



Empirische Entwicklung von Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern für Schüttgut

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. W.A. Günthner, TU München

Dipl.-Ing. J. Fottner, Dipl.-Ing. O. Rong, TU München

Das Forschungsvorhaben (AiF-FV-Nr. 12453 N1) ist aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und über die über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert und im Auftrag des Forschungskuratoriums Maschinenbaue.V., Frankfurt, durchgeführt worden.

1. Einleitung und Problemstellung

Die Anforderungen an stetige Fördermittel sind in den letzten Jahren hinsichtlich der Zuverlässigkeit, Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der Förderanlage sowie im Bereich des Umweltschutzes deutlich gestiegen. Aus diesem Grund werden im Massengutumschlag von Schüttgütern immer häufiger hochleistungsfähige, schnelllaufende Schneckenförderer, die sogenannten **Hochleistungs-Schneckenförderer**, eingesetzt. Dank ihres einfachen und robusten Aufbaus, der niedrigen Anlagen- und Wartungskosten, der geringen Störanfälligkeit und der gekapselten und staubdichten Konstruktion können diese Anforderungen mit diesem Fördermittel optimal erfüllt werden. Bei der Auslegung von Schneckenförderern sind u.a. zwei Betriebsbereiche zu unterscheiden:

Horizontal und leicht geneigte Förderung

Für diesen Bereich 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 die Auslegung von langsamlaufenden Schneckenförderern in bestimmten Betriebsbereichen von Drehzahl, Füllungsgrad und Massenstrom. Die Auslegung nach DIN 15262 beruht dabei auf rein schüttgutspezifischen Kenngrößen, die keine Abhängigkeit von den eben genannten Betriebsparametern aufweisen. Für Betriebsbereiche, die von der DIN 15262 nicht abgedeckt werden ist deshalb eine exakte Auslegung von horizontalen und leicht geneigten Hochleistungs-Schneckenförderern mit diesen Kenngrößen nicht möglich!

Vertikale Förderung

In diesem Bereich existiert ein Auslegungsverfahren, das am Lehrstuhl fml aufbauend auf der DIN 15262 entwickelt wurde. Grundlage ist ein theoretisches Berechnungsmodell, anhand dessen auf Basis der Einzelkörperbewegung die Gutbewegung im Förderer beschrieben wird. Die Leistung setzt sich aus einem Hub- und einem Reibleistungsanteil zusammen. Die Hubleistung wird über die Axialgeschwindigkeit des Fördergutes berechnet. Die Reibleistung wird mit Hilfe der Normalkraft auf die Rohrwand und dem aus der DIN 15262 bekannten, rein schüttgutspezifischen Verschiebewiderstandsbeiwert λ berechnet. Dieser hat jedoch wie oben beschrieben lediglich für bestimmte Betriebsbereiche der horizontal und leicht geneigten Förderung Gültigkeit. Um Firmen eine exakte Auslegung von vertikalen Hochleistungs-Schneckenförderern zu ermöglichen müssen zunächst gesicherte, empirische Kenngrößen in Abhängigkeit von den Schüttgut- und den Betriebsparametern entwickelt werden.

2. Zielsetzung im AiF-Projekt Nr. 12453 N/1

Im AiF-Projekt Nr. 12453 N/1 soll eine Grundlage für die Leistungsermittlung von Hochleistungs-Schneckenförderern mit Hilfe empirisch ermittelter, schüttgutspezifischer Kennwerte geschaffen werden. Damit soll in Zukunft bei der Projektierung neuer Anlagen der Leistungsbedarf des Förderers deutlich genauer vorherbestimmbar sein.

Weiter soll die Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern praxistauglich und handhabbar gestaltet werden. Dies geschieht durch die Integration der Haupteinflussparameter in die empirisch ermittelten Kennwerte.

3. Lösungsansatz und Vorgehensweise

Um die bestehenden Probleme bei der Konzeption und Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern zu lösen, ist es notwendig eine Auslegungsberechnung so zu gestalten, dass analytisch nicht oder nur sehr schwer zu integrierende Einflüsse abgebildet und eingebracht werden können. Ein erster Schritt ist sicherlich bereits in der bestehenden DIN 15262 und dem hier verwendeten Verschiebewiderstandsbeiwert λ verwirklicht.

Einen ersten Versuch dieses Vorgehen analog auf den vertikalen Schneckenförderer anzuwenden hat bereits Gabler (Gab-81) beschrieben. Verifizierungen seines Verfahrens zeigten jedoch, dass die Kennwerte, die für den horizontalen Förderer ermittelt wurden nicht auf den vertikalen Einsatzfall übertragbar sind.

Beim horizontalen Hochleistungs-Schneckenförderer wird die Normalkraft auf das Förderrohr, also die Gewichtskraft des Fördergutes analog zur Berechnung nach DIN 15262 als Bezugsgröße genutzt. Damit ist klar, dass im unteren Drehzahl- und Füllungsgradbereich, also in dem Bereich der den Annahmen der DIN 15262 entspricht, die Norm und das neue Auslegungsverfahren identisch sind. Erst in den darüber hinausgehenden Betriebsbereichen werden Unterschiede sichtbar. Das neue Verfahren kann als Erweiterung der bestehenden Norm betrachtet werden.

Im vertikalen Fall soll dem Vorschlag Gablers entsprechend die Reibkraft zwischen Fördergut und Förderrohr - als Analogie zum horizontalen Förderfall - die Basis im Sinne eines fiktiven, globalen Reibungskoeffizienten bilden [Gab-81]. Aufbauend auf diesen Kräften wird durch Multiplikation mit empirisch ermittelten Kenngrößen der Gesamtleistungsbedarf des Förderers berechnet.

In beiden Fällen wird jedoch nicht von **konstanten**, sondern von mehrdimensionalen Kennwerten für unterschiedliche Güter ausgegangen. Dafür wird in einem ersten Schritt die Abhängigkeit von verschiedenen Parametern untersucht und deren Einfluss ermittelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen als Kennfelder abgelegt werden, mit deren Hilfe Koeffizienten ermittelt werden können, die in Abhängigkeit des jeweiligen Betriebspunktes eine Berechnung der von verschiedenen Verlustleistungen verursachten Abweichung von einem theoretisch bestimmbareren Leistungsbedarf zulässt.

Um die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens sicher zu stellen, wird ein Großteil der Einflussgrößen direkt in die entwickelte Kenngröße eingehen. Damit kann erreicht werden, dass große Teile des Berechnungsverfahrens weitgehend rein analytisch und mit vertretbarem Rechenaufwand abgearbeitet werden können. Innerhalb dieser Arbeit wird der analytische Teil anhand des Auslegungsverfahrens von Greinwald [Grei-94] berechnet.

4. Experimentelle Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden an einem Versuchsstand am Lehrstuhl fml durchgeführt (Abb. 1), der im Rahmen einer Forschungsk Kooperation mit der Firma Krupp Fördertechnik geplant und aufgebaut wurde.



Abb. 1: Versuchsanlage für Hochleistungs-Schneckenförderer am Lehrstuhl fml

Dieser gleicht in seinen geometrischen Abmessungen und auch in den Leistungsdaten mehr einer realen Förderanlage als bisherigen Versuchsständen. Die Versuchsanlage wurde für einen Nennmassenstrom von $I_m = 100 \text{ t/h}$ bei einer Gutdichte von $1,0 \text{ t/m}^3$ ausgelegt. In ihrer Leistungsfähigkeit übertrifft sie damit deutlich bestehende Versuchsanlagen. Bei der Konzipierung wurde darauf Wert gelegt, dass neben dem Gesamtsystem Förderer auch Untergruppen wie z.B. das Zwischenlager und Zuführelemente untersucht werden können. Ein weiteres Ziel ist die Untersuchung der Förderbarkeit bestimmter, schwierig zu fördernder Güter. Die Versuchsanlage erfüllt folgende Anforderungen:

- Betrieb unter realitätsnahen Bedingungen
- Austauschbarkeit von Schnecke, Zuführorgan und Zwischenlager
- einfacher, modularer Aufbau der Anlage
- Möglichkeit von Messungen in einem stationären Förderzustand
- Messung von Drehzahl, Drehmoment und Massenstrom
- Untersuchung unterschiedlichster Fördergüter

Während der Versuchsdurchführung ist das Schüttgut in einem 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. Dabei werden empirische Kenngrößen in Abhängigkeit von Konstruktions-, Betriebs-, und Schüttgutparameter ermittelt. Die Variation der Konstruktionsparameter wie z.B. des Schneckendurchmessers, der Förderlänge oder der Ganghöhe waren nicht Inhalt dieses Forschungsprojekts. Betriebsparameter wie die Schneckendrehzahl und der Massenstrom werden hingegen stark variiert. Folglich ebenso der Füllungsgrad, der sich aus der Schneckendrehzahl und dem Massenstrom ergibt.

