

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Fachausschusses Forschung und Lehre der
Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG)

527

Andrey Timofeev

**Förderung und Entmischung auf dem
Vorbereitungsboden des Mähdreschers**

Dissertation

Hohenheim 2013

Institut für Agrartechnik
Universität Hohenheim
Grundlagen der Agrartechnik
Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger

Förderung und Entmischung auf dem Vorbereitungsboden des Mähdreschers

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Agrarwissenschaften
der Fakultät IV - Agrarwissenschaften II
Agrarökonomie, Agrartechnik und Tierproduktion

vorgelegt von
Andrey Timofeev
aus Kazan, Russland

2013

Die vorliegende Arbeit wurde am 27. Juni 2013 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung:	31. Juli 2013
Prodekan:	Prof. Dr. M. Rodehutschord
Berichterstatter,	1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger
Mitberichterstatter,	2. Prüfer: Prof. Dr. U. Haas
	3. Prüfer: Prof. Dr. H. W. Griepentrog

D100

ISSN 0931 – 6264

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2465-4

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

VORWORT

Die wissenschaftlichen Untersuchungen der vorliegende Arbeit wurden in den Jahren 2004 bis 2007 während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Grundlagen der Agrartechnik des Institutes für Agrartechnik der Universität Hohenheim durchgeführt. Die Arbeit wurde im Jahr 2012 parallel zu meiner Tätigkeit in der Industrie fertiggestellt.

Die Anregung für diese Arbeit im Bereich Erntetechnik stammt von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H. D. Kutzbach. Für die wissenschaftliche Betreuung sowie für die stets verständnisvolle Förderung bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Kutzbach. Für das entgegengebrachte Vertrauen und für den gewährten Freiraum bei der Bearbeitung des Forschungsprojektes bin ich besonders dankbar.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. St. Böttinger für die weitere Betreuung und die wertvolle Unterstützung, was wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Durch vielfältige Aufgabenstellungen und Anregungen aus Forschung und Lehre konnte ich mich fachlich und persönlich gut weiterentwickeln.

Allen Mitarbeitern des Lehrstuhles sowie der zentralen Einrichtungen des Institutes, die mich beim Aufbau des Versuchsstandes unterstützt haben, möchte ich ebenfalls herzlich danken. Herrn Dipl.-Ing. K. Lutz für konstruktive Tipps, Herrn Dr. sc. agr. P. Wacker für stete Bereitschaft zur kritischen Diskussionen, sei an dieser Stelle gedankt. Allen wissenschaftlichen Hilfskräften des Lehrstuhls bedanke ich mich für engagierte Mitarbeit bei der Durchführung der umfangreichen Versuche und deren Auswertung.

Die finanzielle Förderung erfolgte durch den Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) im Rahmen eines Promotionsstudiums. Hierdurch wurde mir die Forschungstätigkeit auf höchstem Niveau ermöglicht. Gleichzeitig konnten wissenschaftliche Erkenntnisse aus unterschiedlichen Ländern in dieser Arbeit zusammengeführt werden. Hierfür möchte ich mich ausdrücklich bedanken.

Kazan, am 14. September 2012

Andrey Timofeev

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG	1
2 STAND DER TECHNIK	4
2.1 Aufbau und Arbeitsweise des Vorbereitungsbodens	4
2.2 Funktion des Vorbereitungsbodens	4
2.3 Parameter des Vorbereitungsbodens	8
2.4 Wurfkennzahl	9
2.5 Bisherige Untersuchungen des Vorbereitungsbodens	12
3 THEORETISCHE BETRACHTUNG DES VORBEREITUNGSBODENS.....	24
3.1 Kinematik des Vorbereitungsbodens.....	24
3.1.1 Antrieb des Vorbereitungsbodens als Gelenkgetriebe.....	24
3.1.2 Bewegungsgleichungen	25
3.1.3 Ergebnisse der Simulation.....	31
3.2 Bewegung der Einzelmasse auf dem Vorbereitungsboden	36
3.2.1 Förderung.....	37
3.2.2 Entmischung.....	40
4 VERSUCHSSTAND FÜR UNTERSUCHUNGEN AM VORBEREITUNGSBODEN	42
4.1 Vorbereitungsboden	43
4.2 Antriebe	46
4.3 Zuführeinrichtung	46
4.4 Korndosieranlage	47
4.5 Verfahren zur Messung der Fördergeschwindigkeit	47
4.6 Messverfahren zur Ermittlung der Entmischung.....	48
4.6.1 Kalibrierung der Reinigungsanlage.....	49
4.6.2 Luftströmungsfeld der Reinigungsanlage	50
4.6.3 Reproduzierbarkeit	51
5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	53
5.1 Versuchsablauf.....	53
5.2 Auswertungskriterien	54
6 VERSUCHSGUT	56
5.1 Versuchsguteigenschaften	56

7 VERSUCHSERGEBNISSE	58
7.1 Einfluss der Schichtung.....	58
7.2 Einfluss des Korndurchsatzes	62
7.3 Einfluss der Länge des Vorbereitungsbodens	66
7.4 Einfluss des Drahtrechens.....	69
7.5 Einfluss des Schwingungswinkels bei verschiedenen Neigungen.....	72
7.6 Einfluss des vorderen und hinteren Schwingungswinkels	74
7.7 Einfluss der unterschiedlichen Längen der Schwingen	77
7.8 Einfluss des Übertragungswinkels.....	78
7.9 Einfluss der Amplitude und Frequenz.....	79
7.10 Versuchsergebnisse bei konstanter Wurfkennzahl.....	82
7.11 Einfluss der Beschleunigungen	84
8 ZUSAMMENFASSUNG.....	89
9 SUMMARY	92
10 LITERATURVERZEICHNIS	95

FORMELZEICHEN

A_K	%	Kornabscheiderate
a	mm	Amplitude des Vorbereitungsbodens
α	°	Neigung des Vorbereitungsbodens
α_H	°	Hangneigung des Geländes
α'	°	Stufenwinkel
b_{VB}	mm	Breite des Vorbereitungsbodens
β	°	Schwingungswinkel des Vorbereitungsbodens
β_H	°	hinterer Schwingungswinkel
β_V	°	vorderer Schwingungswinkel
f_E	Hz	Frequenz des Vorbereitungsbodens
F_G	N	Gewichtskraft
F_N	N	Normalkraft
F_R	N	Reibungskraft
F_T	N	Trägheitskraft
F_{Tn}	N	Normalkomponente der Trägheitskraft
Fr		Froudezahl
Fr_V		Wurfkennzahl
Γ		SiebKennziffer
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
γ	°	Differenzwinkel
h_F	mm	Fallstufenhöhe
h_{NKB}	mm	NKB-Schichthöhe
l_{80}	m	Länge des Siebes, wo 80% der Körner abgeschieden sind
l_{FB}	mm	Länge des Förderbandes
l_{KST}	mm	Länge der Kurbelstange
l_{SB}	mm	Länge des Siebes
l_{SW}	mm	Länge der Schwinge
l_{SWH}	mm	Länge der hinteren Schwinge
l_{SWV}	mm	Länge der vorderen Schwinge
l_{VB}	mm	Länge des Vorbereitungsbodens

\dot{m}_K	kg/(s·m)	bezogener Korndurchsatz
m_K	kg	gesamte Kornmasse
$m_K(i)$	kg	abgeschiedene Masse im Auffangbereich (i) des Siebes
$m_{K,V}$	kg	nicht abgeschiedene Kornmasse
n	min ⁻¹	Drehzahl des Vorbereitungsbodens
n_G	min ⁻¹	Drehzahl des Gebläses
η		Koordinate senkrecht zur Oberfläche
η'		Korndurchgang
μ		Reibungszahl
μ'		Ersatz-Reibungszahl
ξ		Koordinate waagrecht zur Oberfläche
ψ	°	Übertragungswinkel zwischen Kurbelstange und Schwinge
R	%	Restkornanteil
S	%	Anteil ausgetragener Masse
t	s	Zeit
t_V	s	Versuchsdauer
v_E	mm/s	Entmischungsgeschwindigkeit
v_{FB}	m/s	Zuführungsgeschwindigkeit
v_{GUT}	m/s	Fördergeschwindigkeit
v_K	%	Kornverlust
v_{VB}	m/s	Vorbereitungsbodengeschwindigkeit
\dot{v}	rad/s ²	Beschleunigung
\dot{v}_X	rad/s ²	horizontale Beschleunigung
\dot{v}_Y	rad/s ²	vertikale Beschleunigung
\dot{v}_ξ	rad/s ²	horizontale Beschleunigung zum Vorbereitungsboden
\dot{v}_η	rad/s ²	vertikale Beschleunigung zum Vorbereitungsboden
w	m/s	Luftgeschwindigkeit
w_{SCH}	m/s	Schwebegeschwindigkeit
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit des Antriebes

1 EINLEITUNG

Aufgrund von Bevölkerungswachstum, Klimawandel und der Endlichkeit fossiler Energieträger werden die existierenden landwirtschaftlichen Flächen immer intensiver genutzt. Die Landmaschinenindustrie reagiert darauf mit noch leistungsfähigeren und moderneren Maschinen, die eine schnelle und schlagkräftige Durchführung der landwirtschaftlichen Arbeiten unter vielfältigen Einsatzbedingungen und den steigenden Erträgen ermöglichen [1].

Durch den Strukturwandel der traditionellen Landwirtschaft, der u. a. durch den Preisverfall landwirtschaftlicher Erzeugnisse und von der EU-Agrarreform verursacht wird, nimmt die Flächenausstattung der Betriebe bei gleichzeitiger Abnahme der Zahl der Betriebe in Deutschland weiter zu, **Bild 1** [2].

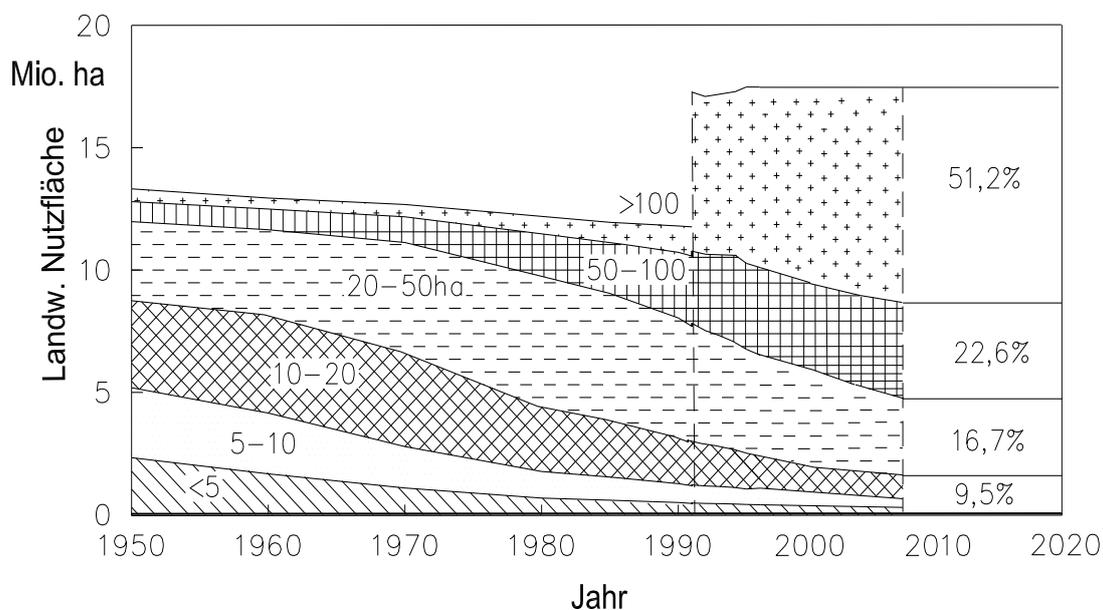


Bild 1: Flächenanteile verschiedener Betriebsgrößen in Deutschland [2]

Bei Mähdreschern werden die konventionellen Dreschwerke durch zusätzliche Dresch- und Abscheidetrommeln ergänzt und die Hordenschüttler durch einen oder mehrere Abscheiderotoren ersetzt, **Bild 2**. Verbreitung finden auch die Mähdrescher (MD) mit einem oder zwei Axialrotoren für das Dreschen und Trennen.

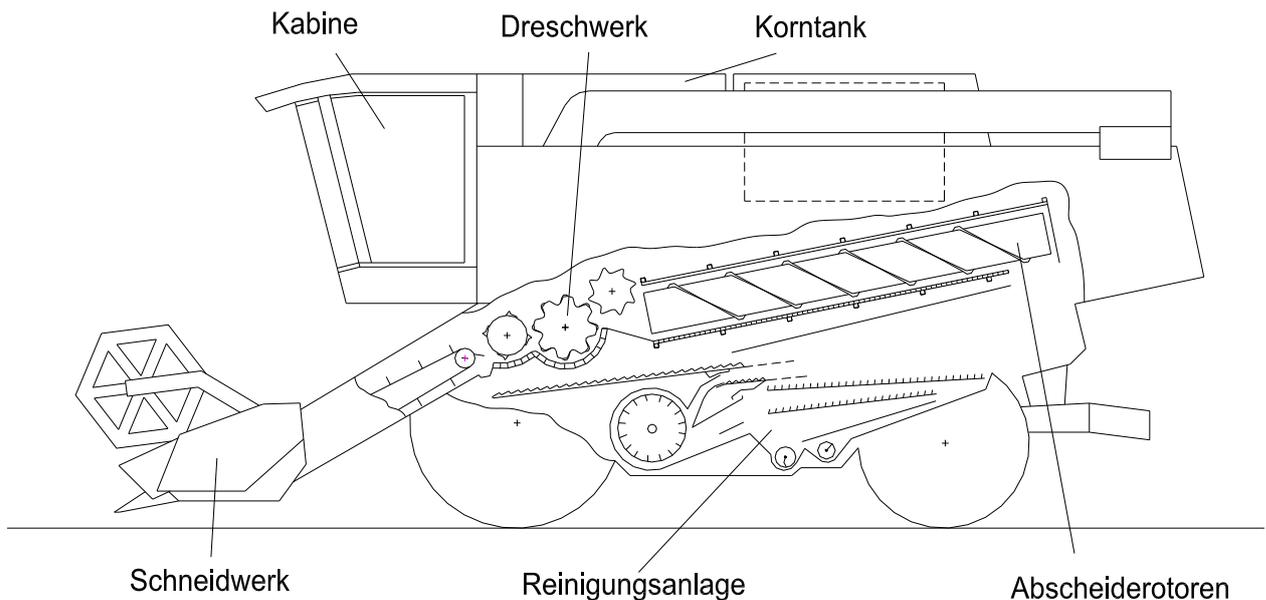


Bild 2: Mähdrescher mit Tangentialdreschwerk und Abscheiderotoren [3]

Ein unerwünschter Nebeneffekt bei rotierenden Trenneinrichtungen ist der hohe Anteil an Nichtkornbestandteilen (NKB) im Reinigungsgut, der bis zu 60 % betragen kann [4-6]. Dies führt zu einer wesentlich höheren Belastung der Reinigungsanlage des Mähdreschers und erschwert die Abtrennung der Körner.

Die Reinigungsanlage besteht aus Vorbereitungsboden (VB), Sieben, Gebläse, Kurbelantrieb und trennt die ausgedroschenen Getreidekörner von den NKB, **Bild 3**. Die mit NKB vermischten Getreidekörner gelangen durch den Dreschkorb und über den Rücklaufboden der Abscheiderotoren oder der Hordenschüttler auf den Vorbereitungsboden. Der Vorbereitungsboden fördert das abgeschiedene Gut zu der Fallstufe und den Sieben. Durch die Schwingbewegungen des Vorbereitungsbodens findet gleichzeitig die Vorentmischung von Körnern und NKB statt [7-13]. Die Zuführung eines vorentmischten Gutes mit unten liegender Kornschicht und oberer NKB-Schicht zu der Fallstufe und den Sieben kann die Leistungsfähigkeit der Reinigungsanlage wesentlich erhöhen [14]. Die Arbeitsqualität des Vorbereitungsbodens wird durch zwei Faktoren gekennzeichnet:

- sichere Förderung des Gutes bei wechselnden Erntebedingungen und Hangneigungen,
- Vorentmischung des transportierten Gutes.

Am Drahtrechen des Vorbereitungsbodens und in der Fallstufe wird das Gut von einer oder mehreren Luftströmungen durchströmt. Der größte Anteil von NKB wird in der Fallstufe und auf den Sieben von den Luftströmungen in die Schwebelose genommen und aus dem Mähdrescher ausgetragen. Die Getreidekörner dagegen gelangen an die Trennfläche der Siebe und werden durch die Öffnungen der oberen und unteren Siebe abgetrennt.

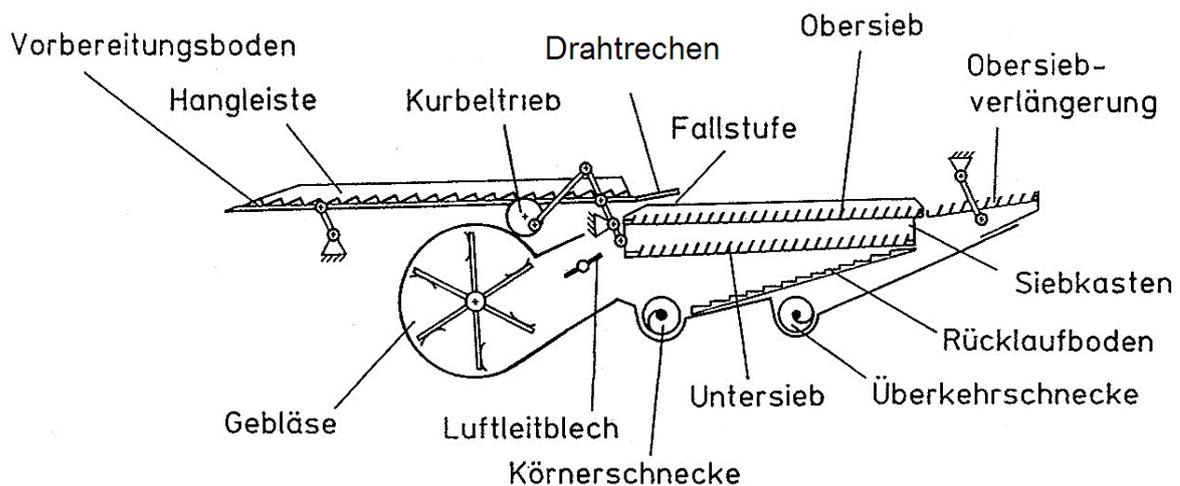


Bild 3: Funktionselemente einer konventionellen Mähdrescherreinigungsanlage [5]

Neben der konventionellen Reinigungsanlage mit Flachsieben wurden auch rotierende Reinigungseinrichtungen für den Einsatz im Mähdrescher geprüft, aber sie konnten sich nicht durchsetzen [15-16]. In einigen Mähdreschern sind Förderschnecken statt des Vorbereitungsbodens eingebaut, da diese eine sichere Förderung unabhängig vom Durchsatz bei jeder Hangneigung des Geländes gewährleisten. Die Förderschnecken haben aber als Nachteil die Vermischung des Reinigungsgutes und einen relativ hohen Leistungsbedarf [17].

Der Vorbereitungsboden einer Reinigungsanlage wird in dieser Arbeit hinsichtlich zuverlässiger Förderung und Entmischung untersucht. Es werden die Auswirkungen der kinematischen und geometrischen Parameter auf die Förderung und Entmischung des Reinigungsgutes überprüft. Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen über den Vorbereitungsboden wird dieser hier auch in Grenzbereichen untersucht. Für diese Untersuchungen am Vorbereitungsboden ist ein neuer Versuchsstand aufgebaut worden.

2 STAND DER TECHNIK

2.1 Aufbau und Arbeitsweise des Vorbereitungsbodens

Der Vorbereitungsboden gehört zu der Gruppe der Schwingförderer [18]. Er wird über einen Kurbelantrieb und geneigten Schwingen schräg auf- und abwärts bewegt. Dadurch wird dem Reinigungsgut eine Förderbewegung nach hinten zu den Sieben erteilt [19,20]. Die Reibungskräfte und die Beschleunigung des Gutes in Förderrichtung sind größer als bei der Vorwärtsbewegung des Vorbereitungsbodens. Dabei hebt sich das Gut von der Unterlage und wird im Idealfall in Form einer Wurfparabel gefördert [21,22]. Während dieser Wurfbewegung wird der Vorbereitungsboden abgebremst, nach vorne gezogen und erneut in Förderrichtung beschleunigt. Trifft das Gut dann weiter hinten wieder auf dem Vorbereitungsboden auf, so nimmt es nach Gleit- und Dämpfungsverzögerung die Geschwindigkeit des Vorbereitungsbodens an und bewegt sich synchron mit diesem bis zum nächsten Abwurf. Durch Wiederholungen dieses Zyklus ergibt sich die Förderung des Gutes [23,24]. Der Verlauf der Gutbewegung kann in Abhängigkeit von der Reibungszahl und von Betriebsparametern recht verschieden sein [25,26]. Wenn während des Fördervorganges kein Abheben des Fördergutes von der Unterlage erfolgt, arbeitet der Vorbereitungsboden als Schüttelrutsche. Man spricht von Schwingrinnen, wenn der Fördervorgang durch eine Wurfphase gekennzeichnet ist [18].

Die Vorteile der Schwingförderer mit Kurbelantrieb liegen neben dem kostengünstigen Aufbau mit geringer Bauhöhe auch in der konstanten Schwingweite bei veränderlicher Belastung [27,28]. Als Nachteil wird die Anregung anderer Bauteile des Mähdreschers zur Vibration gesehen [29,30]. Diese Antriebsart lässt sich aber in der Konstruktion des Mähdreschers in Verbindung mit dem Antrieb vom Siebkasten kombinieren. Durch gegenläufige Schwingbewegungen lassen sich ein Teil der Massenkräfte kompensieren.

2.2 Funktionen des Vorbereitungsbodens

Förderung

Der Vorbereitungsboden des Mähdreschers fördert das von Dreschkorb, Schüttler oder Abscheiderotoren abgeschiedene Gut zu den Sieben zur Entmischung, Auslese

und Abscheidung [11-13]. Bei der Förderung soll eine möglichst gleichmäßige Gutgeschwindigkeit auch unter wechselnden Einsatzbedingungen des Mähreschers erreicht werden.

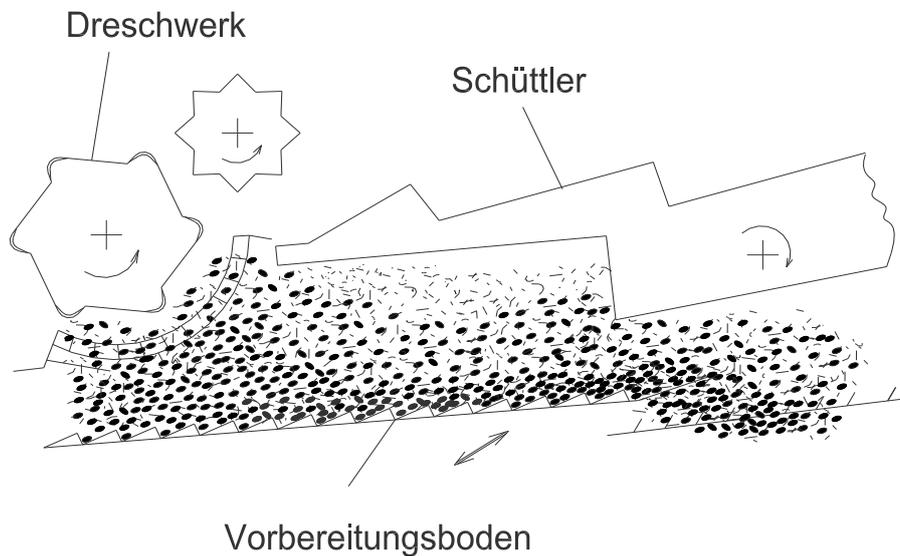


Bild 4: Funktion des Vorbereitungsbodens [6]

Die Förderung des Reinigungsgutes auf dem Vorbereitungsboden ist sehr komplex und hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu gehören die Stoffeigenschaften des Gutes, konstruktive und kinematische Parameter des Vorbereitungsbodens, der Durchsatz, sowie die Einsatzbedingungen des Mähreschers.

Die Stoffeigenschaften des Gutes, wie die unterschiedliche Struktur der Halme, die teilweise gerichtete Behaarung von Halmen und Blättern und vor allem die hohe Feuchtigkeit und das als Fremdstoff auftretende Unkraut, haben großen Einfluss auf die Fördergeschwindigkeit [31]. Durch die Gutfeuchte kann die Reibungszahl sich bis auf das Doppelte erhöhen. Feuchtes Gut neigt zum Schmieren, Haften und Kleben und erschwert dadurch die Förderung [32].

Neben den Stoffparametern hat auch die Oberflächenstruktur des Vorbereitungsbodens eine Auswirkung auf die Reibungszahl. Der Vorbereitungsboden im Mährescher ist mit Stufen versehen, welche ein Zurückgleiten des Gutes entgegen der gewünschten Förderrichtung verhindern sollen, **Bild 5**. Von Beck [6] wurde eine Ersatz-Reibungszahl vorgeschlagen, um diesen Einfluss zu erfassen.

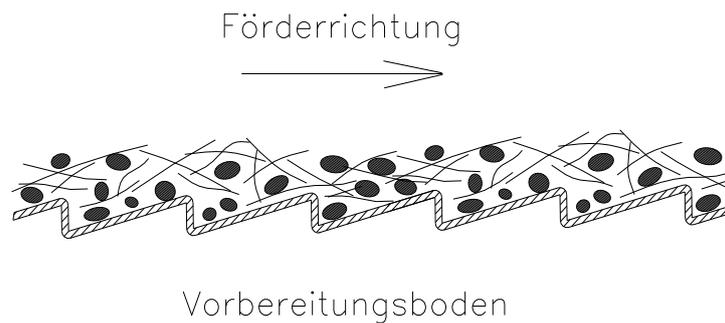


Bild 5: Oberflächenstruktur des Vorbereitungsbodens [6]

Nach Rochell [11] ist eine profilierte Oberfläche mit Stufen für den Vorbereitungsboden günstig, um die Fördergeschwindigkeit im Betrieb des Mähdreschers, je nach Hangneigung, nach Art des Erntegutes und seinen physikalischen Eigenschaften wie Reibungszahl, Gutfeuchte, Schüttdichte und Größenverteilung, konstant zu halten. Das Profil des Vorbereitungsbodens ist stufenförmig, meist 5 bis 10 mm hoch und zwischen 30 und 40 mm lang. Die Abmessungen der Stufen sind so gewählt, dass die minimale Höhe der Stufen der Einkornschicht des Gutes und die Länge der Stufe einer Wurfweite entsprechen. Dadurch kann das Reinigungsgut nur eine geringe Rückwärtsbewegung gegen die Förderrichtung machen [11].

Spittel [12] weist darauf hin, dass die Abmessungen der Stufen keinen Einfluss auf die Fördergeschwindigkeit haben, wenn der Vorbereitungsboden im Betrieb mit Wurf arbeitet. Nach [13] wird beim Betrieb ohne Wurf eines mit $\alpha = 15^\circ$ geneigten Vorbereitungsbodens eine niedrigere Schichthöhe auf dem Vorbereitungsboden ohne Stufen als auf dem Vorbereitungsboden mit Stufen erreicht. Dies passiert deswegen, weil bei einer Neigung von $\alpha = 15^\circ$ die Vorbereitungsbodenfläche und die Wurfrichtung des Gutes etwa in einer Ebene liegen [13]. Dadurch hat die Gleitphase im Fördervorgang den wesentlichen Anteil und die Stufen erschweren die Förderung. Im Betrieb mit Wurf wurden niedrigere Schichthöhen bei geringeren als 15° Neigungen auf dem Vorbereitungsboden mit Stufen festgestellt. Bei diesen Neigungen werden die Stufen des Vorbereitungsbodens vom Haufwerk des Gutes übersprungen und damit wirken sich die Stufen günstig aus.

In verschiedenen Arbeiten [11-13,33,34] wurde der Fördervorgang des Gutes auf dem Vorbereitungsboden untersucht. Botschkov [13] sowie Persson und Megnin

[33,34] weisen darauf hin, dass die oberen Schichten des Gutes während der Förderung sich überdurchschnittlich schneller als die unteren bewegen.

Peschl [35] stellt die Abhängigkeiten zwischen Schichthöhe, Reibungskräften und Fördergeschwindigkeit in seinen Untersuchungen fest. Die Auflockerung wird mit steigender Schichthöhe geringer. Je größer die innere Reibung der Schicht ist, umso mehr nähert sich die Fördergeschwindigkeit bei kleineren Schichthöhen der Geschwindigkeit der Unterlage. Bei größeren Schichthöhen kann wegen der Unterschiede zwischen der inneren Reibung des Gutes und der Reibung zwischen der Unterlage und dem Gut eine gegenseitige Verschiebung der Schichten des Gutes auftreten. Dies führt zu einer Verminderung der mittleren Fördergeschwindigkeit, aber gleichzeitig zu einer besseren Entmischung [13].

Entmischung

Die Entmischung ist ein Vorgang, der in der Schicht des Reinigungsgutes infolge der unterschiedlichen Eigenschaften der Gutpartikeln während der Förderung auf dem Vorbereitungsboden erfolgt. Das Reinigungsgut besteht im Wesentlichen bei Betrachtung des Volumens aus den Nichtkornbestandteilen (NKB). Das Haufwerk hält aufgrund der Kohäsionseigenschaften der NKB zusammen. Um eine Lageänderung der Körner in der NKB-Schicht zur Entmischung hervorzurufen, müssen die Bindekräfte des Haufwerkes überwunden werden. Dies geschieht durch dynamische Kräfte während der Förderung, **Bild 6**. Bei aufgelockertem Gut können die Körner durch die Schwerkraft sich innerhalb der NKB-Schicht nach unten zur Oberfläche des Vorbereitungsbodens bewegen.

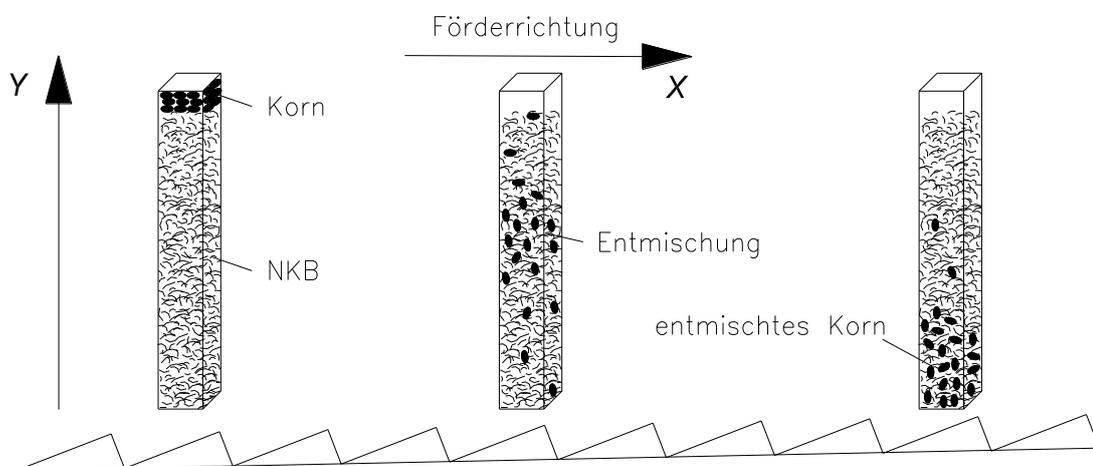


Bild 6: Entmischung der Körner in der NKB- Schicht, nach [6]

Der Entmischungsprozess wird umso vollständiger erfolgen, je länger die Verweildauer des Gutes auf dem Vorbereitungsboden ist [11]. Die Verweildauer ist von der konstruktiven Länge des Vorbereitungsbodens und von der Fördergeschwindigkeit des Gutes abhängig. Die Länge des Vorbereitungsbodens wird durch die Mähdreherkonstruktion vorgegeben. Bei gleicher Länge des Vorbereitungsbodens wird die Verringerung der Fördergeschwindigkeit zu einer steigenden Schichtdicke führen [11].

Neben der Verweildauer spielt auch die Aufprallgeschwindigkeit des Gutes für die Entmischung eine Rolle. Je höher die Aufprallgeschwindigkeit ist, desto leichter überwinden die Körner die Kohäsion des Gutes und die NKB-Schicht [36].

2.3 Parameter des Vorbereitungsbodens

Bei der Förderung und der Vorentmischung des Gutes auf dem Vorbereitungsboden haben vor allem folgende Parameter einen Einfluss:

- konstruktive Parameter:
 - Oberflächenstruktur, Ausstattung
 - Länge des Vorbereitungsbodens l_{VB} ,
 - Länge der Schwinge l_{SW} ,
- geometrische Parameter:
 - Neigung α ,
 - Schwingungswinkel β ,
 - Übertragungswinkel ψ ,
- kinematische Parameter:
 - Frequenz f_E ,
 - Amplitude (Kurbellänge) a ,
- Stoffeigenschaften des Gutes,
- Korn-NKB-Verhältnis,
- Korndurchsatz \dot{m}_K .

Im **Bild 7** ist ein Vorbereitungsboden mit dem Grossteil seiner Parameter dargestellt. Der Neigungswinkel α des Vorbereitungsbodens wird positiv bezeichnet, wenn der MD abwärts fährt bzw. der Neigungswinkel α positiv gegen den Uhrzeigersinn ist.

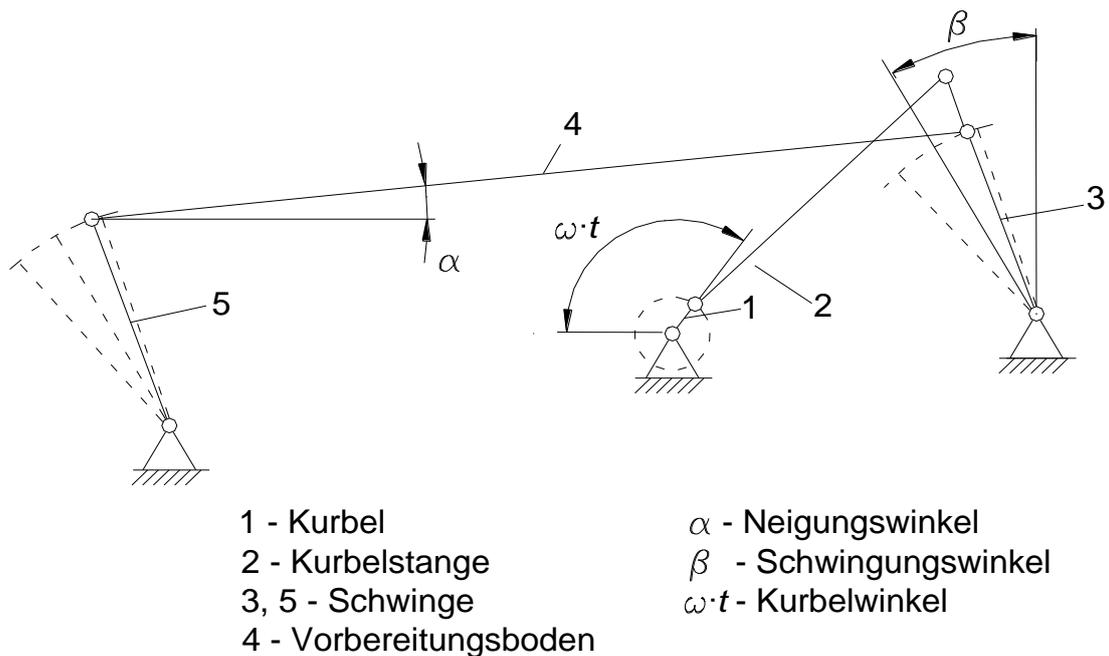


Bild 7: Schematische Darstellung des Vorbereitungsbodens

2.4 Wurfkennzahl

Für die Betrachtung der Bewegung eines Massenpunktes auf den schwingenden Unterlagen wurde von Schubert [18] die Froudezahl Fr als dimensionslose Kenngröße eingeführt. Die Froudezahl gibt das Verhältnis der größten Beschleunigung, bestimmt durch Amplitude a und Winkelgeschwindigkeit ω zur Erdbeschleunigung g wieder.

$$Fr = \frac{a\omega^2}{g} \quad (1)$$

Die Wurfkennzahl Fr_v wurde von Rochell [11] für die Beschreibung der Gutbewegung senkrecht zum Vorbereitungsboden verwendet.

$$Fr_v = \frac{a\omega^2 \sin(\beta - \alpha)}{g \cos \alpha} \quad (2)$$

Mittels der Einführung des Differenzwinkels γ durch Spittel [12]:

$$\gamma = \beta - \alpha \quad (3)$$

nimmt die Gleichung der Wurfkennzahl Fr_v unter Verwendung von (1) die folgende Form an:

$$Fr_v = \frac{a\omega^2 \sin\gamma}{g \cos\alpha} = Fr \frac{\sin\gamma}{\cos\alpha} \quad (4)$$

Die schematische Darstellung der entsprechenden Komponenten der Kräfte und der Winkel für die Berechnung der Wurfkennzahl zeigt **Bild 8**.

