Grundlagenuntersuchungen am Mähdrescher-Vorbereitungsboden mit pneumatischer Unterstützung

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. IWE Michael Schwarz

aus Torgau, Sachsen

Hauptberichter: Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger Prof. Dr.-Ing. habil. M. Piesche

Tag der mündlichen Prüfung:

20.09.2017

Institut für Agrartechnik Stuttgart 2017

VORWORT

Die gegenwärtige Arbeit entstand im Wesentlichen in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Grundlagen der Agrartechnik des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim in Stuttgart.

Neben dem geäußerten Anfangsverdacht der Herren Waldemar Thiesmann und Dr.-Ing. Joachim Baumgarten, beide Firma CLAAS, regte mich Herr Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger zur Durchführung dieser Arbeit an. Für ihr Vertrauen und die tatkräftige Unterstützung, gerade bei der Durchsicht meiner Arbeit, möchte ich mich herzlich bedanken. Sie haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Piesche danke ich für die Durchsicht der Arbeit und für die Übernahme des Mitberichtes.

Allen Mitarbeitern des Fachgebietes danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit, insbesondere meinen Weggefährten Dr. Hendrik Schulze Zumkley, Dr. Philipp Mümken, Dr. Paul Witzel und Christoph Müller. Gerade mit Euch habe ich nicht nur meinen fachlichen Horizont erweitert, sondern auch die wichtigen und weniger wichtigen gesellschaftlichen Anlässe genießen können.

Einen wesentlichen Beitrag für den Erfolg der Arbeit gibt die Diplomarbeit von Herrn Philipp Wilde von Wildemann, dem ich hiermit danke. Herrn Dr. Martin Weis danke ich für die fachgebietsübergreifende Zusammenarbeit und die von Ihm zur Verfügung gestellte Bildbearbeitungssoftware. Für die Unterstützung der numerischen Berechnung von Inhalten der Arbeit gilt Herrn Maik Siegel, stellvertretend für die Donaubauer AG, besonderer Dank.

Danken möchte ich meinen Eltern und Geschwistern für Ihre redliche Unterstützung sowie im Besonderen Ann-Katrin für das gegenseitige Motivieren in dieser für uns beide entbehrungsvollen Zeit.

Rheda-Wiedenbrück, im September 2017

INHALTSVERZEICHNIS

FORMELZEICHEN	IV
Indizes	VII
Abkürzungen	IX
KURZFASSUNG	X
ABSTRACT	XII
1 EINLEITUNG	1
2 STAND DER TECHNIK	4
2.1 Trennen in der Verfahrenstechnik, Wi	rbelschichtsysteme5
2.2 Mähdrescher-Reinigung	11
2.2.1 Technische Ausführungen	13
2.2.2 Betriebsverhalten	14
2.2.3 Vorbereitungsboden	23
2.2.4 Modellierung	
2.3 Messtechnische Erfassung der Entmi	schung39
3 PRÄZISIERUNG DER AUFGABENSTELLUNG	41
3.1 Parameteranalyse am Vorbereitungst	oden41
3.2 Motivation und Ziele	44
4 THEORETISCHE UNTERSUCHUNG AM PNEUMAT	ISCH UNTERSTÜTZTEN
VORBEREITUNGSBODEN	46
4.1 Punktmassen-Modell der Förderung	46
4.1.1 Grundlagen	46
4.1.2 Bewegungsphasen	53
4.1.3 Approximation der Luftgeschwi	ndigkeit im Gutgemisch55
4.1.4 Modellanwendung	57
4.2 Stochastisches Modell der Entmischu	ng62
4.2.1 Grundlagen	62
4.2.2 Mechanische und pneumatisch	e Parameter65
4.2.3 Modellanwendung	68
5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG AM PNEUM	ATISCH UNTERSTÜTZTEN
Vorbereitungsboden	71
5.1 Stoffeigenschaften	71

		5.1.1	Versuchsgut	71
		5.1.2	Schwebekennlinie	72
		5.1.3	Fluidisierung	74
		5.1.4	Durchdringungszeit	77
	5.2	Versu	chsumgebung	78
		5.2.1	Grundlagenprüfstand	78
		5.2.2	Planung, Durchführung und Auswertung der Versuche	81
		5.2.3	Kalibrierung der Versuchseinrichtung	83
			5.2.3.1 Abgleich der Luftverteilung	83
			5.2.3.2 Zuführungs- und Dosiereinheiten	84
		5.2.4	Einstell- und Messgrößen, Messtechnik	87
		5.2.5	Detektion der Entmischung	87
	5.3	Ergeb	nisse	89
		5.3.1	Konventioneller Vorbereitungsboden	90
			5.3.1.1 Einfluss des Beschickungsverfahrens	91
			5.3.1.2 Einfluss der Gutaufgabeorte	94
			5.3.1.3 Einfluss der Anteile von Korn- und Nichtkornbestandteiler	n. 96
			5.3.1.4 Einfluss des Übergabeortes am Rücklaufboden	98
		5.3.2	Pneumatisch unterstützter Vorbereitungsboden	99
			5.3.2.1 Einfluss der Strömungsoptimierung	99
			5.3.2.2 Einfluss des Übergabeortes am Rücklaufboden	. 102
			5.3.2.3 Einfluss des Anstellwinkels des Vorbereitungsbodens	. 103
		5.3.3	Variantenvergleich	. 105
		5.3.4	Detektion der Kornanteile nach Beschickungsort	. 106
		5.3.5	Verifizierung der Förderung	. 109
		5.3.6	Verifizierung der Entmischung	. 111
		5.3.7	Überprüfung des Gesamtbewertungsverfahrens	. 119
6	Zus	AMMEN	FASSUNG UND AUSBLICK	. 121
7	Lite	RATUR		. 124
8	ANH	ANG		. 136
	8.1	Bewe	rtungsgrößen in Mähdrescher-Reinigung	.136
	8.2	Luftge	eschwindigkeitsverteilung über der Sieblänge	. 137
	8.3	Übers	sicht untersuchter Parameter am Vorbereitungsboden	. 138
	8.4	Einflu	ss des Vorbereitungsbodens auf den Arbeitserfolg in der MD-RE	. 139
	8.5	Bewe	gungsphasen	. 140
	8.6	Parar	neter zur Approximation der Luftgeschwindigkeit	.142
	8.7	Paran	neter der Punktmassenmodellierung	.143
	8.8	Paran	neter der DEM-Simulation	144
	8.9	Berec	hnung des Entmischungsgrades	. 145
	8.10) Stoffe	igenschaften des Versuchsgutes	.146

8.11 Beschreibung der Versuchsdurchführung	146
8.12 Grundeinstellungen bei der Versuchsdurchführung	148
8.13 Übertragungsfunktion der Bildtransformation	149
8.14 Schema der Gutbeschickung	150
8.15 Restkornanteil in Mähdrescher-Reinigung	150
8.16 Variation der Gutaufgabe am Vorbereitungsboden	152
8.17 Variation des Übergabeortes am Rücklaufboden	153
8.18 Detektion der Kornanteile nach Beschickungsort	154