Der Massenstrom wird über die Frästiefe und die Vorschubgeschwindigkeit der Zuführschnecke festgelegt und variiert. Die Schneckendrehzahlen werden über die stufenlos regelbaren Frequenzumrichter eingestellt. Die Messung des Massenstroms erfolgt über eine in den Förderstrom zwischen dem vertikalen und horizontalen Förderer eingebauten Prallplattenwaage. Um bei der gegebenen Komplexität der Förderer eine einfache, aber doch sehr zuverlässige Messung der auftretenden Drehmomente durchführen zu können, werden diese mit Hilfe der Frequenzumrichter direkt gemessen. Zum qualitativen Vergleich ähnlicher Förderzustände bei unterschiedlichen Betriebs- und Konstruktionsparametern wird darüber hinaus der Füllungsgrad des Förderers bestimmt. Diese rechnerisch auswertbare Kenngröße eines Förderzustandes wird stichprobenweise auch experimentell mittels Verwiegung ermittelt.

Die technischen Daten der Förderer können Tabelle 1 entnommen werden:

Tabelle 1: Technische Daten der Förderer

	Einheit	Zuführschnecke	Vertikal-schnecke	Horizontal-schnecke
Förderlänge L	[m]	1,5	7	3
Schneckendurchmesser D	[mm]	400	260	315
Ganghöhe H	[mm]	400	230	315
Schneckendrehzahl n_s	[1/min]	bis 100	bis 400	bis 560
Antriebsleistung P_M	[kW]	1,5	5,5	30

Neben den Konstruktions- und Betriebsparametern haben die Schüttgutparameter einen entscheidenden Einfluss auf das Förderverhalten und den erforderlichen Leistungsbedarf der Förderer. Anhand der Kenngrößen Schüttdichte, Böschungswinkels, Wandreibung, Adhäsion und der Kornbeschaffenheit wurden folgende Schüttgüter für die Untersuchungen ausgewählt und untersucht:

Getreide: Gerste, Hafer, Mais, Weizen

Derivate: Raps

Ölsaaten: Soja-Schrot, Futterkalk

Düngemittel: Kunstdünger (Kalkamonsalpeter)

Non-Foddprodukte: Steinkohle, PET-Recyclat, Sand, Sägespäne, Schwefel

Die charakteristischen Größen wie Drehmoment, Leistungsbedarf und Drehzahlen werden kontinuierlich während des Versuchs über ein Datenerfassungssystem erfasst und aufgezeichnet. Nach Versuchsablauf werden alle relevanten Betriebsdaten von den Frequenzumrichtern geladen und weiterverarbeitet. Aus den Eingangsgrößen Wirkstrom, Motordrehzahl, Motormoment, Katzfahrgeschwindigkeit und Höhenmessung werden u.a. folgende wichtige Mess- und Kenngrößen ermittelt:

- Drehzahl und Antriebsmomente der Zuführ-, Horizontal- und Vertikalschnecke
- Antriebsleistung und spezifische Leistung der Zuführ-, Horizontal- und Vertikalschnecke
- Verschiebewiderstandsbeiwert λ für die horizontale Förderung
- Förderfaktor für die vertikale Förderung

Die Kenngrößen werden in Form von Kennfeldern und Diagrammen in Abhängigkeit der Einflussgrößen dargestellt und ausgewertet.

5. Experimentelle Ergebnisse

Die Ergebnisse werden separat für den Horizontal- und den Vertikalförderer angegeben. Anhand von **Weizen** werden die Ergebnisse in Form von ausgewählten und aussagekräftigen Diagrammen aufbereitet und die Verläufe analysiert und diskutiert.

Horizontalförderer

In Abb. 2 ist der Drehmomentverlauf über dem Schneckenfüllungsgrad für den Horizontalförderer aufgetragen.

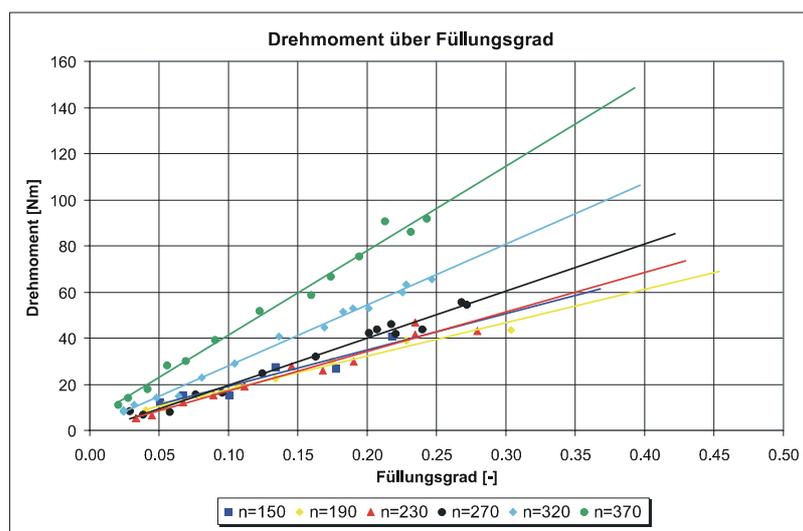


Abb. 2: Drehmoment über dem Füllungsgrad, horizontaler Förderer, Fördergut Weizen

Grundsätzlich ist ein Anstieg des Drehmomentbedarfs mit dem Füllungsgrad zu erkennen. Bei Drehzahlen bis ca. 270 1/min fällt bei kleinen Füllungsgraden bis 10 % eine Überdeckung der Drehmomentkurven auf. Eine Abhängigkeit von der Drehzahl ist in diesem Bereich daher nicht feststellbar. Dagegen ist bei steigendem Füllungsgrad bereits bei diesen Drehzahlen eine deutliche Divergenz der Drehmomentkurven zu erkennen, da das Drehmoment mit steigender Drehzahl und steigendem Füllungsgrad ebenfalls zunimmt. Bei Drehzahlen ab ca. 270 1/min ist neben einem mit der Drehzahl zunehmend steileren Anstieg des Drehmoments ein deutlich erhöhtes Anfangsmoment bei sehr kleinen Füllungsgraden zu erkennen. Dieses nimmt mit zunehmender Drehzahl überproportional zu. Folglich ist das Drehmoment zur Förderung eines konstanten Füllungsgrades nicht konstant, sondern hängt von der Drehzahl ab. Mit steigender Drehzahl nimmt deren Einfluss auf das erforderliche Antriebsmoment deutlich zu.

Nach DIN 15262 [DIN 15262] kann aus der gemessenen Antriebsleistung des Förderers durch Division durch den Massenstrom, die Förderlänge und den Ortsfaktor, der so genannte Verschiebewiderstandsbeiwert λ berechnet werden. Dieser stellt, wie bereits erläutert, die Grundlage der Auslegung horizontaler und leicht geneigter (bis 20°) Schneckenförderer nach DIN 15262 dar. Aus diesem Grund wird dessen Verlauf über dem Füllungsgrad in Abb. 3 dargestellt und erläutert.