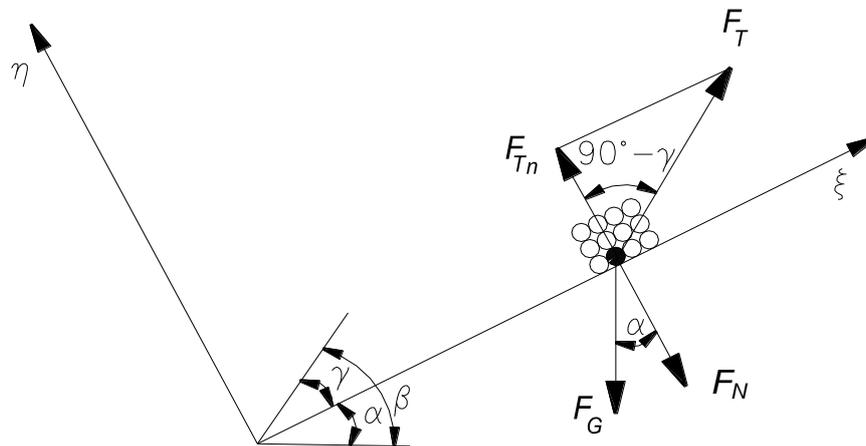


Bild 8: Kräfte zur Berechnung der Wurfkennzahl

Bei $Fr_v < 1$ wird das Gut vom Vorbereitungsboden nicht abgehoben, da der Beschleunigungswert \dot{v}_η senkrecht zur Förderebene die Erdbeschleunigung nicht erreicht, **Gl. 5**. Die Förderung wird lediglich dadurch erzeugt, dass der Anpressdruck des Gutes an den Boden und damit die Reibungskraft bei der Aufwärtsbewegung des Vorbereitungsbodens größer als bei der Abwärtsbewegung ist:

$$\dot{v}_\eta = -g \cdot \cos\alpha \quad (5)$$

Von Baader [37] wurde die Wurfkennzahl Fr_v für die Betrachtung der Entmischung eines Korngut-Fasergut-Haufwerkes auf einer vertikal schwingenden, horizontalen Unterlage benutzt. Reumschüssel [38,39] weist aber darauf hin, dass die Wurfkennzahl Fr_v keine eindeutige Bezugsgröße sein kann, da die Amplitude und Frequenz bei gleicher Beschleunigung unterschiedlich das Versuchsergebnis beeinflussen. Terskov [40,41] weist auch darauf hin, dass wenn die Wurfkennzahl Fr_v angegeben ist, dann muss auch gleichzeitig die Amplitude oder die Frequenz angegeben werden, um die Versuchsergebnisse richtig interpretieren zu können. Zu vergleichbaren Aussagen kommen auch Freye [5] und Beck [42]: die Angabe der Wurfkennzahl al-

lein reicht nicht aus zur Beschreibung der mechanischen Anregung der Unterlage, da auch die Fördergeschwindigkeit bei einer konstanten Wurfkennzahl je nach Wahl von Amplitude, Frequenz, Schwingungswinkel und Neigung unterschiedliche Werte ausweisen kann. Diese dimensionslose Kennzahl findet mehr in der Verfahrenstechnik ihre Anwendung, da der meiste Anteil der in dieser Branche verwendeten Schwingförderer bei waagerechten Einsatzbedingungen arbeiten und die Auswirkung der Neigung α bzw. der Wechselwirkungseinfluss der Neigung α und des Schwingungswinkels β dabei keine gravierende Rolle spielt [43].

Wenn die vertikale Beschleunigungskomponente des Vorbereitungsbodens die Erdbeschleunigung übersteigt, wird das Gut von der Unterlage abgehoben und ein Stück in Förderrichtung geworfen. Abhängig von den Parametereinstellungen und Stoffeigenschaften ist nach dem wieder Auftreffen des Gutes auf die Unterlage eine gewisse Zeit für die Dämpfungs- und Gleitphase erforderlich, bis die Gutmasse zur Ruhe gekommen ist. Dadurch wird das Gut auf dem Vorbereitungsboden auch zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgehoben [6,35]. Der tatsächliche Ablösezeitpunkt des Gutes vom Vorbereitungsboden ist etwas später als der theoretisch ermittelte bei $Fr_v = 1$ [5,6,11].

Tritt bei etwas größeren Werten von Fr_v als 1 ein Abheben ein, so ist die Gleitphase im Vergleich zur Wurfphase noch verhältnismäßig lang. Aufgrund der Reibung ist die Fördergeschwindigkeit gering und dementsprechend bei gleichem Durchsatz die Schichthöhe größer [44].

Bei Fr_v von ca. 1,5 trifft das Schüttgut etwa im unteren Umkehrpunkt der Kurbel auf den Vorbereitungsboden auf. Die Geschwindigkeit des Vorbereitungsbodens ist zu diesem Zeitpunkt etwa gleich 0, das Gut bleibt bis zum Abheben längere Zeit mit dem Vorbereitungsboden in Berührung. Während dieser Zeit wird es sowohl in senkrechter als auch in waagerechter Richtung vom Vorbereitungsboden beschleunigt.

Bei $Fr_v = 3,3$ ist der theoretische Auftreffpunkt gleich dem Ablösepunkt, was auch als statische Resonanz bezeichnet wird. Hier ist die theoretische Fördergeschwindigkeit für die vorgegebenen Werte von Amplitude a und Schwingungswinkel β am größten, da jede einzelne Schwingungsperiode für die Förderung ausgenutzt wird [44].

Im Bereich $3,3 < Fr_v < 4,6$ trifft das Gut auf den Vorbereitungsboden auf und wird sofort wieder hochgeworfen. Da die Horizontalgeschwindigkeit des Vorbereitungsbodens

dens in diesem Bereich sehr klein ist, fehlt der Förderimpuls in x-Richtung. Diese Bereiche mit $\dot{v}_\eta \leq -g$ werden als unperiodische Bereiche bezeichnet [44].

2.5 Bisherige Untersuchungen des Vorbereitungsbodens

Am Vorbereitungsboden wurden hauptsächlich Untersuchungen zum Einfluss der kinematischen und geometrischen Parameter, zur Wechselwirkung der verschiedenen Kombinationen der Parameter, konstruktiven Größen und zur Gestaltung durchgeführt, **Tabelle 1**.

Tabelle 1: Parameter untersuchter Vorbereitungsböden

	Rochell [11]	Spittel [12]	Botschkov [13]
	Parameter		
Frequenz f_E	2,2 bis 7,5 Hz	4,3 bis 5,3 Hz	2,2 bis 4,8 Hz
Amplitude a	10, 20, 40 mm	26 bis 42 mm	20 bis 40 mm
Neigung α	-10, 0, 10°	-13 bis 8°	0, 15°
Hangneigung α_H	-10 bis 10°	-12 bis 9°	0 bis 15°
Schwingungswinkel β	20, 40°	-9 bis 24°	28°
	konstruktive Größen		
Länge l_{VB}	1000 bis 1800 mm	1200 bis 1900 mm	1780 mm
Breite b_{VB}	ca. 270 mm	600 mm	320 mm
	Ausführung und Gestaltung		
Oberfläche	glatt / Stufenprofil 40x10, 40x5 mm 10x5, 10x10 mm	Stufenprofil 40x10 mm	glatt / Stufenprofil 40x14 mm
Drahtrechen	ohne	ohne / mit	ohne

Rochell [11] hat die Fördergeschwindigkeit des Vorbereitungsbodens mit einer konstanten Höhe der Gutschicht von $h_{NKB} = 50$ mm auf dem Zuführförderband bei einem Korn-NKB-Verhältnis von 75 : 25 untersucht. Die Höhe der Gutschicht h_{NKB} ergab sich durch die lose Auflage der NKB auf dem Zuführförderband. Außerdem hat er Untersuchungen mit anderen Stoffarten wie bspw. Polyester durchgeführt, um den Einfluss der Reibungszahl μ auf die Fördergeschwindigkeit feststellen zu können.

Bild 9 zeigt die Versuchsergebnisse eines gestuften und eines glatten Vorbereitungsbodens.

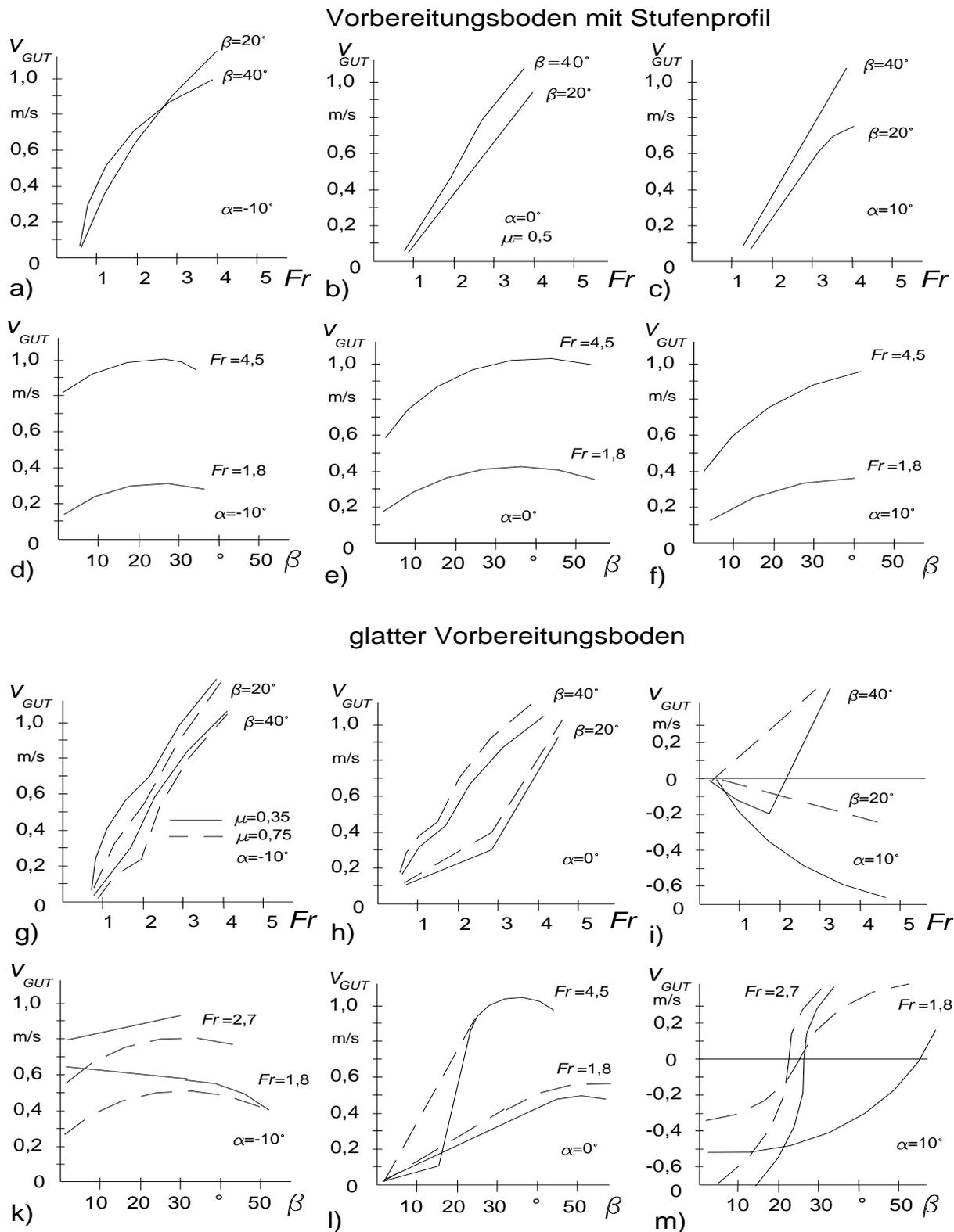


Bild 9: Versuchsergebnisse am gestuften und glatten Vorbereitungsboden bei einer Amplitude von $a = 40 \text{ mm}$ [11]

Seine Versuche hat er bei drei Neigungen von $\alpha = -10^\circ$, 0° , 10° und zwei Schwingungswinkeln $\beta = 20^\circ$ und $\beta = 40^\circ$ durchgeführt. In diesen Bereichen wurden je zwei Amplituden $a = 20$ mm und $a = 40$ mm mit der Änderung der Froudezahl von $Fr = 0,8$ bis $Fr = 4,5$ untersucht. Die Frequenz hat sich dabei entsprechend von $f_E = 3,15$ Hz bis $f_E = 7,5$ Hz und von $f_E = 2,2$ Hz bis $f_E = 5,2$ Hz geändert.

Die Fördergeschwindigkeiten erreichten Werte bis $v_{GUT} \approx 1$ m/s für die untersuchten negativ geneigten und waagerechten Vorbereitungsböden. Größere Unterschiede ergeben sich dagegen für positiv geneigten Böden bei einem Schwingungswinkel von $\beta = 20^\circ$, Bild 9 a, b, c.

Bei Untersuchungen am glatten Vorbereitungsboden ist die Änderung der Geschwindigkeitskurve stärker beim Versuchsgut mit einer niedrigeren Reibungszahl ausgeprägt. Der Knick der Kurve tritt an der Stelle auf, wo Wurf im Förderprozess auftritt, Bild 9 g, h, i. Der Schwingungswinkel hat den günstigen Wert nach höheren Fördergeschwindigkeit etwa von $\beta = 27 - 28^\circ$ bei einer Neigung von $\alpha = -10^\circ$, Bild 9 d, e. Bei einer Neigung von $\alpha = 10^\circ$ beträgt der Schwingungswinkel die Werte höher als $\beta = 30^\circ$ hinsichtlich der maximalen Fördergeschwindigkeit, Bild 9 c, f. Mit steigender Froudezahl Fr verschiebt sich der günstige Schwingungswinkel von $\beta = 50^\circ$ bis $\beta = 30^\circ$, Bild 9 i. Bei einer Neigung von $\alpha = 0^\circ$ ist die Fördergeschwindigkeit am höchsten, wenn der Schwingungswinkel den Wert von $\beta = 30^\circ$ beträgt, Bild 9 e.

Eine Bewertung der Entmischung des Korn-Spreu-Haufwerkes während der Förderung wurde von Rochell mittels eines mit Löchern versehenen Vorbereitungsbodens (Siebboden) ermittelt. Eine gute Vorentmischung wird dann erreicht, wenn der Vorbereitungsboden einen kleinen Schwingungswinkel, kleine Amplitude und niedrige Frequenz hat, **Bild 10**. Dabei ergibt sich aber eine geringere Fördergeschwindigkeit und dadurch eine längere Verweildauer des Gutes auf dem Vorbereitungsboden.

Bis zu einem Gutdurchsatz von etwa $\dot{m}_K = 3$ kg/(s·m) sind die Entmischung und Abscheidung der Körner hauptsächlich von der Durchgangswahrscheinlichkeit der verwendeten Siebe abhängig. Für größere Gutdurchsätze wächst die Durchgangszeit annähernd linear mit der Schichthöhe, weil die zum Durchdringen der Sieböffnung erforderliche Zeit im Verhältnis zur Entmischungszeit abnimmt. Es seien die Zahl und die Größe der Impulse je Zeiteinheit und die Auflockerung des Gutes für die Entmischung ausschlaggebend, da die Körner beim Durchdringen des Haufwerkes die Reibungskräfte der Gutpartikeln überwinden müssen. Nach Sonnenberg [45] er-

höht sich die Rate des Impulsübertrags in die Gutschicht proportional zur Länge des Vorbereitungsbodens.

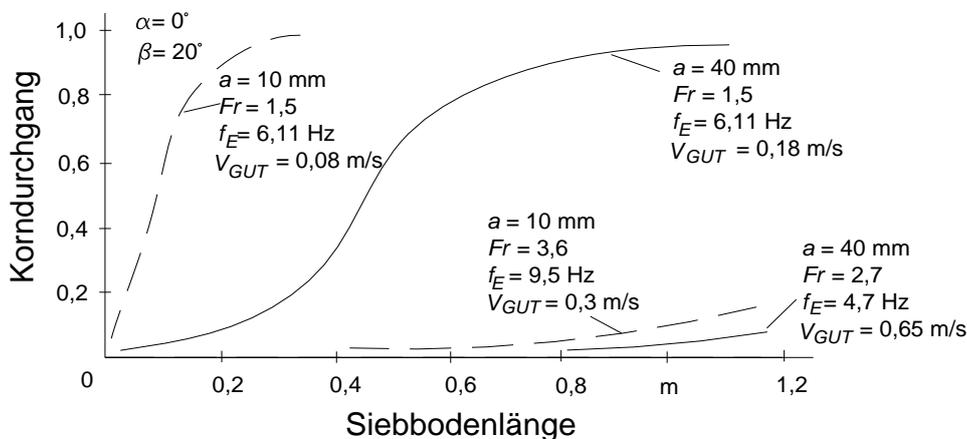


Bild 10: Versuchsergebnisse zur Vorentmischung [11]

Zehme [46] hat in seinen Versuchen festgestellt, dass die Entmischung mit der Zunahme der Schichthöhe nicht nur durch den weiteren Weg der Körner bis zur Schwingungsfläche, sondern auch durch eine zusätzliche Verdichtung der unteren Gutschichten erschwert wird. Dadurch vermindert sich die Korndurchlässigkeit und bewirkt damit eine weitere Erhöhung der Durchdringungszeit.

Spittel [12] hat den Vorbereitungsboden bei einem Korn-NKB-Verhältnis von 80 : 20 untersucht. Das Gutgemisch wurde durch sechs nacheinander aufgelegte Korn- und NKB-Schichten erreicht. Die Auflegung der NKB auf die Körnerschicht ergibt das ideal geschichtete und vorentmischte Gut. Er hat festgestellt, dass das Restkorn am Siebende sich etwa um 50 % durch die Zuführung des vorentmischten Gutes verringert. Die Reinheit des Gutes verschlechtert sich dabei um 20%. Es wurde eine recht kleine Gutgeschwindigkeit von $v_{GUT} = 0,19$ m/s dabei ermittelt. Restkorn und Reinheit des Gutes hat er durch die am Ende des Vorbereitungsbodens angebaute Reinigungsanlage ermittelt. Die Fördergeschwindigkeit wurde durch die Zeitmessung der Gutpartikelbewegungen über eine Länge des Vorbereitungsbodens von 1 m bestimmt. Als Kriterium für die Beurteilung der Arbeitsqualität des Vorbereitungsbodens hat Spittel hauptsächlich die Kornverluste V_K der Reinigungsanlage verwendet.

Bei Untersuchungen der Amplitude im Bereich von $a = 26$ mm bis $a = 42$ mm wurde als die günstigste Amplitude $a = 33,5$ mm für die Kornverluste festgestellt, **Bild 11** a, b, c. Dabei betrug die Frequenz $f_E = 5$ Hz und die Gutgeschwindigkeit lag im Bereich von $v_{GUT} = 0,2$ m/s bis $v_{GUT} = 1,2$ m/s. Bei Versuchen zur Frequenz im Bereich von

$f_E = 4,3$ Hz bis $f_E = 5,3$ Hz hat sich die Frequenz von $f_E = 4,8$ Hz bei einer Amplitude von $a = 33,5$ mm als die günstigste für geringste Kornverluste gezeigt, Bild 11 f, h, i. Die Gutgeschwindigkeit variierte dabei im Bereich zwischen $v_{GUT} = 0,4$ m/s und $0,65$ m/s.

Als günstigster Schwingungswinkel für die Kornverluste hat sich $\beta = 10^\circ$ bei einer Neigung von $\alpha = -1^\circ$ und der Schwingungswinkel $\beta = 18^\circ$ bei einer Neigung von $\alpha = 6^\circ$ bei einem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 3,5$ kg/(s·m) erwiesen, Bild 11 k, l. Damit zeigt es sich, dass der günstige Schwingungswinkel sich bei vergrößernder positiver Neigung des Vorbereitungsbodens zu höheren Werten verschiebt. Die Amplitude und die Frequenz betrug dabei $a = 33,5$ mm und $f_E = 5$ Hz.

Bei Hangfahrten des Mähdreschers ändert sich die Neigung α des Vorbereitungsbodens und der Schwingungswinkel β im Bezug zur Ebene, aber der Differenzwinkel bleibt konstant. Nach den Versuchsergebnissen wurde der Differenzwinkel $\gamma = 16^\circ$ als günstig für die Vorentmischung festgestellt. Bei jeder Änderung der Neigung des Vorbereitungsbodens soll der Schwingungswinkel auf die Größe von $\gamma = 16^\circ$ geändert werden. Dies gilt allerdings nur bis zu einer Neigung $\alpha = 5^\circ$, Bild 11 m, n, p.

Die Länge des Vorbereitungsbodens soll nach Spittel nicht kürzer als $l_{VB} = 1200$ mm sein, damit das Gut genügende Verweildauer für die Entmischung haben kann, Bild 11 d, e.

Die Untersuchungen hat Spittel [12] bei Korndurchsätzen von $\dot{m}_K = 2,4 - 3,5$ kg/(s·m) durchgeführt. Nur bei einigen Versuchen wurden die Einstellungen bei einem größeren Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 4$ kg/(s·m) überprüft.

Nach Spittel [14] kann eine vollständige Entmischung des Reinigungsgutes mit gegenwärtig in den Mähdreschern eingebautem Vorbereitungsboden nicht erreicht werden. Für die Verlängerung der Verweildauer muss die Fördergeschwindigkeit verringert werden, dies führt aber seinerseits zu dickerer Gutschicht auf dem Vorbereitungsboden. Mit zunehmendem Durchsatz wird die Entmischung auch immer unvollständiger, deswegen soll der Vorbereitungsboden hinsichtlich der Fördergeschwindigkeit konstruiert werden [47].

Vorbereitungsboden mit Stufenprofil

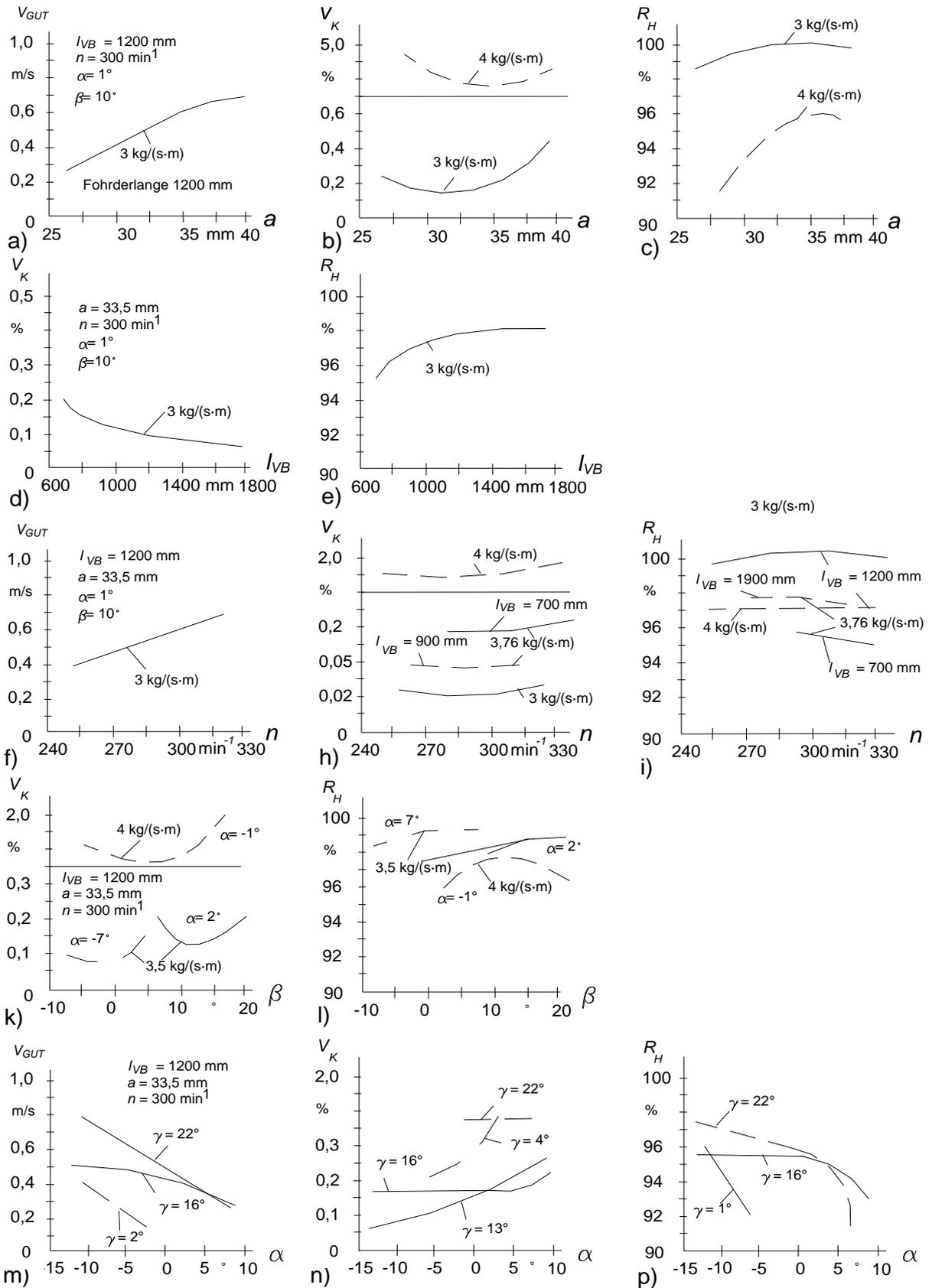


Bild 11: Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von Parametern [12]

Es ist aber möglich, durch Optimierung der Parameter des Vorbereitungsbodens die Leistungsfähigkeit der Reinigungsanlage um 10% bei konstant bleibenden Kornverlusten zu steigern [14]. Dies lässt sich vor allem durch eine relativ hohe Fördergeschwindigkeit von ca. $v_{GUT} \approx 0,5$ m/s und dadurch niedrigere NKB-Schicht erreichen. Die Auswirkung der Vorentmischung auf den Restkornverlauf nach Spittel [12] zeigt **Bild 12**.

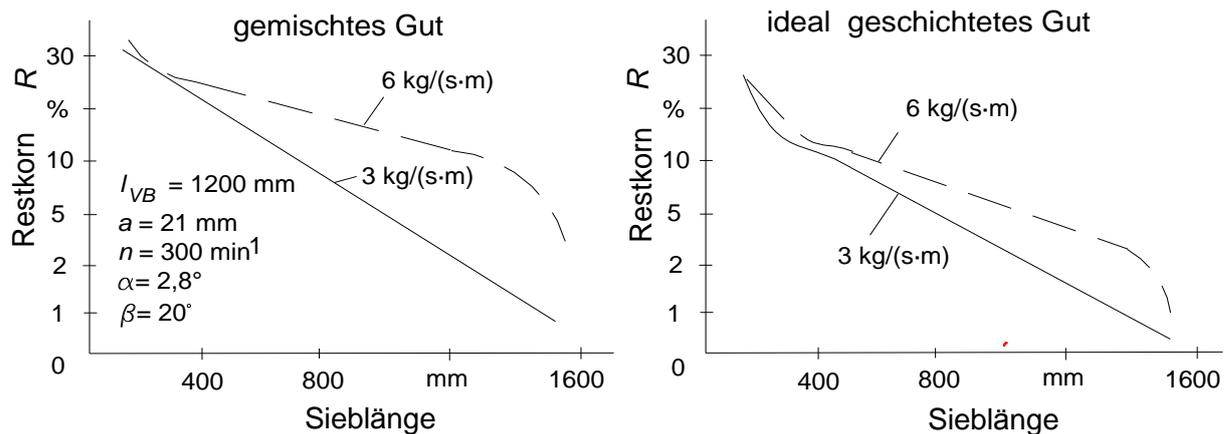


Bild 12: Versuchsergebnisse zur Schichtung [12]

Botschkov [13] hat die Bewegung des Reinigungsgutes auf dem Vorbereitungsboden als Bewegung einer Flüssigkeit mit bestimmter Viskosität betrachtet. In seinen Untersuchungen wurden die NKB-Schichthöhen in Abhängigkeit von der Drehzahl bei verschiedenen Amplituden auf einem gestuften und auf einem glatten Vorbereitungsboden betrachtet, **Bild 13**. Er hat festgestellt, dass die Entmischung bei einer Amplitude von $a = 30$ mm bei Drehzahlen von $n = 160 - 165$ min⁻¹ am intensivsten ist. Bei höheren Werten verlangsamt sich die Entmischungsgeschwindigkeit v_E (Durchgangsgeschwindigkeit der Körner). Bessere Entmischung bei kleinerem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 2,2$ kg/(s·m) erklärt er durch eine bessere Beweglichkeit der Körner bei kleineren Schichthöhen in der NKB-Schicht.

Die Bewertung der Vorentmischung hat Botschkov [13] mittels speziellen seitlich am Vorbereitungsboden angebauten Fraktionskästen vorgenommen, wodurch die Gutpartikeln in verschiedenen Höhen der Gutschicht aufgefangen werden konnten.

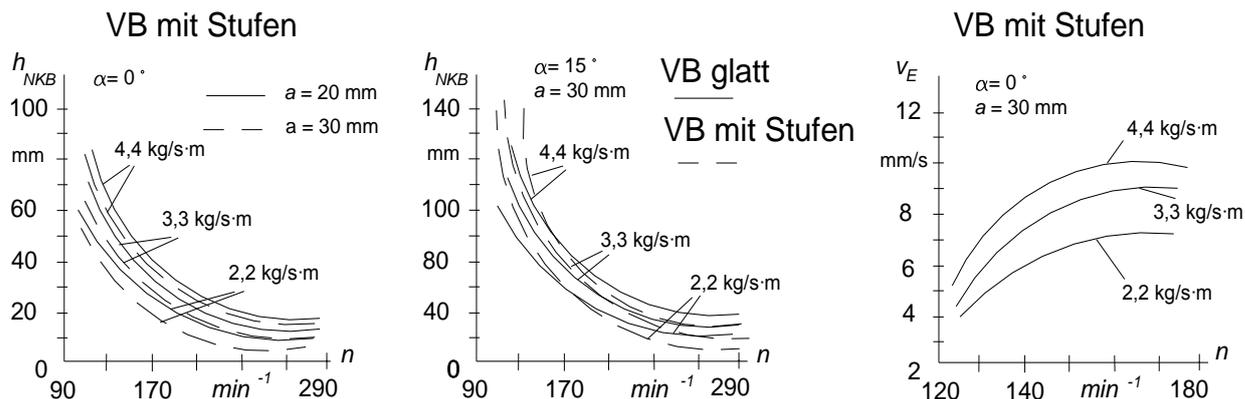


Bild 13: NKB-Schichthöhe und Entmischungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Drehzahl [13]

Gurjev [48] hat einen Vorbereitungsboden untersucht, der am Ende von Luft durchströmt wurde, **Bild 14**. Der Vorbereitungsboden war mit einem Stufenprofil mit 3 mm Löchern ausgerüstet. Der hintere luftdurchströmte Teil des Vorbereitungsbodens war 400 – 600 mm lang. Die Luftgeschwindigkeit betrug 2 – 3 m/s. Als günstigsten Bereich der Frequenz für die Vorentmischung hat er $f_E = 5 - 6$ Hz bei einer Amplitude von $a = 30$ mm bei einer Neigung von $\alpha = 3^\circ$ ermittelt. Die Vorentmischung hat Gurjev auch wie bei Spittel mittels einer hinter dem Vorbereitungsboden angebauten Reinigungsanlage bewertet.

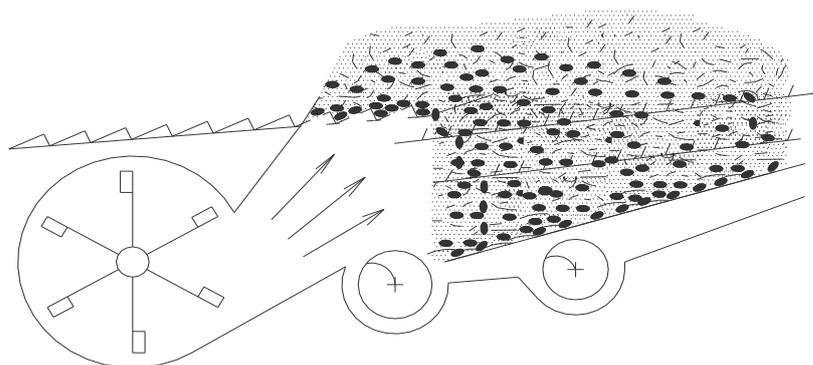


Bild 14: Schematische Darstellung des Gutstroms des Vorbereitungsbodens mit Luftströmung, nach [48]

Haase [49] hat den Einfluss der Drahtrechen untersucht, die am Ende des Vorbereitungsbodens angebaut wurden. Er hat festgestellt, dass die Drahtrechen auf die

Kornabscheidung bei veränderndem Korndurchsatz sich günstig auswirken, weil die NKB ausgeblasen und die unter der NKB-Schicht liegende Kornschicht gleich am Anfang des Siebes abgeschieden wird.

Nach Letoschnev [36] bestimmen die Beschleunigungen den Zeitpunkt des Wurfanfanges auf dem Vorbereitungsboden und den Zeitpunkt, wann die Gutschichten anfangen, sich nach dem Aufprall untereinander zu bewegen.

Durch höhere Aufprallgeschwindigkeiten kann eine bessere Entmischung erreicht werden. Er weist darauf hin, dass die Körner am schnellsten zur Förderfläche gelangen, wenn die Aufprallgeschwindigkeit am Ende einer Wurfphase ihren Höchstwert erreicht. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei der Umkehr der Bewegungsrichtung des Gutes in der Gutschicht möglichst große Verzögerungswerte auftreten. Die Geschwindigkeiten von Gut und Förderfläche sollen bei der Berührung nach dem Wurf möglichst unterschiedlich sein, damit sich das Kurzstrohgitter stark verformt und die Körner diese leichter durchdringen können. Die Aufprallgeschwindigkeit sinkt nach $Fr_v = 1$ bis sie bei etwa $Fr_v = 3$ in Nähe der statischen Resonanz des Vorbereitungsbodens wieder anfängt zuzunehmen. Die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Gut und Vorbereitungsboden wird im Auftreffpunkt dadurch wieder ansteigen.

Terskov [40,41] hat die Entmischung und Abscheidung der Reinigungsanlage auch in Abhängigkeit von Beschleunigungen untersucht. Er stellte fest, dass die Erhöhung der Beschleunigung durch die Frequenz bis $9 - 10 \text{ m/s}^2$ zur Verbesserung der Entmischung führt. Nach weiterer Erhöhung der Beschleunigung fängt die Entmischung an, sich überproportional zu verschlechtern. Er schlägt vor durch Senkung der Schichthöhe mittels höherer Fördergeschwindigkeit die Entmischung zu verbessern.

Durch mehrere Untersuchungen zur Vorentmischung lassen sich gegensätzliche Aussagen bezüglich der Bewegungen und Beschleunigungen der Gutschicht auf dem Vorbereitungsboden in vertikale und horizontale Richtung und ihren Auswirkungen auf die Entmischung angeben: von einigen Autoren wird ein positiver Einfluss auf die Entmischung durch die horizontalen Beschleunigungen hervorgehoben. Bublik [50] stellt fest, dass die Schwingungen in horizontaler Richtung eine wesentlich höhere Effektivität für die Entmischung haben als die in vertikaler Richtung. Von Fiala [51] wird hervorgehoben, dass eine schnellere Entmischung der Körner durch die NKB-Schicht bei einem Schwingungswinkel von $\beta = 25^\circ$ als bei einem Schwingungswinkel von $\beta = 45^\circ$ am waagerechten Sieb stattfindet. Nach Spittel [12] zeigt sich, dass die Kornverluste sich mit steigendem Schwingungswinkel progressiv erhöhen. Manig

[52] stellte fest, dass die Absiebung der Körner umso mehr erschwert wird, je größer die vertikale Bewegung der Körner ist. Freger [53] ermittelte bei seinen Versuchen zur Auflockerung des Gutes in Abhängigkeit von der Wurfkennzahl, dass das Gut sich mit zunehmender mechanischer Erregung in vertikale Richtung verdichtet und dadurch die Entmischung verschlechtert wird.

Diese Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Bewegung der Gutschichten, bzw. höhere Beschleunigungen in horizontaler Richtung günstiger für die Entmischung als die Beschleunigungen in vertikaler Richtung sind.

Andere Autoren weisen darauf hin, dass die vertikalen Bewegungen bzw. Beschleunigungen sich positiv auf die Entmischung auswirken. Nach Gortinskiy [54] gewährleisten die vertikalen Beschleunigungen eine bessere Beweglichkeit des Kurzstrohhauptwerkes und daraus folgernd eine bessere Auflockerung. Nach Evtjagin [55] führt die senkrechte Bewegung des Gutes auf dem Vorbereitungsboden zu einem besseren Durchgang der Körner durch die NKB-Schicht. Beste Entmischungsergebnisse wurden auch bei Bikov [56] bei größeren vertikalen Beschleunigungen festgestellt.

Bikov hat sich [56] mit der Auswirkung der kinematischen und geometrischen Parameter auf die Beschleunigungen und Geschwindigkeiten der schwingenden Unterlage beschäftigt. Er hat sehr vielseitig die Kinematik des Antriebes der Unterlage theoretisch untersucht. Er weist darauf hin, dass die Beschleunigungen der Unterlage in Abhängigkeit von der Kinematik des Antriebes bis 3,3-fach größer sein können, als die Beschleunigung der Kurbel vom Antrieb der schwingenden Unterlage. Außerdem hat Bikov sich mit der Theorie der Bewegung einer dünnen Kornschicht befasst. Dabei berücksichtigt er den Einfluss der Körner aufeinander.

Nach Damm [57] sind die Beschleunigungen in der Praxis höher als theoretisch bei sinusförmiger Bewegung, da dabei die Massen, insbesondere in den Totpunkten der Kurbel, nicht berücksichtigt werden. Freye [5] stellte nach seinen Untersuchungen fest, dass in Abhängigkeit von der Güte des Massenausgleiches des Schwingsystems viel größere Beschleunigungen als theoretisch ermittelt auftreten können.

Nach Mewes [58] treten die Vibrationskräfte besonders stark bei der Beschleunigung oder Verzögerung von Massen bei hin- und hergehenden Bewegungen auf. Der Massenausgleich soll eine wirksame Methode zur Minderung der Vibrationen sein. Die Vibrationsverminderung der schwingenden Unterlage durch Eigenschwingungen hat Romanov [59] untersucht. Er schlägt vor, die Eigenschwingungen durch Verdoppelung des Antriebes zu verringern. In [60] wird das Eigenschwingungsverhalten der

Siebmaschine mittels Starrkörperanalyse erfasst, wobei der Verminderung von Beschleunigungen durch Massenkräfte eine große Rolle zugeschrieben wird. Litvinov [61] hat an der Verbesserung der Kinematik des Vorbereitungsbodens und des Siebes gearbeitet. Er weist darauf hin, dass die Vibration des Mähdreschers durch die Änderung der Kinematik bis auf ein Viertel verringert werden könnte. Dabei spielt die Kinematik des Antriebes der Unterlage eine ausschlaggebende Rolle.

Unter anderen weisen Williams und Shields [62] weisen darauf hin, dass bei nicht senkrechter Anregung der Unterlage neben der Beschleunigung auch die Größe des Schwingungswinkels von Bedeutung für die Entmischung ist, da er die Wurfrichtung bestimmt. Unterschiedliche Schwingungswinkel im vorderen und hinteren Teil des Vorbereitungsbodens und ihre Auswirkung auf die Entmischung sind bisher nicht untersucht worden.