FORMELZEICHEN

а	m	Schwingungsamplitude
a _H	m	Hubweg am Vorbereitungsboden
A	m ²	Fläche
A _{Hyst}	kg·s⁻³	"Hysteresefläche"
b	m	Breite
b	m	mittlere Breite
B(<u>=</u>)	-	abschnittsweise definierte Funktion zur
		Modellierung des Vorbereitungsbodens
C _I	N·m⁻¹	Federsteifigkeit Interaktionskomponente
c _{W,Par}	-	Luftwiderstandsbeiwert Partikel
Ci	-	Integrationskonstante
dı	N·s·m⁻¹	Dämpfungskonstante der Interaktionskomponente
d	m	charakteristischer Durchmesser
D ₁ , D ₂	-	Regressionskoeffizienten Restkornfunktion
Di	-	Dispersionskonstante
D _K (<i>l</i>)	-	Korndurchgangsfunktion
DI	-	Raumdimension
е	-	Eulersche Zahl
Eκ	-	Entmischungsgrad
f	S⁻ ¹	Erregerfrequenz
F	Ν	Kraft
Fr	-	Froudezahl
Fr _v	-	Wurfkennzahl, kinematischer Kennwert
g	m·s⁻²	Gravitationsbeschleunigung
h	m	Höhe
ħ	m	mittlere Höhe
h'	m	wahrer Strömungsweg
i	-	Laufvariable, Anzahl
j	-	Koeffizient Übertragungsfunktion
k	-	Ausdehnungsfaktor
k _{Ent}	m⁻¹	Entmischungskoeffizient

k _l	-	Laminarkonstante
<i>k</i> t	-	Turbulenzkonstante
Ко	-	Konvektionskoeffizient
1	m	Länge, Weg
Ī	m	mittlere Länge, mittlerer Weg
I ₈₀	m	Sieblänge bei der 80% des Korns abgeschieden ist
m	kg	Masse
ṁ	kg·m⁻¹·s⁻¹	spezifischer Durchsatz
n	min⁻¹	Drehzahl
p	Pa	Druck
Δρ	Pa	Druckverlust
Δ ¯ ρ	Ра	mittlerer Druckverlust
Ρ	-	Wahrscheinlichkeit
P(y,t)	-	Kornmassenverteilung
q	-	Einflussfaktor
<i>r</i> i	-	Regressionskoeffizient
R _K	%	Restkorn
R _K (I)	%	Restkornfunktion
S	%	Massenanteil
s	%	mittlerer Massenanteil
$S(v_L)$	m·s⁻¹	Funktion der Anströmgeschwindigkeit
S'(v _L)	m·s⁻¹	Umkehrfunktion der Anströmgeschwindigkeit
t	S	Zeit
<i>t</i> ₈₀	S	Zeit, bei der 80% des Korns abgeschieden ist
t ₉₅	S	Zeit, bei der 95% des Korns abgeschieden ist
T(Ξ)	m	Funktion der Vorbereitungsbodengeometrie
u	m⁻¹	Steigung
\overline{U}	%	mittlere Feuchte
Ü	%	Überkehranteil
V	m·s⁻¹	Geschwindigkeit
\overline{V}	m·s⁻¹	mittlere Geschwindigkeit
V	m ³	Volumen

\overline{V}_{L}	m ³ ⋅m ⁻² ⋅s ⁻¹	spezifischer Luftdurchsatz
V _K	%	Kornverlust
VU	%	Verunreinigung
W	-	Inhomogenität
x	m	Abszisse Weg Inertialsystem
Δx	m	horizontaler Förderweg
X	-	Zustandsvektor
у	m	Ordinate Weg Inertialsystem
Ζ	-	Matrix der Zustandsübergänge
α	o	Anstellwinkel
β	o	Schwingungsrichtungswinkel
Ŷ	o	Differenzwinkel, Schwingungsrichtungswinkel im
		Relativsystem
δ	-	Faktor turbulente Mischbewegung
3	-	relative Porosität
ζ	m	vertikaler Weg Relativsystem Stufe
λ	-	Auflockerungsverhältnis
η	m	Ordinate Weg Relativsystem Stufe
Н	m	Ordinate Weg Relativsystem Vorbereitungsboden
μ	-	Reibbeiwert
ν	m²⋅s⁻¹	kinematische Viskosität
π	-	Kreiszahl
ρ	kg∙m⁻³	Dichte
$\overline{ ho}$	kg∙m ⁻³	mittlere Dichte
σ		Standardabweichung einer Grundgesamtheit
\pmb{arphi}_{rel}	o	relativer Strömungsrichtungswinkel
Ψ	o	Strömungswinkel
ω	rad⋅s⁻¹	Winkelgeschwindigkeit
ξ	m	Abszisse Weg Relativsystem Stufe
Ξ	m	Abszisse Weg Relativsystem Vorbereitungsboden

INDIZES

а	Partikel a
ab	abheben
auf	auftreffen
A	Auftrieb
An	Anströmung
b	Partikel b
dyn	dynamisch
E	Ende
Ent	Entmischung
F	Fluidisierung
Fö	Förderung
FS	Fallstufe
g	gleiten
ges	gesamt
G	Gewicht
Gebl	Gebläse
Gut	Gutgemisch
h	haften
HK	Hauptkanal
ist	Istwert
korr	korrigiert
К	Korn
Ко	Kontraktion
L	Luft
Lock	Lockerung
max	maximal
mech	mechanisch
mess	gemessen
min	minimal
Mix	Vermischung
Ν	Normal
NKB	Nichtkornbestandteil

opt	optimal
OS	Obersieb
pneum	pneumatisch
Par	Partikel
rel	relativ
rü	rückwärts
R	Reibung
RLB	Rücklaufboden
RLB-V	Rücklaufbodenverlängerung
soll	Sollwert
S	Strömungswiderstand
Sch	Schüttung
Sim	Simulation
SK	Siebkasten
St	Stufe
spez	spezifisch
т	Trägheit
VB	Vorbereitungsboden
0	Ausgangszustand
+	positive Richtung
-	negative Richtung

ABKÜRZUNGEN

BNE	Brazil-Nut Effect
CFD	Computational-Fluid-Dynamics
DEM	Discrete-Element-Method
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft
exp.	experimentell
FA	Freie Ansaugfläche
KW	Kurbelwinkel
NKB	Nichtkornbestandteil
NMR	Nuclear-Magnetic-Resonance-Spectroscopy
ОТ	Obere Totpunktlage
PIV	Particle-Image-Velocimetry
pneum.	pneumatisch
RBNE	Re-Brazil-Nut Effect
RLB	Rücklaufboden
RLB-V	Rücklaufbodenverlängerung
spez.	spezifisch
SW	Schlüsselweite
UT	Untere Totpunktlage
VB	Vorbereitungsboden
Wdhg.	Wiederholung

KURZFASSUNG

Die Reinigung ist heute oft die leistungsbegrenzende Baugruppe im Mähdrescher, da zur Entmischung und Abscheidung von Korn neben der Gravitationsbeschleunigung keine zusätzlichen Beschleunigungsfelder wirken. Um die Leistung der Mähdrescher-Reinigung ohne zusätzliche Beschleunigungsfelder zu steigern, kann eine intensivierte Vorsortierung des Gutgemisches vor Eintritt in die Fallstufe der Mähdrescher-Reinigung zielführend sein. Hierfür erweist sich die pneumatische Unterstützung des Sortierprozesses am Vorbereitungsboden als aussichtsreiche Maßnahme. Ziel ist die Erzeugung einer Wirbelschicht.

Zur Modellierung der Förderung und Entmischung auf dem Vorbereitungsboden werden verschiedene Ansätze angewendet. Die analytische Beschreibung der Förderung auf dem pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden durch erweiterte Punktmassenansätze in Verbindung mit einer stochastischen Beschreibung der Entmischung ist zur Modellierung komplexer verfahrenstechnischer Prozesse nur eingeschränkt geeignet.

Zur experimentellen Bewertung der Förderung und Entmischung wird ein Versuchsstand mit einem zusätzlichen Gebläse am Vorbereitungsboden entwickelt. Der Versuchsstand erlaubt die Ermittlung der Kornverluste, der Sauberkeit, der Überkehranteile und der Abscheidekennlinie in der Mähdrescher-Reinigung. Ausgerichtet am Mähdrescher erfolgt die Gutbeschickung sowohl über den Vorbereitungs- als auch über den Rücklaufboden. Um die Kornverluste dem Beschickungsort zuordnen zu können, werden die Körner auf dem Rücklaufboden eingefärbt.

Zur Bewertung der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden wird die mittlere Aufenthaltshöhe des Korns über dem Vorbereitungsboden herangezogen, welche durch Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen mit anschließender Partikelverfolgung ermittelt wird.

Die Untersuchungen am Vorbereitungsboden ohne pneumatische Unterstützung zeigen, dass bei hohen Gutdurchsätzen die Entmischung auf dem Vorbereitungs-

boden eingeschränkt ist. Weiterhin wird deutlich, dass sich mit steigendem Gutdurchsatz der Anteil der Körner vom Rücklaufboden an den Kornverlusten überproportional zum Gesamtkornverlust vergrößert.

Die aus den Untersuchungen abgeleiteten Gestaltungshinweise beinhalten die Anpassung der Vorbereitungsbodenlänge und die Optimierung der Rücklaufbodenanbindung in der Mähdrescher-Reinigung. Durch eine im letzten Drittel des Vorbereitungsbodens angeordnete pneumatische Unterstützung wird eine Wirbelschicht erzeugt, die den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung um rund 10 % steigert.