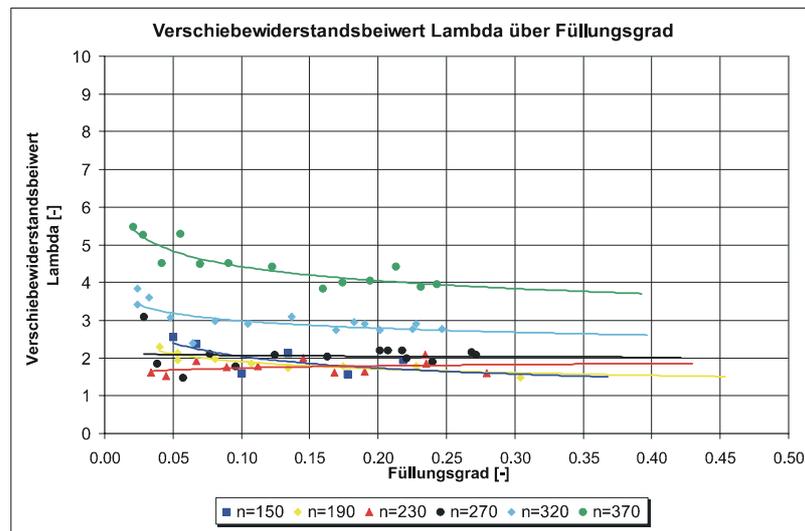


Abb. 3: Verschiebewiderstandsbeiwert λ über dem Füllungsgrad, horizontaler Förderer, Fördergut Weizen

Der Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwertes λ über dem Füllungsgrad ist ab Füllungsgraden von ca. 10 % annähernd konstant. Vergleicht man die λ -Werte aus der DIN 15262 mit den gemessenen λ -Werten für Weizen, dann sind zwei Betriebsbereiche zu unterscheiden:

Für Drehzahlen bis 270 1/min und Füllungsgrade bis 30 % kann der λ -Wert für Weizen von 1,9 aus der DIN 15262 anhand der Versuchsreihen in diesem Projekt bestätigt werden.

Für Drehzahlen größer 270 1/min werden die λ -Werte für Weizen aus der DIN 15262 deutlich überschritten. So ist beispielsweise der λ -Wert bei einer Drehzahl von $n_s=320$ 1/min 2,8, bei einer Drehzahl von 370 1/min bereits 4,0.

Vertikalförderer

In Abb. 4 ist der Drehmomentverlauf über dem Schneckenfüllungsgrad für den Vertikalförderer aufgetragen.

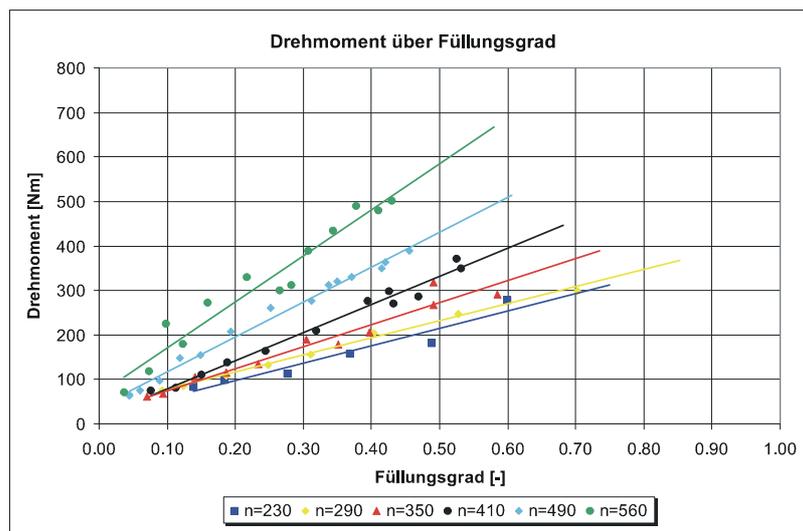


Abb. 4: Drehmoment über dem Füllungsgrad, vertikaler Förderer, Fördergut Weizen

Ebenso wie im horizontalen Bereich ist auch hier für alle Drehzahlkurven grundsätzlich ein Anstieg des Drehmomentbedarfs mit steigendem Füllungsgrad zu erkennen. Im Unterschied zum horizontalen Förderbereich, ist im vertikalen Bereich eine klare Abhängigkeit des erforderlichen Drehmoments von der Drehzahl bei allen Füllungsgraden festzustellen. Die Steigung der Drehmomentkurven ist für größere Schneckendrehzahlen größer, es zeigt sich ein divergenter Verlauf der Kurven mit steigendem Füllungsgrad.

Ab einer Drehzahl von ca. 410 1/min weisen die Drehmomentkurven auch bei sehr kleinen Füllungsgraden einen sprunghaft größeren Wert auf. Auch hier nimmt also der Drehmo-

mentbedarf zur Förderung eines bestimmten konstanten Füllungsgrades mit steigender Drehzahl deutlich zu.

Der Verlauf des spezifischen Leistungsbedarfs (Leistung bezogen auf den Massenstrom und die Förderhöhe) über dem Füllungsgrad, weist ähnlich wie im horizontalen Bereich der Beiwert λ einige charakteristische Merkmale auf. Betrachtet man in Abb. 5 eine einzelne Drehzahlkurve, so ist der Verlauf der spezifischen Leistung bei steigenden Füllungsgraden für das Schüttgut Weizen für Füllungsgrade von 40 % bis 60 % konstant.

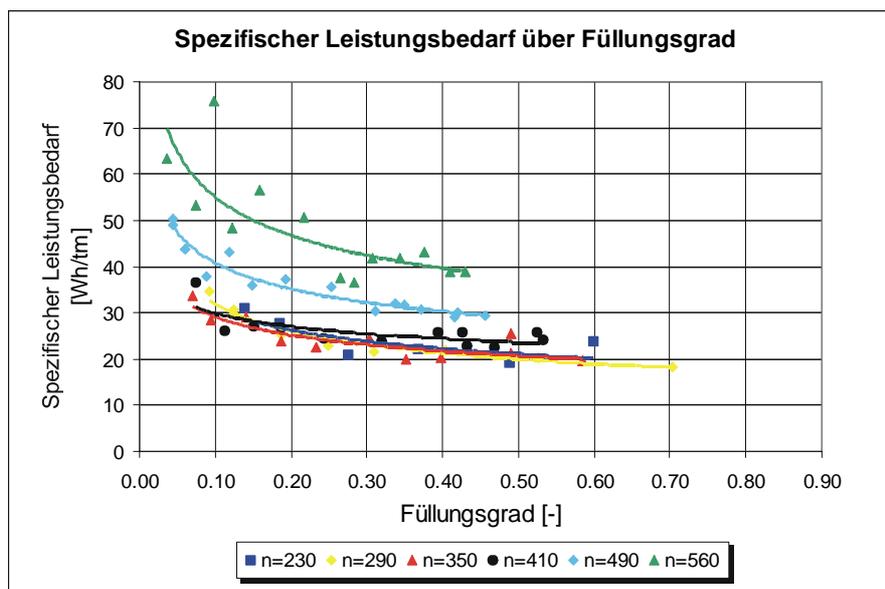


Abb. 5: Spezifischer Leistungsbedarf über dem Füllungsgrad, vertikaler Förderer, Fördergut Weizen

Im Gegensatz zur horizontalen Förderung und dem Verlauf des λ -Wertes nimmt der Verlauf des spezifischen Leistungsbedarfes bei Füllungsgraden unter 40 % deutlich zu. Dieses Verhalten ist unabhängig von der Drehzahl zu beobachten. Die Größe des spezifischen Leistungsbedarfes ist in bestimmten Bereichen drehzahlabhängig.

Im Drehzahlbereich bis 410 1/min sind trotz einer Zunahme des Drehmoments keine nennenswerten Unterschiede im spezifischen Leistungsbedarf zu erkennen. Dies ist durch die proportionale Zunahme des Massenstroms mit der Drehzahl zu erklären.

Erst bei Drehzahlen über 410 1/min ist von Beginn an ein deutlich erhöhter spezifischer Leistungsbedarf erforderlich, da in diesem Bereich das Antriebsmoment nicht proportional mit steigender Drehzahl und dem Massenstrom zunimmt. Bei einem Füllungsgrad von

40 % ist beispielsweise der spezifische Leistungsbedarf bei einer Drehzahl von 560 1/min fast doppelt so hoch wie bei 290 1/min.

Fazit der experimentellen Ergebnisse

Der experimentelle Teil dieser Arbeit stellt die Basis für die empirische Entwicklung der gesuchten Kenngrößen/-felder dar. Es hat sich gezeigt, dass durch die spezielle Konstruktion der Versuchsanlage, verbunden mit der eingesetzten Messtechnik den Anforderungen dieser Zielsetzung auf optimale Weise Rechnung getragen wurde.