In [63] untersuchten Moiset und Heemskerk die Bewegungsverhältnisse eines Vorbereitungsbodens als Hängekonstruktion. Anschließend wurde die Bewegungsbahn eines auf der Oberfläche befindlichen Massenteilchens bestimmt. Dies wurde unter Berücksichtigung der Kinematik des Antriebes vom Vorbereitungsboden als ungleichförmig übersetzendes Getriebe erfasst. Bei Beschleunigungsberechnungen für den Fördervorgang wird die Kinematik des Antriebes berücksichtigt. Es wurden die Gleichungen entwickelt, um die Bewegung des Massenteilchens zu beschreiben und die Verhältnisse zu bestimmen, wann das Teilchen vom Boden abhebt und auf ihn zurückfällt.

Bei Schwingfördern sind höhere Frequenzen und kleinere Amplituden für eine schonendere Behandlung der Körner verantwortlich [64-66]. Niedrigere Frequenzen und größere Amplituden in Kombination mit größeren Schwingungswinkeln gewährleisten dagegen eine stärkere Auflockerung [67-68]. Auch Meinel [69] stellte fest, dass die Entmischung bei größeren Amplituden besser als bei kleineren Amplituden ist.

Einen Einfluss auf die Richtung des Beschleunigungsvektors hat auch der Übertragungswinkel ψ zwischen Kurbelstange und Schwinge, **Bild 15**. Aber der Übertragungswinkel ψ wurde bisher bei Untersuchungen des Vorbereitungsbodens nicht umfassend berücksichtigt. Spittel [12] weist darauf hin, dass der Übertragungswinkel einen geringen Einfluss auf die Schwingweite (zweifache Amplitude) ausübt und dadurch keine große Rolle für den Entmischungs- und Fördervorgang spielt. Dabei wurden aber die Kinematik und Geometrie des Vorbereitungsbodens nicht vollständig analysiert. Die Auswirkung der Kurbeldrehung auf den Beschleunigungsverlauf

wurde nicht in Betracht genommen. Dies wurde bei anderen Autoren [11,13] auch nicht berücksichtigt.

.

3 THEORETISCHE BETRACHTUNG DES VORBEREITUNGSBODENS

3.1 Kinematik des Vorbereitungsbodens

3.1.1 Antrieb des Vorbereitungsbodens als Gelenkgetriebe

Bei vielen Untersuchungen zur schwingenden Unterlage der Reinigungsanlage des Mähreschers wurde die Bewegung der Unterlage als annähernd harmonische Sinusschwingung betrachtet [5,6,8,9,11,12,36,59]. An den Versuchsständen wurden dafür unterschiedliche Konstruktionen verwendet, um reine Sinusbewegungen zu erzeugen, beispielsweise mittels eines Kreuzschleifengetriebes. In vorliegender Arbeit wird die Kinematik des Vorbereitungsbodens als ein ungleichförmig übersetzendes Getriebe untersucht. Bei mehrgliedrigen Antrieben treten in Abhängigkeit von der Geometrie und vom Kurbelwinkel des Antriebes unterschiedliche Geschwindigkeiten und Beschleunigungen auf [70].

Kurbel 1, Koppel 2 und Schwinge 3 mit dem Winkel β_V bilden zusammen mit dem Gestell, den Festpunkten von Kurbel und Schwinge, ein Gelenkviereck. Mit einer zusätzlichen zweiten Schwinge 5 unter dem Winkel β_H und einer zweiten Koppel 4, welcher unter dem Neigungswinkel α den Vorbereitungsboden bildet, ergibt sich ein sechsgliedriges Koppelgetriebe, Bild 15 [71].

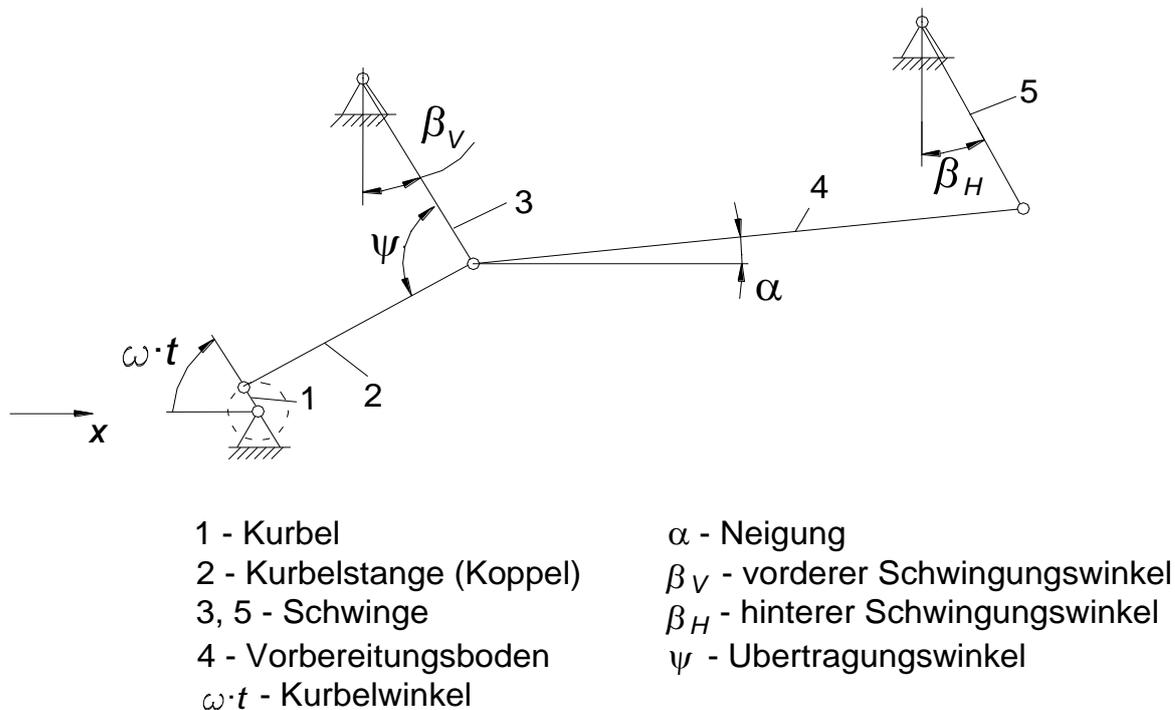


Bild 15: Schematische Darstellung des Vorbereitungsbodens

3.1.2 Bewegungsgleichungen

In der Herleitung und Darstellung der Bewegungsgleichungen des Vorbereitungsbodens als Form eines ungleichförmig übersetzenden ebenen Getriebes wurden folgende Bestimmungen verwendet. Den geometrischen Aufbau des untersuchten Vorbereitungsbodens zeigt **Bild 16**. Die Punkte D und E stellen die oberen Gelenke der Schwingen dar. Die Linie DE entspricht der Befestigungslinie, dem Gestell des Vorbereitungsbodens, während C und F die Befestigungspunkte am Vorbereitungsboden sind. Die Koppel BC wird durch die Kurbel AB angetrieben. Neben den Punkten D und E liegt Punkt A der Kurbel ebenfalls fest. Der Winkel φ stellt jeweils den Winkel zwischen den Getriebegliedern und der x -Achse in Richtung der Kurbeldrehung dar. Alle Punkte des Vorbereitungsbodens schwingen auf einer Kurvenbahn und je kürzer die Schwingen desto größer ist die Krümmung dieser Bahn [70-72].

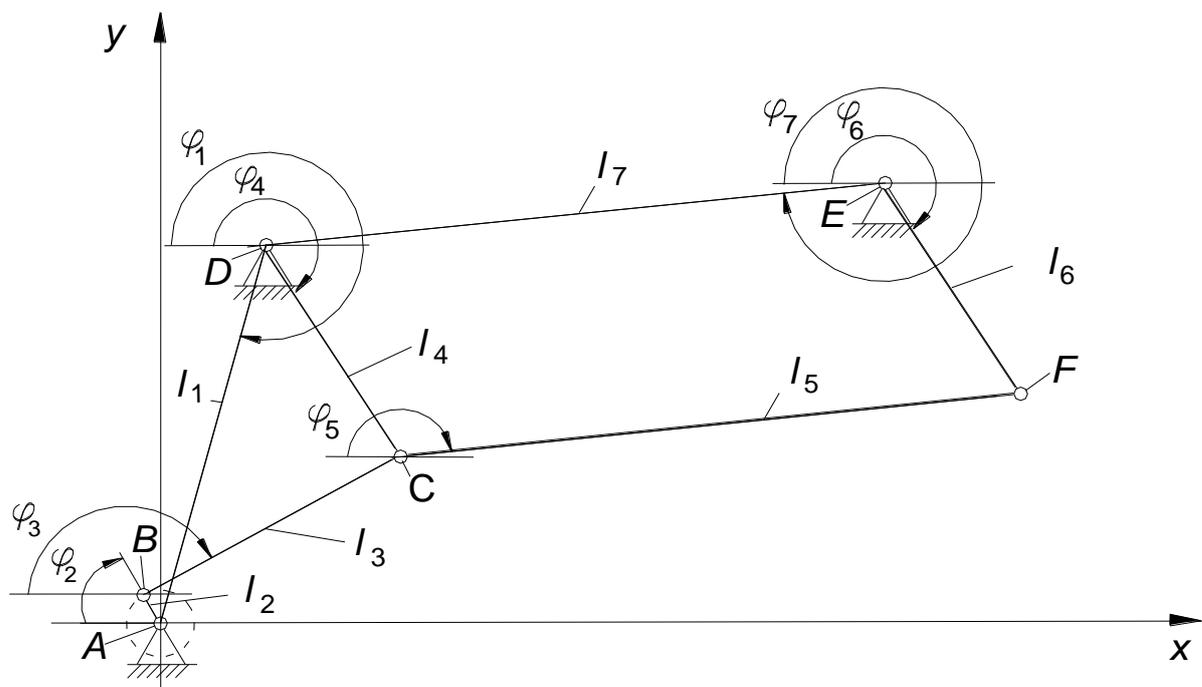


Bild 16: Getriebeschema des untersuchten Vorbereitungsbodens

Gelenkviereck $ABCD$

Zunächst wird das Gelenkviereck $ABCD$ analysiert. Aus Bild 16 ergibt sich folgende Vektorbeziehung:

$$\vec{DA} + \vec{AB} + \vec{BC} = \vec{DC} \quad (6)$$

Durch Projektion auf die Achsen x und y folgt:

$$l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3 = l_4 \cos \varphi_4 \quad (7)$$

$$l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin \varphi_3 = l_4 \sin \varphi_4 \quad (8)$$

Dabei sind:

$l_1 = AD$, $l_2 = AB$, $l_3 = BC$, $l_4 = DC$ und $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ die Winkel zwischen den jeweiligen Gliedern und der x -Achse in Drehrichtung der Kurbel.

Da die Glieder l_1 , l_2 und ihre Winkel φ_1 , φ_2 aus der Konstruktion des Vorbereitungsbodens im Mähdrescher vorgegeben sind, werden folgende Bezeichnungen eingeführt:

$$b = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 \quad (9)$$

$$c = l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 \quad (10)$$

Dadurch folgt:

$$l_3 \cos \varphi_3 = l_4 \cos \varphi_4 - b \quad (11)$$

$$l_3 \sin \varphi_3 = l_4 \sin \varphi_4 - c \quad (12)$$

Die beiden Seiten der Gleichungen werden quadriert und zusammen addiert. Daraus ergibt sich:

$$\frac{l_3^2 - l_4^2 - b^2 - c^2}{2bl_4} + \cos \varphi_4 + \frac{c}{b} \sin \varphi_4 = 0 \quad (13)$$

Folgende Vereinfachungen werden eingeführt:

$$G = \frac{l_3^2 - l_4^2 - b^2 - c^2}{2bl_4} \quad (14)$$

$$H = \frac{c}{b} \quad (15)$$

Dadurch ergibt sich:

$$G + \cos \varphi_4 + H \sin \varphi_4 = 0 \quad (16)$$

$$G + \cos \varphi_4 = -H \sin \varphi_4 \quad (17)$$

Dieser Ausdruck wird umgeformt:

$$G + \cos \varphi_4 = H \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_4} \quad (18)$$

Diese Gleichung wird quadriert und addiert. Damit erhält man:

$$(G + \cos \varphi_4)^2 = H^2 (1 - \cos^2 \varphi_4) \quad (19)$$

Daraus ergibt sich:

$$\cos \varphi_4 = -\frac{1}{(1 + H^2)} (G \pm H \sqrt{1 + H^2 - G^2}) \quad (20)$$

Da $\varphi_4 = 2\pi - \arccos(\cos \varphi_4)$ ist, wird $\cos \varphi_3$ abschließend durch die Gl. (7) bestimmt:

$$\cos \varphi_3 = \frac{l_4 \cos \varphi_4 - l_1 \cos \varphi_1 - l_2 \cos \varphi_2}{l_3} \quad (21)$$

$\sin \varphi_3$ wird:

$$\sin \varphi_3 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_3} \quad (22)$$

Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Gliedes CD (l_4)

Für die Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit des Gliedes l_4 wird die Gl. (7) nach dem Winkel φ_2 abgeleitet. Glied l_1 und Winkel φ_1 sind durch das Gestell konstruktiv vorgegeben und konstant und entfallen somit.

$$-l_2 \cdot \sin \varphi_2 - l_3 \cdot \sin \varphi_3 \cdot \frac{d\varphi_3}{d\varphi_2} = -l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot \frac{d\varphi_4}{d\varphi_2} \quad (23)$$

Zusammen mit den Übersetzungszahlen $\frac{d\varphi_3}{d\varphi_2} = i_{32}$ und $\frac{d\varphi_4}{d\varphi_2} = i_{42}$ ergibt sich:

$$l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin \varphi_3 \cdot i_{32} = l_4 \sin \varphi_4 \cdot i_{42} \quad (24)$$

Bei einer Drehung des Koordinatensystems um den Winkel φ_3 , ist jeweils im Argument der Sinusfunktion in (24) von den Winkeln φ_3 zu subtrahieren.

$$l_2 (\sin \varphi_2 - \varphi_3) + l_3 (\sin \varphi_3 - \varphi_3) \cdot i_{32} = l_4 (\sin \varphi_4 - \varphi_3) \cdot i_{42} \quad (25)$$

Da $\sin(\varphi_3 - \varphi_3) = 0$ ist, ergibt sich die Übersetzung:

$$i_{42} = \frac{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_3)} \quad (26)$$

Analog dazu ergibt sich durch Drehung des Koordinatensystems um den Winkel φ_4 :

$$i_{32} = \frac{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_4)}{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_4)} \quad (27)$$

Die Winkelgeschwindigkeit des Gliedes l_4 wird mit der folgenden Gleichung beschrieben:

$$\omega_4 = i_{42} \cdot \omega_2 \quad (28)$$

Die Winkelbeschleunigung des Gliedes l_4 wird durch die Ableitung der Gl. (24) nach dem Winkel φ_2 bestimmt:

$$l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cdot \sin \varphi_3 \cdot i'_{32} + l_3 \cdot i_{32} \cdot \cos \varphi_3 \cdot \frac{d\varphi_3}{d\varphi_2} = l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot i'_{42} + l_4 \cdot i_{42} \cos \varphi_4 \frac{d\varphi_4}{d\varphi_2} \quad (29)$$

Daraus resultiert:

$$l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cdot \sin \varphi_3 \cdot i'_{32} + l_3 \cdot i_{32}^2 \cdot \cos \varphi_3 = l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot i'_{42} + l_4 \cdot i_{42}^2 \cos \varphi_4 \quad (30)$$

Nach dem Subtrahieren mit dem Winkel φ_3 und durch die Vereinfachungen:

$\sin(\varphi_3 - \varphi_3) = \sin 0 = 0$ und $\cos(\varphi_3 - \varphi_3) = \cos 0 = 1$ ergibt sich:

$$i'_{42} = \frac{l_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + l_3 \cdot i_{32}^2 - l_4 \cdot i_{42}^2 \cdot \cos(\varphi_4 - \varphi_3)}{l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_3)} \quad (31)$$

Durch diese Übersetzungszahl wird die Bestimmung der Winkelbeschleunigung des Gliedes l_4 ermöglicht:

$$\varepsilon_4 = \omega_2^2 \cdot i'_{42} \quad (32)$$

Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Punktes C

Die Geschwindigkeit des Punktes C ist:

$$v_C = \omega_4 \cdot l_4 \quad (33)$$

Die Normalgeschwindigkeit des Punktes C ist gleich 0, da der Punkt D ortsfest ist.

Die Beschleunigung des Punktes C teilt sich in eine tangentielle und eine normale Komponente auf. Die tangentielle Beschleunigungskomponente ergibt sich aus:

$$\dot{v}_{Cr} = \varepsilon_4 l_4 \quad (34)$$

Die Normalbeschleunigung wird demzufolge:

$$\dot{v}_{Cn} = \omega_4^2 \cdot l_4 \quad (35)$$

Die absolute Beschleunigung bestimmt sich aus:

$$\dot{v}_C = \sqrt{(\dot{v}_{Cr})^2 + (\dot{v}_{Cn})^2} \quad (36)$$

Gelenkviereck $CDEF$

Aus dem Gelenkviereck $CDEF$ ergibt sich folgende Vektorbeziehung:

$$\vec{ED} + \vec{DC} + \vec{CF} = \vec{EF} \quad (37)$$

Projektionen der Vektoren auf die Achsen x und y ergeben die Gleichungen:

$$l_7 \cos \varphi_7 + l_4 \cos \varphi_4 + l_5 \cos \varphi_5 = l_6 \cos \varphi_6 \quad (38)$$

$$l_7 \sin \varphi_7 + l_4 \sin \varphi_4 + l_5 \sin \varphi_5 = l_6 \sin \varphi_6 \quad (39)$$

Gelenkviereck $CDEF$ wird analog dem Gelenkviereck $ABCD$ berechnet.

Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Gliedes EF (l_6)

Die Gl. (38) wird nach dem Winkel φ_2 abgeleitet:

$$l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot \frac{d\varphi_4}{d\varphi_2} + l_5 \cdot \sin \varphi_5 \cdot \frac{d\varphi_5}{d\varphi_2} = l_6 \cdot \sin \varphi_6 \cdot \frac{d\varphi_6}{d\varphi_2} \quad (40)$$

Dadurch ergibt sich:

$$l_4 \sin \varphi_4 \cdot i_{42} + l_5 \sin \varphi_5 \cdot i_{52} = l_6 \sin \varphi_6 \cdot i_{62} \quad (41)$$

Durch Drehung des Koordinatensystems um den Winkel φ_5 ergibt sich:

$$i_{62} = \frac{l_4 \cdot \sin(\varphi_4 - \varphi_5)}{l_6 \cdot \sin(\varphi_6 - \varphi_5)} i_{42} \quad (42)$$

Daraus ist die Winkelgeschwindigkeit vom Glied EF (l_6):

$$\omega_6 = i_{62} \cdot \omega_2 \quad (43)$$

Wenn das Koordinatensystem um den Winkel φ_6 gedreht wird, ergibt sich:

$$i_{52} = -i_{42} \frac{l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_6)}{l_5 \sin(\varphi_5 - \varphi_6)} \quad (44)$$

Die Beschleunigung vom Glied EF (l_6) wird durch die Ableitung der Gl. (41) berechnet:

$$\begin{aligned} l_4 \cos \varphi_4 \cdot i_{42} \cdot \frac{d\varphi_4}{d\varphi_2} + l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot i_{42} + l_5 \cdot \cos \varphi_5 \cdot i_{52} \cdot \frac{d\varphi_5}{d\varphi_2} + l_5 \cdot \sin \varphi_5 \cdot i_{52} = \\ l_6 \cos \varphi_6 \cdot i_{62} \frac{d\varphi_6}{d\varphi_2} + l_6 \cdot \sin \varphi_6 \cdot i_{62} \end{aligned} \quad (45)$$

Danach:

$$\begin{aligned} l_4 \cos \varphi_4 \cdot i_{42}^2 + l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot i_{42} + l_5 \cdot \cos \varphi_5 \cdot i_{52}^2 + l_5 \cdot \sin \varphi_5 \cdot i_{52} = \\ l_6 \cos \varphi_6 \cdot i_{62}^2 + l_6 \cdot \sin \varphi_6 \cdot i_{62} \end{aligned} \quad (46)$$

Durch die Drehung des Koordinatensystem um φ_5 ergibt sich:

$$\begin{aligned} l_4 \cos(\varphi_4 - \varphi_5) \cdot i_{42}^2 + l_4 \cdot \sin(\varphi_4 - \varphi_5) \cdot i_{42} + l_5 \cdot i_{52}^2 = \\ l_6 \cos(\varphi_6 - \varphi_5) \cdot i_{62}^2 + l_6 \cdot \sin(\varphi_6 - \varphi_5) \cdot i_{62} \end{aligned} \quad (47)$$

$$i_{62} = \frac{l_4 \cos(\varphi_4 - \varphi_5) i_{42}^2 + l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_5) i_{42} + l_5 i_{52}^2 - l_6 \cos(\varphi_6 - \varphi_5) i_{62}^2}{l_6 \sin(\varphi_6 - \varphi_5)} \quad (48)$$

Die Winkelbeschleunigung des Gliedes EF (l_6) ist:

$$\varepsilon_6 = \omega_2^2 \cdot i_{62} \quad (49)$$

Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Punktes F

Die Geschwindigkeit des Punktes F wird:

$$v_F = \omega_6 \cdot l_6 \quad (50)$$

Die tangentielle Komponente der Winkelbeschleunigung:

$$\dot{v}_{F\tau} = \varepsilon_6 l_6 \quad (51)$$

Die normale Komponente der Winkelbeschleunigung:

$$\dot{v}_{Fn} = \omega_6^2 l_6 \quad (52)$$

Daraus resultiert die Beschleunigung des Punktes F :

$$\dot{v}_F = \sqrt{(\dot{v}_{F\tau})^2 + (\dot{v}_{Fn})^2} \quad (53)$$

Durch die aufgeführten Gleichungen sind die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Vorbereitungsbodens bestimmbar.

3.1.3 Ergebnisse der Simulation

Die kinematische Analyse des Vorbereitungsbodens wurde mit dem Programm SAM - 5 (Simulation and Analysis of Mechanisms, ARTAS Engineering) durchgeführt. Mit diesem Programm ist es möglich, verschiedene Geometrien von Antrieben des Vorbereitungsbodens zu entwerfen und kinematisch zu analysieren.

Der Einfluss der geometrischen und konstruktiven Parameter auf den Beschleunigungsverlauf wurde an den Geometrien 1 und 2 angezeigt, **Bild 17**.

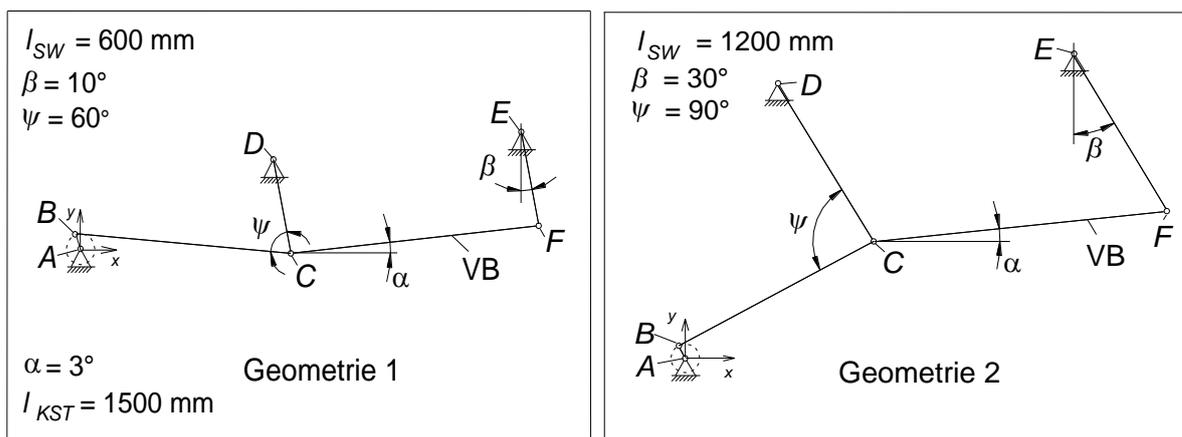


Bild 17: Schematische Darstellung des Vorbereitungsbodens mit der Anordnung Geometrie 1 und Geometrie 2

Die **Bilder 18, 19** zeigen, wie unterschiedlich die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Vorbereitungsbodens während einer Kurbeldrehung nur durch Änderung der geometrischen und konstruktiven Parameter verlaufen. In Bild 18 ist erkennbar, dass die Beschleunigungen bei der Geometrie 1 in Richtung y-Achse vier Extrempunkte statt zwei im Vergleich zur Geometrie 2 haben und bei der Vorwärtsbewegung höhere Werte auftreten als bei der Rückwärtsbewegung. Die vertikale Beschleunigung wird bei der Geometrie 1 kleiner, aber die horizontale Beschleunigung erhöht sich gegenüber Geometrie 2. Diese Zunahme der horizontalen Beschleunigung kann sich auf die schichtartigen Bewegungen des Gutes positiv auswirken.

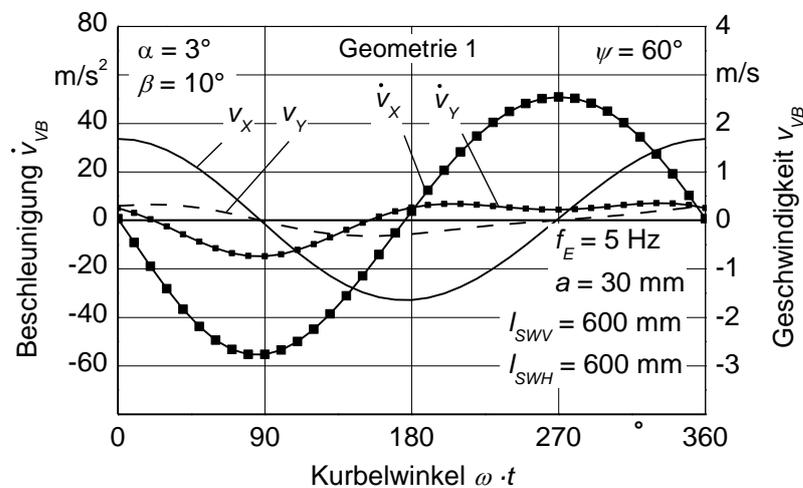


Bild 18: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Beschleunigung bei der Geometrie 1

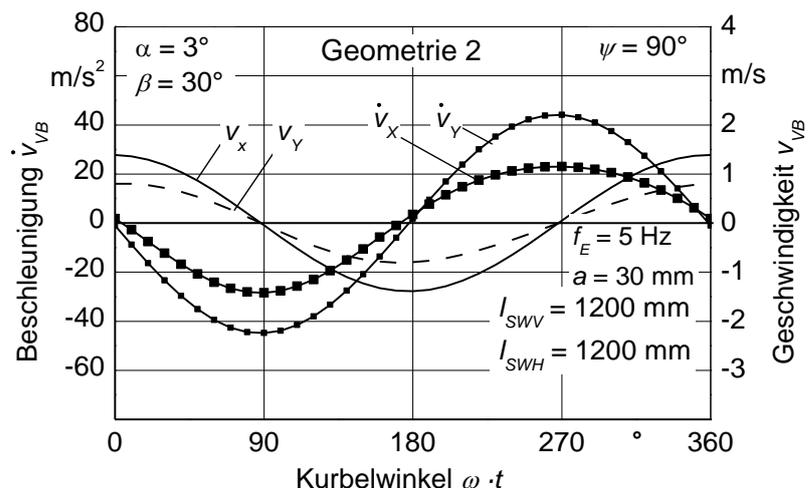


Bild 19: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Beschleunigung bei der Geometrie 2

Bei Geometrie 2 wirken auf die Gutschicht bei Hin- und Rückbewegung des Vorbereitungsbodens betragsmäßig gleich große Beschleunigungen. Bei einem angenommenen Schwingungswinkel von $\beta = 0^\circ$ würde das Gut dabei nicht gefördert.

Bei gleichen vorderen und hinteren Schwingungswinkeln β_V, β_H und gleichen Schwingenlängen hat der Vorbereitungsboden die gleiche Bewegungsbahn in ganzer Länge. Durch Variation der Schwingungswinkel und Schwingenlängen ist es möglich, die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Vorbereitungsbodens zu beeinflussen. Als Folge davon treten unterschiedliche Geschwindigkeiten und Beschleunigungen am Anfang und am Ende des Vorbereitungsbodens auf. Die dadurch erreichbare zusätzliche Ausdehnung der Gutschicht während der Förderung kann zu einer besseren Auflockerung des NKB-Gitters auf dem Vorbereitungsboden führen, was die Entmischung verbessert.

Bilder 17, 18, 19 zeigen auch, dass bei einer Verringerung des Übertragungswinkels ψ von 90° auf 60° und des Schwingungswinkels β von 30° auf 10° die Horizontalbeschleunigungen zunehmen und die Vertikalbeschleunigungen abnehmen.

Die Änderung der Beschleunigung von der Amplitude und Frequenz zeigen die **Bilder 20, 21**. Die Verdoppelung der Frequenz f_E führt etwa zu einer Vervierfachung der Beschleunigung des Vorbereitungsbodens, die Verdoppelung der Amplitude führt zu einer Verdopplung der Beschleunigung.

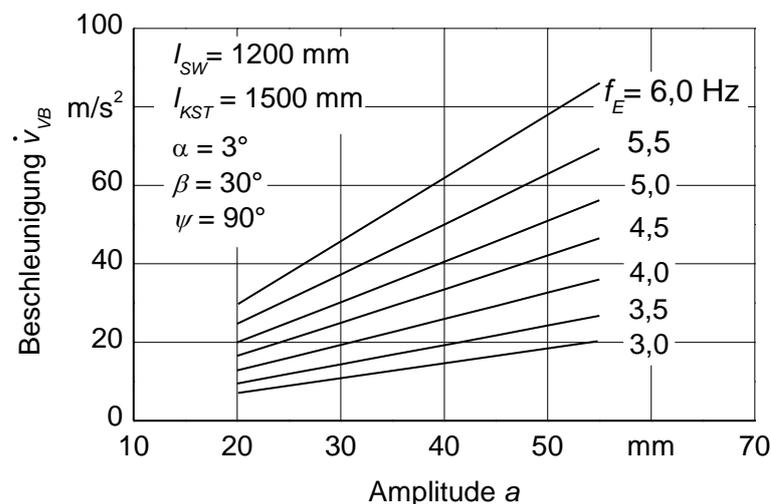


Bild 20: Variation der Beschleunigung des Vorbereitungsbodens in Abhängigkeit von der Amplitude a

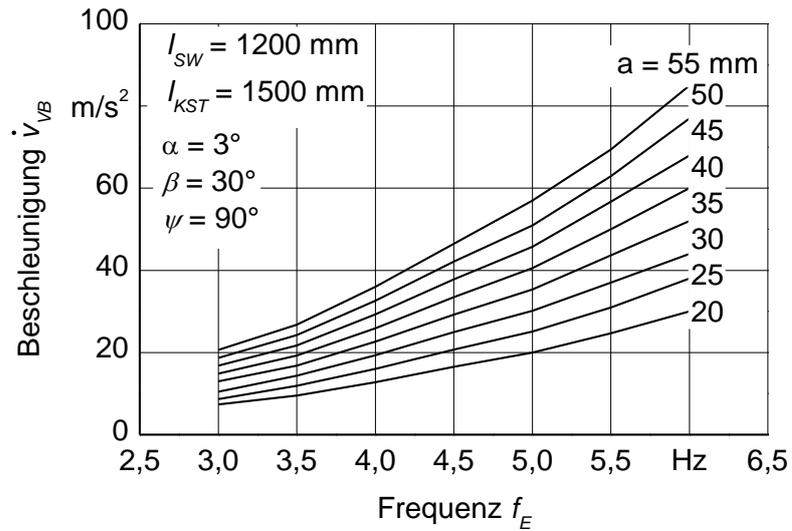


Bild 21: Beschleunigung des Vorbereitungsbodens in Abhängigkeit von der Frequenz f_E

In Mähdreschern werden Wurfkennzahlen von etwa $Fr_v = 1$ verwendet [11]. Es besteht die Tendenz bei größeren Durchsätzen größere Wurfkennzahlen zu verwenden. In den **Bildern 22-25** sind die Froudezahlen Fr und Wurfkennzahlen Fr_v des Vorbereitungsbodens bei unterschiedlichen Amplituden a und Frequenzen f_E aufgezeigt.

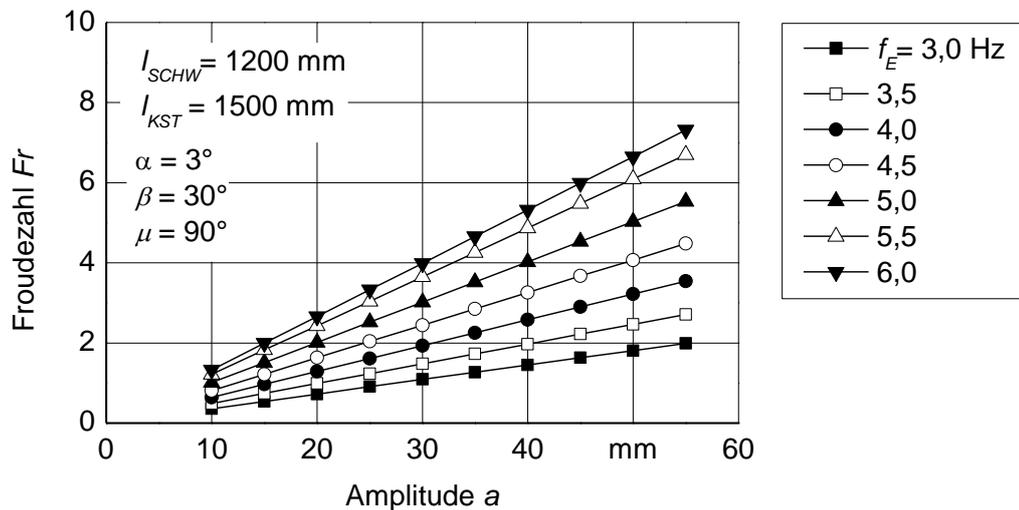


Bild 22: Froudezahl Fr des Vorbereitungsbodens in Abhängigkeit von der Amplitude a

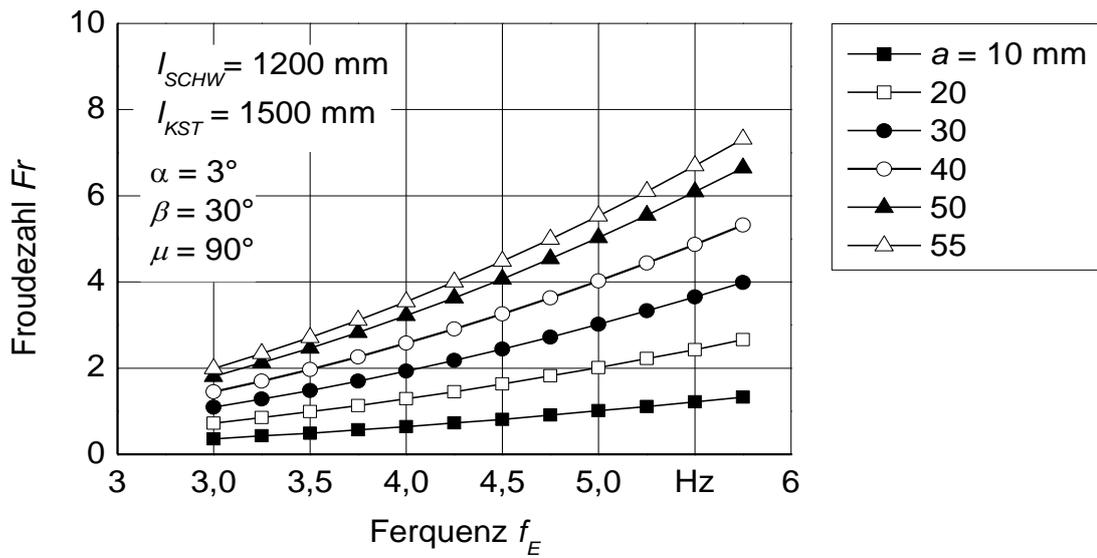


Bild 23: Froudezahl Fr des Vorbereitungsbodens in Abhängigkeit von der Frequenz f_E

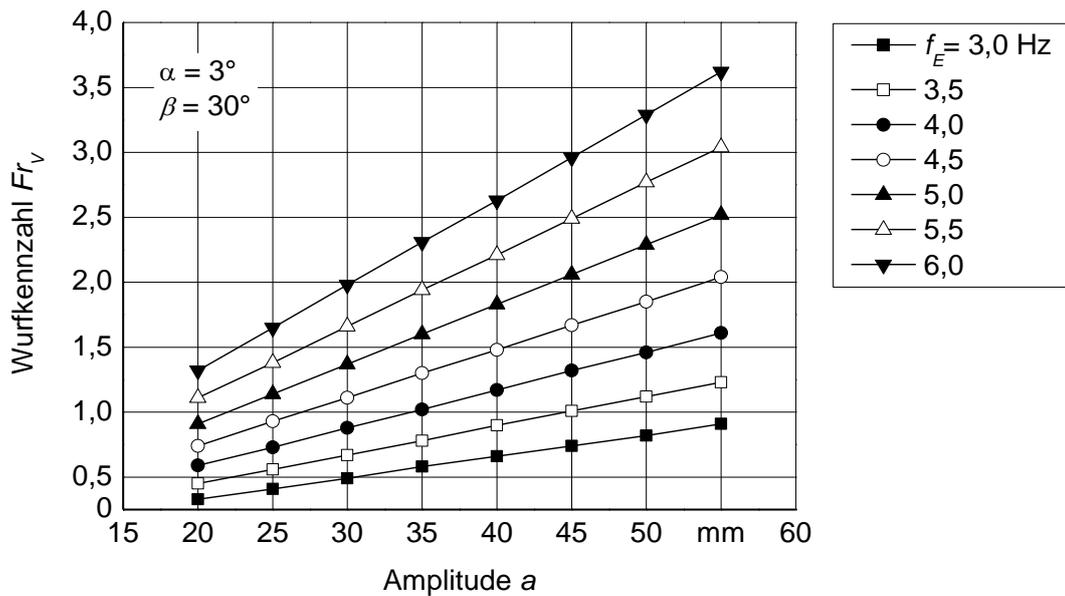


Bild 24: Wurfkennzahl Fr_V des Vorbereitungsbodens in Abhängigkeit von der Amplitude a

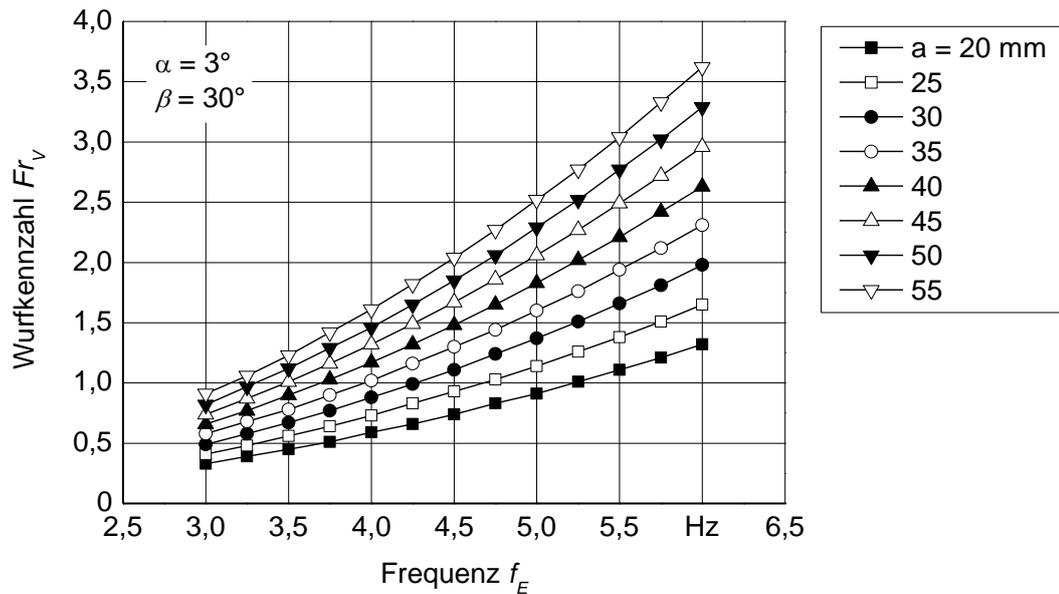


Bild 25: Wurfkennzahl Fr_V des Vorbereitungsbodens in Abhängigkeit von der Frequenz f_E

In **Bild 26** ist der funktionale Zusammenhang von Frequenz und Amplitude bei konstanter Wurfkennzahl $Fr_V = 1$ aufgezeigt. Die Wurfkennzahl $Fr_V \geq 1$ beschreibt den Wert ab dem die Beschleunigung des Vorbereitungsbodens gleich der Erdbeschleunigung ist bzw. überschreitet und dadurch ein Wurf in der Förderung des Gutes auf dem Vorbereitungsboden eintritt.