ABSTRACT

Nowadays the cleaning unit in combines is often the power limiting assembly unit. There are no additional accelerating fields acting to segregate and separate grain besides gravitational acceleration. A strengthened pre separation of the material mixture acting in front of the winnowing step in the combine can increase the power of the cleaning unit without additional accelerating fields. A pneumatically supported separation process at the preparation floor is a promising measure. The target is to generate a fluidized bed.

Conveying and segregation at the preparation floor are modeled following different approaches. The analytical description of the conveying at the pneumatically supported preparation floor by means of extended point mass approaches in conjunction with a stochastic description of the segregation is suitable for conventional modeling approaches for complex process engineering processes to a limited extent. For the experimental evaluation of the conveying and segregation a test rig with an additional fan at the preparation floor is developed. The test rig allows the determination of grain losses, cleanliness, return and separation characteristic in the cleaning unit. As typically handled in combines the feeding of the material is handled via the preparation floor and return pan.

In order to be able to assign the grain losses to the point of delivery, the grains transported on the return pan are coloured. To evaluate the segregation at the preparation floor, the average height of the grain above the preparation floor is to be determined. This determination is done by means of a high-speed camera recording with subsequent particle tracking. The investigations at the preparation floor without pneumatically support show that the segregation at the preparation floor is restricted at high throughputs. Furthermore, it demonstrates that upon increasing throughput the proportion of the grains in the share of grain losses from the return pan increases disproportionally higher than the total grain losses. The design notes derived therefrom include the adaptation of the preparation floor length as well as the optimization of the return pan's connectivity to the cleaning unit. By means of a pneumatic support arranged in the last third of the preparation floor, a fluidized bed is generated in the investigation, which increases the work efficiency of the cleaning unit by approximately 10%.

1 EINLEITUNG

Im Hochleistungssegment der Mähdruschtechnik werden heute vorwiegend Dresch- und Restkornabscheidesysteme in Axial- und Hybridbauweise eingesetzt, **Bild 1**.



Bild 1: Motorleistung des Marktangebotes an Mähdreschern 2013 in Deutschland, eingeteilt nach Eintrommel- und Mehrtrommeltangential-Dreschwerken mit Hordenschüttlern, Tangentialdreschwerken mit rotierenden Trennelementen (Hybridmähdrescher) und Axialmähdreschern, nach Böttinger [1]

Die genannten Technologien führen aufgrund der vergrößerten Trennkrafteinleitung im Vergleich zur konventionellen Schüttlerbauweise zu einer erhöhten Zerstörung von Nichtkornbestandteilen (NKB). Besonders bei trockenen Erntebedingungen wird die Mähdrescher-Reinigung daher stark belastet. Bernhardt [2] verweist im Rahmen der Entwicklung von Getreidemähdruschsystemen in Axialbauweise bereits auf diesen Forschungsgegenstand.

Gegenwärtig eingesetzte Mähdrescher-Reinigungen verwenden Konzepte auf der Basis von Plansieb-Reinigungseinrichtungen, die bevorzugt aus ein oder zwei luftdurchströmten Fallstufen mit dahinter angeordnetem Ober- und Untersieb bestehen [3]. Um die Kornverluste $V_{\rm K}$ und die Verunreinigungen *VU* in der Mähdrescher-Reinigung zu minimieren, wird der Trennvorgang aufgrund der ähnlichen mechanischen und aerodynamischen Stoffeigenschaften der Gutgemischbestandteile als Sieb-Sicht-Prozess ausgeführt [4]. Ein hoher NKB-Durchsatz $\dot{m}_{\rm NKB}$ ist dabei im Vergleich zum Korndurchsatz $\dot{m}_{\rm K}$ entscheidend für den Anstieg der Kornverluste in der Mähdrescher-Reinigung [5,6]. Da dieser nicht unmittelbar beeinflussbar ist, soll das Gutgemisch der Mähdrescher-Reinigung möglichst vorsortiert zugeführt werden.

Das Gutgemisch der Dresch- und Restkornabscheidung wird durch den Vorbereitungsboden (VB) in die Mähdrescher-Reinigung gefördert. Dabei tritt eine Entmischung aufgrund der Dichtedifferenz von Korn- und Nichtkornbestandteilen ein. Nach Freye [3] und Zehme [7] unterstützt die Luftbeaufschlagung in der Mähdrescher-Reinigung die Entmischung maßgeblich.

Daraus leitet sich die Fragestellung der vorliegenden Arbeit ab, inwiefern eine Einbringung von pneumatischer (pneum.) Energie am Vorbereitungsboden die Entmischung darauf beeinflusst. Ziel ist es, die Vorsortierung auf dem Vorbereitungsboden weiter zu steigern und damit den Arbeitserfolg in der Mähdrescher-Reinigung zu erhöhen. Die bereits ausgereizten Grenzen der Mähdrescher hinsichtlich der Straßenverkehrszulassung führen weiterhin zu der Forderung, dass eine Bauraumvergrößerung der Mähdrescher-Reinigung vermieden werden muss [1].

Die einsetzende Vorsortierung des Durchganges der Restkornabscheidung auf dem Rücklaufboden (RLB) wird in der Mähdrescher-Reinigung nur eingeschränkt genutzt, da die Gutübergabe auf den Vorbereitungsboden eine Umkehrung der Gutflussrichtung bedeutet und eine nicht gewünschte Umlagerung der vorsortierten Körner auf der NKB-Schicht nach sich zieht [5]. Da bei Axial- und Hybriddreschsystemen ein hoher Anteil des Korn-NKB-Gemisches aus der Restkornabscheidung erwartet wird, ist dieser Bereich mit in die Untersuchung einzuschließen.

Zur Überprüfung der genannten Fragestellungen wird ein neuer Grundlagenprüfstand erarbeitet, der die Einbringung pneumatischer Energie am Vorbereitungsboden sowie die Detektion der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden gestattet. Vielen bisherigen Grundlagenuntersuchungen zur Mähdrescher-Reinigung gemein ist die Gutbeschickung über den Vorbereitungsboden. Eine realitätsnahe Beschickung des zu reinigenden Gutgemisches aus dem Dreschwerk und der Restkornabscheidung wird damit bedingt abgebildet [5,8-13]. Der neue Grundlagenprüfstand ermöglicht eine unabhängige Gutbeschickung von Vorbereitungs- und Rücklaufboden.

Parallel dazu wird der Fördervorgang am pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden durch eine Punktmassen-Betrachtung modelliert sowie ein Entmischungsmodell erarbeitet. Die Ergebnisse der Modellierungen werden mit denen der experimentellen Untersuchungen verglichen. Ziel ist die Bewertung des Modellierungsaufwandes komplexer physikalischer Zusammenhänge mit konventionellen Werkzeugen in Form von Bewegungs- und Entmischungsdifferentialgleichungen im Hinblick auf den Einsatz der Discrete-Element-Method (DEM).

2 STAND DER TECHNIK

Der Mähdrescher wird nach der Einbau- und Wirkungsweise der eingesetzten Verfahrenstechnik zur Trennung der Korn- von den Nichtkornbestandteilen charakterisiert. Der Schüttler-Mähdrescher besitzt ein Tangentialdreschwerk mit danach angeordneten Hordenschüttlern zur Restkornabscheidung, der Axial-Mähdrescher verwendet einen kombinierten Dresch- sowie Restkornabscheiderotor und der Mähdrescher in Hybridbauweise kombiniert ein Tangentialdreschwerk mit einem danach angeordneten Axialrotorsystem zur Restkornabscheidung, **Bild 2**.