Es konnte ermittelt werden, dass der bei der Förderung unterschiedlicher Schüttgüter auftretende Leistungsbedarf stark unterschiedlich war, jedoch ließen sich parallele Verhaltensmuster über den Betriebsbereich identifizieren. Dies erlaubt die Annahme, dass mit geeigneten Ähnlichkeitsgrößen und Koppelbedingungen eine allgemeinere Beschreibung der realen Vorgänge im Schneckenförderer möglich ist.

6. Grundlagen für ein semi-empirisches Auslegungsverfahren

Ziel des AiF-Projekts ist die empirische Entwicklung von schüttgutspezifischen Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern für Schüttgut. Diese Kenngrößen sollen eine Grundlage für eine praxistaugliche und einfache Auslegungsberechnung für diese Förderer bilden. Dabei sollen analytisch nicht oder nur sehr schwer zu integrierende Einflüsse abgebildet und eingebracht werden können. Da sich die Eingangsgrößen gegenseitig beeinflussen, ist es notwendig, fiktive theoretische Größen - beispielsweise für den Füllungsgrad - einzuführen, die auf einfache Art und Weise vom Projektteur berechnet werden können und als Eingangsparameter einer Berechnung dienen können.

Horizontaler Hochleistungs-Schneckenförderer

Im horizontalen Fall liegt - wie bereits erläutert - mit der DIN 15262 ein Berechnungsverfahren vor, das für bestimmte Betriebsbereiche Gültigkeit besitzt und bereits einen solchen semi-empirischen Ansatz verwirklicht hat. Im Rahmen dieses Projekts wurde das Verfahren nun so weiter entwickelt, dass es auf einen maximalen Betriebsbereich angewendet werden kann. Auf Grund der Konstruktion der Versuchsanlage beschränkte sich die Untersuchungen im Projekt dabei auf den horizontalen Förderbereich.

Für die Berechnung der Antriebsleistung konnte auf die Berechnungsmethoden der DIN 15262 zurückgegriffen werden. Es wurde auch hier die Normalkraft des Gutes als Bezugsgröße verwendet. Diese berechnet sich mit dem vorgegebenen Massenstrom I_m , der Förderlänge L , der axialen Gutgeschwindigkeit $v_{axial,theo}$ und der Erdbeschleunigung g zu:

$$F_{normal,theo} = \frac{I_m \cdot L \cdot g}{v_{axial,theo}} \quad (1)$$

Aus den empirisch ermittelten Kennfeldern kann nun mit den Parametern Füllungsgrad und Drehzahl ein für den Förderfall zutreffender Wert für den Verschiebewiderstandsbeiwert λ ausgelesen werden.

Durch Multiplikation von λ mit der berechneten theoretischen Normalkraft kann der Leistungsbedarf P_{HLS} des horizontalen Hochleistungs-Schneckenförderers ermittelt werden zu:

$$P_{HLS} = \lambda \cdot I_m \cdot L \cdot g \quad (2)$$

Bei dieser Auslegung kann jedoch nicht von einem über allen Betriebsparametern konstanten Verschiebewiderstandsbeiwert λ ausgegangen werden. Vielmehr muss der Einfluss der Drehzahl, des Füllungsgrads und des Massenstroms auf diesen Beiwert mit berücksichtigt werden. Dieser ist in den in diesem Projekt ermittelten Kenngrößen enthalten.

Wie bereits ausführlich beschrieben, konnten die Verschiebewiderstandsbeiwerte λ der DIN 15262 für den horizontalen Fördervorgang und die untersuchten Schüttgüter anhand der Versuchsauswertung für Drehzahlen bis 270 1/min und Füllungsgrade bis $\varphi = 30\%$ bestätigt werden. Für Schneckendrehzahlen größer 270 1/min wurden die λ -Werte aus der DIN 15262 für den Versuchsförderer deutlich überschritten. Der Drehzahlbereich über 270 1/min wird daher von der DIN 15262 nicht abgedeckt.

Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass bis zu einer durch die Betriebsparameter relativ starr definierten Grenze tatsächlich eine rein translatorische Förderung, wie in der DIN 15262 angenommen wird stattfindet. Darüber hinaus werden sich Sekundäreffekte, wie Gutumwälzungen und Zurückfallen eines Teils der Schneckenkammerfüllung soweit verstärken, dass ein zusätzlicher Verlustleistungsanteil berücksichtigt werden muss.

Bei der Entwicklung von Auslegungsverfahren mit empirisch ermittelten Kennwerten wurde eine Untersuchung der speziellen Einflussfaktoren im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierbei sind oftmals geeignete Ähnlichkeitsgrößen zu finden. Die wichtigsten Einflussgrößen beim Betrieb von horizontalen Hochleistungs-Schneckenförderern sind außer den Betriebsparametern wie Drehzahl und Füllungsgrad auch die geometrischen Abmaße der Anlage. Im Falle des Füllungsgrades ist bereits eine Einflussgröße so

gewählt, dass im Sinne einer Ähnlichkeitsabbildung unterschiedliche Geometrien berücksichtigt sind. Anders verhält sich dies mit der Drehzahl des Förderers. So zeigen bereits die von der DIN 15262 vorgeschlagenen Drehzahlen, dass die Geometrie des Förderers wesentlichen Einfluss auf das Verhalten des Gutes während der Förderung bei bestimmten Drehzahlen hat. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes konnte in einem ersten Schritt das grundlegende Verhalten des Gutes bei der Förderung in horizontalen Hochleistungs-Schneckenförderern geklärt werden. Durch die Kombination der an der Versuchsanlage für Hochleistungs-Schneckenförderer empirisch ermittelten Kenngrößen in Abhängigkeit der variierten Betriebs- und Schüttgutparameter mit dem semi-empirischen Berechnungsansatz aus der DIN 15262 konnte die Auslegungssicherheit derartiger Fördergeräte wesentlich gesteigert werden. Die Erkenntnisse dienen als Grundlage für weitere zielgerichtete Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Geometrie und der Schneckenneigung (0° bis 20°). Die erarbeiteten Kenntnisse ermöglichen durch Variation weiterer Betriebsparameter (z.B. Schneckenneigung) und Konstruktionsparameter (z.B. Förderergeometrie) eine grundlegende Erweiterung der bestehenden DIN 15262 im Rahmen eines neuen Forschungsprojekts.

Vertikaler Hochleistungs-Schneckenförderer

Aufgrund der veränderten Förderbewegung sind die Vorgänge im Vertikalförderer wesentlich komplexer und damit auch in ihrer Beschreibung schwieriger. Als Grundlage der vorliegenden Untersuchung dient die Abbildung des Förderverhaltens in vertikalen Hochleistungs-Schneckenförderern mit Hilfe eines Mehrkörperberechnungsverfahrens. Zur Festlegung einer geeigneten Kenngröße und Bezugsgröße wurden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung mit denen einer theoretischen Sensitivitätsanalyse verbunden. Hierbei wurden folgende Einflussfaktoren auf die Leistungsberechnung identifiziert:

- Konstruktionsparameter wie Rohrrinnendurchmesser, Ganghöhe, Wellendurchmesser und Schneckenwendeldurchmesser
- Betriebsparameter wie Füllungsgrad und Drehzahl der Schnecke

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass nicht von einer eindimensionalen Kenngröße, wie dies beispielsweise die DIN 15262 oder der Ansatz von Gabler vorsehen, ausgegangen werden kann.

Sicher ist, dass die Schüttgutfüllung der Schneckenkammer eine herausragende Rolle spielt. Mit dieser Größe ist für einen bestimmten Betriebszustand der Massenstrom eindeutig festgelegt. Bei der Verwendung des Füllungsgrades als variable Größe ist gleichzeitig die Geometrie des Gerätes zumindest aus dieser Einflussgröße eliminiert.