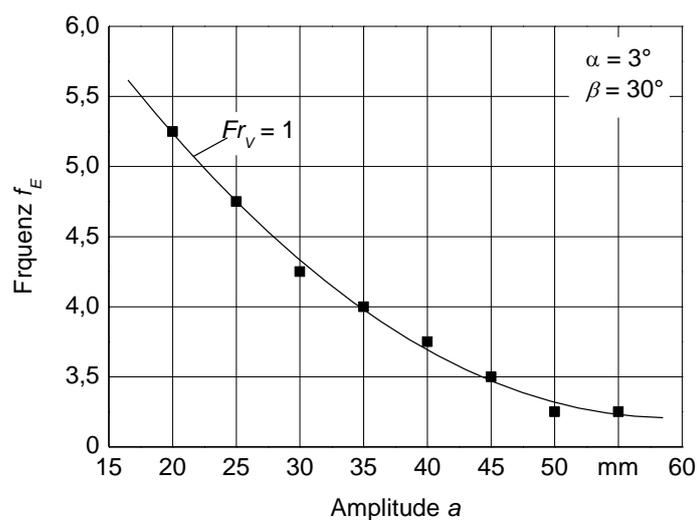


Bild 26: Frequenz f_E in Abhängigkeit von der Amplitude a bei der Wurfkennzahl $Fr_V = 1$

3.2 Bewegung der Einzelmasse auf dem Vorbereitungsboden

3.2.1 Förderung

Für die Beschreibung der Bewegungsvorgänge auf dem Vorbereitungsboden wird eine Einzelmasse im Koordinatensystem (ξ, η) betrachtet, **Bild 27**. Das Koordinatensystem (ξ, η) ist bezogen auf einen Vorbereitungsboden mit einer Neigung α , der mit einem Schwingungswinkel β angeregt wird. Das Koordinatensystem (ξ, η) führt dabei Relativbewegungen gegenüber dem ortsfesten Koordinatensystem (x, y) aus.

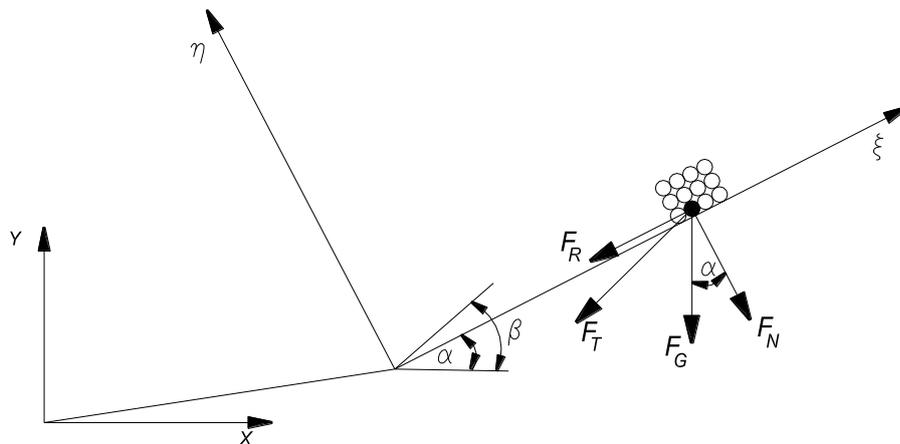


Bild 27: Kräfte an einem Einzelteilchen im Haufwerk mit ortsfestem Koordinatensystem (x, y) und dem mitbewegten Relativsystem (ξ, η) , nach [5,6]

Auf die Einzelmasse im Haufwerk und auf die mitbewegte Unterlage wirken folgende Kräfte:

Gewichtskraft:

$$F_G = m_K \cdot g \quad (54)$$

Reibungskraft:

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (55)$$

Trägheitskraft:

$$F_T = -m_K \cdot \dot{v} \quad (56)$$

Die Bewegung der Einzelmasse auf einer schwingenden Unterlage im (ξ, η) -System wird durch folgende Gleichungen beschrieben [5, 6]:

$$m_K \cdot \frac{d}{dt^2} \xi = -F_R - F_T \cos(\beta - \alpha) - F_G \sin \alpha \quad (57)$$

$$m_K \cdot \frac{d}{dt^2} \eta = -F_N - F_T \sin(\beta - \alpha) - F_G \cos \alpha \quad (58)$$

Die Reibungszahl μ lt. Gl. (55) wird entsprechend für Haft- und Gleitreibung eingesetzt [5,6,41]. Außerdem wird eine Ersatz-Reibungszahl μ' lt. Gl. (62) verwendet, die den Einfluss des Stufenprofils vom Vorbereitungsboden berücksichtigt [6].

Die Betrachtung der Ersatz-Reibungszahl durch die auf die Einzelmasse wirkenden Kräfte zeigt **Bild 28**.

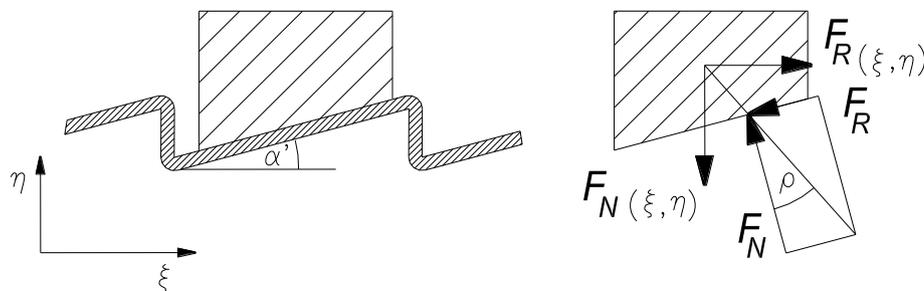


Bild 28: Kräfte an einer Einzelmasse zur Bestimmung der Ersatz-Reibungszahl [6]

Die Ersatz-Reibungszahl wird nach Beck [6] durch die folgenden Gleichungen bestimmt:

$$\Sigma F_{\xi} : F_{R(\xi,\eta)} - F_R \cos \alpha' - F_N \sin \alpha' = 0 \quad (59)$$

$$\Sigma F_{\eta} : -F_{N(\xi,\eta)} - F_R \sin \alpha' + F_N \cos \alpha' = 0 \quad (60)$$

wobei,

$$F_{R,\alpha'} = \mu' \cdot F_N \quad (61)$$

$$\mu'_{(\xi,\eta)} = \frac{\mu \cos \alpha' + \sin \alpha'}{\cos \alpha' - \mu \sin \alpha'} = \frac{F_{R(\xi,\eta)}}{F_{N(\xi,\eta)}} \quad (62)$$

Die Ergebnisse dieser Gleichungen wurden von Beck [6] in grafischer Form dargestellt, **Bild 29**.

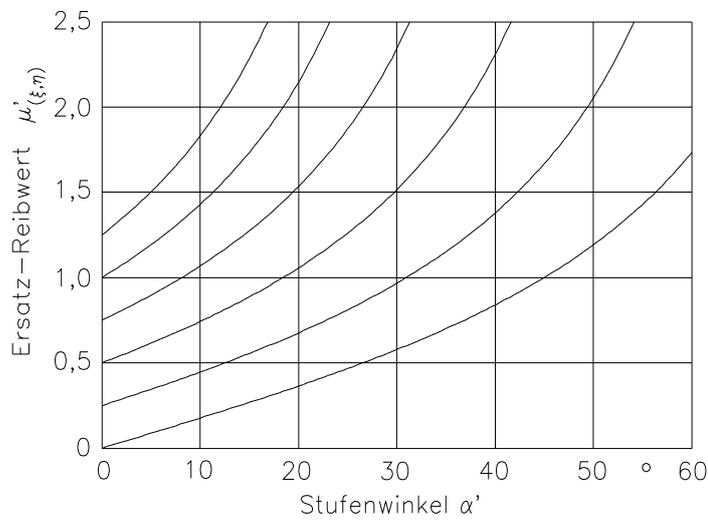


Bild 29: Abhängigkeit der Ersatz-Reibungszahl $\mu'_{(\xi,\eta)}$ vom Stufenwinkel α' des Vorbereitungsbodens, nach [6]

Die Bewegung des Gutes auf dem Vorbereitungsboden wird in Ruhephase, Gleitphase und Wurfphase unterteilt [5,6,11], **Bild 30**. Während der Ruhephase findet keine Relativbewegung zwischen der Unterlage und dem Gut statt. Die Geschwindigkeit des Vorbereitungsbodens wird in dieser Phase vollständig auf das Reinigungsgut übertragen. Während der Gleit- und der Wurfphase wird das Gut auf eine bestimmte Länge relativ zum Vorbereitungsboden bewegt.

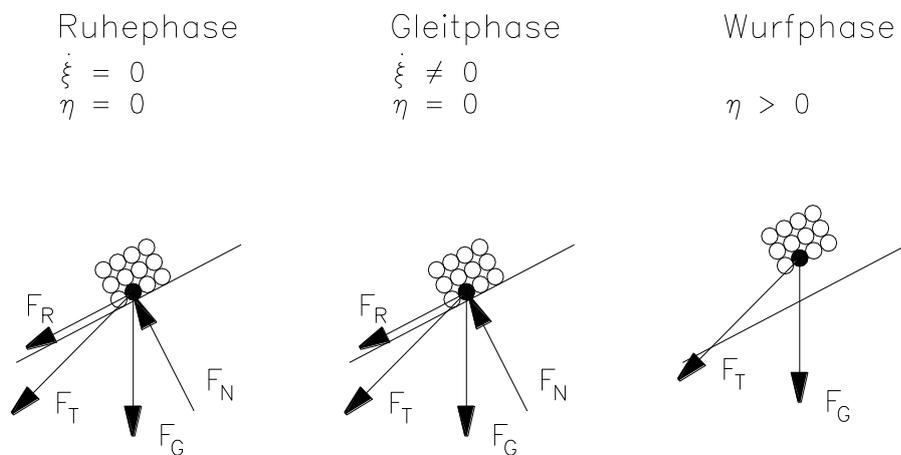


Bild 30: Schematische Darstellung der Kräfte auf eine Einzelmasse während der Bewegungsphasen, nach [6]

Der vom Vorbereitungsboden auf das Gut übertragene Impuls wird durch die plastische Deformation der Gutschicht während des Abhebens und während des Aufpralls sehr stark aufgenommen. Infolgedessen wird die Bewegung des Gutes bei höheren Korndurchsätzen intensiver abgeschwächt. In der Praxis kann die maximal mögliche Fördergeschwindigkeit bei größeren Korndurchsätzen wegen der Eigenschaften des Gutes wie Elastizität und Reibungsbeiwert, nur durch eine Erhöhung der mechanischen Anregung nicht erreicht werden. Die maximale mögliche Fördergeschwindigkeit wird bei kleineren Korndurchsätzen bzw. geringeren Schichthöhen des Gutes erreicht [12].

3.2.2 Entmischung

Entmischung ist ein Vorgang, der in der Schicht des Reinigungsgutes infolge der unterschiedlichen Eigenschaften der Gutpartikeln auf dem Vorbereitungsboden erfolgt. Das Volumen des Reinigungsgutes wird im Wesentlichen von den NKB-Partikeln gebildet. Um eine Lageänderung der Körner in der NKB-Schicht zur Entmischung hervorzurufen, müssen die Bindekräfte des Haufwerkes überwunden werden. Dies geschieht durch dynamische Kräfte während der Schwingförderung [11]. Durch die Gutauflockerung wird ein Sinkvorgang ermöglicht, bei dem die Körner durch die Schwerkraft innerhalb der NKB-Schicht nach unten bewegt werden [6].

Die für diese Entmischung notwendige Zeit wird mit der Hilfe der Summen-Kurve nach Beck [73] mathematisch beschrieben. **Bild 31.**

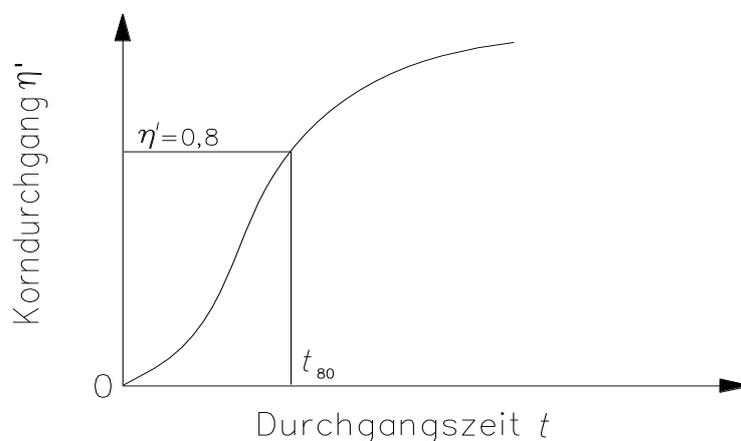


Bild 31: Qualitativer Verlauf der Entmischung, nach [73]

Die Durchgangszeit nimmt mit zunehmendem Korndurchsatz aufgrund der Erhöhung der Schichtdicke zu. Die Gleichung der Entmischungsfunktion $\eta'(t)$ ist in Gl. 63 wiedergegeben [73].

$$\eta'(t) = 1 - \frac{t \cdot b}{(b-a)} \cdot \exp\left(\frac{-a}{c+t} \cdot t^{(c+t)}\right) - \frac{t \cdot b}{(b-a)} \cdot \exp\left(\frac{-b}{c+t} \cdot t^{(c+t)}\right) \quad (63)$$

wobei:

η' - Korndurchgang

t - Zeit

a, b, c - Regressionskonstanten

Für den Erfolg des Entmischungsvorganges wurde die Durchgangszeit t_{80} von Baader [37] als technologischer Kennwert verwendet, bei der 80% der aufgegebenen Kornmasse abgeschieden sind. In [5,8] wird die Abscheidelänge l_{80} statt der Durchgangszeit t_{80} für die Bewertung der Entmischung verwendet, wobei auch 80 % der Körner abgeschieden wurden.

Die NKB-Schichthöhe H_{NKB} hat auch einen Einfluss auf die Entmischung. Sie bestimmt den Weg, den das Korn zurücklegen muss, bis es vollständig von der NKB entmischt und zur Oberfläche des Vorbereitungsbodens gelangt ist. Die Erhöhung der NKB-Schicht führt zu überproportionaler Verschlechterung der Entmischung [11]. Die Entmischung wird dann besser, wenn die Fördergeschwindigkeit auf dem Vorbereitungsboden höhere Werte erreicht und dabei die für die Entmischung notwendige Zeit infolge reduzierter Schichthöhe schneller als die Verweildauer des Reinigungsgutes abnimmt [12].

4 VERSUCHSSTAND FÜR UNTERSUCHUNGEN AM VORBEREITUNGSBODEN

Für die Untersuchung der Förderung und der Entmischung von Reinigungsgut auf dem Vorbereitungsboden wurde in Hohenheim ein neuer Versuchsstand aufgebaut. Besondere Rolle spielen dabei die Untersuchungsmöglichkeiten zur Auswirkung der kinematischen Parameter und der Geometrie des Vorbereitungsbodens als ungleichförmig übersetzendes Koppelgetriebe auf die Förderung und Entmischung.

Der Vorbereitungsboden-Versuchsstand hat relativ große Verstellmöglichkeiten, so dass die Arbeitsqualität auch in Grenzbereichen und bei großen Längsneigungen untersucht werden kann, **Tabelle 2**.

Tabelle 2: Parameter und konstruktive Größen am Versuchsstand für Untersuchungen des Vorbereitungsbodens

Parameter	
Frequenz f_E	3 – 6 Hz
Amplitude a	0 – 55 mm
Neigung α	-9 – +15°
Hangneigung α_H	-12 – +12°
vorderer Schwingungswinkel β_V	-9 – +42°
hinterer Schwingungswinkel β_H	-9 – +42°
Übertragungswinkel ψ	60 – 120°
Konstruktive Größen	
Länge l_{VB}	1880 mm
Breite b_{VB}	500 mm
Länge der vorderen Schwinge l_{SWV}	600 – 1200 mm
Länge der hinteren Schwinge l_{SWH}	600 – 1200 mm
Ausführung und Gestaltung	
Oberfläche	Stufen 10 mm x 30 mm
Drahtrechen	mit und ohne

Der Vorteil eines stationären Versuchsstandes im Labor ist die Unabhängigkeit bei der Versuchsdurchführung von Erntezeiträumen, von Stoffeigenschaftsänderungen

sowie von Klimaschwankungen auf dem Feld, wodurch gute Reproduzierbarkeit erreicht wird.

In **Tabelle 3** ist der Wurfkennzahlenbereich bei den Vorbereitungsbodenuntersuchungen in Abhängigkeit von Neigung und Schwingungswinkel bei der Amplitude $a = 30 \text{ mm}$ und Frequenz $f_E = 5 \text{ Hz}$ dargestellt.

Tabelle 3: Bereich der Wurfkennzahl Fr_V bei den Untersuchungen des Vorbereitungsbodens

Hang- neigung $\alpha_H, ^\circ$	Neigung $\alpha, ^\circ$	Schwingungswinkel $\beta, ^\circ$											
		9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42
12	15								0,81	0,97	1,12	1,27	1,42
9	12								0,95	1,11	1,26	1,40	1,54
6	9							0,94	1,10	1,24	1,39	1,53	
3	6						0,94	1,09	1,23	1,38	1,52		
0	3					0,93	1,08	1,23	1,37	1,51			
-3	0			0,93	1,08	1,23	1,37	1,51					
-6	-3			0,93	1,08	1,23	1,37	1,51					
-9	-6		0,94	1,09	1,23	1,38	1,52						
-12	-9	0,94	1,10	1,24	1,39	1,53							

4.1 Vorbereitungsboden

Die Arbeitsbreite des Vorbereitungsbodens beträgt $b_{VB} = 500 \text{ mm}$ und entspricht im Mährescher dem Siebbereich zwischen drei Hangleisten. Die Länge des Vorbereitungsbodens beträgt $l_{VB} = 1880 \text{ mm}$ und die Oberfläche ist mit dem Stufenprofil von $30 \times 10 \text{ mm}$ ausgestattet.

Der Vorbereitungsboden ist an vier Schwingen im Rahmen aufgehängt, **Bild 32**. Neben den kinematischen Parametern können die Längen der Schwingen und der Kurbelstange (Koppel) sowie der Übertragungswinkel ψ zwischen Schwinge und Kurbel-

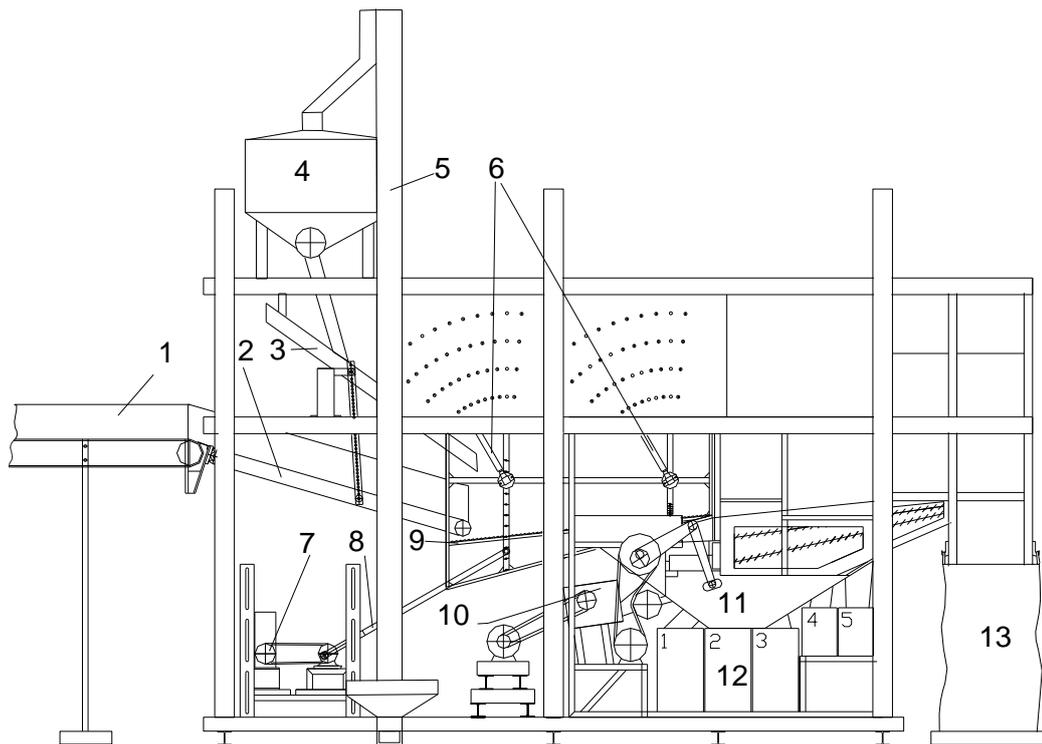
stange verändert werden. Darüber hinaus lässt sich bei dem Versuchsstand der Schwingungswinkel der vorderen und der hinteren Schwingen des Vorbereitungsbodens unabhängig von einander einstellen. Diese Verstellmöglichkeiten erlauben es auch unterschiedliche Beschleunigungen entlang des Vorbereitungsbodens zu untersuchen.

Als Grundeinstellung des Vorbereitungsbodens wurde eine im Mähdrescher übliche geringe Neigung von $\alpha = 3^\circ$ ausgewählt. Der Schwingungswinkel wurde auf $\beta = 30^\circ$ eingestellt, dies entspricht dem Schwingungswinkel der meisten ausgeführten Vorbereitungs- und Siebkästen. Die Längen der Schwingen sind $l_{SW} = 1200$ mm. Die Pleuellstange ist $l_{KST} = 1500$ mm lang ausgeführt.

Durch Veränderung der Gestelllager kann die Neigung des Vorbereitungsbodens in Stufen von 3° geändert werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Mähdrescher bis 12° Hangneigung einsetzbar sein sollen [12]. Bei Fahrt in Falllinie hangaufwärts und hangabwärts ändert sich dabei die Neigung des Vorbereitungsbodens von $\alpha = -9^\circ$ bis $\alpha = 15^\circ$, Tabelle 2. Der Schwingungswinkel kann in 3° Schritten variiert werden. Am Versuchsstand kann durch die Veränderung der Anlenkung der Pleuellstange der Übertragungswinkel ebenfalls in 3° Schritten geändert werden. Dies ermöglicht, dass der Übertragungswinkel von $\psi = 90^\circ$ zwischen der Schwinde und der Pleuellstange bei den Untersuchungen zur Neigung unverändert bleibt.

Bei der Verstellung der Vorbereitungsbodenneigung wird die Fallstufenhöhe zwischen dem Vorbereitungsboden und dem Obersieb immer auf konstant 185 mm Höhe gehalten.

Um eine konstante Überlappung zwischen dem Vorbereitungsboden und dem Siebkasten im Versuchsstand zu gewährleisten, wird bei Veränderungen der geometrischen Parameter die Abwurfkante des Vorbereitungsbodens in Mittelstellung der Schwingweite des Vorbereitungsbodens mit einer speziellen Einstelleinrichtung festgehalten. Bei der Grundeinstellung steht die Pleuellstange parallel zu den Schwingen unter gleichem Winkel β nach oben.



- | | |
|--------------------|------------------------|
| 1 Förderband | 8 Kurbelstange |
| 2 Zuführförderband | 9 Vorbereitungsboden |
| 3 Rutsche | 10 Querströmgebläse |
| 4 Korndosieranlage | 11 Reinigungsanlage |
| 5 Elevator | 12 Auffangbehälter 1-5 |
| 6 Schwinge | 13 Auffangsack |
| 7 Kurbelantrieb | |

Bild 32: Schematische Darstellung des Versuchsstandes für Untersuchungen am Vorbereitungsboden

Um den Förder- und Entmischungsprozess während des Versuches zu beobachten und mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufnehmen zu können, sind die Seiten des Vorbereitungskastens in Plexiglas ausgeführt, **Bild 33**. Der Randeinfluss der Plexiglas-Seitenwände kann durch die Arbeitsbreite von 500 mm vernachlässigt werden.



Bild 33: Versuchsstand für Untersuchungen am Vorbereitungsboden

4.2 Antriebe

Der Vorbereitungsboden wird durch einen Getriebe-Motor, eine Kurbel und die Kurbelstange bewegt. Die Amplitude a des Vorbereitungsbodens kann von 20 bis 55 mm stufenlos verstellt werden. Die Einstellung der Schwingungsfrequenz $f_E = 3 - 6$ Hz erfolgt über die Drehzahl des Getriebe-Motors. Der Antrieb des Querstromgebläses und des Siebkastens erfolgt durch Elektromotoren mit fest eingestellten Drehzahlen.

4.3 Zuführeinrichtung

Die Zuführung der NKB erfolgt über ein 14 m langes Förderband. Eine Länge von 8 m des Förderbandes wird für die Versuche mit NKB von Hand belegt. Dem Vorbereitungsboden wird das Gut mit einer Geschwindigkeit von $v_{FB} = 0,5$ m/s zugeführt. Um die NKB auf den Vorbereitungsboden zu übergeben, wurde ein zusätzliches Zuführförderband mit einer Länge von 2 m eingebaut. Die Fallstufenhöhe zwischen dem zweiten Förderband und dem Vorbereitungsboden kann dadurch auf beliebige Höhe eingestellt werden.

4.4 Korndosieranlage

Die Korndosieranlage dient der gleichmäßigen Dosierung von Körnern auf die NKB-Schicht, die durch das Förderband dem Vorbereitungsboden zugeführt wird. Die sorgfältige Aufgabe der Körner auf die NKB-Schicht hat eine hohe Bedeutung, weil dadurch eine unerwünschte Entmischung beim Auflegen der Körner vermieden wird.

Die Korndosieranlage besteht aus Dosierwalze, Getriebemotor, Vorratsbehälter, optischem Sensor und einem Zeitrelais. Der Sensor erkennt die Oberflächenfarbe von NKB und gibt ein Signal zum Einschalten des Antriebsmotors, wenn die NKB-Schicht den Vorbereitungsboden erreicht. Die Zeitverzögerung zwischen dem Förderungsbeginn des mit NKB belegten Bandes und dem Übergabepunkt der Kurzstrohschicht auf den Vorbereitungsboden wird durch ein Zeitrelais eingestellt. Nach Ende der Zuführung wird der Antriebsmotor der Korndosieranlage automatisch abgeschaltet.

Die Einstellung des Korndurchsatzes zwischen $\dot{m}_K = 2 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ und $\dot{m}_K = 7,5 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ erfolgt über die Dosierung der Kornmenge. Die Kornmenge an der Korndosieranlage kann durch die Drehzahländerung der Dosierwalze variiert werden.

Bei Übergabe der NKB-Schicht vom Förderband auf den Vorbereitungsboden kann es zu einem Aufklappen der Gutschicht kommen. Auf der Gutschicht liegende Körner können hierbei in den Spalten weit die Schicht durchdringen. Um die Auswirkung dieses „Harmonika“-Effektes bzw. der unerwünschten Entmischung an der Übergabestelle auf die Versuchsergebnisse zu vermeiden, werden die Körner in vorliegender Arbeit auf die NKB-Schicht nach der Übergabe am Anfang des Vorbereitungsbodens und nicht auf die NKB-Schicht auf dem Förderband dosiert. Dies wird durch die Rutsche 3 der Korndosieranlage 4 ermöglicht, Bild 32. Diese Art der Zuführung simuliert die Zuführung des Gutes im Mährescher und gewährleistet praxisnahe Versuchsergebnisse.

4.5 Verfahren zur Messung der Fördergeschwindigkeit

Zur Messung der Fördergeschwindigkeit wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera verwendet. Die Aufnahmefrequenz wurde nach Vorversuchen auf 250 Bilder pro Sekunde festgelegt. Bei der Analyse der Versuchsaufnahmen wurden 10 Gutteilchen als Referenz in der Gutschicht während der Förderung beobachtet. Dadurch konnte die durchschnittliche Fördergeschwindigkeit des Reinigungsgutes berechnet werden. Diese Methode gewährt zwar eine hohe Genauigkeit bei der Auswertung der ermittel-

ten Daten, der Aufwand bei der Auswertung ist jedoch hoch. Es wurde deshalb ein weiteres Verfahren zur indirekten Fördergeschwindigkeitsmessung aufgebaut. Diese Messeinrichtung besteht aus einem parallel zur Plexiglaswand umlaufenden Kontrollriemen mit farbigen Markierungen. Während des Versuches wird die Riemengeschwindigkeit über einen stufenlos einstellbaren Getriebemotor mit der Fördergeschwindigkeit des Gutes auf dem Vorbereitungsboden in Einstimmung gebracht. Danach wird über die Drehzahl die Riemenumfangsgeschwindigkeit bestimmt. Um die Fehlerquote bei den Messungen möglichst gering zu halten, werden die Messungen immer von ein und derselben Person durchgeführt. Dieses Messverfahren wurde bereits von Freye, Beck, Rochell, Peschl [5,6,11,35] verwendet.

Während der Versuche wurden beide Methoden verwendet. Da jedoch die Auswertung mittels der Hochgeschwindigkeitskamera sich als zuverlässigere und genauere Messmethode gezeigt hat, wurde dieses Messverfahren trotz des höheren Aufwandes bevorzugt.

4.6 Messverfahren zur Ermittlung der Entmischung

Als indirektes Messverfahren zur Ermittlung der Entmischung wurde hinter dem zu untersuchenden Vorbereitungsboden eine serienmäßige Reinigungsanlage eines Mähreschers verwendet. Damit wird es ermöglicht, die Funktion des Vorbereitungsbodens unter praxisnahen Bedingungen zu betrachten.

Die eingebaute Reinigungsanlage wurde auf eine Breite von 500 mm halbiert. Der Siebkasten der Reinigungsanlage hat ebenfalls Öffnungen mit Plexiglas in den Seitenwänden. Die Länge der Siebe beträgt 1,3 m und die Länge der Überkehr ist 0,5 m.

Zur Erzeugung des Luftstromes wurde ein Querstromgebläse statt des ursprünglichen Radialgebläses eingesetzt. Da es sich beim Querstromgebläse um eine zweidimensionale ebene Strömung durch den Rotor handelt, kann dessen Breite als dritte Dimension frei gewählt werden [74]. Dies hat bei der Verkleinerung der Kanalbreite des Versuchsstandes eine wichtige Rolle gespielt, da der geringe Durchmesser des Querstromgebläses es ermöglicht, den notwendigen Platz für die Einstellungen der Neigung vom Vorbereitungsboden im Schwingungsrahmen zu gewinnen.

Um einen gleichmäßigen Luftstrom gewährleisten zu können, muss ein Freiraum von etwa 80 % des Durchmessers oberhalb des Querstromgebläses vorhanden sein [75].

Um dies zu erreichen, wurde das Querstromgebläse um 7° nach unten geneigt.

Um die Arbeitsqualität des Vorbereitungsbodens mittels der Reinigungsanlage über die Sieblänge beurteilen zu können, wurde der Siebkasten über die Länge in vier Abscheideabschnitte unterteilt. Damit die Luftströmung dabei nicht gestört wird, wurden auf dem Boden des Siebkastens vier Bleche mit kleiner Neigung zum Siebkastenboden eingeschweißt. Sie ermöglichen, dass die Körner in vier Abscheidebehältern über die Länge des Siebkastens aufgefangen werden. Im fünften Abscheidebehälter wird die Überkehr aufgefangen. Der Siebübergang wird in einem Auffangsack am Ende der Siebe gesammelt.

4.6.1 Kalibrierung der Reinigungsanlage

Um die Entmischungsergebnisse durch die als indirektes Messverfahren verwendete Reinigungsanlage ermitteln zu können, mussten die Einstellungen der Reinigungsanlage bestimmt und anschließend konstant gehalten werden.

Ausgehend von Untersuchungsergebnissen zur Anpassung des Querstromgebläses an einen Mähdrescher von Grobler [74] wurde zuerst die Gebläsedrehzahl $n_G = 1000 \text{ min}^{-1}$ für die Versuche zur Wahl der Richtung der Luftströmung in der Reinigungsanlage ausgewählt. Die Richtung der Luftströmung wurde durch die Leitbleche geändert und nach der Auswertung die günstigste Einstellung festgelegt.

In **Bild 34** sind die Kornverluste in Abhängigkeit von der Gebläsedrehzahl bei drei verschiedenen Sieböffnungen für Obersieb, Siebverlängerung und Untersieb dargestellt.

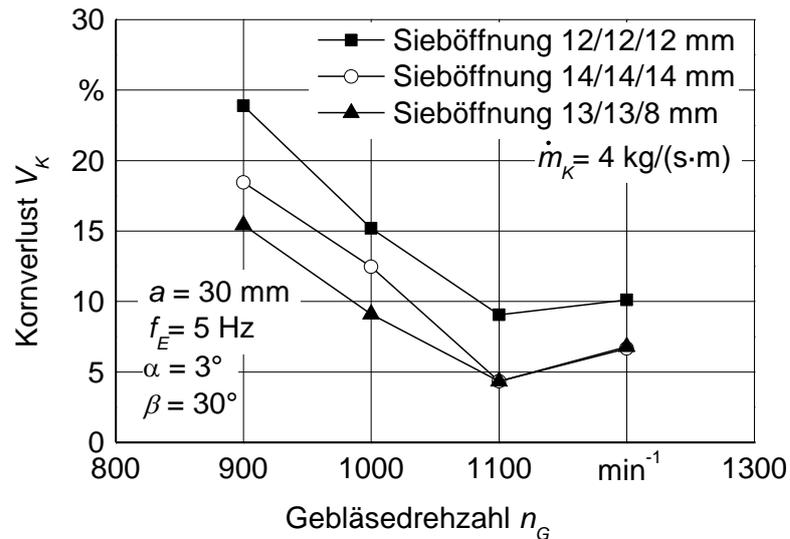


Bild 34: Kornverlust in Abhängigkeit von der Gebläsedrehzahl bei verschiedenen Sieböffnungen

Bild 34 zeigt, dass der Kornverlust seine niedrigsten Werte bei $n_G = 1100 \text{ min}^{-1}$ bei allen Sieböffnungen erreicht. Nach den Vorversuchen wurde die Sieböffnung 13/13/8 mm ausgewählt und bei den weiteren Versuchen konstant gehalten.

4.6.2 Luftströmungsfeld der Reinigungsanlage

Damit die Reinigungsanlage sichere Ergebnisse als Messverfahren liefert, wurde die Luftströmung durch das Obersieb überprüft. Die Luftverteilung über die Sieblänge und in der Fallstufe wurde durch Luftgeschwindigkeitsmessungen ermittelt. Das Strömungsfeld der Reinigungsanlage hängt einerseits von der Luftströmung in der Fallstufe und andererseits von der Luftströmung durch das Sieb ab. Diese zwei Strömungen beeinflussen sich gegenseitig [9]. **Bild 35** zeigt das Luftströmungsfeld durch das Sieb der Reinigungsanlage.

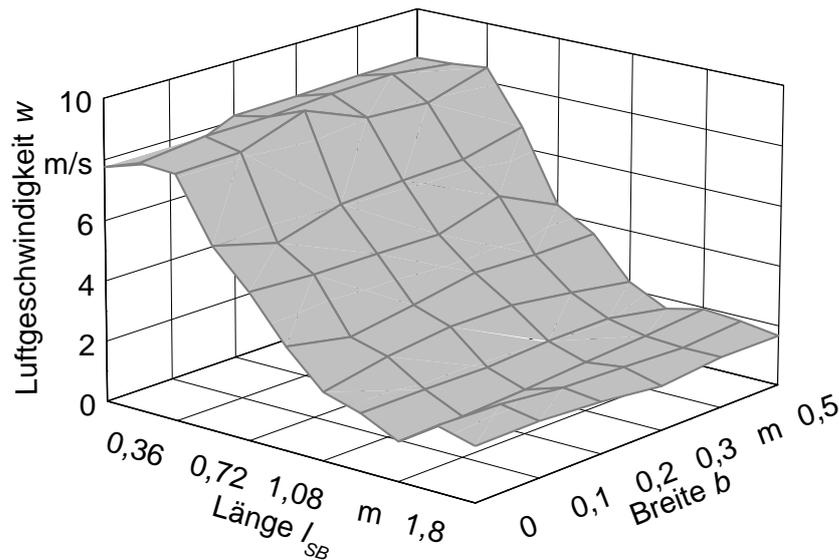


Bild 35: Luftströmungsfeld auf dem Obersieb

Die Luftverteilung über die Sieblänge ist abfallend. Die Luftgeschwindigkeit am Anfang des Siebes liegt im Bereich von 6 – 9 m/s und am Ende des Siebes etwa bei 2 m/s. Das wirkt sich bei hohen Durchsätzen günstig aus, da am Anfang des Siebes die starke Auflockerung der Gutmatte stattfindet und am Ende des Siebes die freien Körner nicht ausgeblasen werden sollen [8,9,73].