Bild 2: Schematische Darstellung eines Hybridmähdreschers

Die Aufgaben im Mähdrescher sind Schneiden, Fördern, Trennen (Dreschen, Abscheiden, Reinigen), Sammeln und Verteilen. Das Getreide wird durch das Schneidwerk am Halm getrennt und zum Schrägförderer geführt. Dieser übergibt das Gutgemisch in das Dreschwerk, bestehend aus Dreschtrommel und -korb. In diesem wird der Hauptteil des Korns durch Reiben und Schlagen aus dem Ährenstand gelöst und anschließend mit Spreu-, Kurzstroh- und Ährenteilen sowie weiteren Verunreinigungen durch den Dreschkorb geführt. Lose in der Langstrohmatte verbliebene Körner werden mit Spreu- und Kurzstrohteilen durch die Restkornabscheidung ausgetragen. Diese besteht aus auf Kreisbahnen geführten Schüttlerhorden oder Abscheiderotoren. Die Gutströme aus Dreschwerk und Restkornabscheidung werden mit Förderern in der Mähdrescher-Reinigung zusammengeführt. In dieser fördern Schwingsiebe das Gutgemisch und trennen unter Luftzufuhr die Körner von den Nichtkornbestandteilen, die im Anschluss auf dem Feld verteilt werden. Weiterführende Beschreibungen sind unter anderem in [6,14-17] angegeben.

2.1 Trennen in der Verfahrenstechnik, Wirbelschichtsysteme

Zur Trennung von polydispersen Gutgemischen finden verschiedene Technologien Anwendung, die auf Platzwechselvorgänge von Partikeln im Gutgemisch aufgrund unterschiedlicher Stoffeigenschaften zurückzuführen sind. Die Erzeugung von Wirbelschichtsystemen stellt eine Möglichkeit dar, Platzwechselvorgänge in einem Gutgemisch hervorzurufen. In der Literatur werden verschiedene Wirbelschichtsysteme angeführt, **Bild 3**. Die Korn-NKB-Trennung in der Mähdrescher-Reinigung wird durch ein Gas-Feststoff-System dargestellt. Strömende Luft bildet das Wirbelmedium im System. Das Wirbelgut besteht aus einem Gutgemisch von Korn- und Nichtkornbestandteilen. Zur Darstellung einer Entmischung bei Korn-NKB-Gemischen werden Formen der klassierenden und sortierenden Wirbelschicht angestrebt. [18]





- c) brodelnde Wirbelschicht
- e) durchbrochene Wirbelschicht

b) klassierende, sortierende Wirbelschicht

- d) stoßende Wirbelschicht
 - Sprudelschicht

Bild 3: Arten von Wirbelschichten, nach Beránek [18]

f)

Neben klassierenden und sortierenden Wirbelschichten zeigen sich bei Gemischen aus körnigen und faserigen Bestandteilen auch blasenbildende und durchbrochene Wirbelschichten [19] sowie, in Kombination mit einer mechanischen Schwingungsanregung, Ausprägungen von Vibrationswirbelschichten [18]. Letztere haben aufgrund des oszillierenden Antriebes der Mähdrescher-Reinigung eine besondere Bedeutung. Unter der Voraussetzung einer näherungsweise gleichen Dichte der Partikel erfolgt die Anordnung in der Gutschicht nach Form und Größe der Partikel. Es wird von der klassierenden Wirbelschicht gesprochen. Das dem Umsortieren zugrundeliegende Kräftegleichgewicht am Einzelpartikel ist wie folgt definiert, **GI. (1)** - **GI. (5)**. [18]

$$F_{\rm G} = F_{\rm S} + F_{\rm A} \tag{1}$$

$$F_{\rm S} = \frac{1}{2} \cdot c_{\rm W, Par} \cdot \rho_{\rm L} \cdot A_{\rm Par} \cdot v_{\rm L}^2$$
⁽²⁾

$$F_{\rm A} = \rho_{\rm L} \cdot V_{\rm Par} \cdot g \tag{3}$$

Mit $\rho_{\rm L} \ll \rho_{\rm Par}$ berechnet sich der Strömungswiderstand am Einzelpartikel nach [18]:

$$\Delta p \sim \frac{\rho_{\rm L}}{2} \cdot v_{\rm L}^2 = \frac{\rho_{\rm Par} \cdot V_{\rm Par} \cdot g}{A_{\rm Par} \cdot c_{\rm W, Par}}$$
(4)

Zur Beschreibung des Verhaltens des Gutgemisches in der Wirbelphase muss der Ansatz der Einzelpartikelbetrachtung erweitert werden. Bis zum Erreichen des Lockerungspunktes durch Erhöhung der Luftgeschwindigkeit $v_{\rm L}$ bleibt die Porosität der Ruheschüttung $\varepsilon_{0,Gut}$ und damit die Gutschichthöhe h_{Gut} konstant. Der Druckverlust Δp_{Gut} in der Strömung ist geringer als der um den Auftrieb reduzierte Schweredruck des Gutgemisches. [18]

$$\Delta \rho_{\rm Gut} < \frac{\rho_{\rm Gut} \cdot A \cdot h_{\rm Gut} \cdot g}{A} = \left[\rho_{\rm Par} \cdot \left(1 - \varepsilon_{0,\rm Gut} \right) + \rho_{\rm L} \cdot \varepsilon_{0,\rm Gut} \right] \cdot h_{\rm Gut} \cdot g$$
(5)

Am Lockerungspunkt wird die Gewichtskraft des Gutgemisches aufgehoben. Die Partikel beginnen sich zu bewegen. Der Druckverlust im Lockerungspunkt wird mit der relativen Porosität ε_{Lock} und der Gutschichthöhe h_{Lock} beschrieben. Qualitative

Verläufe des Druckverlustes über der Luftgeschwindigkeit in Gutgemischen von Schüttgütern führt Keuneke [19] an, **Bild 4**.



a. Behälter; b. Luftverteilboden; c. Richtung der Gasströmung; d. fluidisierte Teilchen; e. nicht fluidisierte Teilchen mit Kanälen; f. Gasblase; g. fluidisierte Teilschicht; ε_0 , ε_{WP} und ε_F relatives Zwischenraumvolum der Ruheschüttung, am Wirbelpunkt beziehungsweise am oberen Fluidisierungspunkt; Δp_{AP} Druckverlust am Ausdehnungspunkt; *S* Stoßpunkt

a) ideale Fluidisierung

C)

sehr ausgeprägte Kanalbildung

- b) schwache Kanalbildung
- d) stoßende Teilschichten
- **Bild 4:** Qualitativer Verlauf des Druckverlustes in fluidisierten Gutgemischen, nach Keuneke [19]

Zur Charakterisierung des Druckverlustes in polydispersen Gutgemischen aus kugelförmigen Partikeln etabliert Ergun [20] eine teilempirische Gleichung, die für den gesamten Reynoldszahlenbereich Gültigkeit besitzt, **GI. (6)**.

$$\frac{\Delta \rho}{h_{\text{Lock}}} = k_{\text{I}} \cdot \frac{\rho_{\text{L}} \cdot \nu_{\text{L}}}{d_{\text{Kugel}}^{2}} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{\text{Lock}})^{2}}{\varepsilon_{\text{Lock}}^{3}} \cdot \nu_{\text{L}} + k_{\text{t}} \cdot \frac{\rho_{\text{L}}}{2 \cdot d_{\text{Kugel}}} \cdot \frac{1 - \varepsilon_{\text{Lock}}}{\varepsilon_{\text{Lock}}^{3}} \cdot \nu_{\text{L}}^{2}$$
(6)

Zur Annäherung der Gleichung an Versuchsergebnisse werden die Laminarkonstante k_1 sowie die Turbulenzkonstante k_t eingeführt und mit den Werten k_1 = 150, k_t = 1,75 angegeben [20]. Abhängig von den Stoffeigenschaften des Gutgemisches und den strömungsmechanischen Parametern zur Erzeugung der Wirbelschicht können sich Phänomene der Ver- oder Entmischung einstellen [3,18].