Ebenfalls zeigt sich ein mindestens ebenso gravierender Einfluss der Schneckendrehzahl auf den Leistungsbedarf. Die Erfahrung hat hier jedoch gezeigt, dass gleiche Schneckendrehzahlen bei unterschiedlicher Schneckengeometrie auch ein gänzlich verschiedenes Bewegungs- und Leistungsverhalten bewirken.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde eine Leistungsberechnung in Anlehnung an das von Gabler vorgeschlagene Verfahren entwickelt. Dabei sollen geeignete, empirisch ermittelte Kennwerte eingesetzt werden. Von ausschlaggebender Wichtigkeit ist hierbei, dass die verwendete, analytisch berechnete Bezugsgröße auf die empirisch ermittelte Kenngröße abgestimmt ist. Die Grundidee der Berechnung soll entsprechend dem allgemeinen Vorschlag von Gabler der Gleichung (3)

$$P_{\text{tats}} = C(x, y, \dots) \cdot \sum_i P_i + \sum_j P_j \quad (3)$$

folgen. Dabei soll der von den Parametern $x, y, \text{ etc.}$ abhängende Koeffizient C dem hier entwickelten empirischen Förderfaktor entsprechen. Die Leistungsanteile P_i sind die Bezugsgröße, auf die sich der Förderfaktor beziehen soll. P_j sind Leistungsanteile, die rein analytisch bestimmt werden sollen.

Geht man in einem ersten Schritt lediglich von einer für die Referenzanlage gültigen Abbildungsvorschrift aus, so ist die Bezugsgröße prinzipiell frei wählbar. Für diesen Fall wäre es sinnvoll, die Bezugsgröße vor dem Hintergrund einer möglichst einfachen empirischen Kenngröße - optimal wäre dabei eine konstante Größe - zu wählen. Da aber die empirische Größe auch für beliebige andere Schneckenförderer Gültigkeit haben soll, erscheint es notwendig, die Bezugsgröße so zu wählen, dass möglichst weitreichend der Betriebspunkt und der Förderzustand berücksichtigt sind.

Ein weiterer Gesichtspunkt bei der Wahl einer geeigneten Bezugsgröße ist, gesicherte, analytisch berechenbare Größen direkt in den Berechnungsvorgang zu übernehmen. Wichtig ist dabei auch, dass sich die über einen empirisch ermittelten Koeffizienten berechneten Größen bezüglich der Einflussfaktoren ähnlich verhalten müssen wie die Bezugsgröße.

Abb. 6 zeigt dazu sowohl die rechnerisch bestimmbaren Verlustleistungsanteile wie Hubleistung, Reibleistung zwischen Fördergut und Schneckenrohr, Gesamtreibleistung und rechnerische Gesamtleistung als auch den experimentell ermittelten Leistungsbedarf des Versuchsförderers.

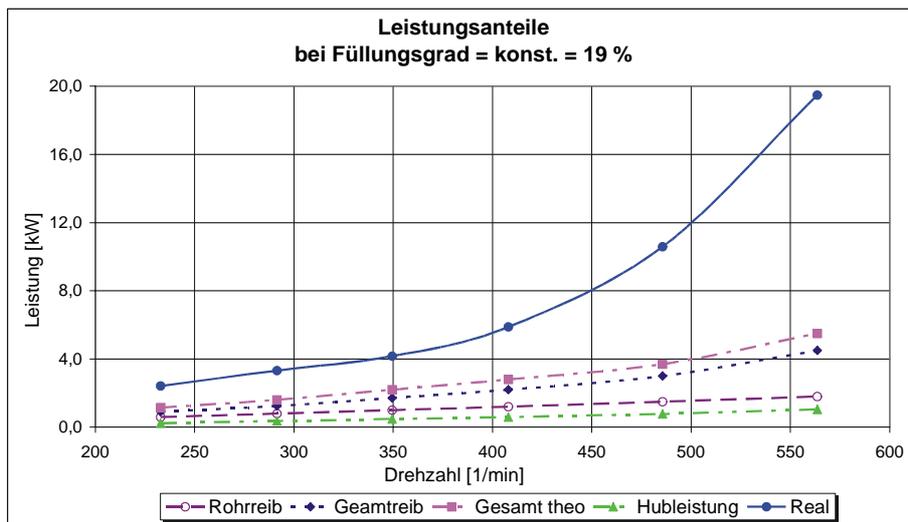


Abb. 6: Verlustleistungsanteile (rechnerisch und experimentell) bei konstantem Füllungsgrad, vertikaler Förderer, Fördergut Weizen

Deutlich zu erkennen ist, dass sowohl der Anteil der Hubleistung wie auch der der Rohrreibleistung annähernd linear mit der Drehzahl ansteigen. Demgegenüber steigt der Anteil der Gesamtreibleistung, also sowohl gegenüber Fördergut und Schnecke als auch gegenüber Fördergut und Förderrohr, deutlich überproportional im oberen Drehzahlbereich.

Ursache hierfür ist der unterschiedliche Anstieg der Relativgeschwindigkeiten, während sich die Kräfte aufgrund der Gleichgewichtsbedingungen nur wenig verändern. Wie die Berechnung zeigt, ist bei steigender Drehzahl lediglich ein unterproportionaler Anstieg der Gutwinkelgeschwindigkeit zu beobachten. Demgegenüber steigt durch diesen niedrigen Anstieg der Gutwinkelgeschwindigkeit die Relativgeschwindigkeit wesentlich stärker an. Dadurch ändert sich der Anteil der Rohrreibleistung gegenüber der Reibleistung zwischen Schnecke und Fördergut über dem Drehzahlbereich.

Da sich gleichzeitig ab einer bestimmten Gutwinkelgeschwindigkeit und damit einer höheren Drehzahl durch Änderung der Füllungskonfiguration auch ein zusätzlicher Reibungsanteil zwischen Schnecke und Fördergut einstellt, erhöht sich diese Reibleistung überproportional. Während der Änderung der Füllungskonfiguration verschiebt sich darüber hinaus der Massenschwerpunkt der Schüttgutfüllung. Damit wiederum wandert auch der für die Leistungsberechnung maßgebliche Radius nach außen, die Geschwindigkeitskomponente steigt nochmals.

Für die bisher gar nicht berücksichtigten Verlustleistungsanteile im Spalt sind ebenfalls sowohl Gutwinkelgeschwindigkeit als auch die Relativgeschwindigkeit zwischen Schneckenaußenkante und rotierendem Fördergut maßgeblich.

Vergleicht man das Verhältnis der tatsächlich gemessenen Leistungsbedarfe durch die Gesamtreibleistung mit dem Quotienten der realen Leistungsbedarfe bezogen auf die Rohrreibleistung (Abb. 7), so ist festzustellen, dass das überproportionale Ansteigen der Leistung bei höheren Drehzahlen real von keiner der beiden theoretischen Größen in ausreichendem Maße abgebildet werden kann. Es ist folglich in jedem Fall notwendig, dieses Verhalten innerhalb der empirisch ermittelten Kenngröße abzubilden.

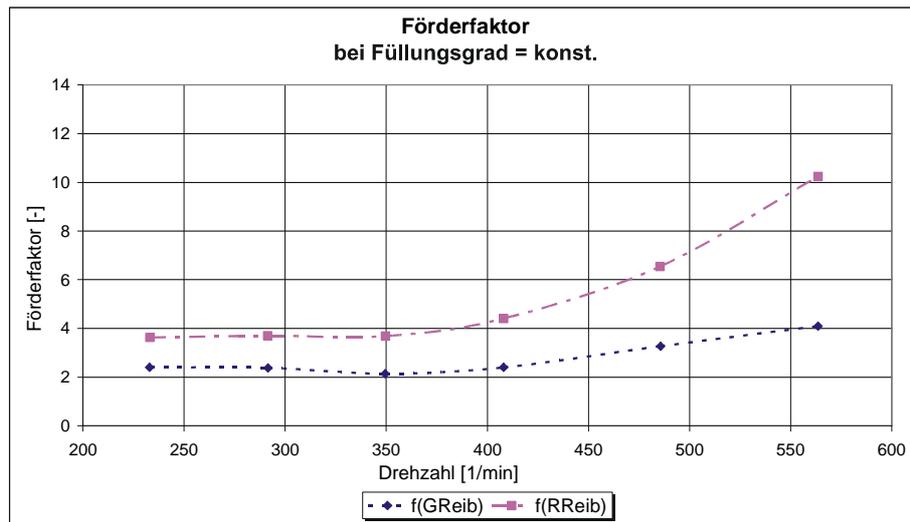


Abb. 7: Vergleich verschiedener Bezugsgrößen bei der Bildung des Förderfaktors bei konstantem Füllungsgrad, vertikaler Förderer, Fördergut Weizen

Der Rechenaufwand, der zur Bestimmung der Gesamtreibleistung notwendig ist, ist sehr komplex. Demgegenüber ist die Rohrreibleistung über relativ einfache Zusammenhänge berechenbar. Da auch die theoretisch berechenbare Reibleistung zwischen Förderrohr und Fördergut, die schon dem Modell von Gabler zu Grunde liegt, sowohl die Füllungskonfiguration als auch Betriebsparameter wie Füllungsgrad (und damit auch den Förderstrom) und Gutwinkelgeschwindigkeit sowie Axialgeschwindigkeit berücksichtigt, erscheint diese als optimale Grundlage für das hier entwickelte Verfahren. Weiterhin sind über die Berechnung der oben genannten Größen auch die Schüttgutkonditionen, also innere Reibung, Spannungsverhalten etc. bereits integriert.