4.6.3 Reproduzierbarkeit

In zwei Versuchsreihen wurde bei gleichen Einstellungen des Versuchsstandes die Reproduzierbarkeit überprüft. Die Verlustkurven und Abscheidelängen unterscheiden sich kaum, **Bild 36, 37**. Dies zeigt, dass mit dem Versuchsstand eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse erzielt wird.

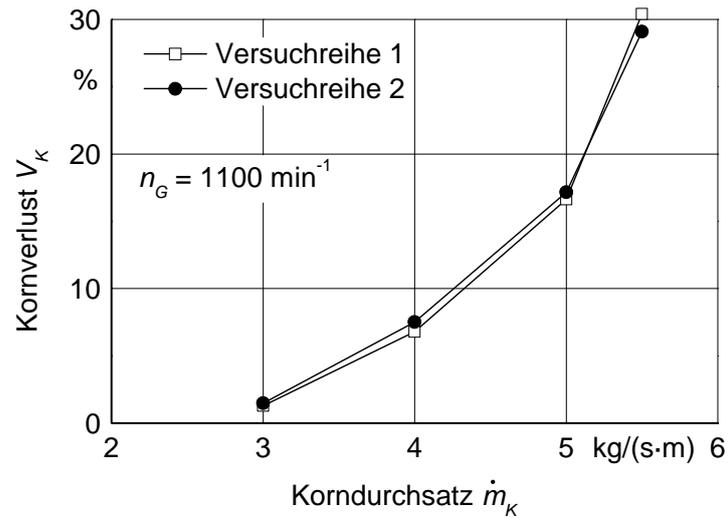


Bild 36: Kornverlust in Abhängigkeit vom Korndurchsatz

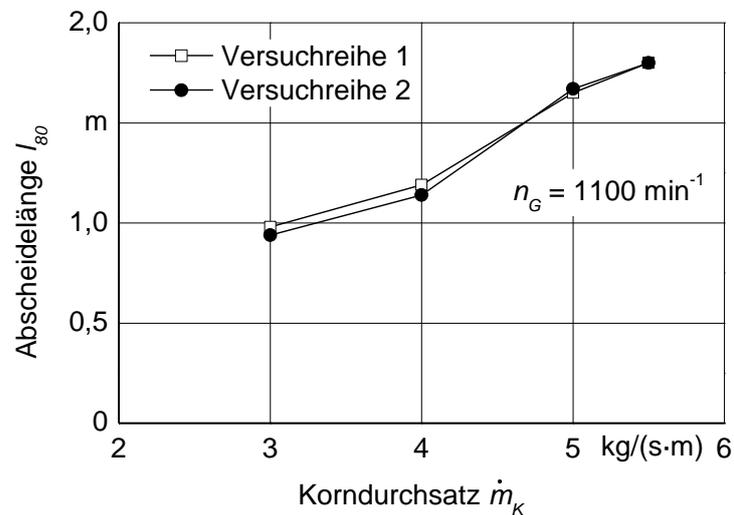


Bild 37: Abscheidelänge l_{80} in Abhängigkeit vom Korndurchsatz

Da die Reinigungsanlage in dieser Arbeit nur als Auswertungshilfsmittel verwendet wird, wurden hohe Werte der Kornverluste akzeptiert. Als Bewertungskriterium für die Entmischung wird die Abscheidelänge l_{80} verwendet [5,8].

5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

5.1 Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Versuche wird eine definierte Menge des Strohhäcksels auf vier Längsabschnitte mit einer Einzellänge von jeweils 2 m auf das Förderband von Hand aufgelegt. Damit die Zusammensetzung des Versuchsgutes während aller Versuchsreihen möglichst konstant bleibt, wird für jeden Versuch 1/3 ungebrauchtes und 2/3 gebrauchtes Strohhäcksel verwendet. Gebrauchtes Strohhäcksel ist der Siebübergang des Versuchsgutes, der zur Ermittlung der Reinigungsverluste nach dem Versuch in einem Nachreiniger gereinigt wird. Das Korn wird während des Versuches durch die Dosieranlage zeitgesteuert der Rutsche zugeführt. Bei Versuchen zur Beeinflussung der Schichtung wurden die Körner unter sowie zwischen 1/3 neuem NKB und 2/3 gebrauchtes NKB von Hand aufgelegt.

Der Versuch ist in drei Phasen geteilt:

1. Einlaufphase
2. stationäre Phase
3. Auslaufphase

Bei den Versuchen sind die Dauer der Ein- und Auslaufphase des Gutes von der Fördergeschwindigkeit des Gutes auf dem Vorbereitungsboden abhängig. Um konstante Bedingungen während aller Versuche gewährleisten zu können, wurde die Geschwindigkeit des Zuführbandes auf $v_{FB} = 0,5$ m/s eingestellt und beibehalten. Bei 8 m belegtem Förderband resultiert daraus eine Versuchsdauer von 16 Sekunden.

Nach jedem Versuch wurden die Inhalte der fünf Auffangbehälter gewogen. Die Fraktionen wurden nachgereinigt und zur Bestimmung der Kornabscheidung, des Restkornes und der Reinheit entlang der Siebe des Reinigungsanlage-Messverfahrens nochmals gewogen. Die Körner des Siebdurchganges wurden anschließend mittels einer Saatgutreinigung von Bruchkorn getrennt und wieder verwendet.

Das im Auffangsack gesammelte Gut wird mit einer serienmäßigen Reinigungsanlage mit niedriger Gebläsedrehzahl nachgereinigt. Dadurch werden die nichtabgeschiedenen Körner von NKB getrennt. Dieser Kornanteil im Siebübergang beinhaltet jedoch noch Halmknoten. Deshalb wird er vor dem Wiegen zur Bestimmung der

Kornverluste noch einmal in einem Nachreiniger gereinigt. Nach dem Wiegen dieses Kornanteiles werden die Kornverluste berechnet.

5.2 Auswertungskriterien

Die in Hohenheim zur Beurteilung der Versuchsergebnisse verwendeten Auswertungskriterien wurden in der Arbeit von Zhao [9] genau beschrieben. Spittel [12] verwendet beim Auftragen der Versuchsergebnisse über die x -Achse den NKB-Durchsatz anstelle des Korndurchsatzes. Da in der Praxis in der Regel der Korndurchsatz \dot{m}_K für die Bestimmung der Arbeitsqualität der Reinigungsanlage verwendet wird, wurde dies in dieser Arbeit für die Auswertung verwendet. Da das Kornstrohverhältnis mit 70 : 30 während der Versuche konstant bleibt, ist eine leichte Umrechnung möglich.

Die Fördergeschwindigkeit v_{GUT} wird durch experimentell gewonnene Daten berechnet. Für die Auswertung der Entmischung wird die Abscheidelänge l_{80} in dieser Arbeit eingesetzt. Die Abscheidelänge l_{80} ist die Länge des Siebes bei der 80 % der Körner abgeschieden werden. Außerdem wurden die Versuche hinsichtlich Kornverluste, Kornabscheiderate und Restkorn ausgewertet.

Der Kornverlust V_K ist der Massenanteil der nicht in der Reinigungsanlage abgeschiedenen Körner an der gesamten zugeführten Kornmasse, Gl. (64).

$$V_K = \frac{m_{K,V}}{m_K} \cdot 100\% \quad (64)$$

wobei:

$m_{K,V}$ - nicht abgeschiedene Kornmasse

m_K - gesamte Kornmasse

Die Kornabscheiderate $A_K(i)$ ist der Anteil der abgeschiedenen Kornmasse im Auffangbereich i von der gesamten Kornmasse.

$$A_K(i) = \frac{m_K(i)}{m_K} \cdot 100\% \quad (65)$$

wobei:

$m_K(i)$ - abgeschiedene Masse im Auffangbereich (i) des Siebes

Das Restkorn $R(i)$ ist der Anteil der noch nicht abgeschiedenen Kornmasse zu der gesamten Kornmasse. Es wird mit 4 Auffangbereichen am Ende des Auffangbereiches (i) nach Gl. (66) berechnet.

$$R(i) = \frac{\sum_{i+1}^5 m_K(i) + m_{K,V}}{m_K} \cdot 100\% \quad (66)$$

6 VERSUCHSGUT

6.1 Versuchsguteigenschaften

Als Versuchsgut für die Untersuchungen wurden Weizenkörner und gehäckseltes Weizen-Stroh der Sorte „Dekan“ verwendet. Das Versuchsmaterial wurde in der Erntezeit 2004 eingelagert. Das Verhältnis zwischen NKB und Körner war bei den Versuchen 30 % zu 70 %, dies entspricht einer sehr hohen Belastung des Vorbereitungsbodens mit NKB. Gehäckseltes Weizen-Stroh (NKB) hat sich bei den Versuchen in Hohenheim bewährt [8,74].

Auf dem Vorbereitungsboden passieren die Körner eine wechselnd aufgelockerte und verdichtete NKB-Schicht während der Förderung, wobei kleinere NKB die Gitter aus Strohteilern ausfüllen und dadurch den Weg der Körner zur Oberfläche des Vorbereitungsbodens erschweren. Zum Verhaken neigendes Kurzstrohhäcksel verschlechtert ebenfalls die Auflockerung auf dem Vorbereitungsboden. Das NKB-Versuchsgut besteht aus Spreu, sperrigen Blättern, Knoten, Spindelteilen und Kurzstroh [5-9], **Bild 38**.

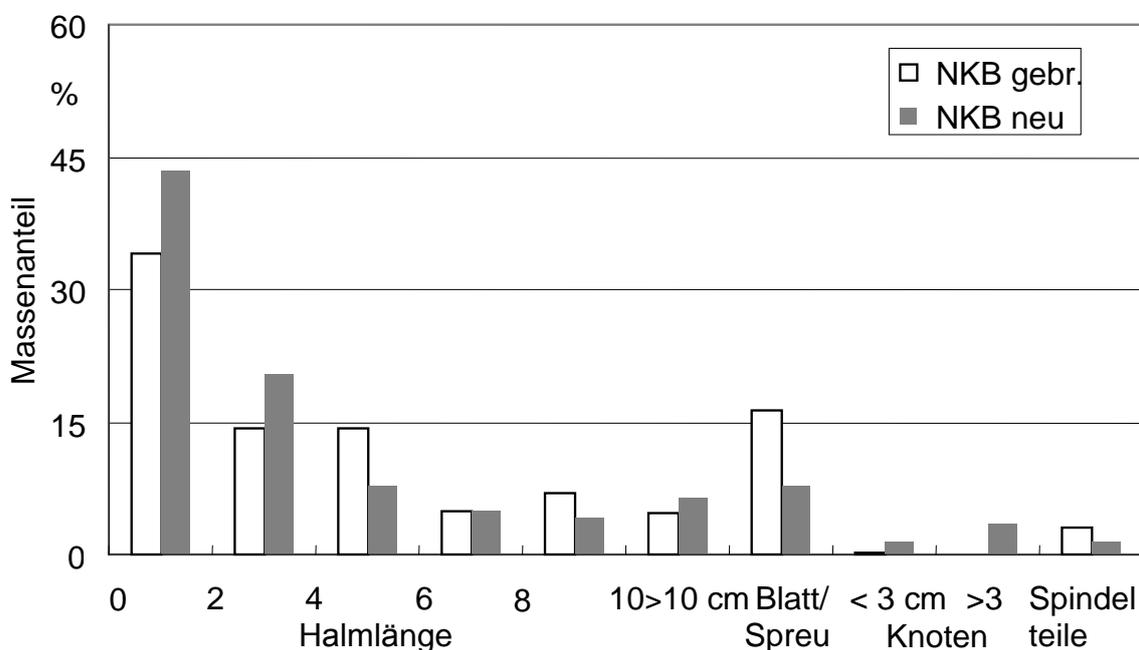


Bild 38: Zusammensetzung des untersuchten NKB-Versuchsgutes

Halmknoten haben annähernd die gleiche Masse wie die Körner. Den größten Anteil besitzt die Fraktion mit Halmlängen bis 2 cm.

Die Kornfraktion mit einem Tausendkorngewicht von 45,2 g hatte einen Feuchtigkeitsgehalt von 9,6 %, der NKB-Feuchtigkeitsgehalt betrug 9,3 %. Damit die Stoffeigenschaften des Versuchsgutes während der Versuche möglichst gleichmäßig gehalten werden, wurde das Versuchsgut vor jeder Versuchsreihe zur Anpassung über mehrere Tage in der Versuchshalle gelagert.

Die Schwebegeschwindigkeit des Gutes ist ein Kennwert, der zur Beurteilung der Guteigenschaften häufig verwendet wird. **Bild 39** zeigt die Schwebekennlinien des Versuchsgutes.

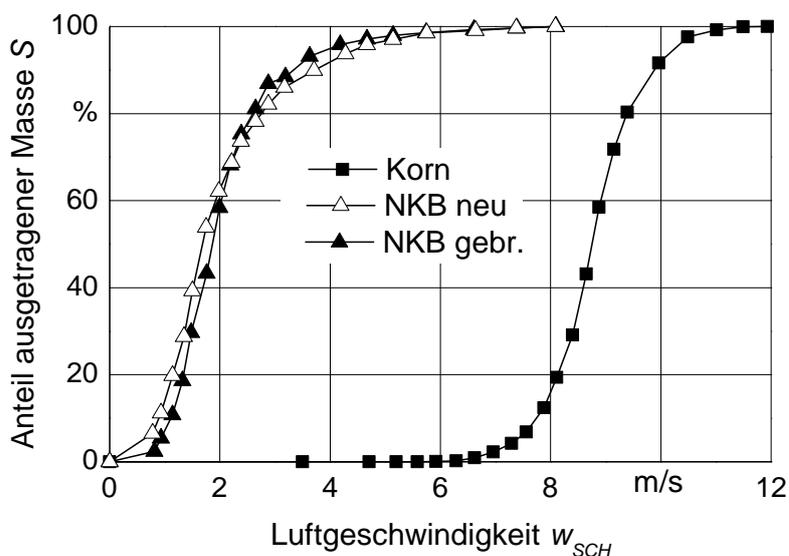


Bild 39: Schwebekennlinien des verwendeten Versuchsgutes

Die Schwebekennlinien von gebrauchten und ungebrauchten NKB unterscheiden sich nur geringfügig. Die mittlere Schwebegeschwindigkeit bei 50 % ausgetragener NKB liegt bei 1,8 m/s, für Weizenkorn bei 8,7 m/s.

7 VERSUCHSERGEBNISSE

7.1 Einfluss der Schichtung

Bei Untersuchungen zur Schichtung wurden drei Arten der Schichtung realisiert. Bei der Schichtung „Korn oben“ wurden die Körner von Hand auf die NKB-Schicht auf dem Zuführförderband gelegt. Bei der Schichtung „Korn unten“ wurden zuerst die Körner und dann die NKB-Schicht aufgelegt. Zusätzlich wurde die Variante „Korn geschichtet“ untersucht. Bei der Gutbelegung „Korn geschichtet“ wurde das Korn auf die unteren 1/3 NKB verteilt, die restlichen 2/3 NKB wurden auf die Kornschicht aufgelegt.

Die Kornverluste bei der Schichtung „Korn oben“ nehmen mit Zunahme des Korndurchsatzes stark zu, **Bild 40**. Mit zunehmendem Korndurchsatz vergrößert sich der Durchgangsweg des Kornes durch die NKB-Schicht. Als Folge erhöht sich der erforderliche Weg für die Entmischung, die durch die Länge des Vorbereitungsbodens aber begrenzt ist. Gleichzeitig wird bei zunehmender Schichtdicke der Mattenbildungseffekt der NKB stärker, die NKB-Schicht wird kohäsiver. Durch die Kohäsion wird die Lageänderung der Körner in der NKB-Schicht erschwert. Bei der Gutbelegung „Korn unten“ sind die Kornverluste sogar bei hohem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 5,5 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ sehr gering.

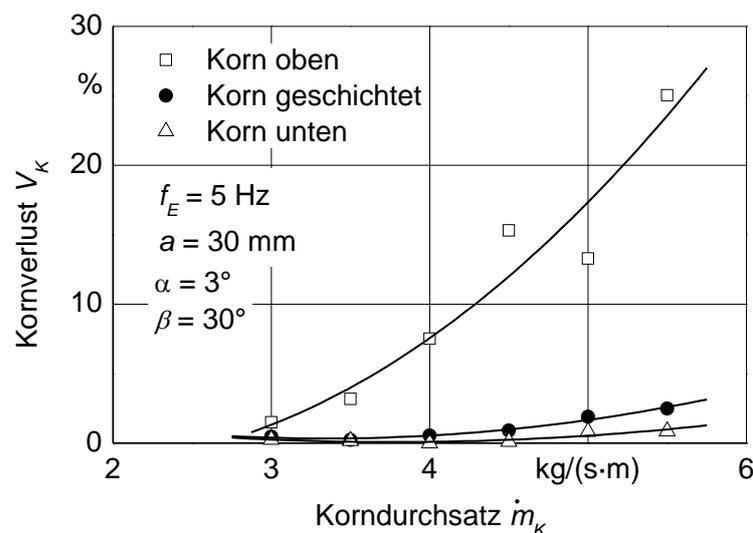


Bild 40: Einfluss der Schichtung auf die Kornverluste

Bei dieser Schichtung ist die 1/3-NKB-Schicht bei kleineren Korndurchsätzen unter dem Korn relativ dünn, was das Durchdringen des Kornes nur geringfügig erschwert. Mit zunehmendem Korndurchsatz wird diese 1/3-NKB-Schicht dicker, so dass die Entmischung sich verschlechtert und die Kornverluste ansteigen.

Im **Bild 41** sind die Kurven der Abscheidelänge l_{80} dargestellt. Bei der Gutbelegung „Korn oben“ nimmt die Abscheidelänge l_{80} mit steigendem Korndurchsatz zu. Bei der Schichtung „Korn geschichtet“ und „Korn unten“ nimmt die Abscheidelänge l_{80} mit zunehmendem Korndurchsatz allerdings nur geringfügig zu.

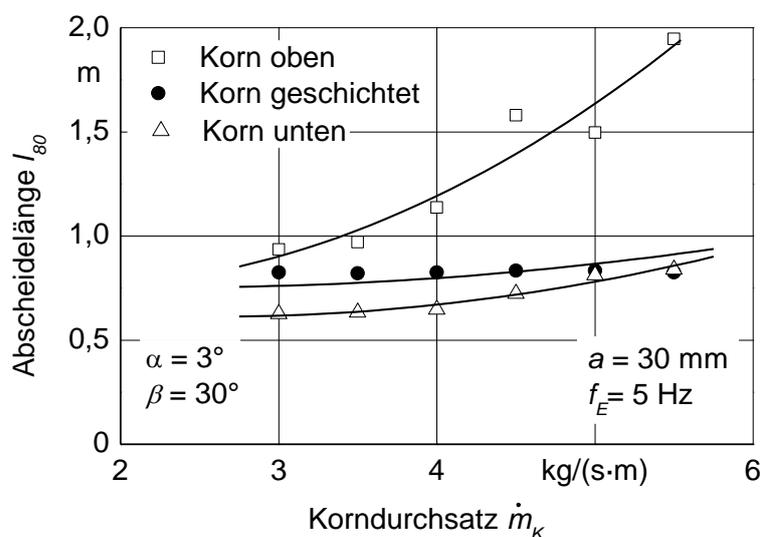


Bild 41: Abscheidelänge l_{80} bei verschiedenen Schichtungen

Die Abscheidung der Körner entlang des Siebes zeigt **Bild 42**. Während bei der Schichtung „Korn unten“ eine Abscheiderate bis zu 80 % bereits im zweiten Abscheideabschnitt erreicht wird, erreicht sie bei der Schichtung „Korn oben“ nur Werte unter 40 %. In diesem Fall erreicht die Abscheiderate den höchsten Wert erst im dritten Siebabschnitt. Dies zeigt, dass durch idealisierte Schichtung (Korn unten, NKB oben) bzw. Entmischung die Kornabscheidung wesentlich verbessert wird.

Im Vergleich zur Schichtung „Korn oben“ verbessert sich die Kornabscheidung bei der Schichtung „Korn geschichtet“ fast bei allen Korndurchsätzen in zweitem Abschnitt bis zu 60 %. Im aufgelockerten Zustand in der Fallstufe bei der Schichtung „Korn geschichtet“ wird das aus NKB und Körner bestehende Gut sowohl entmischt als auch vermischt. Teilweise schon entmischte unten liegende Körner werden in der Fallstufe in die NKB-Schicht bzw. in das Kurzstrohgitter wieder zurück geblasen [12].

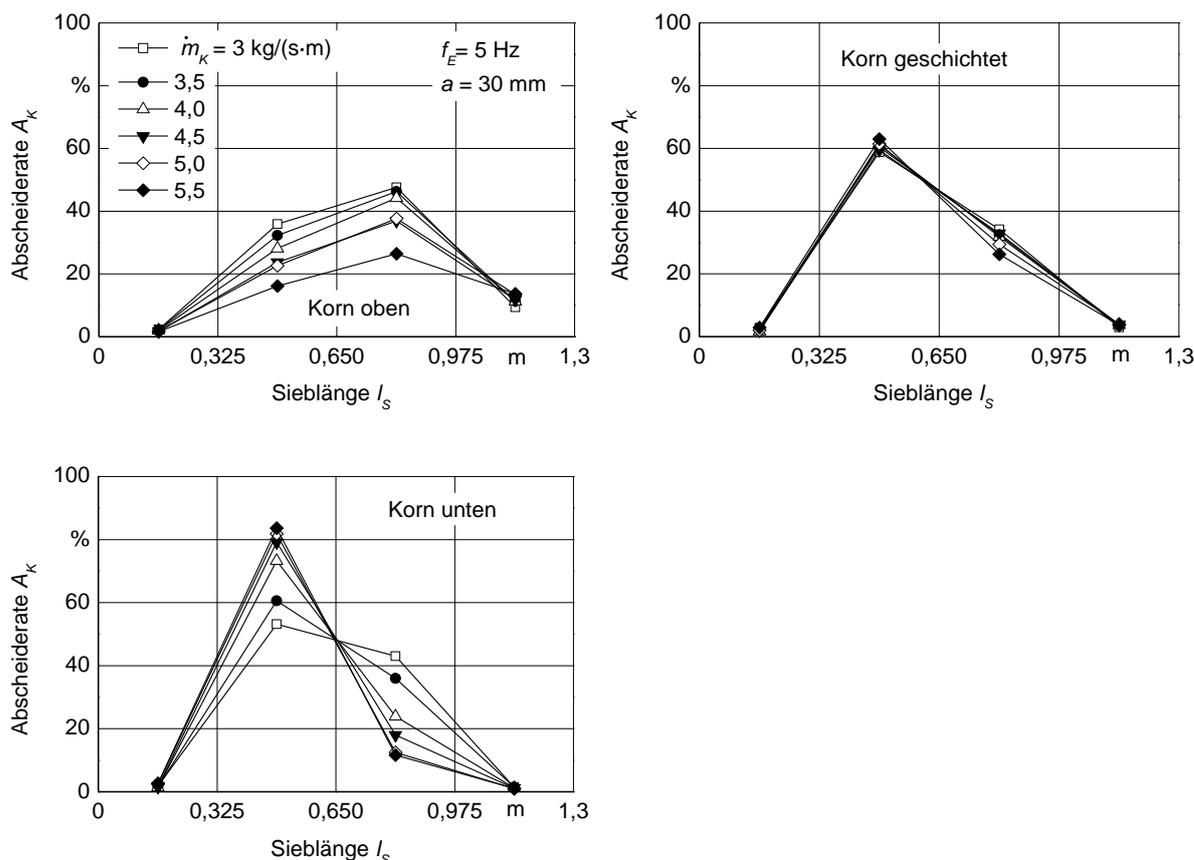


Bild 42: Einfluss der Schichtung auf die Abscheiderate

Während bei der Schichtung „Korn oben“ die Abscheidekurven auf ganzer Länge des Siebes fast parallel zueinander verlaufen, überkreuzen sich diese zwischen zweitem und drittem Abscheideabschnitt bei der Schichtung „Korn unten“. Dies zeigt die unterschiedlichen Auswirkungen der Vorentmischung auf den Abscheidungsprozess entlang des Siebes bei unterschiedlichen Korndurchsätzen.

Die Kornabscheidung verbessert sich durch die Vorentmischung bei höheren Korndurchsätzen viel stärker als bei kleineren Korndurchsätzen. Bei der Änderung Schichtung von „Korn oben“ auf „Korn unten“ erhöht sich die Kornabscheiderate von ca. 18 % etwa auf 82 % im 2. Abschnitt bei einem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 5,5$ kg/(s·m). Bei einem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 3,5$ kg/(s·m) verbessert sich die Kornabscheiderate von ca. 37 % etwa auf 55 %.

Bild 43 zeigt die Fördergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Schichtung. Mit der Zunahme des Korndurchsatzes bzw. der NKB-Masse werden die durch den Vorbereitungsboden angeregten mechanischen Kräfte intensiver durch die Gutschicht ge-

dämpft, was zur Verringerung der Fördergeschwindigkeit führt. Der Grund dafür ist die nachgiebige NKB-Schicht mit stark ausgeprägten elastischen Eigenschaften. Bei der Schichtung „Korn oben“ sinkt die Fördergeschwindigkeit von $v_{GUT} = 0,55 \text{ m/s}$ auf $v_{GUT} = 0,4 \text{ m/s}$.

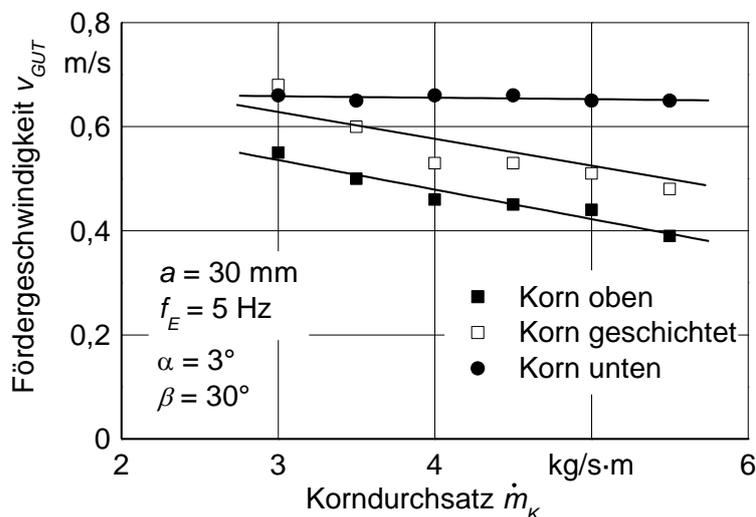


Bild 43: Einfluss der Schichtung auf die Fördergeschwindigkeit

Bei der Schichtung „Korn geschichtet“ liegt die Fördergeschwindigkeit bei höheren Werten. Je tiefer sich das Korn in der NKB-Schicht befindet und je geringer zwischen Korn und Vorbereitungsboden liegende NKB-Menge ist, ist desto besser die Geschwindigkeitsübertragung vom Vorbereitungsboden auf die Gutschicht.

Bei Schichtung „Korn unten“ bleibt die Fördergeschwindigkeit mit der Zunahme des Korndurchsatzes fast konstant, da im unteren Bereich der Gutschicht fast keine NKB vorhanden sind. Das Korn als schwerere Fraktion im Gutgemisch trägt hier die NKB. Deswegen erreicht das Gut die höhere Geschwindigkeiten bei der Schichtung „Korn unten“.

Zusammenfassend führt die Verbesserung der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden nicht nur zur besseren Kornabscheidung in der Reinigungsanlage, sondern auch zur besseren Übertragung der Geschwindigkeit vom Vorbereitungsboden auf das Gut, d.h. zur höheren Fördergeschwindigkeit. Bei diesen Versuchen liegen die geometrischen und kinematischen Parameter in dem Bereich, wo der Harmonika-Effekt nicht auftritt.

7.2 Einfluss des Korndurchsatzes

Bei der Beurteilung der Auswirkung der Vorentmischung durch die Reinigungsanlage ist besonders deren Durchsatz-Verlustverhalten aussagekräftig. **Bild 44** zeigt Kornverlustkurven in Abhängigkeit vom Korndurchsatz bei verschiedenen Frequenzen des Vorbereitungsbodens. Der Korndurchsatz hat einen wesentlichen Einfluss auf die Vorentmischung.

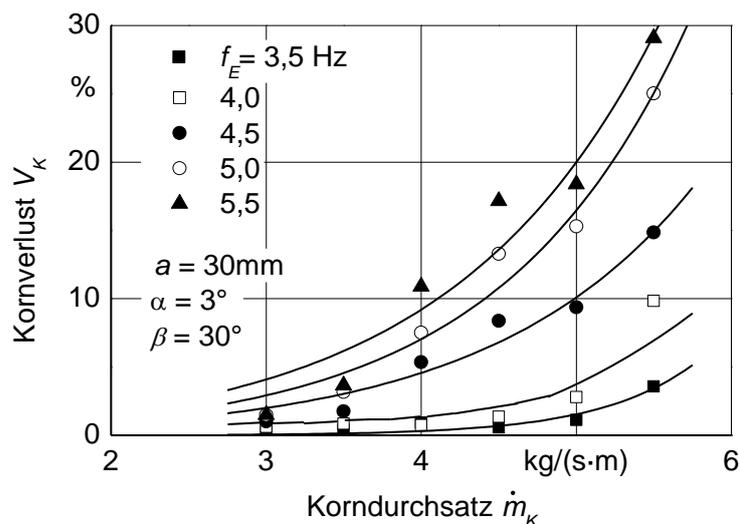


Bild 44: Kornverlust in Abhängigkeit vom Korndurchsatz bei verschiedenen Frequenzen des Vorbereitungsbodens

Bis zum Korndurchsatz $\dot{m}_K = 3,5 \text{ kg/(s}\cdot\text{m)}$ nehmen die Kornverluste geringfügig zu, bei weiterer Erhöhung des Korndurchsatzes erhöhen sich die Kornverluste überproportional. Bei kleineren Frequenzen verlaufen die Kornverlustkurven auf relativ niedrigem Niveau, was die Verbesserung der Vorentmischung durch die geringere Fördergeschwindigkeit zeigt. Bei höheren Frequenzen reicht die Verweildauer des Gutes für die vollständige Vorentmischung nicht aus.

Die Fördergeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Korndurchsatz bei verschiedenen Frequenzen zeigt **Bild 45**. Der Einfluss des Korndurchsatzes auf die Fördergeschwindigkeit ist besonders bei höheren Frequenzen zu erkennen. Mit zunehmendem Korndurchsatz geht die Fördergeschwindigkeit bei höheren Frequenzen stark zurück. Die Geschwindigkeitsübertragung vom Vorbereitungsboden auf das Gut verschlechtert sich in Abhängigkeit vom Korndurchsatz umso mehr, je höher die Frequenz ist. Bei geringerer, mechanischer Anregung bleibt die Fördergeschwindigkeit bei allen Korndurchsätzen fast konstant. Bei Fördergeschwindigkeiten von

$v_{GUT} = 0,3 - 0,35$ m/s treten Unstabilitäten im Förderprozess ein, so dass eine stabile Förderung nicht gesichert ist. Bei den noch geringeren Fördergeschwindigkeiten kann die Gleichmäßigkeit der Gutschichthöhe bei der Förderung des Gutes zu den Sieben vom Vorbereitungsboden nicht gewährleistet werden.

Die günstigsten Frequenzen hinsichtlich Vorentmischung bei einer Amplitude von $a = 30$ mm liegen im Bereich $f_E = 3,5 - 4,5$ Hz, Bild 45. In Hinsicht auf die Fördergeschwindigkeit ist die Frequenz von $f_E = 4,5$ zu bevorzugen, da dabei das Niveau der Geschwindigkeit über $v_{GUT} = 0,35$ m/s liegt, Bild 46.

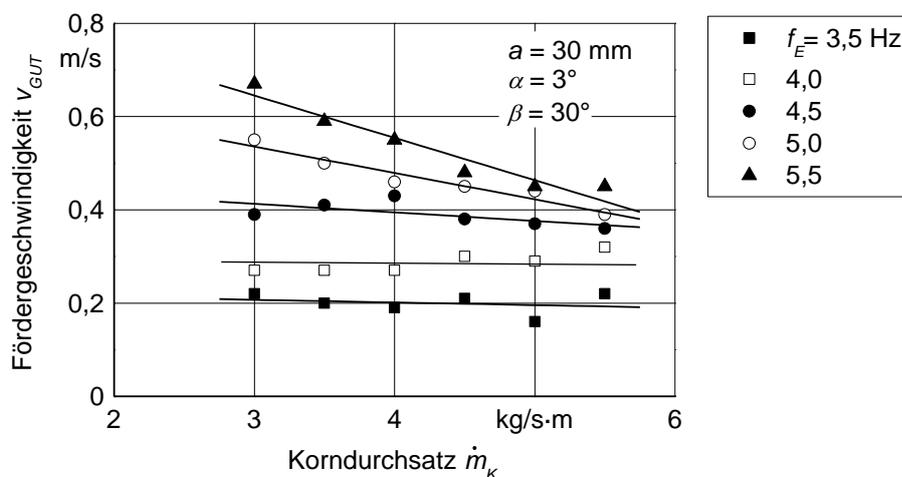


Bild 45: Einfluss des Korndurchsatzes auf die Fördergeschwindigkeit bei verschiedenen Frequenzen

Bild 46 zeigt den Einfluss des Korndurchsatzes auf die Abscheidelänge l_{80} durch die Frequenz. Die Abscheidelängen l_{80} steigen mit der Erhöhung der Frequenz an. Das Niveau der Kurven ist mit zunehmendem Korndurchsatz höher. Nach Meinel [69] nimmt die Anzahl der Stöße der Körner auf die Partikel zweier Gutkomponenten mit zunehmender mechanischer Anregung überproportional zu, d. h. mit zunehmender Schichthöhe wird sich nicht nur die notwendige Zeit für die Entmischung vergrößern, sondern selbst der Entmischungsprozess in der Schicht wird durch zunehmende stochastische Stöße der Gutkomponenten erschwert.

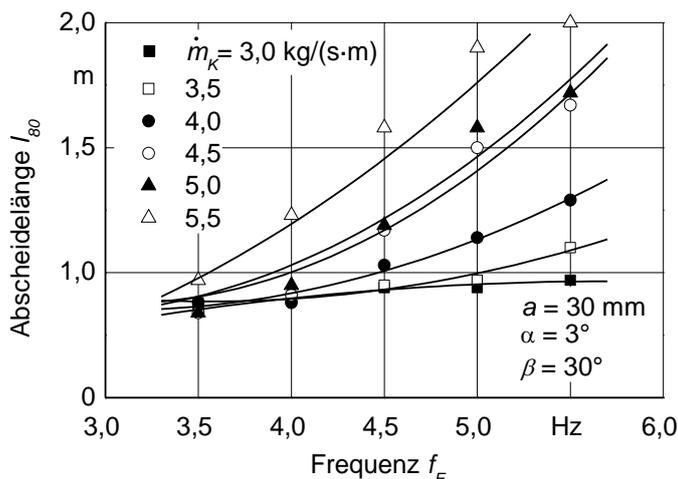


Bild 46: Einfluss des Korndurchsatzes auf die Abscheidelänge l_{80} in Abhängigkeit von der Frequenz f_E

Bild 47 zeigt auch, dass durch die Zunahme des Korndurchsatzes die Fördergeschwindigkeit abnimmt. Die Fördergeschwindigkeiten des Gutes sind wesentlich niedriger als die Geschwindigkeit des Vorbereitungsbodens, insbesondere bei höheren Frequenzen. Aber wie Bild 46 zeigt, verbessert sich die Abscheidelänge l_{80} bzw. die Vorentmischung nicht. Die notwendige Zeit für die Entmischung nimmt mit der Zunahme der Schicht stärker zu als die Verweildauer des Gutes auf dem Vorbereitungsboden durch die Senkung der Fördergeschwindigkeit.

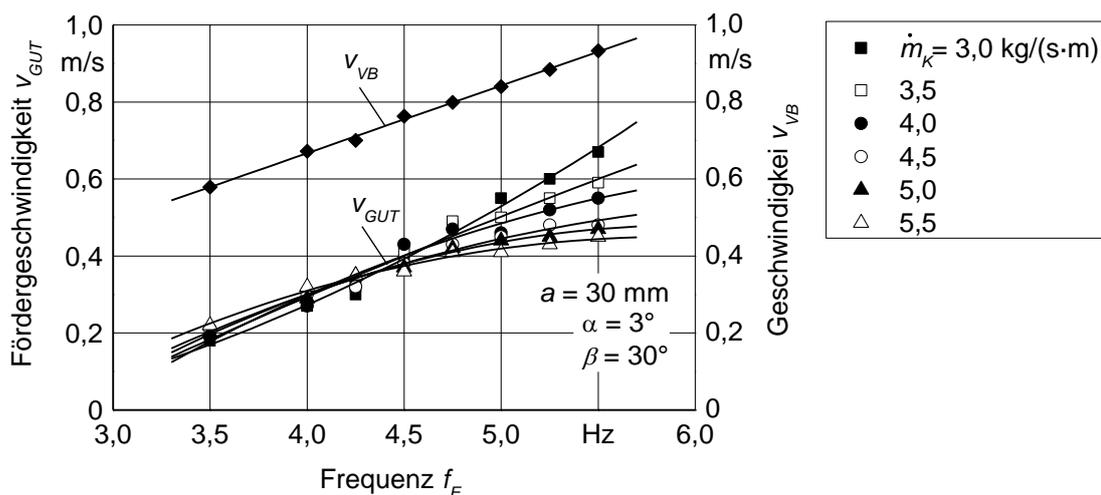


Bild 47: Einfluss des Korndurchsatzes auf die Fördergeschwindigkeit durch die Frequenz

Während die Fördergeschwindigkeit bei einem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 3,5 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ proportional mit zunehmender Frequenz steigt, nimmt die Fördergeschwindigkeit bei einem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 5 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ geringer zu. Besonders bemerkenswert ist hier der Bereich der Frequenzen zwischen $f_E = 4 \text{ Hz}$ und $f_E = 4,5 \text{ Hz}$, in dem die Kurven sich kreuzen. Ab diesem Bereich tritt der Wurf im Förderprozess auf ($Fr_V \approx 1$). Vor dem Wurf haben die Fördergeschwindigkeiten bei höheren Korndurchsätzen höhere Werte und nach dem Auftreten des Wurfes hat es umgekehrte Auswirkung. Im Betrieb ohne Wurf wirkt die Höhe der Gutschicht günstig auf die Fördergeschwindigkeit, da die höhere Gutschicht sich stärker verdichtet. Die Reibungskräfte erhöhen sich in der Gutschicht. Im Betrieb mit dem Wurf verschlechtert die Höhe der Gutschicht den Förderprozess, da die elastischen Eigenschaften der NKB sich viel deutlicher auswirken.