Der in den 1930er-Jahren erstmals beschriebene Brazil-Nut Effect (BNE) zeigt die Komplexität von Entmischungsvorgängen. Seinen Namen verdankt der Effekt aufschwimmenden Paranüssen in Müslipackungen, die beim Transport Platzwechselvorgänge durchführen [21-23]. Untersuchungen des Effektes zeigen bis heute konträre Ergebnisse. Neben dem Brazil-Nut Effect werden Theorien, wie der Re-Brazil-Nut Effect (RBNE) vertreten [24,25]. Um beide Effekte abzubilden, erarbeiten Hong et al. empirische Zusammenhänge zwischen Durchmesser- und Masseverhältnis der betrachteten kugelförmigen Partikel abhängig von der Raumdimension *DI*, **GI. (7)**.

$$\left(\frac{d_{\rm a}}{d_{\rm b}}\right)^{Dl-1} \approx \frac{m_{\rm a}}{m_{\rm b}} \tag{7}$$

Das Aufschwimmen, Schweben und Absinken von zwei in Durchmesser und Masse differierenden kugelförmigen Partikelarten in Gutgemischen wird demnach im dreidimensionalen Raum durch die Wurzelfunktion angenähert, **Bild 5**. [26]



a) zweidimensional, *DI* = 2



Bild 5: Phasendiagramme zur Abbildung der Entmischung eines Gutpartikels a aus einem zweiphasigen Gutgemisch, nach Hong et al. [26]

Bezüglich der Anforderungen in der Verfahrenstechnik wie zum Beispiel abgeschlossene Prozesse in Reaktoren ohne kontinuierliche Gutbeschickung und Förderfunktion mit aufwärts gerichteter Strömungszufuhr beschreiben die in der Literatur angeführten Modellierungsansätze für Wirbelschichtphasen vorrangig die bekannten Gas-Feststoff-Systeme nach den im Bild 3 definierten Zuständen [27]. Die Auswirkungen auf die Wirbelschichtentstehung bei gekoppelter Anregung durch mechanische und pneumatische Energiezufuhr werden in der verfahrenstechnischen Literatur wenig behandelt.

In der Verfahrenstechnik werden verschiedene mathematische Ansätze zur Simulation von Entmischungs- und Abscheidevorgängen granularer Medien beschrieben [28-33]. Einen auszugsweisen Überblick gibt Beck [14]. Zahlreiche Modellansätze [34-37] münden in die von Cundall [38] beschriebene DEM, die auf Basis diskreter Partikel eine analytische Beschreibung loser Schüttungen erlaubt. Neben der etablierten Beschreibung von Entmischungs- und Abscheidevorgängen mit Hilfe der DEM liefern stochastische Modelle gerade vor dem Hintergrund moderater Rechenzeiten vergleichbar gute Ergebnisse [31,32].

Meinel und Schubert entwickeln auf Basis der Arbeiten von Molerus [28,39] einen theoretischen Ansatz, um die zur Darstellung der Förderung bei Dünnschichtsiebung notwendige Modellierung der Einzelkorndynamik mit dem auf der stochastischen Siebtheorie basierenden Ansatz der Dickschichtsiebung zu kombinieren. Die Bestimmung der Bewegung von Kornkollektiven nahe der Trennfläche wird durch die lineare, homogene, partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung mit nichtkonstanten Koeffizienten von Fokker, Planck und Kolmogorow abgebildet, **GI. (8)**. [30,33]

$$\frac{\partial}{\partial t}P(y,t) = -Ko_y \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + Di_y \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}$$
(8)

Die Kornmassenverteilung P(y,t) wird durch senkrecht auf dem Sieb wirkende Dispersions- und Konvektionsvorgänge beschrieben. Meinel und Schubert verwenden dafür die gleichbedeutenden Begriffe der Diffusions- und Segregationsprozesse. Die Kenntnis der Diffusions- und Segregationskoeffizienten ist für die Bestimmung des Entmischungsverlaufes notwendig. [30,33]

Meinel hat einen Prüfstand auf Basis eines vertikal angeregten Stößelsiebes entwickelt. Das sogenannte Auflockerungsgerät ermöglicht das willkürliche Trennen eines mehrphasigen Gutgemisches bei einer vorgegebenen Auflösung in der Messzeit und -höhe. Nach der Auswertung der Einzelfraktionen können der Dispersionsund der Konvektionskoeffizient abhängig von den eingestellten mechanischen Parametern ermittelt werden. [33]

Ferrara und Preti erarbeiten ein Abscheidemodell, welches auf der Einteilung in Dünn- und Dickschichtsiebung nach Meinel und Schubert [30,33] beruht. Mit der auf einen Elementarabschnitt bezogenen Massenbilanz wird der Restkornanteil $R_{\rm K}$ auf dem Sieb abhängig vom Abscheideweg durch zwei Differentialgleichungen angegeben. Nach den Gleichungen ändert sich das Abscheideverhalten beim Wechsel von Dick- zu Dünnschichtsiebung von linearer zu exponentieller Abnahme des Restkornanteils. Das Modell wird durch praktische Versuche bestätigt. [40]

Yang und Keairns haben sich mit dem Entmischungsverlauf mehrphasiger Gutgemische im Wirbelschichtzustand beschäftigt. Ziel ist die Bestimmung der mittleren Fluidisierungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Gutgemischzusammensetzungen. Eine optimale Entmischung erfolgt, wenn die Luftgeschwindigkeit in der Nähe der Fluidisierungsgeschwindigkeit des schweren Gutgemischanteils liegt. Hier ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass die schweren Partikel nach oben getragen werden. [41]

2.2 Mähdrescher-Reinigung

Baumgarten [6] definiert den Begriff der konventionellen Mähdrescher-Reinigung, deren Aufbau am Beispiel der CLAAS-JET-STREAM-Reinigung [42] beschrieben wird, **Bild 6**.



Bild 6: Schematische Darstellung der CLAAS-JET-STREAM-Reinigung [42]

Zur Abführung des Gutgemischdurchganges von Dreschwerk und Restkornabscheidung werden vorrangig zwei Typen von Förderern eingesetzt. Diese sind in Fahrtrichtung parallel angeordnete Schneckenförderer oder über ebene Koppelgetriebe angeregte Schwingförderer, **Bild 7**. Letztere bilden die Grundlage der Untersuchung, da eine den Arbeitserfolg in der Mähdrescher-Reinigung steigernde Vorsortierung von Korn unter Nichtkornbestandteilen gegenwärtig mit Schneckenförderern nicht erzielt werden kann [5,13]. Im Gegensatz dazu stellt sich bei Verwendung von Schwingförderern eine Dichtesortierung ein, die auf Wurfbewegungen zurückzuführen ist [8,43,44]. Für die anschließende Trennung wird die Gutschicht vorsortiert, also "vorbereitet". Die Baugruppe wird daher als Vorbereitungsboden bezeichnet.



Bild 7: Schematische Darstellung der Förderer, a) Schneckenförderer, b) Schwingförderer

Der Förderer der Restkornabscheidung wird Rücklaufboden genannt und häufig als Schwingförderer ausgeführt. Die einsetzende Vorsortierung auf dem Rücklaufboden wird aufgrund der Umlagerung bei der Gutübergabe auf den Vorbereitungsboden zum Teil aufgehoben. Der Vorbereitungsboden fördert das Gutgemisch in eine erste Fallstufe. Darin werden im Quersichtprozess der Hauptteil der Korn-, Spreu-, Kurzstroh- und Ährenteile sowie weitere Verunreinigungen entsprechend der Schwebegeschwindigkeit sortiert und teilweise getrennt. Zur Intensivierung der Sortierung schließt sich nach einer Förderphase ein zweiter Quersichtprozess an. Über den erzeugten Luftstrom wird der Hauptteil der Nichtkornbestandteile aus der Mähdrescher-Reinigung gefördert. Das Korn wird am Obersieb in einem Sieb-Sichtprozess von schweren Nichtkornbestandteilen getrennt. Das abgeschiedene Korn und kleine Nichtkornbestandteile werden am Untersieb in einem zweiten Sieb-Sichtprozess getrennt. Der Überlauf des Untersiebes wird mit den an der Obersiebverlängerung abgeschiedenen Ähren- und Nichtkornbestandteilen als Überkehr dem Dreschprozess erneut zugeführt. Der Durchgang des Untersiebs wird über Förderschnecken und Elevatoren in den Korntank gefördert. [3,6,15]

2.2.1 Technische Ausführungen

Eine Analyse der Mähdrescher-Reinigungen am Markt zeigt, dass keine Schnittstelle zwischen Vorsortierung und Sieb-Sichtprozess definiert werden kann, da eine eindeutige Zuordnung der verfahrenstechnischen Prozesse Entmischung und Abscheidung nicht gelingt, **Bild 8**. Weitere Bauformen geben unter anderem [6,45] an.