Die Hubleistung kann in jedem Falle analytisch berechnet werden und muss nicht in den empirischen Anteil des Berechnungsverfahrens integriert werden.

Bei der Entwicklung des neuen semi-empirischen Ansatzes zur Bestimmung des Leistungsbedarfes von vertikalen Hochleistungs-Schneckenförderern soll nach Gleichung (4) vorgegangen werden. Der hier λ_{vert} genannte Kennwert soll auf Grund seines deutlichen

Unterschiedes zum Verschiebewiderstandsbeiwert λ des horizontalen Förderers nach dem Vorschlag von Vollmann [Voll-00] als Förderfaktor bezeichnet werden.

$$P_{\text{tats}} = \lambda_{\text{vert}}(\omega_a \cdot r, \varphi, \text{Gutart}) \cdot P_{\text{Reib,Rohr}} + P_{\text{Hub}} \quad (4)$$

Ein Problem, das stets bei empirischem Vorgehen auftritt, ist die Umrechnung der gewonnenen Kennwerte auf Geräte anderer Geometrie. Wichtig ist in diesem Zusammenhang das Auffinden von Koppelbedingungen. Diese haben die Eigenschaft, dass bei gleichen Koppelbedingungen in Geräten unterschiedlicher Geometrie gleiche oder ähnliche Förderbedingungen in der Schneckenkammer vorliegen.

Im Falle des Schneckenförderers liegt es nahe, dass die Bedingungen zwischen Rohr und Fördergut von erheblichem Einfluss auf das Bewegungsverhalten sind. Deshalb ist es sicherlich ein erster Weg, diese Bedingungen in eine von der Geometrie des Förderers unabhängige Darstellung der Kennwerte einzubringen.

Dies ist in erster Linie durch die Berücksichtigung der Winkelgeschwindigkeit des Fördergutes möglich, obwohl dadurch lediglich ein Teil des Einflusses integriert wird. So sind durch die Gutwinkelgeschwindigkeit zwar ausschlaggebend die Füllungskonfiguration und die Axialgeschwindigkeit des Förderstromes beschrieben, speziell aber die Bedingungen an der Rohrwand sind noch unberücksichtigt.

Geht man noch einen Schritt weiter und integriert in die Kenngröße den Rohrrinnenradius, so wird die Gutwinkelgeschwindigkeit in Form der Gutumfangsgeschwindigkeit ebenfalls berücksichtigt. Als Resultat dieser Geschwindigkeit mit der Axialgeschwindigkeit des Fördergutes ergibt sich die zur Leistungsberechnung notwendige Absolutgeschwindigkeit zwischen Gut und Förderrohr. In Abb. 8 ist der Förderfaktor für jeweils konstante Füllungsgrade über der Gutumfangsgeschwindigkeit aufgetragen.

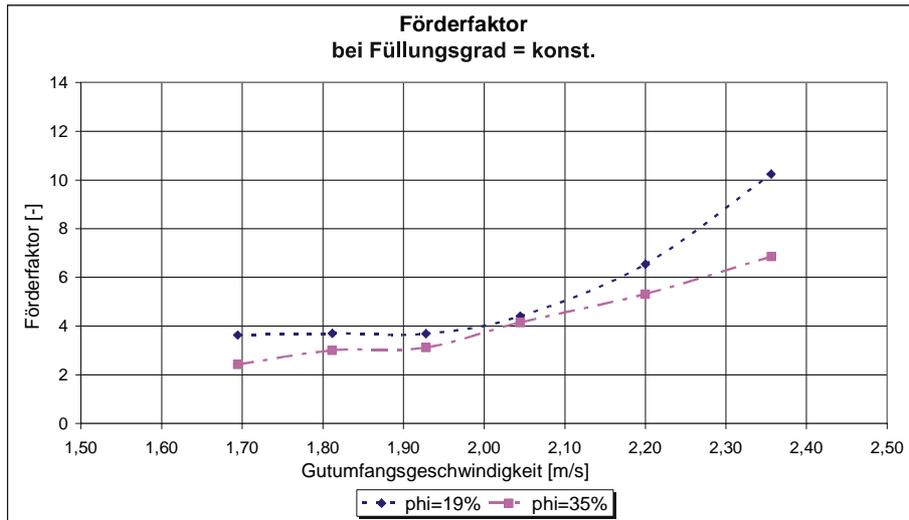


Abb. 8: Förderfaktor über der Gutumfangsgeschwindigkeit für Fördergut Weizen im vertikalen Hochleistungs-Schneckenförderer

Es ist anzunehmen, dass Effekte im Schneckenpalt durch die reine Rotationsbewegung verursacht werden. Damit ist für diesen Leistungsanteil auch lediglich eine Umfangskomponente zu berücksichtigen. Wie weiter oben beschrieben gibt es aber einen von der Geometrie weitgehend unabhängigen Zusammenhang zwischen Gutwinkelgeschwindigkeit und Schneckenwinkelgeschwindigkeit.

Es ist folglich bei dieser Darstellungsweise auch möglich, Anteile, die aus den Effekten im Schneckenpalt resultieren, zu berücksichtigen. Letztendlich kann aber eine Bestätigung für die Richtigkeit der Ähnlichkeitsbedingungen nur über eine experimentelle Variation der Geometrieparameter erfolgen. Erste Vergleiche mit an anderen Versuchsanlagen gewonnenen Erkenntnissen lassen aber den Schluss zu, dass die Verwendung der Gutwinkelgeschwindigkeit als Laufparameter in der Kennwertdarstellung die gewünschte Übertragbarkeit der Werte ermöglicht.

Der Vorteil bei der Verwendung der Rohrreibleistung ist außer der einfachen Handhabung auch die Möglichkeit über unterschiedlichste Verfahren diese Größe berechnen zu können. So kann unter Berücksichtigung der Genauigkeiten der jeweiligen Rechenverfahren jedes der vorgestellten Rechenmodelle zur Bestimmung der Rohrreibleistung und damit als Grundlage für das neu entwickelte semi-empirische Auslegungsverfahren genutzt werden.

Im Folgenden soll aber noch kurz der Zusammenhang zwischen den Betriebsparametern und der Größe der Rohrreibleistung untersucht werden. Dazu werden für sämtliche ge-

messenen Betriebspunkte die zugehörigen Rohrreibleistungswerte nach dem Modell von Greinwald berechnet und über dem Füllungsgrad dargestellt. Es zeigt sich (Abb. 9), dass sich für jede Drehzahl mit hinreichender Genauigkeit eine durch den Ursprung verlaufende Gerade ergibt.

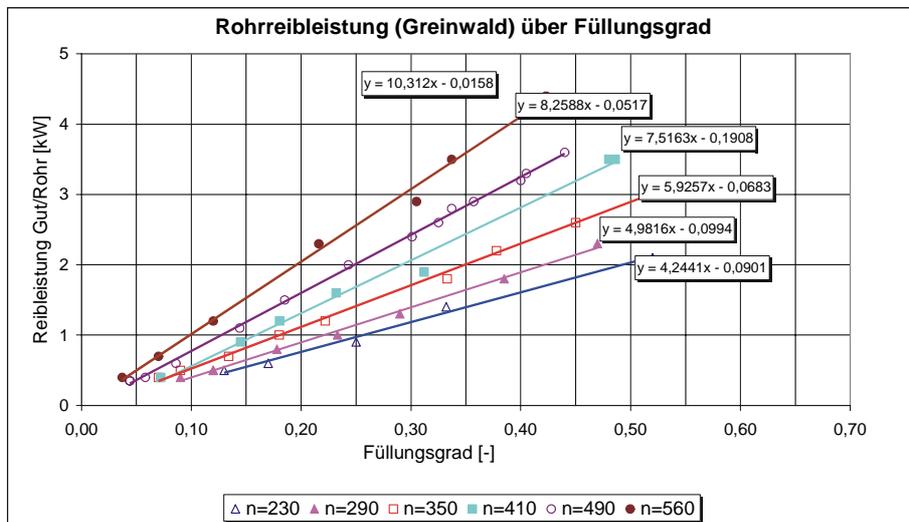


Abb. 9: Rohrreibleistung nach Greinwald für das Fördergut Weizen im vertikalen Versuchsförderer

Da dabei die Steigungen der Geraden wiederum linear über der Drehzahl verlaufen, liegt die Vermutung nahe, dass die Reibleistung lediglich eine Abhängigkeit vom Massenstrom zeigt.