Bei höheren Korndurchsätzen vergrößert sich die Differenz zwischen der Fördergeschwindigkeit und der Vorbereitungsbodengeschwindigkeit mit der Zunahme der Frequenz überproportional.

Zwischen dem Korndurchsatz und der NKB-Schichthöhe besteht eine lineare Abhängigkeit, **Bild 48**. Die NKB-Schicht erreicht bei höheren Korndurchsätzen von $\dot{m}_K = 5,5 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ während der Auflockerung wesentlich größere Schichthöhen als die Belegungshöhe. Die Gutschicht ist aufgelockert, wenn die Schichthöhe auf dem Vorbereitungsboden größer als die Belegungshöhe ist. Dies tritt am Anfang der Wurfphase bzw. am Ende der Ruhephase auf. Die Gutschicht ist verdichtet, wenn die Schichthöhe kleiner als die Belegungshöhe ist. Dies tritt am Anfang der Ruhephase bzw. dem Ende der Wurfphase während des Aufpralles auf. Dabei ist die Auflockerung der NKB-Schicht stärker als die Verdichtung. Die Messungen der Schichthöhe während der Förderung wurden mittels der Hochgeschwindigkeitskamera durchgeführt.

Bei höheren Gutschichten erreicht die vom Vorbereitungsboden dem Reinigungsgut zugeführte mechanische Anregung nur geringfügig die oberen Schichten des Gutes. Dadurch wird das Gut in den oberen Schichten nicht genügend aufgelockert.

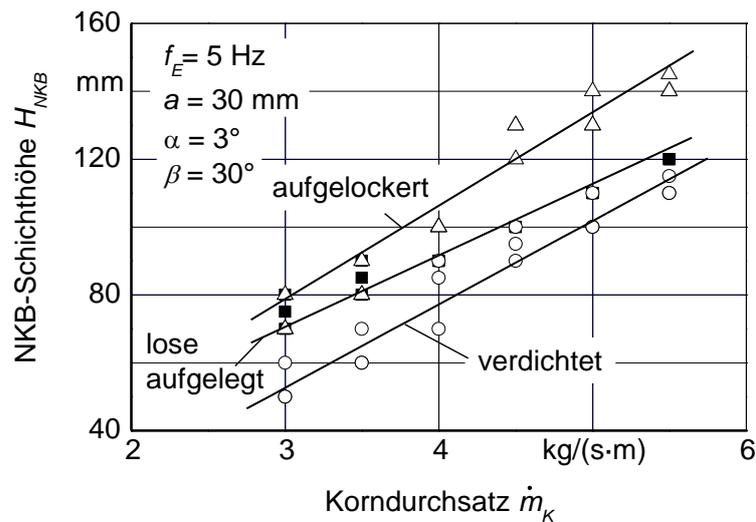


Bild 48: Einfluss der Verdichtung und der Auflockerung auf die NKB-Schichthöhe in Abhängigkeit vom Korndurchsatz (Massenverhältnis Korn : NKB, 70 : 30)

Der Vergleich der Kurven zeigt, dass bei höheren Korndurchsätzen eine intensivere Auflockerung auftritt. Dies ist durch die größere Menge an elastischen NKB im Gut zu erklären. Bei kleineren Korndurchsätzen entgegen wird das Gut am Anfang der Ruhephase stärker verdichtet, wodurch der innere Reibungskoeffizient wächst und dadurch die Förderung günstig beeinflusst wird [35]. Im komprimierten Zustand ist die Geschwindigkeitsübertragung von der Unterlage auf die Gutschicht besser. Durch die wachsende NKB-Dichte im verdichteten Zustand bei kleineren Korndurchsätzen wird die Strecke zwischen zwei Stößen von Gutpartikeln aneinander kürzer. Aber die Intensität dieser Stöße wird stärker [69]. Es finden mehr Stöße statt, was zu einer Abnahme der Entmischungsgeschwindigkeit führt [6]. Da aber bei kleineren Korndurchsätzen die NKB-Schicht auch relativ niedrig ist, ist der Einfluss dieser Verdichtung und der Intensivierung der Stöße geringer als der Einfluss durch die Zunahme der Schichthöhe auf Entmischungsvorgang [11].

7.3 Einfluss der Länge des Vorbereitungsbodens

Da dem Korn für die Entmischung nur eine begrenzte Verweildauer durch die Fördergeschwindigkeit und die Länge des Vorbereitungsbodens zur Verfügung steht, nimmt die Abscheidelänge l_{B0} mit zunehmendem Korndurchsatz zu, **Bild 49**.

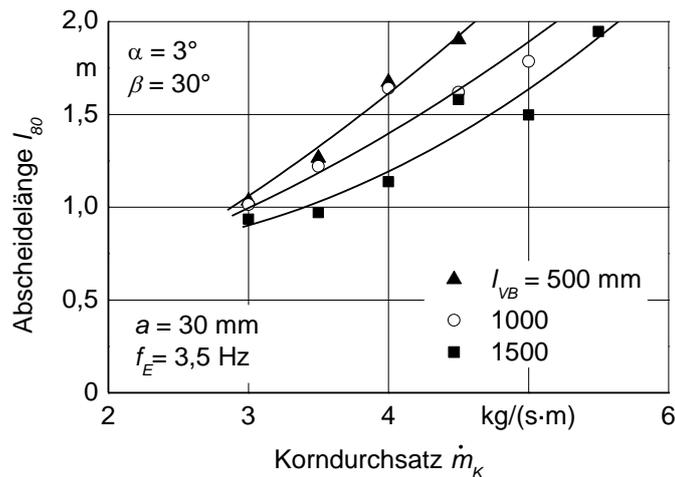


Bild 49: Einfluss der Länge l_{VB} des Vorbereitungsbodens auf die Abscheidelänge l_{80}

Bild 50 zeigt, dass die Abscheidelänge l_{80} bei einer Länge des Vorbereitungsbodens von $l_{VB} = 500$ mm mit zunehmendem Korndurchsatz stärker zunimmt als bei der Länge des Vorbereitungsbodens von $l_{VB} = 1500$ mm. Die Abscheidelänge l_{80} liegt etwa bei $l_{80} = 1$ m bei einem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 3$ kg/(s·m) und im Bereich von fast $l_{80} = 2$ m bei einem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 4,5$ kg/(s·m) bei einer Länge des Vorbereitungsbodens von $l_{VB} = 500$ mm. Im Vergleich dazu nähert sich die Abscheidelänge l_{80} dem Wert von 2 m bei einer Länge des Vorbereitungsbodens von $l_{VB} = 1500$ mm erst bei einem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 5,5$ kg/(s·m). Die Erhöhung des Korndurchsatzes um 50 % von $\dot{m}_K = 3$ kg/(s·m) auf $\dot{m}_K = 4,5$ kg/(s·m) bei der Länge des Vorbereitungsbodens von $l_{VB} = 500$ mm führt zur Verdoppelung der Abscheidelänge l_{80} . Bei der Länge des Vorbereitungsbodens von $l_{VB} = 1500$ mm steigt hierbei die Abscheidelänge l_{80} nur etwa um 50 % an. Dies zeigt, dass der längere Vorbereitungsboden eine bessere Entmischung aufweist.

In **Bild 50** ist der Einfluss der Länge des Vorbereitungsbodens auf die Kornabscheiderate über der Sieblänge dargestellt.

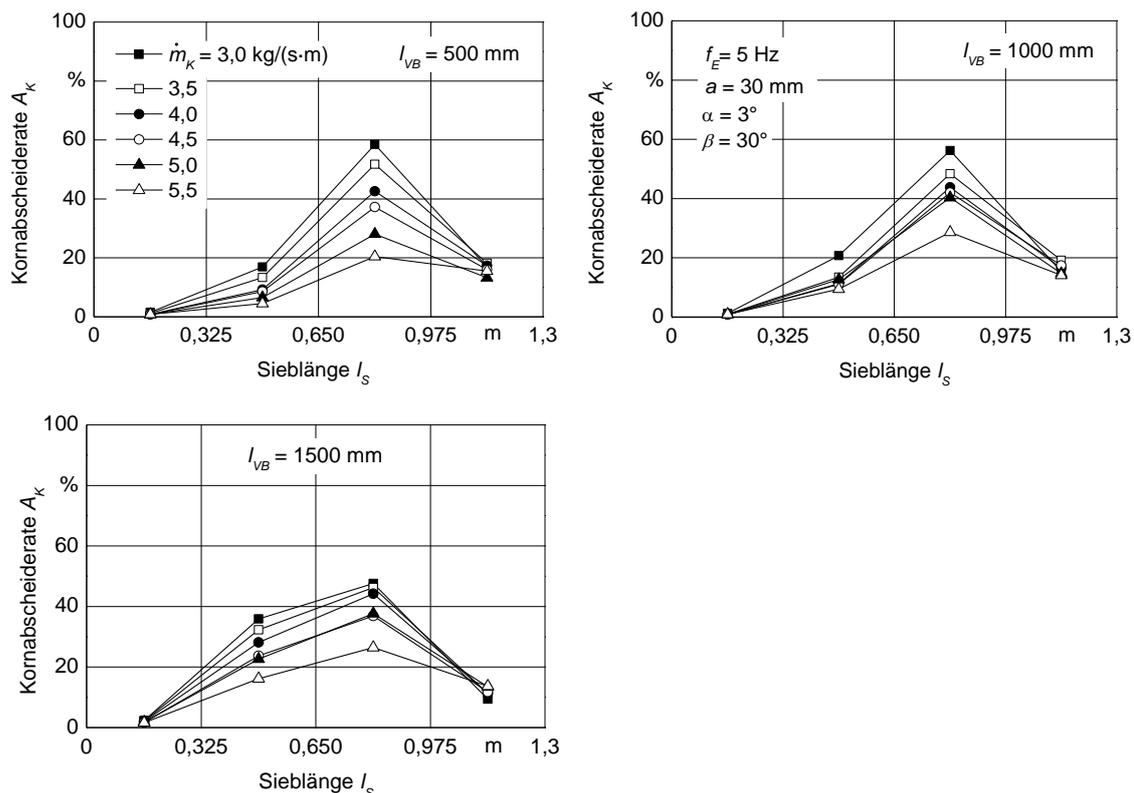


Bild 50: Einfluss der Länge des Vorbereitungsbodens auf die Kornabscheiderate über der Sieblänge

Die Kornabscheiderate verbessert sich bei der Länge des Vorbereitungsbodens von $l_{VB} = 1000$ mm erst im dritten Abschnitt. Bei der Länge von $l_{VB} = 1500$ mm wird die Kornabscheidung bereits im zweiten Abschnitt deutlich erhöht. Proportional zur Länge des Vorbereitungsbodens erhöht sich die Verweildauer des Reinigungsgutes auf dem Vorbereitungsboden und damit die Rate des Impulsübertrags Anzahl in das Reinigungsgut.

Bild 51 zeigt, dass bei der Verlängerung des Vorbereitungsbodens von $l_{VB} = 1000$ mm auf $l_{VB} = 1500$ mm das Restkorn nach dem zweiten Siebabschnitt auf 10 % sinkt. Die größeren Unterschiede des Restkornes in Abhängigkeit vom Korndurchsatz sind bei einer Länge des Vorbereitungsbodens von $l_{VB} = 500$ mm festzustellen. Die bessere Vorentmischung bei längerem Vorbereitungsboden beeinflusst den Restkornverlauf besonders bei größeren Korndurchsätzen.

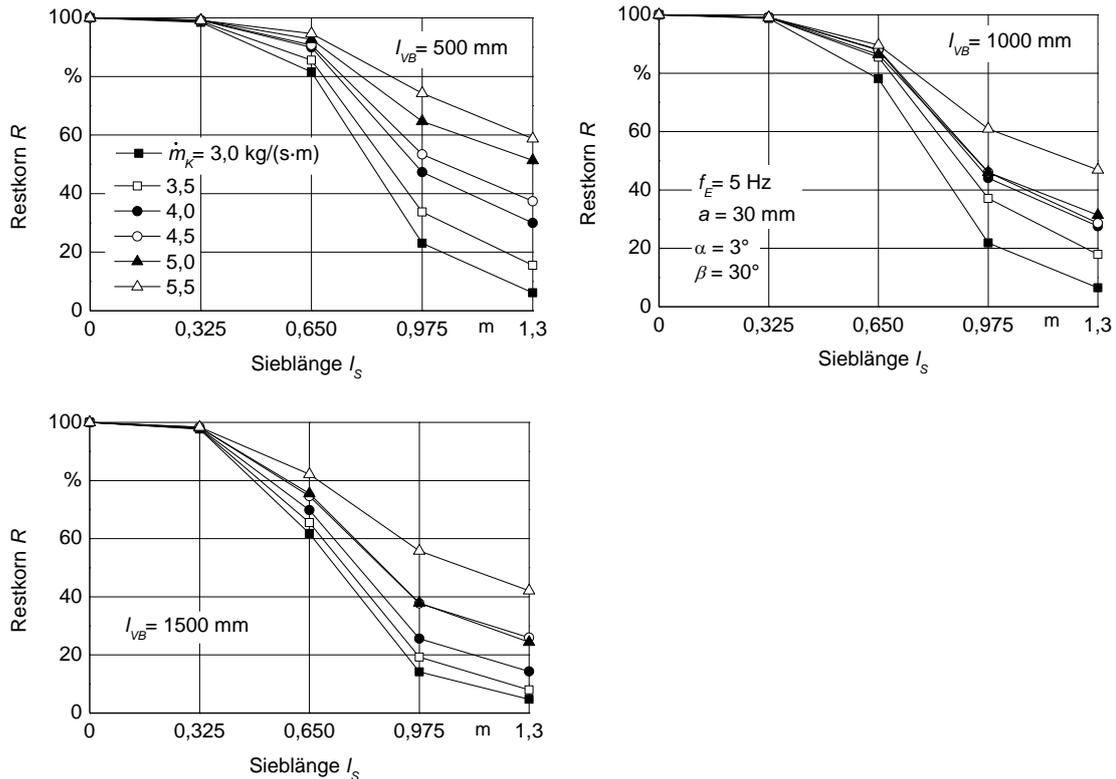


Bild 51: Einfluss der Länge des Vorbereitungsbodens auf das Restkorn bei unterschiedlichen Korndurchsätzen

7.4 Einfluss des Drahtrechens

Der Vorbereitungsboden im Mähdrescher ist mit einem luftdurchströmten Drahtrechen ausgestattet. Der Drahtrechen ist eine Verlängerung des Vorbereitungsbodens. Bei den Untersuchungen wurde ein serienmäßiger Drahtrechen verwendet. Er besteht aus 230 mm langen Rundstäben im Abstand von 30 mm voneinander. Dazwischen sind auf die Hälfte gekürzte Stäbe im Abstand von 15 mm eingebaut. Bei den Versuchen „ohne Drahtrechen“ wurden beide Stäbe ausgebaut.

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Vorbereitungsbodens zum Einfluss des Drahtrechens zeigt **Bild 52**. Der Drahtrechen verlängert die Abscheidelänge l_{80} , da ein großer Teil der NKB und der darin befindlichen Körner erst später auf das Obersieb gelangen.

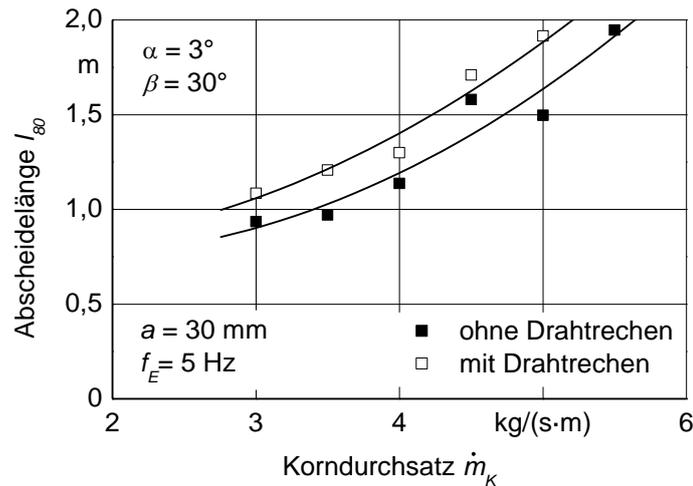


Bild 52: Abscheidelänge l_{80} mit und ohne Drahtrechen

Bild 53 zeigt, dass die Abscheidung beim Betrieb des Vorbereitungsbodens ohne Drahtrechen im zweiten Siebabschnitt höhere Werte als beim Betrieb des Vorbereitungsbodens mit Drahtrechen erreicht.

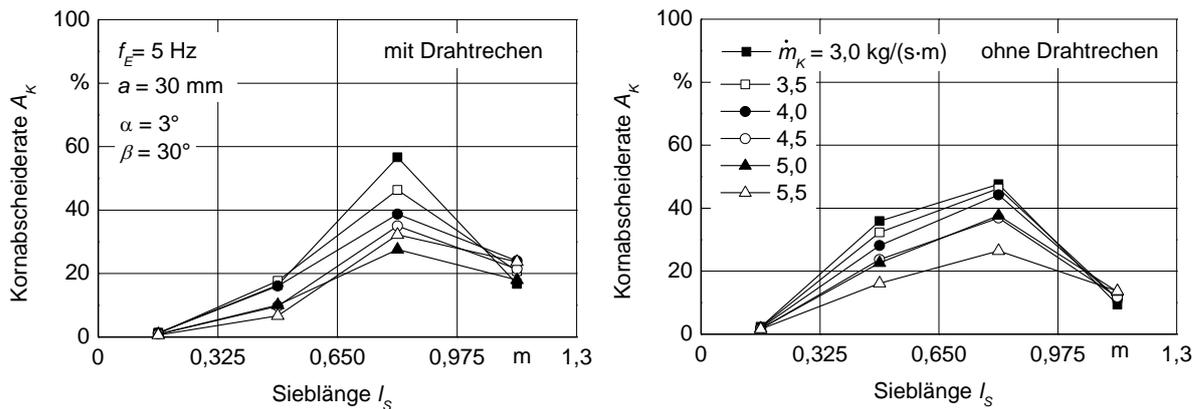


Bild 53: Kornabscheiderate beim Vorbereitungsboden mit und ohne Drahtrechen

Die Empfindlichkeit der Arbeitsqualität des Vorbereitungsbodens mit Drahtrechen wird durch die Änderungen des Korndurchsatzes geringfügiger beeinflusst. Dies ist besonders bei höheren Korndurchsätzen erkennbar, da der Drahtrechen aufgrund seiner Ausführung auch eine mechanische Vorsortierung vornimmt. Die Änderung der Kornabscheiderate im zweiten Siebabschnitt ist bei einem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 5,5$ kg/(s·m) geringer als bei einem Korndurchsatz $\dot{m}_K = 3$ kg/(s·m) **Bild 54**. Das Reinigungsgut wird auf dem Drahtrechen durch die Luft zusätzlich aufgelockert, wodurch die Körner leichter die NKB-Schicht durchdringen können. Die Abscheidung der aus dem Gut entmischten Körner am Drahtrechen gewährleistet, dass zuerst die

Körner und dann die groben NKB dem Obersieb zugeführt werden. Wird das vorentmischte Reinigungsgut der Fallstufe ohne Drahtrechen übergeben, so ist die Vermischung durch die Windsichtung stärker als bei der Übergabe mit Drahtrechen. Die bereits erzielte Entmischung wird nicht vollständig genutzt. Diese ist bei höheren Korndurchsätzen bzw. bei höheren Gutschichten stärker ausgeprägt. Bei hohen Korndurchsätzen, wobei der Entmischungseffekt auf dem Vorbereitungsboden in höheren Maßen abnimmt, wird die Verbesserung der Kornabscheidung bzw. das Ausnutzen des bereits entmischten Gutes vorrangig durch den Drahtrechen verbessert.

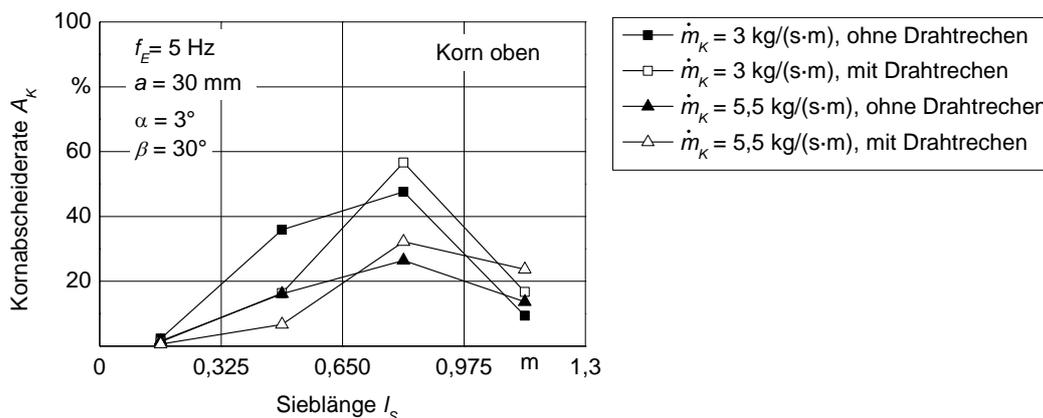


Bild 54: Kornabscheiderate beim Vorbereitungsboden mit und ohne Drahtrechen

Der Restkornverlauf beim Vorbereitungsboden mit Drahtrechen liegt bei höheren Werten, **Bild 55**. Insbesondere bei höheren Korndurchsätzen verzögert sich die Kornabscheidung in der ersten Hälfte des Siebes. Aber auch bei einem relativ kleinen Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 3$ kg/(s-m) ist der Kornrest bei der Variante „mit Drahtrechen“ am Siebende etwas höher als „ohne Drahtrechen“.

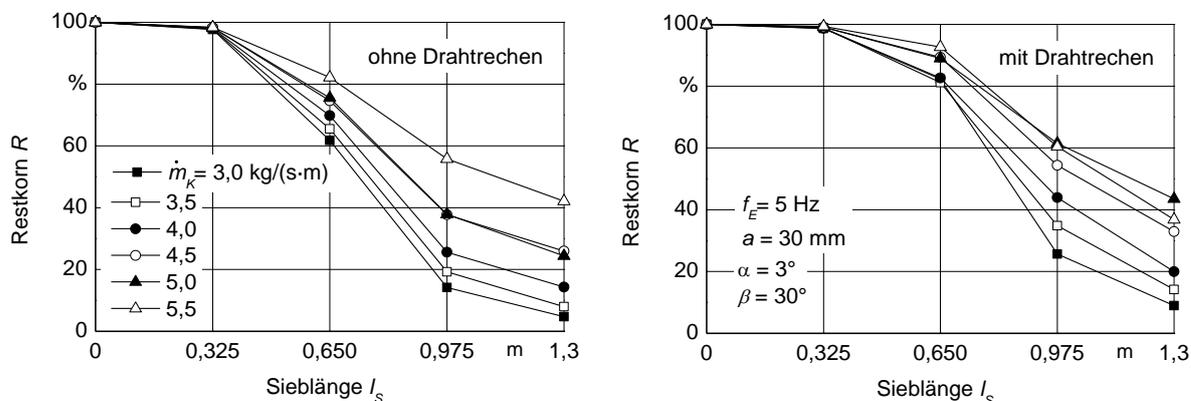


Bild 55: Restkorn bei der Ausrüstung des Vorbereitungsbodens mit und ohne Drahtrechen

7.5 Einfluss des Schwingungswinkels β bei verschiedenen Neigungen α

Der Untersuchungsbereich des Schwingungswinkels bei verschiedenen Neigungen wurde ausgehend von der Wurfkennzahl festgelegt. Die Wurfkennzahl änderte sich in Abhängigkeit von der Neigung α und des Schwingungswinkels β von $Fr_v = 0,24$ bis $Fr_v = 1,52$, Tabelle 3. Die Froudezahl betrug $Fr = 3,02$ bei einer Amplitude von $a = 30$ mm und Frequenz von $f_E = 5$ Hz-

Mit der Zunahme des Schwingungswinkels nimmt die Fördergeschwindigkeit bei allen Neigungen bis zu einem Maximum zu, **Bild 56**. Bei weiterer Erhöhung des Schwingungswinkels geht die Fördergeschwindigkeit zurück. Die Maxima der Fördergeschwindigkeit verschieben sich zu größeren Schwingungswinkeln bei größeren Neigungen. Dies erklärt sich dadurch, dass die vertikale Komponente der Beschleunigung bei steigendem Schwingungswinkel kleiner wird. Die Sensibilität des Vorbereitungsbodens bei der Förderung bei größeren Schwingungswinkeln ist niedriger als bei kleineren Schwingungswinkeln. Die Unterschiede in der Fördergeschwindigkeit beim Schwingungswinkel $\beta = 30^\circ$ und bei unterschiedlichen Neigungen sind kleiner als bei einem Schwingungswinkel $\beta = 20^\circ$.

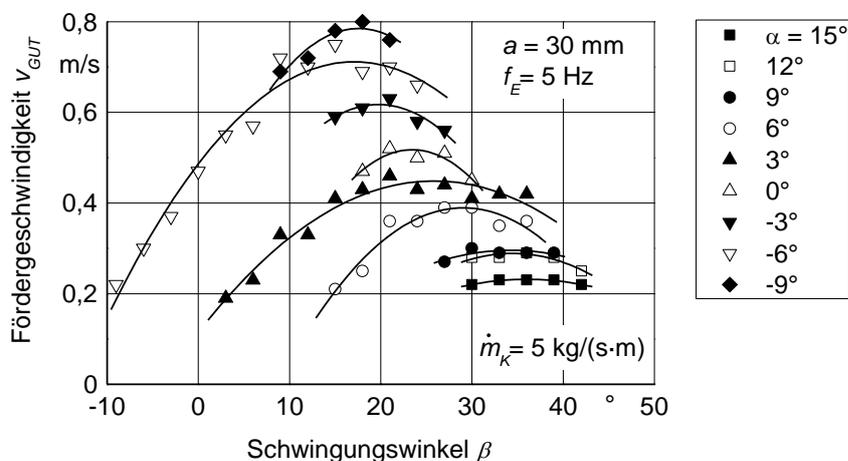


Bild 56: Fördergeschwindigkeit v_{GUT} in Abhängigkeit vom Schwingungswinkel β bei verschiedenen Neigungen α

Bei positiven Neigungen des Vorbereitungsbodens von $\alpha = 9^\circ - 15^\circ$ ist die Fördergeschwindigkeit im ganzen untersuchten Bereich unter $v_{GUT} = 0,3 - 0,35$ m/s. Bei diesen Neigungen verstärkt sich die relative Bewegung zwischen den Schichten des Reinigungsgutes. Die unteren Schichten haben durch das Stufenprofil des Vorberei-

tungsbodens eine höhere Fördergeschwindigkeit, die oberen Schichten rutschen im Vergleich zu den unteren Schichten stärker zurück. Dabei wird das Gut besser entmischt, **Bild 57**, aber die Fördergeschwindigkeit bleibt sehr gering.

Die geringste Abscheidelänge l_{80} erreicht den Wert von etwa 0,8 m. Eine weitere Senkung der Abscheidelänge l_{80} bei Abnahme des Schwingungswinkels bei positiven und negativen Neigungen ist nicht festzustellen. Dabei vergrößert sich die Abscheidelänge l_{80} bei Erhöhung des Schwingungswinkels bei allen Neigungen kontinuierlich. Die Vergrößerung der Abscheidelänge l_{80} bei Neigungen von $\alpha = 9^\circ - 15^\circ$ ist gering.

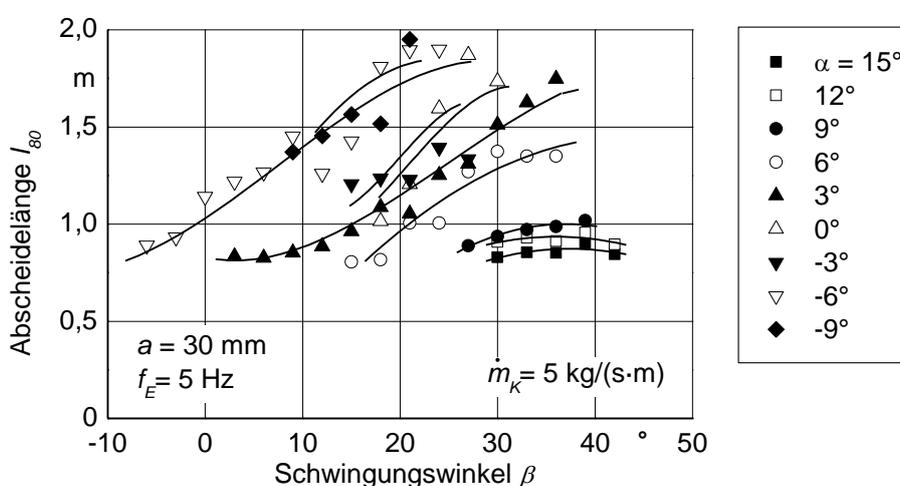


Bild 57: Abscheidelänge l_{80} in Abhängigkeit vom Schwingungswinkel β bei verschiedenen Neigungen α

Bild 58 zeigt, wie sich die Neigung des Vorbereitungsbodens auf die Fördergeschwindigkeit auswirkt. Bei der Zunahme der positiven Neigung sinkt die Fördergeschwindigkeit linear. Bei kleineren Schwingungswinkeln ist die Abnahme größer. Nur bei größeren Schwingungswinkeln wird die Abnahme der Fördergeschwindigkeit bei größeren Neigungen geringer.

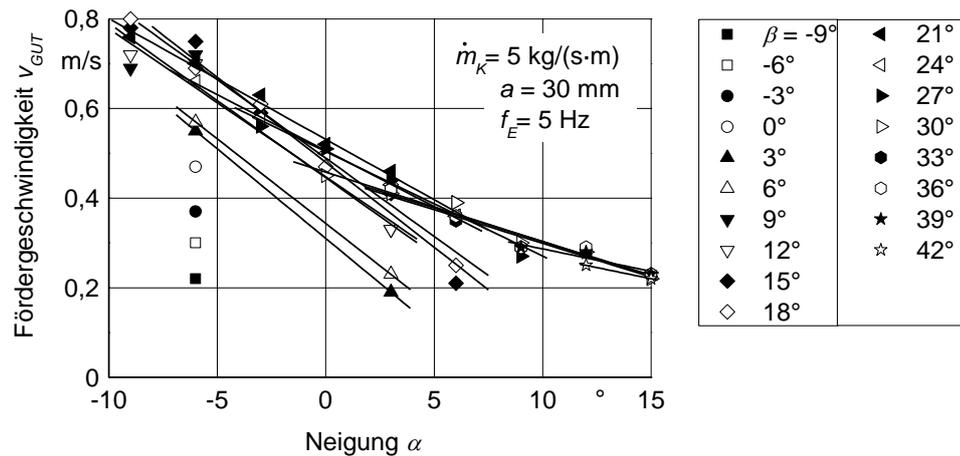


Bild 58: Fördergeschwindigkeit v_{GUT} in Abhängigkeit von verschiedenen Neigungen α

Bild 59 zeigt die Abscheidelänge l_{80} in Abhängigkeit von den Neigungen. Bei konstantem Schwingungswinkel nimmt die Abscheidelänge l_{80} mit zunehmender Neigung, d.h. bergabwärts, ab. Bei größeren Neigungen ab $\alpha = 9^\circ$ liegt die Abscheidelänge l_{80} in einem niedrigem Bereich, aber bei diesen Neigungen kann keine sichere Förderung vom Vorbereitungsboden gewährleistet werden.

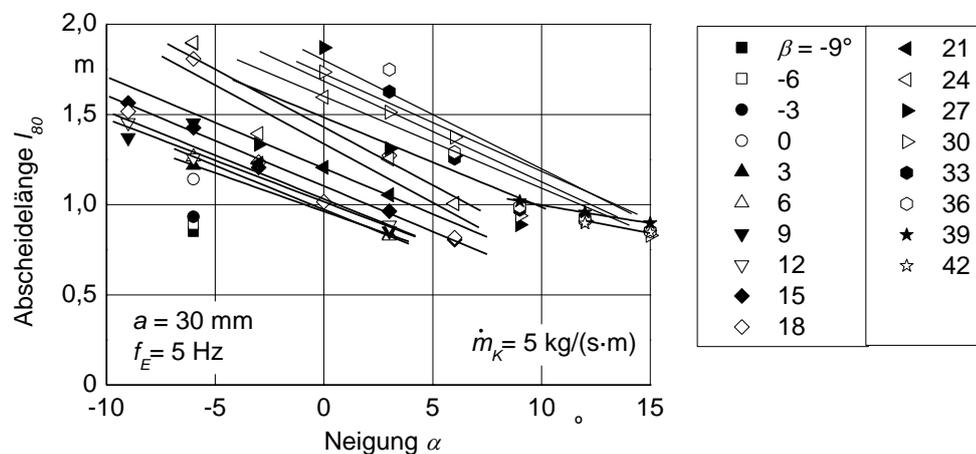


Bild 59: Abscheidelänge l_{80} in Abhängigkeit von verschiedenen Neigungen α

7.6 Einfluss des vorderen und hinteren Schwingungswinkels

Bilder 60, 62 zeigen die Fördergeschwindigkeit bei unterschiedlichen vorderen und hinteren Schwingungswinkeln. Die höchsten Fördergeschwindigkeiten bei sich veränderten hinteren Schwingungswinkeln liegen zwischen $\beta_H = 24^\circ$ und $\beta_H = 30^\circ$. Bei

allen Variationen der Parameter, außer hinterem Schwingungswinkel von $\beta_H = 21^\circ$ und $\beta_H = 33^\circ$, erreicht die Fördergeschwindigkeit ein Maximum, wenn die vorderen und hinteren Schwingungswinkel gleich sind.

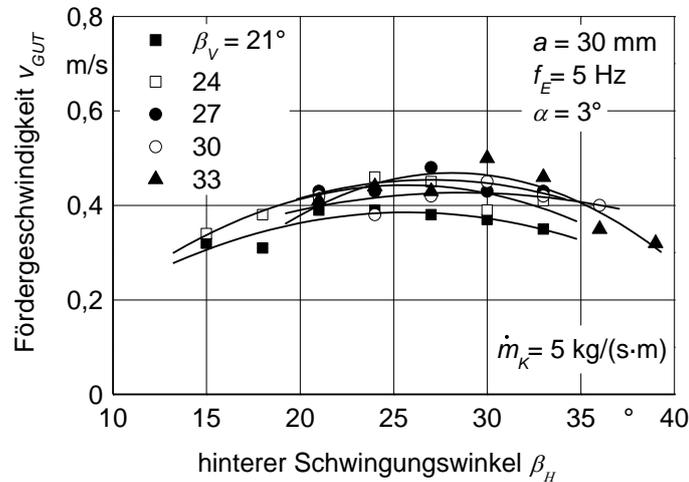


Bild 60: Einfluss des hinteren Schwingungswinkels bei verschiedenen vorderen Schwingungswinkeln auf die Fördergeschwindigkeit v_{GUT}

Die gleiche durch den Schwingungswinkel bedingte Wurfbahn am Anfang und am Ende des Vorbereitungsbodens ist günstig für die Förderung.

Fast bei allen konstanten hinteren Schwingungswinkeln führt eine Abweichung des vorderen Schwingungswinkels zu einer besseren Entmischung. Bei unterschiedlichen Schwingungswinkeln am Anfang und am Ende des Vorbereitungsbodens treten unterschiedliche Wurfbahnen entlang des Vorbereitungsbodens auf, wodurch die Wurfweite und Wurfhöhe der Gutpartikel unterschiedlich werden. Dies verbessert die Entmischung durch intensivere Strukturänderung der NKB-Schicht, **Bild 61**.

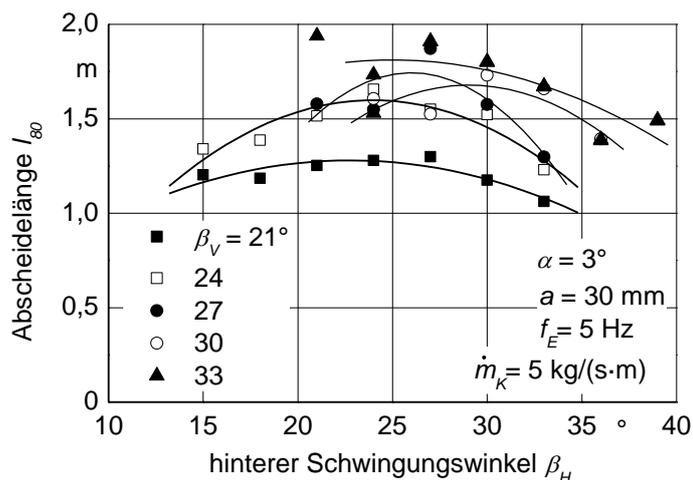


Bild 61: Einfluss des hinteren Schwingungswinkels bei verschiedenen vorderen Schwingungswinkeln auf die Abscheidelänge l_{80}

Im Vergleich zu Bild 60 wirken sich die Änderungen des vorderen Schwingungswinkels bei konstantem hinteren Schwingungswinkel nur geringfügig auf die Fördergeschwindigkeit aus, **Bild 62**.