Bild 8: Auswahl von Mähdrescher-Reinigungen mit verschiedenen Vorsortierungselementen; CNH a) [46], b) [47]; JOHN DEERE c) und d) [48], e) [49], f) [50]; VEB Kombinat Fortschritt Landmaschinen g) und h) [51]; CLAAS i) [52]; AGCO j) [53]

2.2.2 Betriebsverhalten

Die konventionelle Mähdrescher-Reinigung separiert ein mehrphasiges Gutgemisch aus Korn- und Nichtkornbestandteilen in einem dem Fördern überlagerten Trennvorgang, der durch die Teilprozesse Entmischung, Auslese und Abscheidung gekennzeichnet ist [54], **Bild 9**.



Bild 9: Auflösung des Trennvorganges in Teilvorgänge, nach Wessel [54]

Gewöhnlich wird dieselbe Antriebskinematik für Siebkasten, Vorbereitungs- und Rücklaufboden verwendet, **Bild 10**. Dies ist darauf zurückzuführen, dass freie Kräfte aufgrund der oszillierenden Siebkastenbewegung ausgeglichen werden können und eine Vorsortierungswirkung auf dem Vorbereitungsboden erreicht werden kann.



Bild 10: Schema der Antriebe von a) Siebkasten, Obersieb dick, Untersieb dünn und b) Vorbereitungsboden der CLAAS-JET-STREAM-Reinigung [42]

Die auftretenden Vorgänge hinsichtlich Förderung und Trennung auf den oszillierenden Baugruppen sind demzufolge ähnlich. Lediglich die Geometrie der Förderund Trennelemente sowie die Strömungsbeaufschlagung unterscheiden den Förder- und den Trennvorgang. Der idealisierte Bewegungsvorgang wird durch die mechanischen Parameter Schwingungsamplitude *a*, Anstellwinkel *a*, Schwingungsrichtungswinkel *β* und Winkelgeschwindigkeit *ω* beschrieben. Die Schwingen- und Koppellänge spielt beim idealisierten Bewegungsvorgang eine zu vernachlässigende Rolle. Neben diesen beeinflusst die Luftströmung in der Mähdrescher-Reinigung die Förderung zusätzlich, die durch die Parameter Geschwindigkeit, Richtung und Verteilung über der Sieblänge und -breite definiert wird [6].

Zur detaillierten Abbildung der Förderung und Entmischung sind weitere Größen notwendig. Diese sind die Oberflächengeometrie und das Material (z.B. Reibwert, Restitutionskoeffizient) der Baugruppe. Zusätzlich beeinflussen die Stoffeigenschaften der Gutgemischbestandteile sowie deren Zusammensetzung die Förderung und Entmischung [13].

Eine Bewertung des Einflusses der genannten mechanischen Parameter auf den Förderprozess wird durch die dimensionslose, auf Sieb- oder Vorbereitungsbodenfläche bezogene, Froudezahl *Fr* beschrieben. In der Literatur wird dazu der kinematische Kennwert oder die gleichbedeutende Wurfkennzahl *Fr*_v eingeführt [55-57], **GI. (9)** und **GI. (10)**. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen den mechanischen Parametern kann bei gleicher Wurfkennzahl das Bewegungsverhalten verschieden sein [58,59]. Die Funktion der Wurfkennzahl ist nicht injektiv.

$$Fr = \frac{a \cdot \omega^2}{g}$$
(9)

$$Fr_{v} = \frac{a \cdot \omega^{2} \cdot \sin(\beta - \alpha)}{g \cdot \cos \alpha}$$
(10)

Im Folgenden werden der Förderprozess und der Trennvorgang separat betrachtet. Die Entmischung kann aufgrund mechanischer und pneumatischer Energieeinleitung sowie durch deren Kombination erfolgen [44]. Optimale Entmischungsverhältnisse vertikal angeregter Siebe stellen sich bei Parameterkombinationen von Schwingungsamplitude zu Erregerfrequenz im Froudezahlenbereich Fr = 1 bis 3,3 ein. Nach Baader et al. [60] sind dafür die obersten NKB-Schichten verantwortlich, die vom Einfach- in den Wechselwurf übergehen. Die Zuordnung der Bestparameterkombinationen sind dabei nahezu unabhängig vom NKB-Durchsatz, **Bild 11**.



Bild 11: Funktionaler Zusammenhang von Schwingungsamplitude A_e zu Erregerfrequenz $f_{e,opt.}$ bei optimalen Entmischungsbedingungen, nach Baader et al. [60]

Es wird gezeigt, dass mit zunehmender NKB-Masse die Durchgangszeit t_{80} , bei der 80 % der Kornmasse abgeschieden ist, progressiv steigt und damit die Entmischung erschwert wird. Bei geringen NKB-Belegungen $m_{\text{NKB,spez}} < 3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ wird der höhere Einfluss auf die Kornabscheidung und bei hohen NKB-Belegungen der größere Aufwand zur Kornentmischung nachgewiesen. [60]

Damm [44] hat die Ergebnisse Baaders et al. [60] hinsichtlich des Optimums der Entmischung im Grenzbereich zwischen Einfach- und Wechselwurf bestätigt. Dabei stimmt die Wurffrequenz des Gutpartikels mit der Erregerfrequenz überein. Die vertikal wirkenden Kräfte sind demnach für die Entmischung maßgeblich. Rochell [8] hat den Zusammenhang zwischen Durchgangszeit t_{80} und zu durchdringender NKB-Masse bestätigt. Beim vertikal angeregten und luftdurchströmten Sieb erlaubt lediglich die Wurfphase eine Relativbewegung der Partikel [44].

Nach Freye [3] erfolgt die Entmischung hauptsächlich in der Wurfphase und wird maßgeblich durch die pneumatische Energie bestimmt. Entscheidend sind dabei die abhängig von den Trägheits- und Strömungskräften auftretenden Wurfparabeln der einzelnen Gutgemischbestandteile sowie die damit zusammenhängende Lageänderung der Partikel in vertikaler Richtung nach Damm [44], **Bild 12**. Die auftretende Expansion der Gutschicht in der Wurfphase ist vergleichbar mit dem angestrebten Wirbelschichtverhalten luftdurchströmter ruhender Gutgemische aus Korn und Nichtkornbestandteilen [3]. Neben der Auflockerung des Gutgemisches in der Wurfphase beeinflusst die in der Schwingungsanregung begründete gegenläufige Bewegung einzelner Elementarschichten die Entmischung während der Gleitphase positiv [6].



Bild 12: Theoretische Lageänderung eines Zweiphasengemisches aus Kugeln, Winkelgeschwindigkeit $\omega = 57,6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, Siebamplitude a = 5 mm, Dichte $\rho_{\text{K}_1} = 2577 \text{ kg/m}^3$, Dichte $\rho_{\text{K}_2} = 1140 \text{ kg/m}^3$, Durchmesser der Teilchen $d_{\text{K}} = 1,95 \text{ mm}$, nach Damm [44]

Nach Zehme fördern hohe Gleitgeschwindigkeiten den Versatz zwischen den unteren Gutschichten und der Trennfläche, während geringe Gleitgeschwindigkeiten die oberen Gutschichten zur Scherbewegung anregen. Für die Entmischung von Weizenkorn in Stroh-Spreu-Gemischen stellt sich deshalb ein Optimum bei einer mittleren Gleitgeschwindigkeit von $\bar{v} = 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ein. Große Schwingungsamplituden unterstützen die Entmischung zusätzlich. Nicht der Kornauslese- und Abscheideprozess auf der Siebebene limitieren den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung, sondern die zur Entmischung zur Verfügung stehende Zeit. Eine Luftunterstützung führt zu einer überproportionalen Abnahme der Durchgangslänge I_{80} . [7]

Wechselwirkungen zwischen pneumatischen und mechanischen Parametern erlauben in Grenzen eine Austauschbarkeit dieser Parameter [3,6,44]. Damm leitet diesen Zusammenhang aus Regressionsanalysen durchgeführter Abscheideversuche verschiedener Güter bei variierenden mechanischen und pneumatischen Parametern ab. Als Zielgröße dient die Durchgangszeit *t*₉₅. Außer der Erkenntnis der Unabhängigkeit der untersuchten Materialien, Siebamplituden und Durchgangswahrscheinlichkeiten von dem allgemeingültigen Zusammenhang zwischen Froudezahl und Luftgeschwindigkeitsverhältnis bietet dieser eine Möglichkeit, den Sortiervorgang zu optimieren, **Bild 13**.