Dies bestätigt sich bei entsprechender Darstellung in Abb. 10.

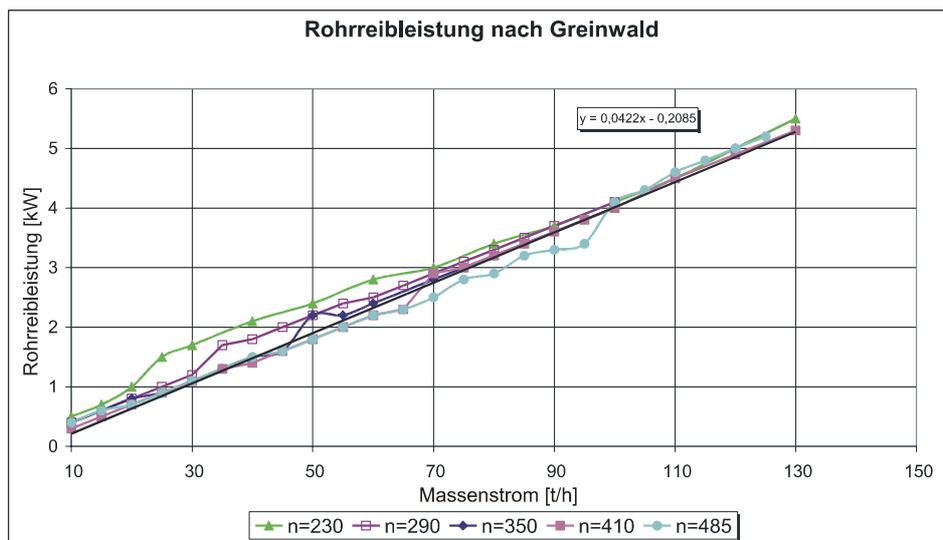


Abb. 10: Rechnerische Rohrreibleistung am vertikalen Förderrohr für Fördergut Weizen aufgetragen über dem Massenstrom; Bildung einer gemeinsamen Regressionsgeraden

Damit ist offensichtlich, dass es auf einfache Art möglich ist, eine Näherungsformel für die Berechnung der Bezugsgröße Rohrreibleistung zu finden und damit den Berechnungsvorgang weiter zu vereinfachen.

Wie aus der Einzelkörpertheorie nach Böttcher [Böt-63] hervorgeht, ergibt sich die Reibleistung am Schneckenrohr aus der Reibkraft am Schneckenrohr R_z und der Absolutwinkelgeschwindigkeit v_a . Weiterhin gehen der Förderwinkel und der Radius des Massenschwerpunktes der Gutfüllung ein.

$$P_{\text{tats}} = R_z \cdot v_a = \mu_z \cdot F_z \cdot v_a = \mu_z \cdot (m \cdot r \cdot \omega_a^2) \cdot \frac{r \cdot \omega_a}{\cos \psi} \quad (5)$$

Daraus ist ersichtlich, dass die Rohrreibleistung in erster Linie in der 3. Potenz von der Gutwinkelgeschwindigkeit abhängt (5).

Abb. 11 zeigt die Rohrreibleistung reduziert um die Gutwinkelgeschwindigkeit zur 3. Potenz.

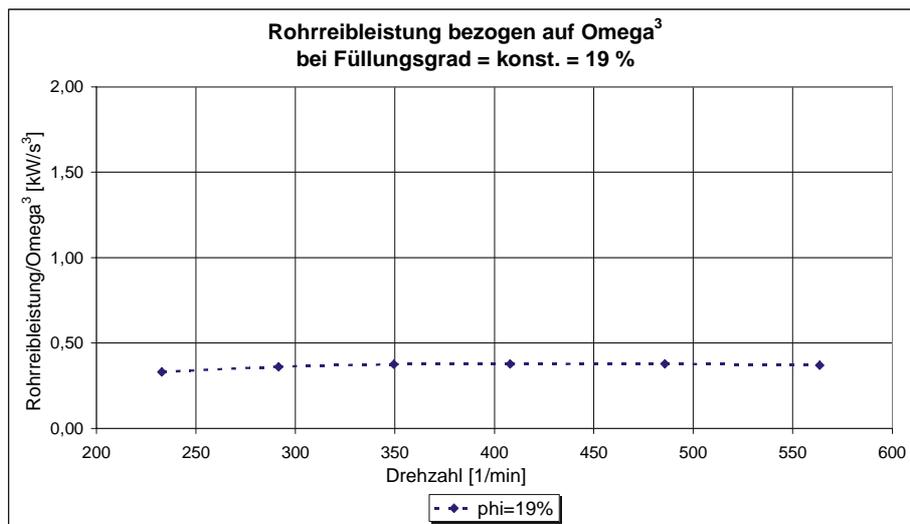


Abb. 11: Rohrreibleistung reduziert um ω^3 über der Drehzahl bei konstantem Füllungsgrad, vertikaler Förderer, Fördergut Weizen

Man erkennt, dass sich hier ein näherungsweise konstanter Wert ergibt. Folglich ist der Einfluss der Gutwinkelgeschwindigkeit im Vergleich zu den anderen Einflussgrößen klar dominant. Im Folgenden wird beschrieben, wie eine Auslegung nach dem hier vorgeschlagenen semi-empirischen Auslegungsverfahren durchgeführt werden muss.

Nachdem im ersten Schritt die Bewegung des Fördergutes in der Schneckenkammer mit Hilfe eines der erläuterten Berechnungsverfahren oder der beschriebenen Näherungslö-

sung geklärt wurde, ist es möglich, mit den Parametern Füllungsgrad und Gutumfangsgeschwindigkeit einen für den Bewegungszustand gültigen Wert des Förderfaktors aus Abb. 12 zu entnehmen.

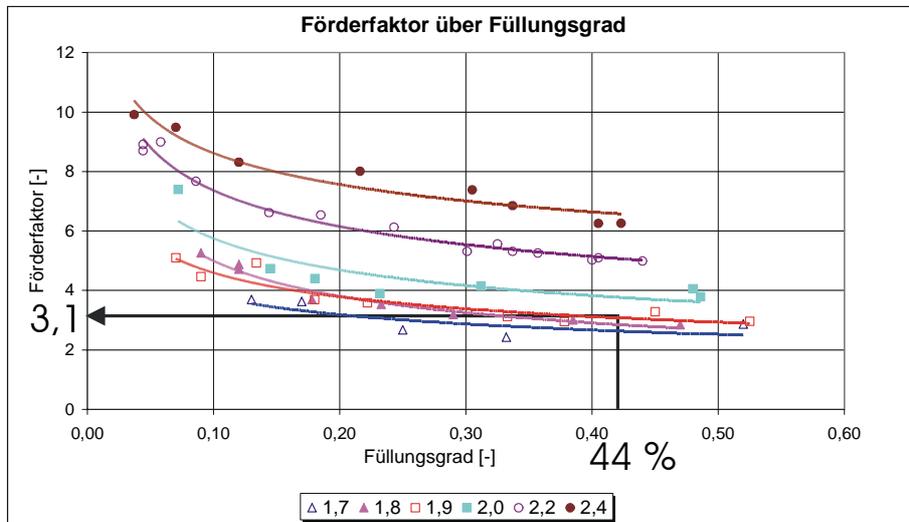


Abb. 12: Auslesen des Förderfaktors aus dem Kennfeld für $\omega_r=1,9$ und $\varphi=44\%$, vertikaler Förderer, Fördergut Weizen

Im nächsten Schritt muss die Hubleistung P_{Hub} für den konkreten Einsatzfall mit Hilfe des Massenstroms I_m und der Hubhöhe h berechnet werden.

$$P_{Hub} = h \cdot I_m \cdot g \quad (6)$$

Schließlich kann der Leistungsbedarf des Förderers über den bereits in Gleichung (4) beschriebenen Zusammenhang von

$$P_{tats} = \lambda_{vert}(\omega_a \cdot r, \varphi, Gutart) \cdot P_{Reib,Rohr} + P_{Hub} \quad (7)$$

berechnet werden. Die Rohrreibleistung kann dabei - wie beschrieben - entweder über theoretische Berechnungsmodelle, oder, wie in diesem Projekt untersucht, anhand von einfachen, empirischen Näherungslösungen berechnet werden.