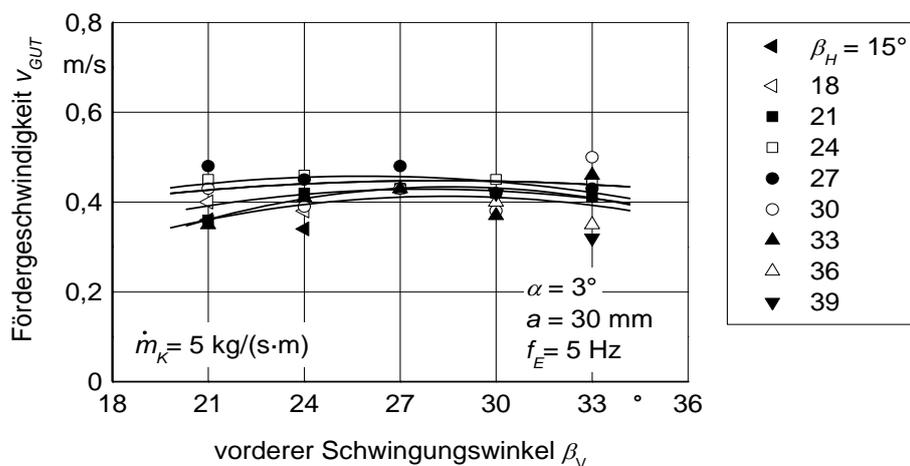


Bild 62: Einfluss des vorderen Schwingungswinkels bei verschiedenen hinteren Schwingungswinkeln auf die Fördergeschwindigkeit v_{GUT}

Eine Kombination von einem kleineren vorderen Schwingungswinkel mit einem größeren hinteren Schwingungswinkel ist günstiger für die Entmischung als zwei gleich große Schwingungswinkel.

7.7 Einfluss unterschiedlicher Längen der Schwingen

Die Länge der Schwinge wirkt sich auf den tatsächlichen Wurfwinkel (Winkel, mit welchem das Gutpartikel geworfen wird) aus und bestimmt die Größenordnung der Krümmung der Bewegungsbahnen des Vorbereitungsbodens. Deswegen wurden unterschiedliche Längen der Schwinge des Vorbereitungsbodens untersucht, **Bild 63**.

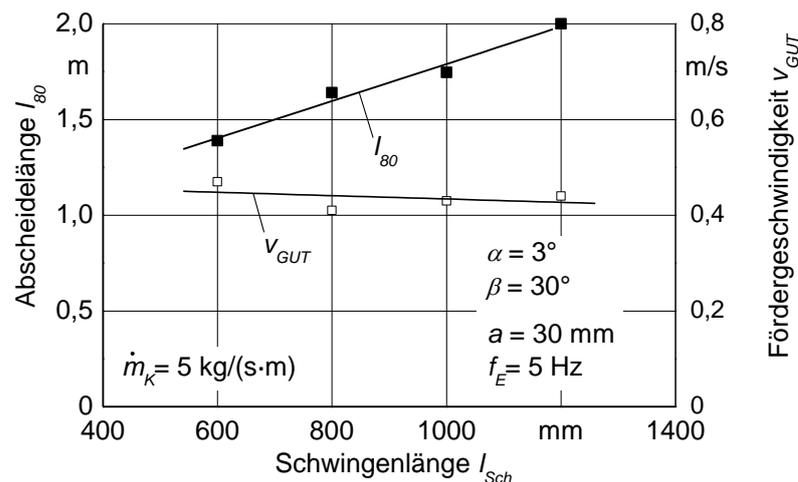


Bild 63: Einfluss der Schwingenlängen auf die Abscheidelänge l_{80} und die Fördergeschwindigkeit v_{GUT}

Die Abscheidelänge l_{80} ist kleiner bei kürzeren Schwingenlängen. Je kürzer die Schwinge, desto kleiner ist der Krümmungsradius. Dadurch wird die Auflockerung bei kürzeren Schwingen besser als bei längeren Schwingen. Die Änderung des Wurfwinkels beeinflusst die Fördergeschwindigkeit geringfügig. Bei kürzeren Schwingen wird die Schwingungsrichtung bei gleichem Schwingungswinkel steiler, was zu höheren kürzeren Wurfen führt.

Die Abscheidelänge l_{80} nimmt mit Verlängerung der hinteren Schwinge bei konstanter vorderer Schwinge zu. Die Abscheidekurven liegen bei kürzeren Schwingen auf niedrigerem Niveau, was durch den steileren Wurfwinkel bedingt ist, **Bild 64**. Da der Einfluss der Schwingenlänge auf die Fördergeschwindigkeit sehr gering ist, sind die kürzeren Schwingen zu bevorzugen.

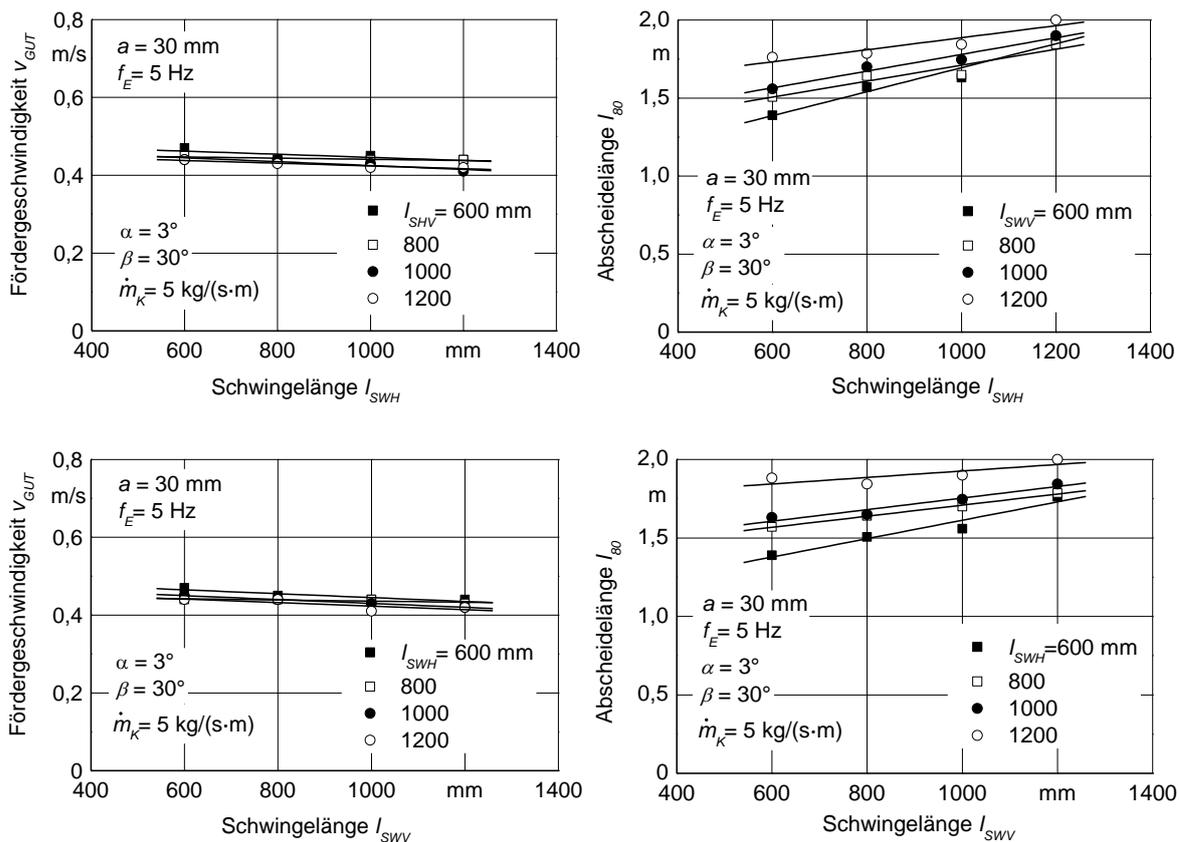


Bild 64: Einfluss der unterschiedlichen vorderen und hinteren Schwingenlängen auf die Abscheidelänge l_{80} und auf die Fördergeschwindigkeit v_{GUT}

Die Fördergeschwindigkeit nimmt geringfügig ab, da die Wurfweite bzw. der Wurfwinkel durch eine längere Schwinde abnimmt. Die unterschiedlichen vorderen und hinteren Schwingenlängen führen zur besseren Entmischung. Dies geschieht durch unterschiedliche Wurfbahnen des Gutes entlang des Vorbereitungsbodens. Infolgedessen wird das kompakte Haufwerk des Gutes besser aufgelockert und dabei mehr Hohlraumvolumen für den Durchgang des Kornes in Gutschicht geschaffen.

7.8 Einfluss des Übertragungswinkels ψ

Bild 65 zeigt den Einfluss des Übertragungswinkels auf die Fördergeschwindigkeit v_{GUT} und Abscheidelänge l_{80} . Die Fördergeschwindigkeit v_{GUT} wird umso mehr vom Übertragungswinkel abhängig, je größer der Schwingungswinkel ist.

Bei größeren Schwingungswinkeln liegt die Fördergeschwindigkeit auf mittlerem, bei kleineren Schwingungswinkeln auf geringem Niveau. Die Fördergeschwindigkeitskurven haben ein Minimum bei jedem untersuchten Schwingungswinkel. Bei einem

Schwingungswinkel von $\beta = 6^\circ$ liegt die Fördergeschwindigkeit unter dem Wert von 0,3 m/s. Die Änderung des Übertragungswinkels hat bei dieser flachen Schwingungsrichtung, bei der keine Wurf Förderung auftritt, fast keinen Einfluss. Bei größeren Schwingungswinkeln hat der Übertragungswinkel einen stärkeren Einfluss, da dabei das Gut geworfen wird. Bei höheren Korndurchsätzen ist eine zügige Förderung ohne Wurf sehr erschwert.

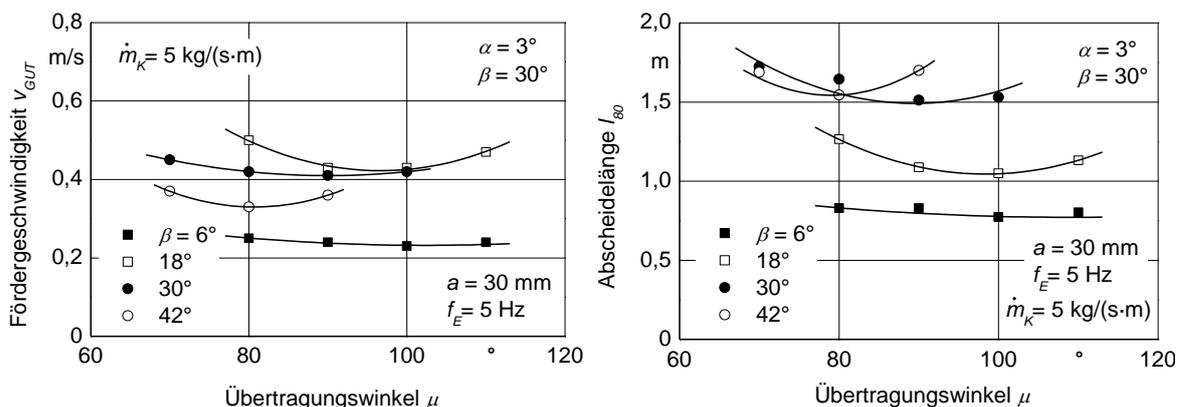


Bild 65: Einfluss des Übertragungswinkels ψ auf die Fördergeschwindigkeit v_{GUT} und Abscheidelänge l_{80}

Das Niveau der Abscheidelänge l_{80} liegt in unterschiedlichen Bereichen in Abhängigkeit vom Schwingungswinkel, da er den größeren Einfluss als der Übertragungswinkel ψ auf die Wurfrichtung hat. Jedem Schwingungswinkel entspricht ein bestimmter günstiger Übertragungswinkel, was auf eine günstige Verteilung der vertikalen und horizontalen Beschleunigungen hinweist. Für die kleineren Schwingungswinkel ist der größere Übertragungswinkel günstig, da dadurch die abnehmende Beschleunigung in senkrechter Richtung kompensiert wird. Bei größeren Schwingungswinkeln verschiebt sich der günstige Übertragungswinkel zu kleineren Werten, wodurch die horizontale Beschleunigung gleich bleibt.

Es lässt sich zusammenfassen, dass es einen günstigen Übertragungswinkel und entsprechend einen günstigen Wurfwinkel bzw. eine günstige Verteilung der horizontalen und vertikalen Beschleunigungen für jeden Schwingungswinkel gibt.

7.9 Einfluss der Amplitude a und Frequenz f_E

Die Fördergeschwindigkeit steigt mit der Zunahme der Amplitude linear bei allen Frequenzen an, **Bild 66**. Sie erreicht die größten Werte von ca. $v_{GUT} = 0,7 \text{ m/s}$ bei

den Amplituden von $a = 45 - 50$ mm und bei relativ kleinen Frequenzen von $f_E = 4 - 4,25$ Hz. Im üblichen Bereich der Grundeinstellungen des Vorbereitungsbodens im Mährescher bei Amplituden von etwa $a = 30$ mm liegt die Fördergeschwindigkeit zwischen $v_{GUT} = 0,35$ m/s und $v_{GUT} = 0,5$ m/s in Abhängigkeit von der jeweiligen Frequenz.

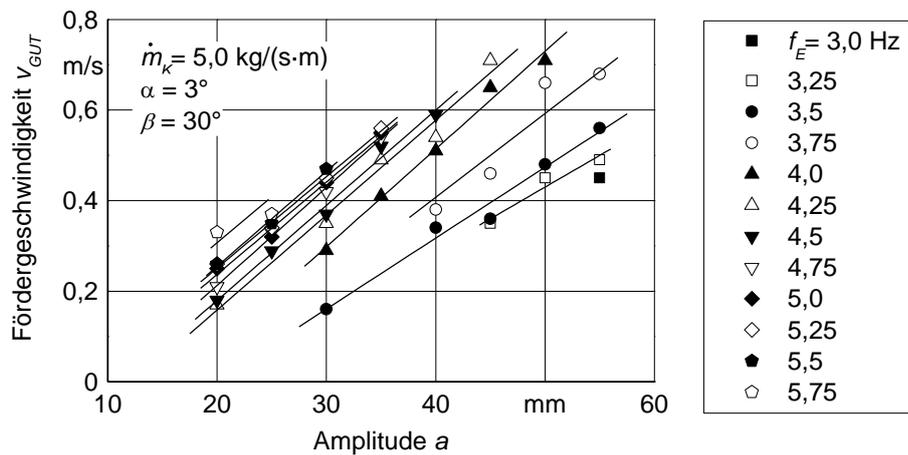


Bild 66: Fördergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Amplitude a

Bild 67 zeigt die Abscheidelängen l_{80} in Abhängigkeit von der Amplitude bei verschiedenen Frequenzen. Mit zunehmender Frequenz verschlechtert sich die Entmischung überproportional.

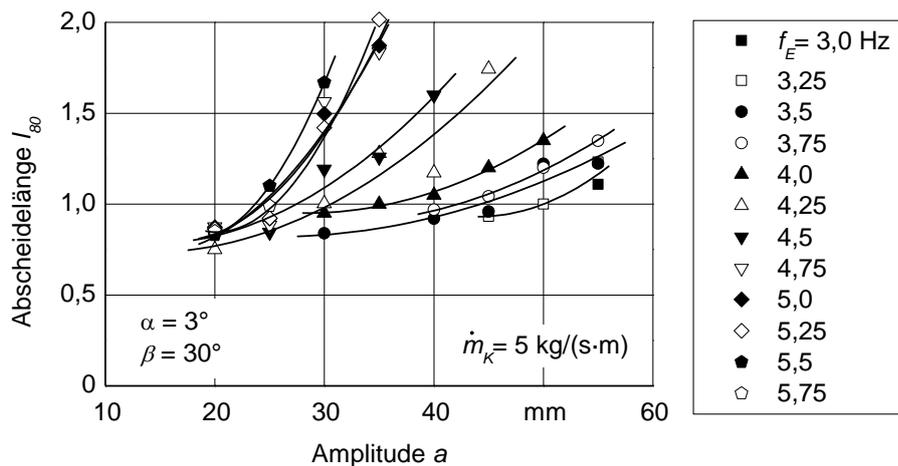


Bild 67: Abscheidelänge l_{80} in Abhängigkeit von Amplitude a

Die Abscheidelänge l_{80} bei den Amplituden $a = 20$ und 25 mm ist am geringsten. Dabei ist die Fördergeschwindigkeit auf dem Vorbereitungsboden sehr gering. Bei kleineren Amplituden von etwa $a = 30$ mm und höheren Frequenzen von etwa $f_E = 5$ Hz liegt die Fördergeschwindigkeit auf gleichem Niveau wie bei der Amplitude von $a = 50$ mm und Frequenz von $f_E = 3,25$ Hz. Die Entmischung zeigt sich durch eine $0,5$ m kürzere Abscheidelänge l_{80} bei der Amplitude von $a = 50$ mm und Frequenz von $f_E = 3,25$ Hz viel besser als bei der Amplitude von $a = 30$ mm und Frequenz von $f_E = 5$ Hz. Bei höheren Korndurchsätzen bzw. bei höheren Schichthöhen erreicht die mechanische Anregung, die vom Vorbereitungsboden dem Reinigungsgut zugeführt wird, die oberen Schichten des Gutes nur geringfügig. Dadurch wird das Gut in den oberen Schichten nicht genug aufgelockert. Bei größeren Amplituden wird die Wurfhöhe durch die längere Schwingweite größer, wobei eine bessere Auflockerung stattfindet und die höhere Aufprallgeschwindigkeit auftritt.

In **Bild 68** ist die Fördergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz bei verschiedenen Amplituden aufgezeigt. Die Fördergeschwindigkeit steigt mit zunehmender Frequenz bei größeren Amplituden von $a = 45 - 55$ mm stärker als bei kleineren Amplituden von $a = 20 - 25$ mm.

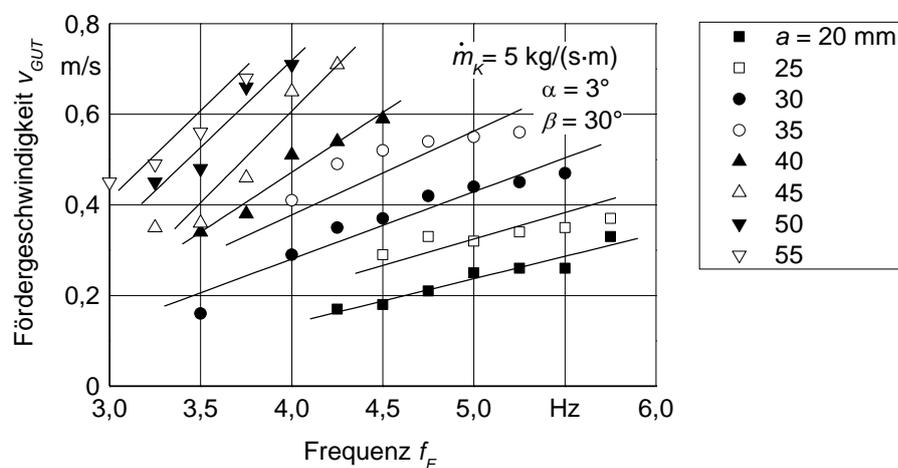


Bild 68: Fördergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz f_E bei verschiedenen Amplituden a

Die Ergebnisse des Einflusses der Frequenz bei verschiedenen Amplituden auf die Abscheidelänge l_{80} zeigt **Bild 69**. Die Frequenz beeinflusst die Entmischung bei größeren Amplituden stärker, wobei bei kleineren Amplituden die Abscheidelängen l_{80}

sich nur geringfügig ändern. Die Abscheidelänge l_{80} liegt bei mittleren Frequenzen und mittleren Amplituden auf höherem Niveau.

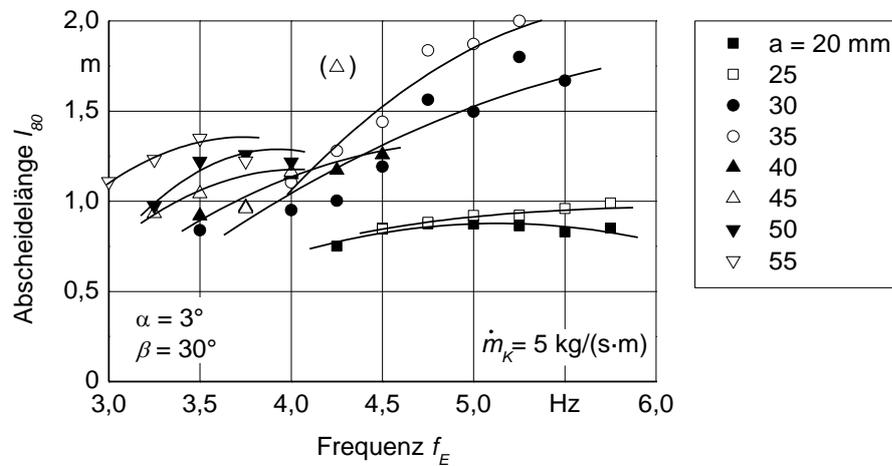


Bild 69: Einfluss der Frequenz auf die Abscheidelänge l_{80} bei unterschiedlichen Amplituden a

Nach der Auswertung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera ist die sichere Förderung bei Fördergeschwindigkeiten niedriger als 0,3 m/s bei einem Korndurchsatz von $\dot{m}_K = 5 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ nicht gewährleistet. Die dabei entstehende Beschleunigung etwa von $20 \text{ m}/\text{s}^2$ kann als der Grenzwert der Beschleunigung \dot{v}_{VB} für die Kontinuität der Förderung bezeichnet werden, Bild 20. Diese liegt etwa im Bereich von Amplituden $a = 20 - 25 \text{ mm}$ und Frequenzen von $f_E = 4 - 4,5 \text{ Hz}$ bei Einstellungen $\alpha = 3^\circ$ und $\beta = 30^\circ$.

7.10 Versuchsergebnisse bei konstanter Wurfkennzahl, $Fr_V = 1$

Bild 70 zeigt die Abhängigkeit der Abscheidelänge l_{80} und der Fördergeschwindigkeit v_{GUT} von Amplitude a und Frequenz f_E . Um die Wurfkennzahl $Fr_V = 1$ konstant zu halten, wurde die Frequenz und die Amplitude geändert.

Bei konstanter Wurfkennzahl $Fr_V = 1$ nimmt mit zunehmender Amplitude die Fördergeschwindigkeit zu. Dadurch steigt die Abscheidelänge l_{80} bis 1 m geringfügig an, da die Verweildauer sich verkürzt. Bei weiterer Zunahme der Fördergeschwindigkeit verschlechtert sich die Entmischung nicht, sondern verbessert sich geringfügig. Es zeigt sich auch, dass günstige Bedingungen für die Entmischung dann auftreten, wenn durch die kleineren Fördergeschwindigkeiten bei relativ kürzeren Amplituden

sich die Verweildauer verlängert oder durch intensivere Auflockerung der höheren Schichten des Gutes bei relativ größeren Amplituden. Die Fördergeschwindigkeit liegt dabei etwa bei $v_{GUT} = 0,42 - 0,5$ m/s auf relativ hohem Niveau.

Mit zunehmender Frequenz bei konstanter Wurfkennzahl $Fr_V = 1$ nimmt die Fördergeschwindigkeit ab. Damit das Beschleunigungsniveau konstant bleibt, muss bei der Erhöhung der Frequenz die Amplitude gesenkt werden. Die Amplitude hat auf die Fördergeschwindigkeit eine viel stärkere Auswirkung als die Frequenz.

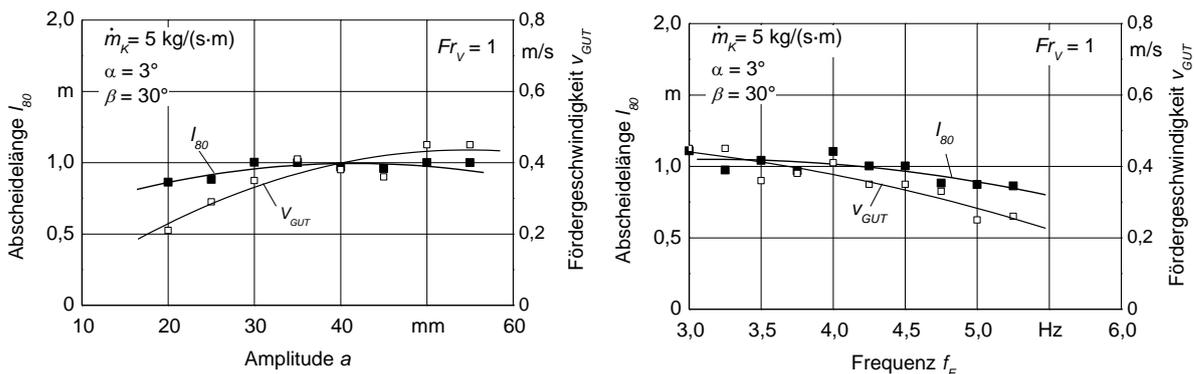


Bild 70: Abscheidelänge l_{80} und Fördergeschwindigkeit v_{GUT} in Abhängigkeit von der Amplituden a bzw. Frequenz f_E bei der Wurfkennzahl $Fr_V = 1$

In **Bild 71** ist die Abscheidelänge l_{80} und die Fördergeschwindigkeit v_{GUT} in Abhängigkeit vom Schwingungswinkel β und Neigung α dargestellt. Hier wurde der Schwingungswinkel β mit der Neigung α variiert, um die Wurfkennzahl $Fr_V = 1$ konstant zu halten.

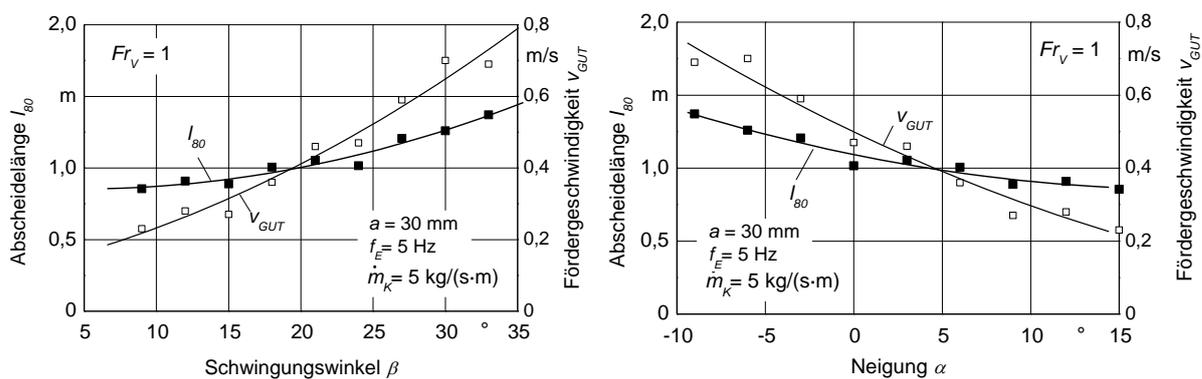


Bild 71: Abscheidelänge l_{80} und Fördergeschwindigkeit v_{GUT} in Abhängigkeit von Schwingungswinkel β bzw. Neigung α bei der Wurfkennzahl $Fr_V = 1$

Die Abscheidelänge l_{80} nimmt mit der Vergrößerung des Schwingungswinkels bei der Abnahme der Neigung bei konstanter Wurfkennzahl $Fr_V = 1$ zu. Starken Einfluss auf die Entmischung hat die Fördergeschwindigkeit auch bei geneigtem Vorbereitungsboden. Bei den kleineren Neigungen von etwa $\alpha = 3 - 4^\circ$ ist der Schwingungswinkel von etwa $\beta = 18 - 21^\circ$ am günstigsten für die Arbeitsqualität des Vorbereitungsbodens. Wegen des Haltens der konstanten Wurfkennzahl durch kleinere Schwingungswinkel nimmt bei negativen Neigungen auch die Aufprallgeschwindigkeit ab. Dadurch wird die Aufhebung des Zusammenhalts der einzelnen Partikeln in der Gutschicht erschwert.

Aus dem Vergleich mit Versuchsergebnissen von Spittel [12] ist zu folgern, dass bei niedrigeren Wurfkennzahlen ($Fr_V = 0,64$) ein kleinerer Schwingungswinkel von $\beta = 10^\circ$ bei einer Neigung von $\alpha = 1^\circ$ günstig ist und bei höheren Wurfkennzahlen ($Fr_V = 1$) ein größerer Schwingungswinkel von etwa $\beta = 18^\circ - 21^\circ$ bei einer Neigung von $\alpha = 3^\circ$ günstig ist. Ausgehend davon, dass die höhere horizontale ξ -Beschleunigungen sich günstiger für die Entmischung gezeigt haben, folgt, dass eine kleinere Wurfkennzahl besser für die Entmischung ist.

7.11 Einfluss der Beschleunigungen

Die Beschleunigungen vom Vorbereitungsboden wurden durch die Amplitude a oder durch die Frequenz f_E geändert. Die Auswirkung der Beschleunigung durch die Amplitude a auf die Fördergeschwindigkeit und auf die Entmischung zeigt **Bild 72**. Der untersuchte Bereich der Beschleunigungen liegt etwa zwischen 10 und 40 m/s^2 .

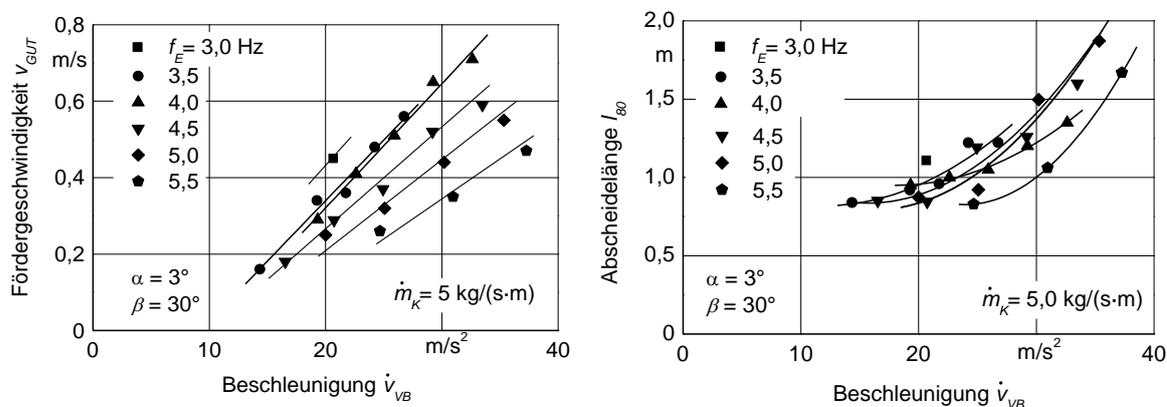


Bild 72: Einfluss der Beschleunigung durch die Amplitude a bei verschiedenen Frequenzen auf die Fördergeschwindigkeit v_{GUT} und Abscheidelänge l_{80}

Bild 72 zeigt, dass die Fördergeschwindigkeit mit zunehmender Beschleunigung linear zunimmt. Bei einer Frequenz von $f_E = 5,5$ Hz treten höhere Beschleunigungen als bei einer Frequenz von $f_E = 3,5$ Hz auf. Während die Fördergeschwindigkeiten mit zunehmender Beschleunigung \dot{v}_{VB} linear ansteigen, nimmt die Abscheidelänge l_{80} nimmt dabei überproportional zu. Diese ist bei höheren Frequenzen etwas stärker ausgeprägt.

Die Abscheidelängen l_{80} liegen bis zu einer Beschleunigung von etwa 20 m/s^2 sehr nah beieinander, dabei arbeitet der Vorbereitungsboden im Betrieb „Schüttelrutsche“ ohne Wurf. Der Verlauf der Abscheidelängen l_{80} ändert sich aber, wenn der Vorbereitungsboden in den Betrieb „Schwingrinne“ eintritt. Die höhere Frequenz bei gleicher Beschleunigung z. B. von 25 m/s^2 verkürzt die Abscheidelänge l_{80} .

Im **Bild 73** ist der Einfluss der Beschleunigung \dot{v}_{VB} durch die Frequenz f_E bei verschiedenen Amplituden a auf die Fördergeschwindigkeit und auf die Abscheidelänge l_{80} aufgezeigt. Die Fördergeschwindigkeit erhöht sich stärker bei größeren Amplituden mit der Zunahme der Beschleunigung.

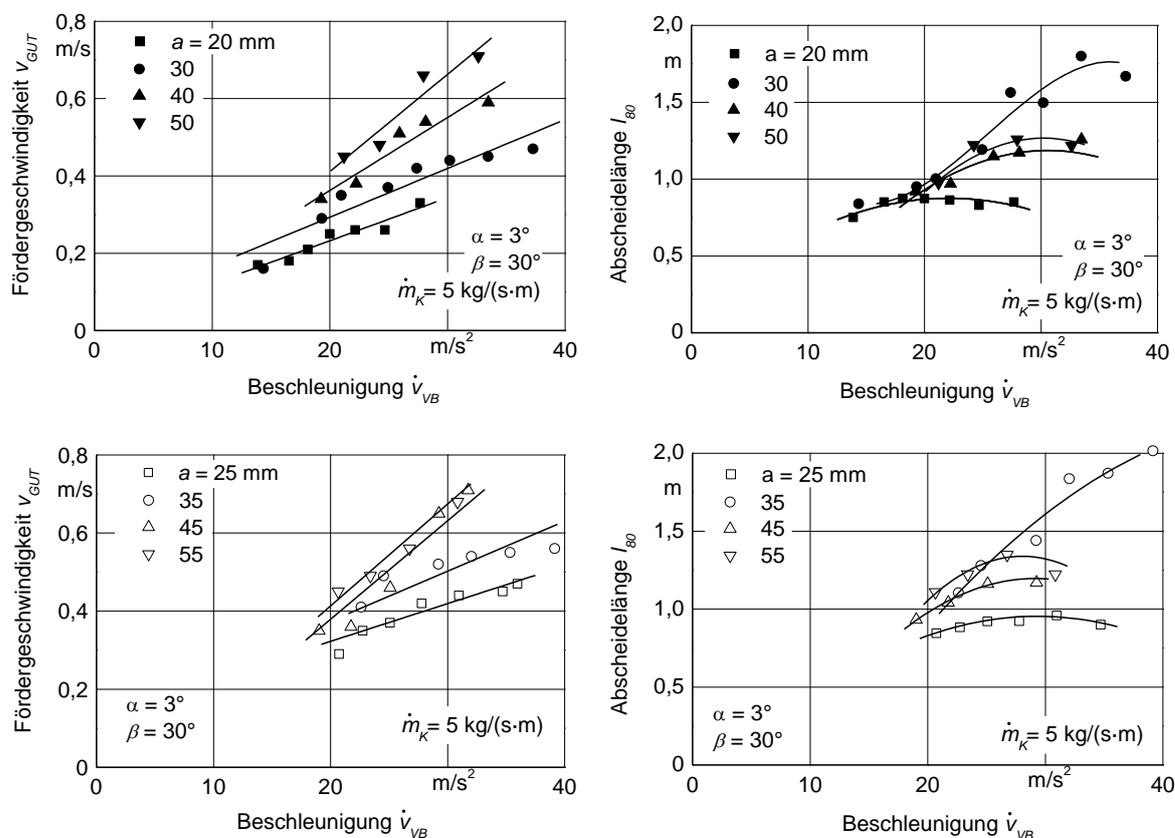


Bild 73: Einfluss der Beschleunigung durch die Frequenz f_E bei verschiedenen Amplituden a auf die Fördergeschwindigkeit v_{GUT} bzw. Abscheidelänge l_{80}

Die kleineren Amplituden sind wegen der geringeren Fördergeschwindigkeit für die Entmischung günstig. Bei größeren Amplituden hat die Abscheidelänge l_{80} auch günstigere Werte als bei mittleren Amplituden. Dies erklärt sich dadurch, dass die Entmischung sich bei mittleren Amplituden weder durch die Verlängerung der Verweildauer (kleine Amplitude) noch durch die stärkere Auflockerung (höhere Amplitude, längerer Wurf) verbessert.

Bild 74 zeigt den Einfluss der Beschleunigungen durch den Schwingungswinkel im bezogenen relativen Koordinatensystem ξ, η , Bild 27. Die ξ -Beschleunigung ist die Komponente der waagerechten Beschleunigung in der Vorbereitungsbodenebene, von der die Förderung abhängig ist. Die η -Beschleunigung zeigt die senkrechte Beschleunigung zum Vorbereitungsboden, die für den Wurf und für die Auflockerung verantwortlich ist. Im Unterschied zur Wurfkennzahl Fr_V berücksichtigt die η -Beschleunigung auch die Kinematik des Vorbereitungsbodens.

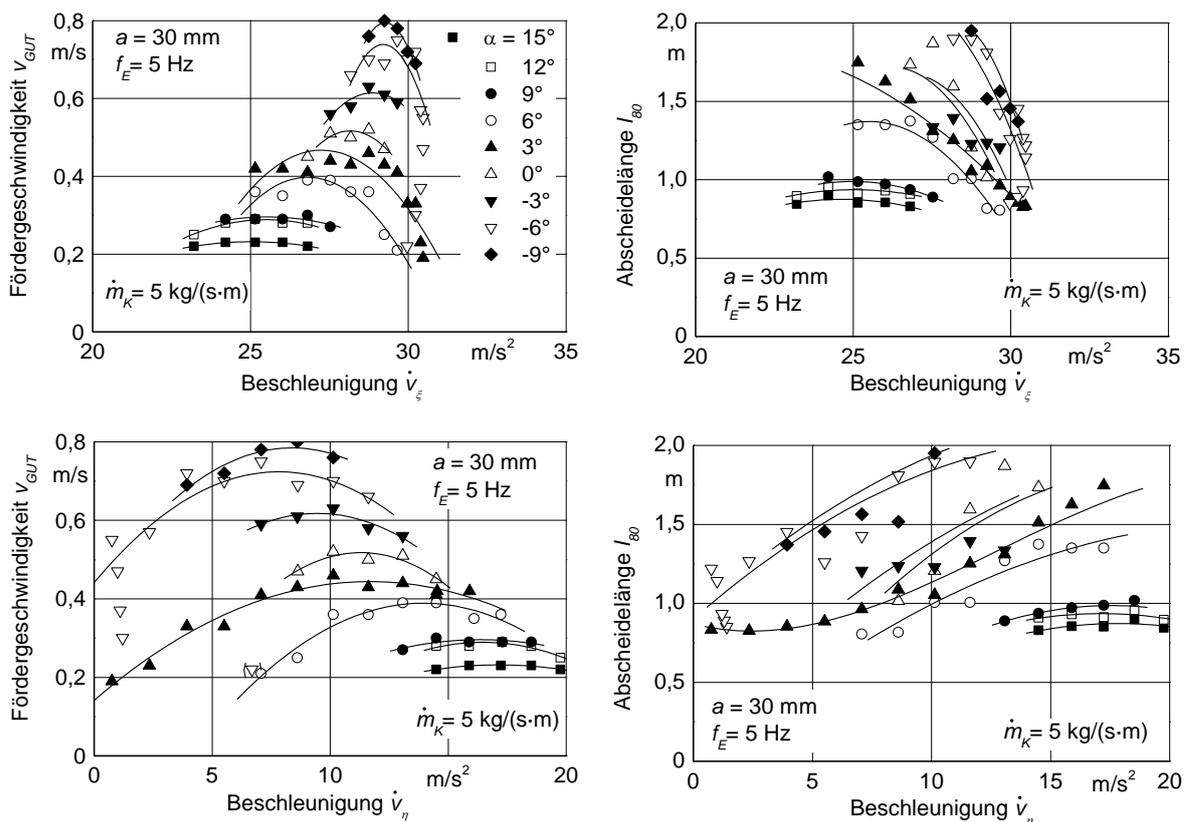


Bild 74: Einfluss der ξ - und η -Beschleunigung auf die Fördergeschwindigkeit und auf die Abscheidelänge l_{80}

Die Fördergeschwindigkeit hat ein Maximum bei bestimmten Beschleunigungen in horizontaler und in vertikaler Richtung. Mit zunehmender Neigung verschiebt sich

das Maximum der horizontalen ξ -Beschleunigung zu kleineren Werten und bei der vertikalen η -Beschleunigung zu größeren Werten.