Bild 13: Funktionaler Zusammenhang zwischen dem optimalen Luftgeschwindigkeitsverhältnis $(v_{L} \cdot v_{A^{-1}})_{opt}$ und der Froudezahl *Fr*, nach Damm [44]

Nach Damm lässt sich ein Gutgemisch aus Weizenkorn- und Nichtkornbestandteilen vollständig auflösen, wenn die Luftgeschwindigkeit im Gutgemisch höher als die Luftgeschwindigkeit am Lockerungspunkt eines NKB-Gemisches gewählt wird. Die Entmischung bei $v_{\rm L} \approx 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ist nahezu unabhängig von Erregerfrequenz und Froudezahl. [44]

Basierend auf dem Ansatz der Austauschbarkeit pneumatischer und mechanischer Parameter hat Freye [3] aus Versuchsergebnissen ein Betriebskennfeld konventionell arbeitender Mähdrescher-Reinigungen entwickelt, **Bild 14**. Anhand des Abstandes der Linien gleicher Durchgangslänge I_{80} wird deutlich, dass die Empfindlichkeit der Mähdrescher-Reinigung auf Schwankungen im Luftdurchsatz bei geringen mechanischen und hohen pneumatischen Anregungen höher ist. Eine stabile Funktionsweise der Mähdrescher-Reinigung stellt sich demnach bei hohen Wurfkennzahlen und vergleichsweise geringem pneumatischen Energieanteil ein. Trotz Berücksichtigung der pneumatischen Parameter ist eine alleinige Betrachtung der Wurfkennzahl zur Bewertung der Entmischung nach Freye nicht zielführend, da die Durchgangslänge I_{80} bei konstanter Wurfkennzahl abhängig von Schwingungsamplitude, Erregerfrequenz sowie dem Anstellwinkel des Siebes variiert. [3]



Bild 14: Konvertierbarkeit der mechanischen und pneumatischen Parameter einer konventionellen Mähdrescher-Reinigung unter Beachtung der Durchgangslänge *I*₈₀, nach Freye [3]

Werden diese Messdaten einer Mehrzieloptimierung unterworfen, lässt sich ein Parametersatz berechnen, bei dem sich die bestmögliche Entmischung bei konstantem Gutdurchsatz einstellt. Zur Bewertung der Entmischung werden die Zielgrößen Durchgangslänge I_{80} und Restkornanteil auf dem Sieb bei einer Sieblänge von $I_{OS} = 1$ m gewählt. Zu beachten ist die nichttrennbare Überlagerung des Einflusses von Entmischungs- und Abscheidewiderstand in den Zielgrößen aufgrund der nicht gegebenen messtechnischen Auflösung. Nach Festlegung der gleich gewichteten Optimierungsziele Minimierung der Durchgangslänge I_{80} und des Restkornanteils auf dem Sieb sowie Maximierung der Fördergeschwindigkeit $v_{Fö}$ stellt sich dieser Parametersatz ein: Schwingungsamplitude a = 0,022 m, Siebneigung $\alpha = 4,1^{\circ}$, Schwingungsrichtungswinkel $\beta = 29,3^{\circ}$, Erregerfrequenz f = 5,3 s⁻¹ und spezifischer Luftdurchsatz $\overline{V}_{L} = 1,15$ m³·m⁻²·s⁻¹. Nach Gl. (10) beträgt die Wurfkennzahl $Fr_v = 1,15$. Die Zusammenhänge zwischen optimierten mechanischen und pneumatischen Parametern werden beispielhaft an der Zielgröße Durchgangslänge länge I_{80} dargestellt, **Bild 15**.



Bild 15: Durchgangslänge I_{80} als Funktion mechanischer und pneumatischer Parameter nach einer Mehrzieloptimierung bei einem spezifischen Körnerdurchsatz $\dot{m}_{\rm K} = 2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, Grundlage sind Messdaten von Freye [3]
Die optimierten Werte sind: Durchgangslänge $I_{80} = 0,45$ m, Fördergeschwindigkeit $v_{Fö} = 0,55$ m·s⁻¹ und Restkornanteil auf dem Sieb $R_{K} = 0,21$ %.

Dahany hat den Einfluss einer variierenden Luftgeschwindigkeitsführung über der Sieblänge auf die Kornabscheidung sowie den Kornverlust untersucht. Der Kornverlust verringert sich bei einer abnehmenden Luftgeschwindigkeitsverteilung in Längsrichtung des Siebes beginnend an der Fallstufe. Wird ein zur Fallstufe ad-äquater Luftstrom mit einer Geschwindigkeit $v_L = 5 - 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ im ersten Viertel des Obersiebes zugeführt, kann die Fallstufe entfallen. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit, die optimale Luftverteilung über der Obersieblänge mit vertretbarem Aufwand einstellen zu können, bietet die Variante einer Fallstufenbelüftung bei gleichzeitiger Anwendung einer fallenden Luftgeschwindigkeit über der Sieblänge das größte Potenzial für eine Leistungssteigerung. [61]

Zehme und Dahany geben an, dass Gutgemische aus Korn, Kurzstroh und Spreu aufgrund ihrer Form sowie ihres Reibungsverhaltens keine Wirbelschichten nach verfahrenstechnischer Definition ausbilden können. Es kommt zu Verflechtung und Mattenbildung. Durch die hohe relative Porosität ε_{Gut} des Gutgemisches gestaltet sich die Wirbelschichtausbildung zusätzlich schwierig, da die genannten Gutgemische zur Kanalbildung neigen. Eine mechanische Anregung führt zu einer verbesserten Auflockerung. [7,61]

Jiang et al. haben die Wirkung eines luftdurchströmten Vorreinigers an einer konventionellen Mähdrescher-Reinigung ohne zusätzliche mechanische Anregung untersucht. Es werden rund 80 % der Kurzstroh- und Spreuanteile am Vorreiniger abgeschieden. Allerdings steigt der Kornverlust überproportional bei hohen NKB-Durchsätzen. [62]

Nach Rendell nimmt bei hoher Siebbeladung die Partikelbewegung in der Gutschicht aufgrund von Verdichtungsvorgängen sowie der gegenseitigen Bewegungsbehinderung stark ab. Eine Entmischung ist nicht nachweisbar. [63] Für die Gutart Weizen haben Lee und Winfield gegensätzliche Ergebnisse geliefert. Sie können einer angepassten Luftgeschwindigkeitsverteilung entlang des Siebes keinen signifikanten Einfluss auf den Kornverlust zuschreiben. [64]

Um das Leistungsvermögen einer Mähdrescher-Reinigung zu charakterisieren, werden verschiedene messtechnisch erfassbare Zielgrößen herangezogen, **Anhang 8.1**. Eine Möglichkeit zur Bewertung des Betriebsverhaltens konventioneller Mähdrescher-Reinigungen gibt die vom NKB- und Korndurchsatz abhängige Kornverlustfunktion bei gegebener konstanter Wurfkennzahl, Gl. (10) sowie konstanter Gebläsedrehzahl n_{Gebl} , **Bild 16**.



Bild 16: Kornverlustverhalten einer konventionellen Mähdrescher-Reinigung, nach Freye [3]

Abhängig von mechanischer und pneumatischer Energieeinleitung lassen sich Ausprägungen von Flug-, Wirbelschicht- und Schüttungsphase nachweisen. In der Flugphase wird die Kornabscheidung durch eine zu hohe Luftgeschwindigkeit behindert. Der Schwebezustand der Körner führt dazu, dass diese das Sieb nicht erreichen und aus der Mähdrescher-Reinigung herausgetragen werden. Eine optimale Entmischung, gekennzeichnet durch geringe Kornverluste, stellt sich im Wirbelzustand der Gutschicht ein. Erhöht sich der Korn- und NKB-Durchsatz in der Mähdrescher-Reinigung derart, dass die Auflockerung verringert und damit eine Entmischung unterbunden wird, setzt die Schüttungsphase ein. Diese charakterisiert sich durch einen annährend linearen Anstieg der Kornverluste. Mit voranschreitender Kornabscheidung an den Sieben sinkt der Strömungswiderstand in der Mähdrescher-Reinigung Richtung Siebende, weshalb sich die Luftgeschwindigkeitsverteilung hin zu höheren Luftgeschwindigkeiten am Siebende verlagert, **Anhang 8.2**. Die in Schwebe gehaltenen Nichtkornbestandteile werden näherungsweise als konstant angenommen. [3]

2.2.3 Vorbereitungsboden

Die Wirkung einer Vorsortierung auf den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung wird durch eine Vielzahl von Untersuchungen belegt [3,5,9,13,14,65-70], **Bild 17**.