7. Zusammenfassung:

Analytische Rechenverfahren können bereits heute mit hoher Genauigkeit zur Vorherbestimmung des Bewegungsverhaltens und damit des möglichen Fördervolumens eingesetzt werden. Die Bemessung des Leistungsbedarfes entzieht sich allerdings einer analytischen Betrachtung. Zu vielfältig sind energieverbrauchende Randeffekte, wie die Gut-

klemmung und -zerstörung im Schneckenpalt, als dass sie in eine analytische Betrachtung gefasst werden könnte.

Andere Gebiete des Maschinenbaus haben in solchen Problemfällen bereits erfolgreich ein weitreichend empirisches Vorgehen zur Abbildung von realen Vorgängen innerhalb von Auslegungsverfahren eingesetzt. Dieses Vorgehen erscheint auch im Zusammenhang mit der Auslegung von Schneckenförderern als zielführend.

Grundlage einer solchen Vorgehensweise sind stets umfangreiche, experimentelle Untersuchungen. Deren genaue Auswertung ergibt im Zusammenhang mit einer eingehenden theoretischen Betrachtung des Bewegungsverhaltens die Basis für eine empirische Kenngröße.

Wichtig ist dabei die Wahl einer geeigneten Bezugsgröße, so dass ein möglichst großer Anteil der Berechnung auf bekannten, praxistauglich zu berechnenden analytischen Größen aufbaut. Im vorliegenden Vorschlag für ein derartiges Verfahren wurde die Rohrreibung als geeignete Basis ermittelt.

Aufbauend auf dieser wird durch einen Vergleich der theoretischen Basis mit den experimentell ermittelten Leistungsbedarfen das Verhalten des Förderers über den gesamten Betriebsbereich in Kennfelder eingebracht. Diese können als Basis eines zukünftigen Auslegungsverfahrens für Hochleistungs-Schneckenförderer eingesetzt werden.

Der erarbeitete Vorschlag für eine Basis eines semi-empirischen Auslegungsverfahrens sowohl für horizontale als auch für vertikale Hochleistungs-Schneckenförderer zeigt, dass dieses Vorgehen eine deutliche Verbesserung bei der Auslegungssicherheit bieten kann. Es ist allerdings notwendig, die gewonnenen Kenntnisse in noch weiterreichenden experimentellen und theoretischen Untersuchungen bezüglich ihrer Übertragbarkeit auf andere Förderergeometrien zu verifizieren. Vorschläge für Koppelbedingungen und Ähnlichkeitsgrößen/-kriterien wurden im Rahmen dieser Untersuchung unterbreitet.

Darüber hinaus zeigt sich, dass mit geeigneten Näherungsgleichungen das verwendete Mehrkörpermodell ohne größeren Qualitätsverlust praxistauglich angewendet werden kann. Anhand der eingehenden theoretischen Untersuchung des Verhaltens von vertikalen Hochleistungs-Schneckenförderern konnten die Einflussfaktoren auf das Bewegungsverhalten und damit auf den Leistungsbedarf über den gesamten Betriebsbereich analysiert werden und damit wesentliche Parameter der Berechnung identifiziert werden.

8. Formelzeichen

D	[m]	Schneckendurchmesser
$F_{normal,theo}$	[N]	theoretische Normalkraft des Schüttguts auf das Rohr
F_z	[N]	Zentrifugalkraft
H	[m]	Ganghöhe
I_m	[t/h] [kg/s]	Massenstrom
L	[m]	Förderlänge
P_{HLS}	[W]	berechneter Leistungsbedarf des horizontalen Hochleistungs-Schneckenförderers
P_{Hub}	[W]	Hubleistung
P_i	[W]	Leistungsanteile auf die sich der Förderfaktor bezieht
P_j	[W]	rein analytisch zu bestimmende Leistungsanteile
P_M	[W]	Leistung des Antriebmotors
$P_{Reib,Rohr}$	[W]	Rohrreibleistung (Gut / Rohr)
P_{tats}	[W]	berechnete, erforderliche Antriebsleistung
R_z	[N]	Reibkraft an der Rohrrinnenwand
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Förderhöhe
m	[kg]	Masse
n_s	[1/min]	Schneckendrehzahl
r	[m]	Radius
v_a	[m/s]	Absolutgeschwindigkeit des Einzelkörpers (vertikal)
$v_{axial,theo}$	[m/s]	axiale, theoretische Gutgeschwindigkeit (horizontal)
φ	[-]	Füllungsgrad
λ	[-]	Verschiebewiderstandsbeiwert
λ_{vert}	[-]	Förderfaktor
μ_z	[-]	Reibwert zwischen Gut und Rohrrinnenwand
ψ	[°]	Förderwinkel
$\omega (\omega_a)$	[1/s]	Gutwinkelgeschwindigkeit (absolute)

9. Literaturverzeichnis

- [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.
- [Bra-69] Brandtner, F.: Die Förderschnecke in ihrer vielseitigen Anwendung. Aufbereitungstechnik 10 (1969) Nr. 8, S. 424-437.
- [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.
- [DIN 15262] DIN 15262: Schneckenförderer für Schüttgut - Berechnungsgrundsätze. Hrsg. Deutscher Normenausschuss, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe Jan. 1983.
- [Eph-57] Ephremidis, C.: Untersuchungen zum Fördervorgang beim waagrecht 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-80] Fehlauer, M.: Berechnungsvorschrift für Schneckenförderer zur Senkrechtförderung landwirtschaftlicher Schütt- und Halmgüter. Agrartechnik 30 (1980), Heft 1.
- [Fo-99b] Fottner, J., Günthner, W.A.: High-Capacity Screw Conveyor - Research Project of Krupp Fördertechnik and TU München, Bulk Solids Handling II (1999), 1999
- [Gab-81] Gabler, H.: Theoretische und experimentelle Untersuchung der Förderung in steilen und senkrechten Schneckenförderern. Dissertation TU München, 1981.
- [Grei-94] Greinwald, K.: Untersuchung der Förderung leicht fließender Schüttgüter im senkrechten Schneckenförderer unter Berücksichtigung der Zwischenlager. Dissertation, TU München, 1994.
- [Gün-99] Günthner, W. A.; Vollmann, A.: Untersuchungsergebnisse zur Schüttgutförderung in geneigten Schnecken. Tagungsbeitrag Fachtagung Schüttgutfördertechnik '99, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 23. und 24. September 1999.
- [Lei-99] Leitner, J.: Untersuchungen zum Spalteinfluss und Einlauf des Fördergutes in senkrechten und steil geneigten Schneckenförderern. Dissertation Montanuniversität Leoben, 1999.
- [Nie-64] Nier, R.: Experimentelle Untersuchungen der Fördervorgänge und Leistungen an senkrechten und schrägen Schneckenför-

derern. 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.
- [Rad-72] Rademacher, F. J. C.: De vertikale schroeftransporteur. Dissertation TH Twente, 1972.
- [Sin-59] Sinha, G. L.: Untersuchung zum Fördervorgang beim senkrechten Schneckenförderer. Dissertation TU Hannover, 1959.
- [Stahl-94] Stahl, H.: Beitrag zur Förderung leicht fließender, feinkörniger Schüttgüter im senkrechten Schneckenförderer unter Spalteinfluss. Dissertation TU München, 1994.
- [Voll-00] Vollmann, A.: Untersuchung der Schüttgutförderung in geneigten Schneckenförderern. Dissertation TU München, 2000.