Die Entmischung verbessert sich mit Zunahme der ξ -Beschleunigung bei allen Neigungen. Bei größeren Neigungen ist dieser Einfluss geringer. Die günstigste horizontale ξ -Beschleunigung hat den Wert von etwa 30 m/s^2 . Mit der Zunahme der η -Beschleunigung verschlechtert sich die Entmischung bei kleineren und bei negativen Neigungen stärker als bei größeren Neigungen.

Im **Bild 75** ist der Einfluss der ξ -Beschleunigung am Ende und am Anfang des Vorbereitungsbodens auf die Entmischung dargestellt.

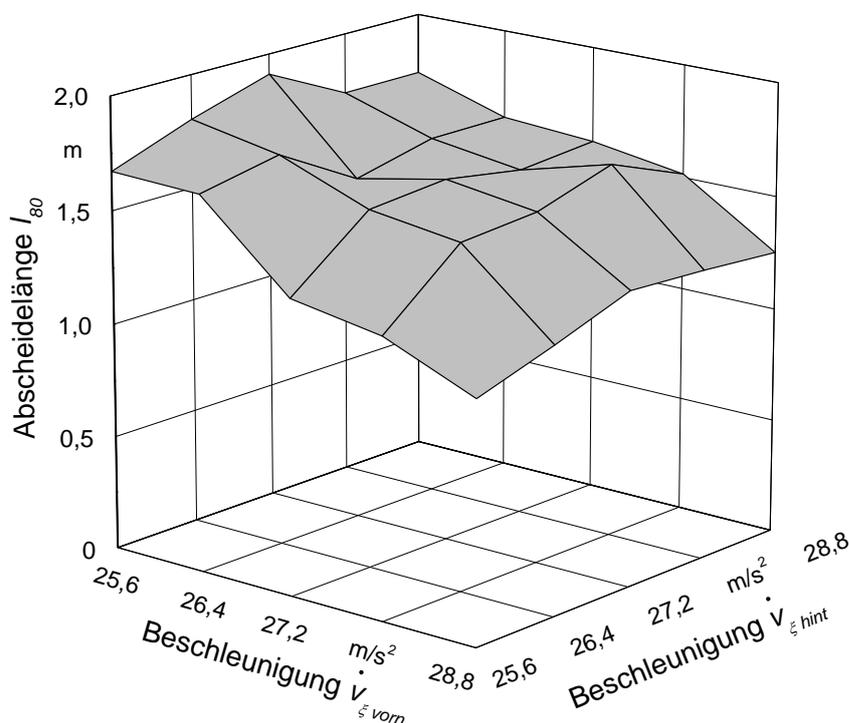


Bild 75: Einfluss der Beschleunigung in ξ -Richtung im vorderen und hinteren Teil des Vorbereitungsbodens bei einer Neigung von $\alpha = 3^\circ$, Amplitude $a = 30 \text{ mm}$, Frequenz $f_E = 5 \text{ Hz}$

Mit der Zunahme der ξ -Beschleunigung am Anfang des Vorbereitungsbodens verbessert sich die Entmischung. Wenn die Fördergeschwindigkeit des Vorbereitungsbodens durch die Senkung der ξ -Beschleunigung im hinteren Teil ein wenig abnimmt, wirkt sich das günstig auf die Abscheidelänge l_{80} aus. Die Abscheidelänge l_{80} liegt im ungünstigen Bereich, wenn die ξ -Beschleunigungen im vorderen und hinteren Teil des Vorbereitungsbodens etwa gleich sind.

In **Bild 76** ist die Abscheidelänge l_{80} in Abhängigkeit der η -Beschleunigung im vorderen und im hinteren Teil des Vorbereitungsbodens gezeigt. Die günstigen Werte der Beschleunigung treten dann auf, wenn der größte Unterschied zwischen Beschleunigung im vorderen und hinteren Teil des Vorbereitungsbodens auftritt. Dadurch wird die intensivere Lageänderung des Kurzstrohgitters erreicht, was den Durchgang der Körner zur Förderfläche begünstigt. Bei der Senkung der η -Beschleunigung entsprechend der Zunahme der ξ -Beschleunigung am Anfang des Vorbereitungsbodens wird die Entmischung besser. Erst bei stärkerer Zunahme der η -Beschleunigung am Ende des Vorbereitungsbodens verbessert sich die Auflockerung und dadurch geht die Abscheidelänge l_{80} etwas zurück.

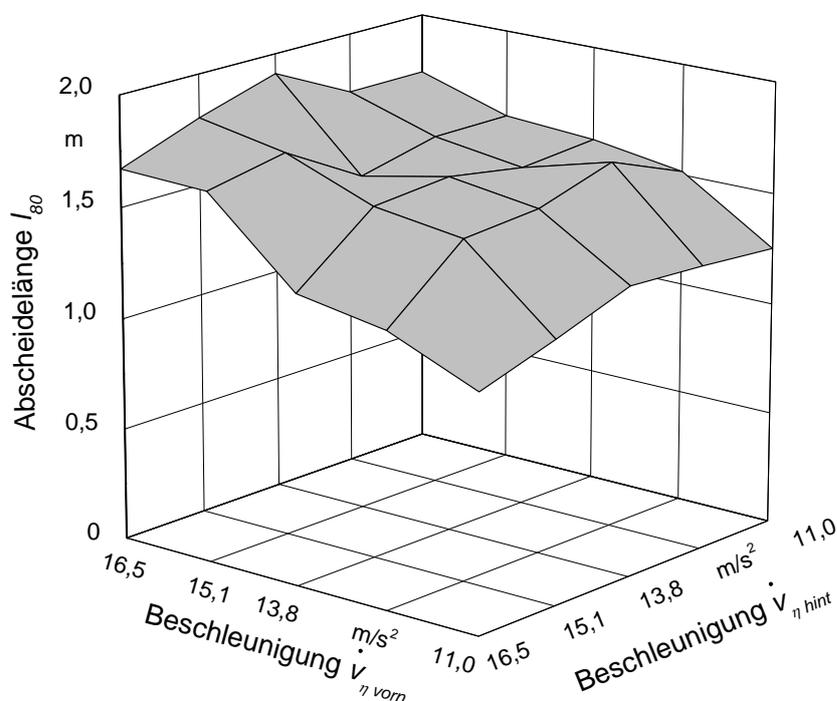


Bild 76: Einfluss der Beschleunigung in η -Richtung im vorderen und im hinteren Teil des Vorbereitungsbodens bei einer Neigung von $\alpha = 3^\circ$, Amplitude $a = 30$ mm, Frequenz $f_E = 5$ Hz

8 ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten Jahren war bei der stetig steigenden Mährescherleistung die Leistung der Reinigungsanlage der begrenzende Faktor, da das Dreschwerk und die Abscheideelemente durch zusätzliche Trenntrommeln und Abscheiderotoren keinen Engpass mehr darstellten. Die Leistungssteigerung der Reinigungsanlage kann vor allem durch eine Vorentmischung wesentlich verbessert werden. Kornverluste können dabei auch bei höheren Korndurchsätzen (untersucht wurden Korndurchsätze bis zu 5,5 kg/(s·m)) auf relativ niedrigem Niveau bleiben.

Korn- und NKB-Durchsatz beeinflussen sowohl die Fördergeschwindigkeit als auch die Entmischung auf dem Vorbereitungsboden. Der Korndurchsatz wirkt sich besonders stark auf die Fördergeschwindigkeit aus, wenn ein „Wurf“ im Förderprozess ($Fr_v > 1$) eintritt. Das Fördergut besitzt Elastizitätseigenschaften, welche die eingeleitete mechanische Anregung stark beeinflussen. Folge ist eine abnehmende Fördergeschwindigkeit. Die Entmischung ihrerseits wirkt sich positiv auf die Geschwindigkeitsübertragung vom Vorbereitungsboden auf das Fördergut aus.

Die Entmischung findet im Wesentlichen im letzten Drittel des Vorbereitungsbodens statt. Das entspricht bei der vorliegenden Untersuchungsanordnung einem Bereich von etwa 1000 – 1500 mm. Die Länge des Vorbereitungsbodens hat einen wesentlichen Einfluss auf die Entmischung. Bei größeren Korndurchsätzen verbessert sich die Entmischung durch eine verlängerte Verweildauer des Gutes auf dem Vorbereitungsboden. Daher sind größere Längen des Vorbereitungsbodens zu empfehlen. Bei einer Vergrößerung des Korndurchsatzes von 3 kg/(s·m) bis 4,5 kg/(s·m) führt die Verlängerung des Vorbereitungsbodens von $l_{VB} = 500$ mm auf $l_{VB} = 1500$ mm zur Verringerung der Abscheidelänge l_{80} um bis zu 50 %.

Der Drahtrechen wirkt sich günstig bei größeren Korndurchsätzen aus. Durch die Luftströmung nimmt das Hohlraumvolumen in der Gutschicht zu. Dies führt zu einer besseren Vorentmischung. Durch den Einsatz des Drahtrechens können gleichzeitig die vorentmischten Körner gleich am Anfang der Siebe abgeschieden werden.

Bei den Untersuchungen des Wechselwirkungseinflusses der Neigung und des Schwingungswinkels hat sich gezeigt, dass das Fördergeschwindigkeitsmaximum sich wie folgt verschiebt: größere Schwingungswinkel von etwa $\beta = 18^\circ$ bis $\beta = 35^\circ$ bei Zunahme der Neigung von etwa $\alpha = -9^\circ$ bis $\alpha = 15^\circ$. Die maximalen Fördergeschwindigkeiten können dabei die Werte von 0,7 – 0,8 m/s erreichen. Dabei beträgt

die minimale Abscheidelänge $l_{80} = 0,6 - 0,75$ m bei einer minimalen Fördergeschwindigkeit. Bei weiterer Verringerung der Fördergeschwindigkeit konnte keine weitere Reduzierung der Abscheidelänge festgestellt werden.

Bei einer Neigung von $\alpha = 3^\circ$ und einem Schwingungswinkel von $\beta = 24^\circ$ ist die maximale Fördergeschwindigkeit $v_{GUT} = 0,45$ m/s. Die Wurfkennzahl entspricht dabei dem Wert $Fr_V = 0,93$. Die beste Entmischung zeigte sich aber bei einem Schwingungswinkel von $\beta = 10^\circ$. Diese Einstellungen entsprechen der Wurfkennzahl $Fr_V = 0,37$ und der Fördergeschwindigkeit $v_{GUT} = 0,35$ m/s.

Bei einer Neigung von $\alpha = 6^\circ$ und einem Schwingungswinkel von $\beta = 30^\circ$ ist die maximale Fördergeschwindigkeit $v_{GUT} = 0,40$ m/s. Die Wurfkennzahl entspricht dabei dem Wert $Fr_V = 1,23$. Die beste Entmischung wurde bei einem Schwingungswinkel von $\beta = 18^\circ$ erzielt. Diese Einstellungen entsprechen der Wurfkennzahl $Fr_V = 0,93$ und der Fördergeschwindigkeit $v_{GUT} = 0,35$ m/s.

Diese beiden Beispiele zeigen, dass eine alleinige Zunahme der Wurfkennzahl zu keiner weiteren Erhöhung der Fördergeschwindigkeit führt. Vielmehr gibt es für jede Neigung einen günstigsten Schwingungswinkel. Hinsichtlich der Entmischung sollte die Fördergeschwindigkeit minimal sein. Allerdings sollte eine Geschwindigkeit von $v_{GUT} = 0,3 - 0,35$ m/s nicht unterschritten werden, da sonst Instabilitäten im Förderprozess eintreten können.

Durch die Änderungen der Geometrie und der Kinematik des Vorbereitungsbodens lassen sich einige Verbesserungen hinsichtlich der Entmischung bei anderen gleichbleibenden Bedingungen aufzeigen. Bei Untersuchung unterschiedlicher vorderer und hinterer Schwingungswinkel wurde festgestellt, dass ein Schwingungswinkel, welcher hinten größer als vorne ist, den Entmischungsprozess positiv beeinflusst. Die höchste Fördergeschwindigkeit wird dagegen bei identischen Schwingungswinkeln erreicht.

Die verschiedenen Schwingenlängen des Vorbereitungsbodens haben zwar einen geringen Einfluss auf die Fördergeschwindigkeit, beeinflussen aber dafür die Abscheidelänge l_{80} . Bei kürzeren Schwingenlängen wird die Entmischung auf dem Vorbereitungsboden besser.

Der Übertragungswinkel ψ beeinflusst durch die Verteilung der horizontalen und vertikalen Beschleunigungen sowohl die Fördergeschwindigkeit wie auch die Entmi-

schung. Für jeden Schwingungswinkel β gibt es einen günstigsten Übertragungswinkel ψ .

Grundsätzlich hatte die Vergrößerung der Amplitude einen stärkeren positiven Einfluss auf die Entmischung als eine Frequenzerhöhung. Es werden dabei auch höher gelegene Schichten des Reinigungsgutes besser aufgelockert. Außerdem führen die größeren Amplituden zu größeren Wurfhöhen und dadurch zu höheren Aufprallgeschwindigkeiten des Gutes, was sich ebenfalls günstig auf die Entmischung auswirkt. Bei gleichbleibender Fördergeschwindigkeit ist die Kombination „größere Amplitude und kleinere Frequenz“ günstiger als die Kombination „kleinere Amplitude und größere Frequenz“.

Die Untersuchungen bei einer konstanten Wurfkennzahl haben gezeigt, dass Amplitude und Frequenz, Neigung und Schwingungswinkel eine unterschiedliche Beeinflussung auf die Förderung und Entmischung ausüben. Deswegen müssen neben der Wurfkennzahl auch diese aufgeführten Parameter berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen zu den Beschleunigungen zeigten, dass die unterschiedlichen Beschleunigungen entlang des Vorbereitungsbodens auch zur intensiveren Lageänderung der NKB-Gitter und des Kornes führen. Die Fördergeschwindigkeit erhöht sich mit der Zunahme der horizontalen ξ -Beschleunigungen auf einen maximalen Wert. Eine weitere Erhöhung führt zu einer abnehmenden Fördergeschwindigkeit. Mit der Zunahme der Neigung verschiebt sich die günstige horizontale ξ -Beschleunigung zu kleineren Werten. Bei den vertikalen η -Beschleunigungen kann Umgekehrtes festgestellt werden. Bei zunehmender Neigung beeinflusst die vertikale η -Beschleunigung die Förderung des Gutes positiv. Für die Entmischung sind maximale horizontale ξ -Beschleunigungen und minimale η -Beschleunigungen bei allen Neigungen günstig.

9 SUMMARY

In the last years with the increasing performance of the combine harvester capacity, the performance of the cleaning system has been the limiting factor, because the capacity of the threshing drum and the separation elements by the use of additional separation drums and rotors is not a problem anymore. The performance of the cleaning system can be greatly increased, especially through intense pre-segregation, whereas grain losses remain at a relatively low level even at high particle rates of approximately of $\dot{m}_K = 5,5 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$.

Grain- and NKB (chaff and other plant residue) -throughput affect both the conveying speed and the segregation on the grain pan. The grain throughput has a particularly strong impact on the conveyor speed, when throw occurs in the conveying process ($Fr_v > 1$). Thereby the elastic properties of the crop layer (straw and chaff rack) damps very strong the introduced mechanical agitation. This decreases the conveying speed strongly. The segregation in turn affects positively the speed of transfer from the grain pan to the material.

The separation takes place substantially in the last third of the grain pan. This corresponds, in the present assay assembly a range of about 1000 – 1500 mm. The length of the grain pan plays an important role in segregation. Since the segregation is improved mainly by extending the retention of the grain on the grain pan by higher MOG layer (throughput), thus a larger grain pan length is advisable. When there is an increase of grain throughput from $\dot{m}_K = 3 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ to $\dot{m}_K = 4,5 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ and a lengthening of the grain pan from $l_{VB} = 500 \text{ mm}$ to $l_{VB} = 1500$, there is a decrease of the separated length l_{80} up to 50 %.

The straw rack is more favourable in case of increased grain throughput. Thereby the cavity volume increases in the product layer because of the air flow. This leads to a better segregation. Simultaneously, through the use of the straw rack the segregated grains may be separated at the beginning of the sieves.

Research of interaction between the influence of inclination and the oscillation angle proved, that the maximum of conveying speed shifts as follows: higher oscillation angle from approximately $\beta = 18^\circ$ to $\beta = 35^\circ$ with the increasing of positive inclination from approximately $\alpha = -9^\circ$ to $\alpha = 15^\circ$. The maximum conveying speeds can reach values between 0,7 – 0,8 m/s. In this case the favorable minimum separated length is $l_{80} = 0,6 - 0,75 \text{ m}$ at the minimum conveying speed. Upon further reduction of the conveying speed, no further reduction of the separated length could be determined.

By inclination of $\alpha = 3^\circ$ and oscillation angle of $\beta = 24^\circ$, the maximum conveying speed is $v_{GUT} = 0,45$ m/s. The throw ratio corresponds to the value of $Fr_V = 0,93$. The favourable segregation has been proved by oscillation angle of $\beta = 10^\circ$. These settings correspond to throw ratio $Fr_V = 0,37$ and conveying speed $v_{GUT} = 0,35$ m/s.

By inclination of $\alpha = 6^\circ$ and oscillation angle of $\beta = 30^\circ$, the maximum conveying speed is $v_{GUT} = 0,40$ m/s. The throw ratio corresponds to the value of $Fr_V = 1,23$. The favourable segregation has been proved by oscillation angle of $\beta = 18^\circ$. These settings correspond to throw ratio $Fr_V = 0,93$ and conveying speed $v_{GUT} = 0,35$ m/s.

These two examples show that only increasing the throw ratio does not lead to further increase of the conveying speed. For any inclination, there is a favorable oscillation angle. Regarding the separation, the conveying speed must be minimal, but should not fall below the values of $v_{GUT} = 0,3 - 0,35$ m/s, because otherwise continuity of conveyance will be endangered.

Changes in the geometry and kinematic of the grain pan can show some improvements in terms of segregation in otherwise constant conditions. Research on different front and back oscillation angles proved, that a oscillation angle which on the back of the grain pan is greater than on the front, affects positively the segregation. The highest conveyance speed is reached by identical oscillation angles.

Different wing lengths of a grain pan have a lower influence on conveyer speed, but they do produce consequences on the separation length l_{80} . Short wing lengths make segregation on a grain pan better.

The transmission angle ψ has an influence through the distribution of the vertical and horizontal components of acceleration on the conveyor speed and segregation. Each oscillation angle β has a favorable transmission angle ψ .

Basically, an increase of the amplitude has a stronger positive influence on the segregation than an increase of the frequency. Even higher levels of MOG are loosened better in this case. The higher amplitude leads also to bigger throw and therefore to higher impact velocity of the good, which in turn leads also to a favourable influence on segregation. With constant conveyor speed is the combination of "high amplitude and less frequency" better than the combination of "less amplitude and high frequency".

Research on constant throw ratio proved that amplitude and frequency, inclination and oscillation angle exercise different influence on conveying and segregation with

constant throw ratio. Therefore, along with the throw ratio one also must consider one of these parameters.

The conveyor speed is increasing with the increase of the horizontal ξ -accelerations to a maximum value. A further increase leads to a decrease of the conveyor speed. With the increase of the inclination, the favorable horizontal ξ -acceleration shifts to smaller values. With the vertical η -accelerations it is reversed. An increase of the inclination has as result, that the vertical η -acceleration affects the conveying of the material in a positive way. For the segregation, the larger horizontal ξ -accelerations and smaller vertical η -accelerations are favorable.

10 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Böttinger S. und P. Wacker,,: Mähdrescher. In: Jahrbuch Agrartechnik - Yearbook Agricultural Engineering, Band 19. Münster 2007.
- [2] Kutzbach, H.D.: Tendenzen in der Mähdrescherentwicklung. VDI-MEG Kolloquium Mähdrescher, 17./18. 03. 2005 Hohenheim. In: VDI-MEG Kolloquium Landtechnik Heft 38 Mähdrescher. Filderstadt: 2005, S. 7-19.
- [3] Kutzbach, H.D.: Mähdrescher. In: Jahrbuch Agrartechnik - Yearbook Agricultural Engineering, Band 9. Münster: Landwirtschaftsverlag 1997, S. 149-156, 291-293.
- [4] Person, S.: Die Arbeitsweise einer Mähdrescherreinigung. Landtechnische Forschung (1957) H. 5, S. 133-137.
- [5] • Freye, T.: Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähdreschers. Dissertation Universität Hohenheim, 1980, Forschungsbericht Agrartechnik der VDI-MEG Nr. 47.
- [6] • Beck, F.: Simulation der Trennprozesse im Mähdrescher. Dissertation Universität Stuttgart, 1999. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebensmitteltechnik Nr. 92.
- [7] Wessel J.: Verfahren des Siebens und des Windsichtens. Grundlagen der Landtechnik 18 (19687) Nr. 4, S. 151-157.
- [8] • Böttinger, S.: Die Abscheidefunktion von Hordenschüttler und Reinigungsanlage in Mähdreschern. Dissertation Universität Stuttgart, 1993, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebensmitteltechnik Nr. 66.
- [9] • Zhao, Y.: Einfluss mechanischer und pneumatischer Parameter auf die Leistungsfähigkeit von Reinigungsanlagen im Mähdrescher. Dissertation Universität Hohenheim, 2002, Forschungsbericht Agrartechnik der VDI-MEG Nr. 387.
- [10] Regge, H.: Möglichkeiten zur Steigerung der Siebleistung von Getreidereinigungsmaschinen. Agrartechnik 30 (1980) H. 1, S. 18-20.
- [11] • Rochell, P.: Untersuchungen über den Fördervorgang auf dem Schwingförderer unter besonderer Berücksichtigung der Reinigungsanlage im Mähdrescher. Dissertation Universität Stuttgart, 1975, Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Nr.4.
- [12] • Spittel, A.: Optimierungsuntersuchungen eines Rücklaufbodens der Reinigungseinrichtung, dargestellt am Beispiel des Mähdreschers und der Fruchtart Weizen. Dissertation Universität Dresden, 1980.

-
- [13] • Botschkov, N.: Obosnovanie optimalnih reschimov raboti i konstrukzii transportnoj doski sernouborotschnogo kombajna (Begründung des optimalen Betriebes und Konstruktion des Förderbodens des Mähdeschers). Dissertation Institut landwirtschaftliche Maschinen. Rostov am Don, 1972.
- [14] Spittel, A.: Neue Erkenntnisse zum Einfluss der Schichtung des Reinigungsgemisches eines Mähdeschers durch geänderte Auswertemethodik. Agrartechnik 29 (1979) H.8, S. 353-355.
- [15] • Hübner, R.: Entwicklung eines Modells zur Auslegung einer rotierenden Reinigungseinrichtung im Mähdescher. Dissertation Technische Universität Dresden, 1997.
- [16] • Grobler, H.: Untersuchungen zur Korn-Stroh-Trennung mit überlagerten Beschleunigungen im Planetentrommelsortierer. Dissertation Universität Stuttgart, 1987, Forschungsbericht Agrartechnik der VDI-MEG Nr. 140.
- [17] Böttcher S. und H. Gabler: Untersuchungen zur Antriebsleistungsberechnung senkechter Schneckenförderer. Fördern und Heben 32 (1982) Nr. 6, S. 447-452.
- [18] • Schubert H.: Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik. Band1, 2. Wiley-VCH, 2003.
- [19] Stieß M.: Mechanische Verfahrenstechnik, Band 1. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1979.
- [20] Steinbrück, K.: Schwinggeräte für förder- und verfahrenstechnische Aufgaben. AEG-Telefunken, Technische Mitteilungen. 71 (1981) Nr. 3, S. 87-93.
- [21] • Sabel, G.: Theoretische und experimentelle Untersuchung des Schwingfördervorganges nach dem Wurfprinzip bei feinkörnigen Fördergütern. Dissertation Universität München, 1985. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 13: Fördertechnik Nr. 26.
- [22] • El-Nokraschy H.M.: Stabilitätsverhalten von Schüttgütern auf schwingenden Unterlagen. Dissertation Universität Darmstadt, 1968.
- [23] Heidt, H. und J. Johannes: Die Schwingrinne – ein Hilfsmittel für die Körnerförderung. Landtechnische Forschung 12 (1962) H. 3, S. 61-67.
- [24] Iltschenko, W. D.: Issledovanie dvischenija nasipnih sernovih kultur tolstim sloem na wibracionnoj ploskosti (Untersuchungen der Bewegung der Schüttgüter von Getreide mit hohen Schichtdicken auf dem Schwingförderer). Aftoreferat 185 (1967) Nr. 1, S. 15-27.

-
- [25] Campbell H. und W.C. Bauer.: Grund und Ursache für die Entmischung in Feststoffmischern. *Aufbereitungstechnik* (1967) Nr. 1, S. 49-50.
- [26] Berdishev W.: Obosnovanie parametrov transportno-kolebatel'noj otschistki sernouborotschnogo kombajna (Begründung der Parameter der Förderschwingreinigungsanlage). Dissertation Agraruniversität Moskau, 1983.
- [27] Axt, W.: Bauformen und Einsatzbeispiele von Schwingrinnen. *Aufbereitungstechnik* (1967) Nr. 3, S. 138-145.
- [28] Hoormann, W., Hannover-Messebericht: Schwingförderer. *Fördern und Heben* 18 (1968) Nr. 10, S. 605-613.
- [29] • Kühler, H.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Schwingfördern. Dissertation Universität der Bundeswehr Hamburg, 1992.
- [30] • Buchta, S.: Untersuchung des Förderverhaltens feinkörniger Schüttgüter auf Schwingrinnen bei nichtharmonischer Rinnenbewegung. Dissertation Technische Universität München, 1981.
- [31] Segler, G. und F. Wieneke: Dreschverluste und Leistungsbedarf des Mähdreschers beim Verarbeiten von Getreide mit Grüngutbesatz. *Landt. Forschung* 11 (1961) Nr.5, S.141-144.
- [32] Wieneke, F.: Reibungswerte von Pflanzen und Faserstoffen. *Landt. Forschung* 6 (1956) Nr. 5, S.1-6.
- [33] Persson, S. and M.K. Megnin: Functions of the Grainpan in a Combine Cleaning Shoe. *AqEng Uppsala*, 1.-4. Juni 1992, paper No. Pm 9201, 17a.
- [34] Persson, S. and M.K. Megnin: Factors Affecting Material Movement on a Corrugated Vibrating Conveyor (Grainpan). *Transactions ASAE* 35 (1992) No. 2, pp. 395-400.
- [35] Peschl, I.: Einfluss der Guteigenschaften auf die Fördergeschwindigkeit bei der Förderung auf Schwingrinnen. *Fördern und Heben* 20 (1970) Nr. 8, S. 442-447.
- [36] • Letoschnev, M.N.: Selskohosjajstvennie Maschini, Landwirtschaftliche Maschinen, Selhosgis, Leningrad 1955.
- [37] Baader, W., H. Sonnenberg und H. Peters: Die Entmischung eines Korngut-Fasergut-Haufwerkes auf einer vertikal schwingenden, horizontalen Unterlage. *Grundlagen der Landtechnik* 19 (1969) H. 5, S. 149-157.
- [38] Reumschüssel, G.: Untersuchungen am Obersieb einer Reinigungseinrichtung. *Deutsche Agrartechnik* 23 (1973) H. 6, S. 280-283.

- [39] Reumschüssel, G.: Untersuchungen am Obersieb der ebenen Mähdrescher-Reinigungseinrichtung. Deutsche Agrartechnik 22 (1972) H. 6, S.264-270.
- [40] Terskov, G.: O vlijanii raslitschnih faktorov na skorost' dvischenija materiala na reschetah s kruglimi otverstijami (Über den Einfluß verschiedener Faktoren auf die Fördergeschwindigkeit der Siebe mit runden Löchern). Trudi Tscheljabinskogo Instituta Mehanisazii Selskogo Hosjajstva 3 (1958), H. 6, S. 95-127.
- [41] Terskov, G.: O vlijanii skorost' dvischenija materiala i kinematitscheskih parametrov na propusknuju sposobnost na reschetah s kruglimi otverstijami (Über den Einfluß der Fördergeschwindigkeit und der kinematischen Parameter auf die Abscheidung der Siebe mit runden Löchern). Trudi Tscheljabinskogo Instituta Mehanisazii Selskogo Hosjajstva 3 (1958), H. 6, S. 127-174.
- [42] Beck, F.: Die Reinigungsanlage im Mähdrescher. Landtechnik 55 (2000) H. S. 76-80.
- [43] Kluge, W.: Neuzeitliche Maschinen für die Aufbereitung. Erdöl und Kohle 4 (1951) Nr. 11.
- [44] Stoff, F.: Verhalten vom Schüttgut auf schwingenden Flächen und Schwingrinnen. Mitteilungen der Carl Schenk Maschinenfabrik GmbH, Darmstadt, 1963.
- [45] Sonnenberg, H.: Korn-Stroh-Trennung mit Doppelkurbel-Hordenschüttlern. Grundlagen der Agrartechnik 20 (1970) Nr. 6, S. 161-166.
- [46] Zehme, Chr.: Zur Entmischung einer homogenen Korn-Stroh-Spreu-Schüttung. Deutsche Agrartechnik 22 (1972) H.6, S. 267-270.
- [47] Spittel, A.: Zum Einfluss ausgewählter Stoffparameter auf das Arbeitsergebnis der Reinigungseinrichtung eines Mähdreschers. Agrartechnik 29 (1979) H. 4., S. 154-156.
- [48] • Gurjev, E.: Issledovanie vosmoschnosti intensivikazii technologitscheskogo ot-schistki sernouborotschnogo kombajna (Untersuchung der Möglichkeit der Intensivierung des Prozesses der Mähdrescherreinigungsanlage). Dissertation Altajskij Selskohosjajstvennij Intitut, 1973.
- [49] Haase A.: Zur Steigerung der Leistungsfähigkeit einer Mähdrescherreinigungseinrichtung. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 268 (1977) H. 6, S. 1125-1127.
- [50] Bublik, S. P.: Opredelenije osnovnich parametrov processa separazii grubogo vorocha; (Bestimmung der Hauptparameter einer Trennung des Reinigungsgutes). Mehanisazija i elektrifikazija selskogo hosjajstva. 21 (1963), S. 15-17.

-
- [51] Fiala, J.: Registrace pohybi zeren v rastve porezaneh obili pomoci luminiscence v ultrafioletovom zarenu (Registrierung der Körnerbewegung in Schicht Getreidehäcksel mit Hilfe von Lumineszenz in ultravioletter Strahlung). Zemedelska Technika (1965) 12, S. 105-113.
- [52] • Manig, G.: Beitrag zur Untersuchung der Auflösung eines aus einem Weizen-Stroh-Spreu-Gemisch bestehenden Strahles im Wirkungsbereich einer horizontalen Luftströmung. Dissertation Technische Universität Dresden, 1971.
- [53] Freger, J.: O charaktere viibracionnogo vosdejstvija na sernovoj sloj; (Über den Einfluss der Schwingung auf die Getreideschicht). Mechanisazija i elektrifikazija selskogo hosajstva, M., 22 (1964), S. 35-36.
- [54] Gortinskij, W.: Sortirovanie siputschih tel pri ich poslojnom dvischenii po sitam (Sortierung des Schüttgutes bei schichtartiger Bewegung auf Sieben). Trudi Vsesojusnogo nauchnosissledovatel'skogo Instituta mechanisazii selskogo hosajstva 34 (1964) H.1, S. 121-194.
- [55] Evtjagin, W.: Isiskanie optimalnogo reschima prodolno-poperetschnih kolebanij rescheta (Bestimmung des optimalen Betriebes der Längs- und Querschwingungen des Siebes). Sowerschenstwowanie selskohosajstvennoj tehniki, 1980, S.16-20.
- [56] • Bikov, W.: Powischie effektivnosti prozessa separirovanija sernowih smesej na ploskih katschajuschih reschetah. (Verbesserung der Effektivität des Prozesses zur Separierung von Getreidegütern auf ebenen Schwingsieben). Habilitationarbeit: Staatliche Akademie für Forstwirtschaft, Woronesch, 1999.
- [57] • Damm, J.: Der Sortiervorgang beim luftdurchströmten Schwingsieb. Dissertation Universität Stuttgart, 1972, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 3: Verfahrenstechnik Nr. 37.
- [58] Mewes, E.: Massenkräfte in Landmaschinen und ihr Ausgleich. Grundlagen der Landtechnik 5 (1955) H. 6, S. 116-133.
- [59] • Romanov, I.: Obosnowanie reschimov separazii serna pri prodolnih prjamolijnejnih i poperetschnih krutil'nih kolebanijah ploskih reschet (Begründung des Betriebes der Getreideabscheidung bei linearen Längsschwingungen und Querkreisschwingungen der Siebe). Dissertation Universität Kurgan, 2002.
- [60] • Hertha, H.: Ein Beitrag zum dynamischen Verhalten von Schwingsiebmaschinen. Dissertation Universität Dortmund, 1991, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 11: Fördertechnik Nr. 150.

-
- [61] Litvinov, a.: Urawnoveschennaja otschistka dlja sernouborotschnogo kombajna (Massenausgegliche Reinigungsanlage des Mähdreschers). Traktori i selskohosjajstvennie maschini 3 (1983), H. 1, S. 19-21.
- [62] Williams, J.C. und G. Shields.: The segeration of granules in a vibrated bed. Power technology (1967) H. 5, S. 149-157.
- [63] Moiset, P. und Heemskerk. Untersuchungen an einem Eindeckschwingsieb mit Exzenterantrieb als Hängekonstruktion. Aufbereitungstechnik (1967) Nr. 3, S. 146-150.
- [64] Weller, E.: Aus der Industrie. Aufbereitungstechnik (1963) Nr.11, S. 525-527.
- [65] Sauer, G.: Schwingfördergerät. AEG-Telefunken, Techn. Mitt. 71 (1981) Nr. 3, S. 125-128.
- [66] Weller, E.: Klassier und Sortieranlagen, Stetigförderer. Aufbereitungstechnik (1967) Nr. 7, S. 392-396.
- [67] Zimmermann, O.: Schwingförderer lassen sich beim Schüttguttransport sehr vielseitig verwenden. Maschinenmarkt 83 (1977) Nr. 21, S.360-365.
- [68] Mechtold, F.: 50% mehr Förderleistung durch Einsatz eines Stetigförderers. Aufbereitungstechnik (1967) Nr.10, S. 567-571.
- [69] Meinel, A.: Zur Fein-, Mittel- und Grobkornklassierung auf Wurfsiebmaschinen. Aufbereitungstechnik 39 (1998) Nr. 7, S. 317-327.
- [70] • Hain, K.: Angewandte Getriebelehre. Hermann Schroedel Verlag K.G. Hannover, 1952.
- [71] Hain, K.: Getriebebeispiel-Atlas. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1973.
- [72] • Artobolevskij, I.I.: Teorija Mechanismov (Getriebelehre). Moskau: Nauka, 1967.
- [73] • Beck, T.: Messverfahren zur Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher. Universität Stuttgart, 1992. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebensmitteltechnik Nr. 54.
- [74] Grobler, H.: Einsatz eines Querstromgebläses in Mähdrescher- Reinigungsanlagen. Manuskript zum Vortrag auf der 40. Internationalen Tagung Landtechnik 28.–29. Oktober 1982 Neu-Ulm / Donau. Universität Hohenheim, 1982.
- [75] Finkbeiner, T.: Untersuchungen an Mähdrescher-Reinigungsgebläsen. Landtechnische Forschung 16 (1966) Nr. 3, S. 96-99.

LEBENS LAUF

Andrey Timofeev

06.08.1980 geboren in Kazan, Russland (RUS)

09.1987 – 06.1995 Grundschule in Savgatschevo, Tatarstan, RUS

09.1995 – 06.1997 Gymnasium in Staromokschino, Tatarstan, RUS

09.1997 – 07.2002 Studium an der Fakultät Mechanisierung der Landwirtschaft der Agraruniversität Kazan, Tatarstan, RUS

- Studienrichtung: Maschinenbau
- Vertiefung: Landmaschinen
- Abschluss als Dipl.-Ing. (Ingenieur-Mechaniker)

08.2002 – 07.2003 Tätigkeit in der technischen Abteilung des Unternehmens „Krasny Vostok“, Kazan, RUS

08.2003 – 09.2003 Deutschsprachkurs am Carl-Duisburg-Centrum, Dortmund, Deutschland (DE)

10.2003 – 02.2004 Gaststudent an der Universität Hohenheim im Bereich Agrartechnik

03.2004 – 04.2007 Doktorand und Gastwissenschaftler an der Universität Hohenheim am Lehrstuhl Grundlagen der Agrartechnik als Stipendiat des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD)

Betreuung durch:

- Prof. Dr.-Ing. H. D. Kutzbach
- Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger

ab 05.2007 Tätigkeit bei internationalen Unternehmen im Bereich Produktion und Technik / Produktionsstandortaufbau:

- Amazonen-Werke GmbH, Osnabrück, Hude (Oldenburg), DE
- AGCO Corporation, Schaffhausen, Schweiz (CH) / Vladimir, RUS
- Liebherr AG, Kirchdorf Iller, DE / Nizhny Novgorod, RUS
- Quarzwerke Gruppe, Frechen (Köln), DE / Ryazan, RUS

ISSN 0931-6264