Bild 17: Auswahl an Messdaten zum Einfluss der Vorsortierung am Vorbereitungsboden auf den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung

Erkenntnisse zum Einfluss der mechanischen Parameter auf die Förderung und Entmischung am Vorbereitungsboden gehen vorwiegend aus experimentellen Untersuchungen hervor [5,8-13], **Anhang 8.3**.

Timofeev und Böttinger [11] geben an, dass die Entmischung auf dem Vorbereitungsboden bei hohen NKB-Durchsätzen einen größeren Einfluss auf den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung besitzt als geringe NKB-Durchsätze.

Timofeev [13] weist nach, dass eine erhöhte Verweilzeit des Gutgemisches auf dem Vorbereitungsboden die Entmischung verbessert. Andererseits belegt Manig [67], dass sich bei vorgegebener Geometrie die Gutschichthöhe auf dem Vorbereitungsboden vergrößert und damit die Kornbewegung durch die NKB-Schicht negativ beeinflusst. Bezogen auf die Zielgröße Vorsortierung besteht damit eine Wechselwirkung zwischen den Parametern Verweilzeit und Gutschichthöhe.

Rochell hat den Einfluss von Froudezahl, Schwingungsrichtungswinkel und Amplitude am Vorbereitungsboden auf die Entmischung anhand des Körnerdurchganges eines perforierten Siebbodens in waagerechter Einbaulage mit dem Anstellwinkel $\alpha_{VB} = 0^{\circ}$ untersucht, **Bild 18**. Der Vorbereitungsboden wird durch ein Kreuzschleifengetriebe in harmonische Schwingungen versetzt. Die Antriebsdrehzahl variiert dabei von 140 - 640 min⁻¹. Daneben werden detaillierte Analysen zum Einfluss von Kinematik- und Materialparametern auf die Zielgröße mittlere Fördergeschwindigkeit \bar{v}_{Fo} am Vorbereitungsboden durchgeführt. Es wird deutlich, dass die beste Entmischung bei kleinen Werten von Froudezahl, Amplitude und Schwingungsrichtungswinkel eintritt. Eine Erklärung dafür liefert die hohe Verweilzeit des Gutgemisches auf dem Vorbereitungsboden zu Lasten einer geringen mittleren Fördergeschwindigkeit, die bei gegebener Geometrie und spezifischen Gesamtdurchsatz den Gutfluss in der Mähdrescher-Reinigung behindert. [8]



c) $\beta_{VB} = 40^{\circ}$, *a*_{VB} = 10 mm



Bild 18: Durchgangssummenkurven für verschiedene Froudezahlen Fr am Vorbereitungsboden, nach Rochell [8]

Spittel hat den Einfluss des Arbeitsverhaltens eines Vorbereitungsbodens auf den anschließenden Arbeitserfolg in der Mähdrescher-Reinigung anhand der Variation kinematischer Parameter untersucht. Zur Sicherstellung eines geringen Kornverlustes muss mit wachsenden NKB-Durchsätzen die Schwingweite (doppelte Amplitude) steigen. Der Einfluss einer variierenden Antriebsdrehzahl hat im Vergleich zu NKB-Beladung, Schwingweite sowie Förderlänge eine untergeordnete Bedeutung auf den Kornverlust. Zur Gewährleistung eines hohen Gesamtdurchsatzes kann daher eine höhere Antriebsdrehzahl gewählt werden, Bild 19. [5]



Bild 19: Kornverlust $V_{\rm K}$ in Abhängigkeit von Schwingweite $H_{\rm B}$ und Antriebsdrehzahl $n_{\rm B}$ bei verschiedenen spezifischen NKB-Durchsätzen $\dot{q}_{\rm B}$ und Förderlängen $I_{\rm F}$ auf dem Vorbereitungsboden, nach Spittel [5]

Aus Voruntersuchungen, die zur Einstellung einer geeigneten Schichtung mit Berücksichtigung der Rücklaufbodenbeschickung dienen, kann eine Ersatzschichtung zur Abbildung einer alleinigen Gutzufuhr über den Vorbereitungsboden in die Mähdrescher-Reinigung identifiziert werden. Neben dem Nachweis der vorteilhaften Schichtung Korn unter Nichtkornbestandteilen, Bild 17, wird die Sechs-Schicht-Beschickung zur reproduzierbaren Einstellung eines Gutgemisches bei der Untersuchung von Mähdrescher-Reinigungen etabliert. Des Weiteren gibt Spittel an, dass die Körner aus der Restkornabscheidung durch oberes Aufliegen vor Eintritt in die Fallstufe den Arbeitserfolg in der Mähdrescher-Reinigung verringern. [5,9]

Timofeev [13] hat die mechanischen Parameter am Vorbereitungsboden sowie die Geometrie des ebenen Viergelenk-Koppelgetriebes bis auf den Parameter Koppelabstand variiert und bestätigt die Ergebnisse von Rochell [8] und Spittel [5]. Eine Geometrieoptimierung hinsichtlich der vorderen und hinteren Schwingenlängen, sowie der dazugehörigen Schwingungsrichtungswinkel am Vorbereitungsboden zeigt marginales Potential zur Steigerung der Entmischung. Anders als in den theoretischen Berechnungen über den geringen Einfluss des Übertragungswinkels auf die Antriebskinematik nach Spittel [5] führt Timofeev [13] optimale Werte des Übertragungswinkels für Durchgangslänge I_{80} und Fördergeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Schwingungsrichtungswinkel an. Nach Timofeev [13] wirkt sich der Drahtrechen am Ende des Vorbereitungsbodens negativ auf die Durchgangslänge I_{80} aus, da sich die Körner in der NKB-Schicht später abscheiden können. Diese Ergebnisse widerlegen die Aussagen von Haase [68] und Spittel [5].

Persson [70] weist darauf hin, dass die Schichtung des Gutgemisches mit Korn unter Nichtkornbestandteilen auf dem Vorbereitungsboden eine positive Wirkung auf die nachfolgende Entmischung und Abscheidung auf dem Obersieb besitzt. Baader [71] kommt im Rahmen von Gebrauchswertprüfungen der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft (DLG) an Mähdreschern zu den gleichen Ergebnissen.

Mac Auley und Lee [69] führen eine Leistungssteigerung in der Mähdrescher-Reinigung ebenfalls auf eine verbesserte Entmischung am Vorbereitungsboden sowie auf eine hohe Fallstufe zurück.

Manig [67] schlägt vor, die Entmischung am Vorbereitungsboden durch Variation der mechanischen Parameter oder den Eintrag von pneumatischer Energie zu steigern.

Baumgarten [6] nennt als Voraussetzungen für eine Entmischung eine relative Bewegung der Elementarschichten gegeneinander über die gesamte Schichthöhe, einen geringen Durchdringungswiderstand für Körner in der Gutschicht und eine kürzere Auslese- und Abscheidezeit der Körner als die Verweilzeit auf dem Sieb. Weiterhin führt Baumgarten [6] Konzeptvarianten eines prozessraumvergrößernden pneumatisch unterstützten Vorbereitungsbodens an, Bild 8.

2.2.4 Modellierung

Die Modellierung von Entmischungs- und Abscheidevorgängen kann über unterschiedliche Theorien bewerkstelligt werden. Baumgarten gliedert die in der Literatur angeführten Ansätze zur Beschreibung von Trennprozessen wie folgt [6]:

- Analytisch beschriebene und physikalisch legitimierte Modelle zur Bestimmung der Gutschichtbewegung sowie von Entmischungs- und Abscheidevorgängen in der Gutschicht ausgehend von Punktmassen [3,8,13-15,44,60,72]
- Stochastische Modellansätze basierend auf der Analyse von Platzwechselvorgängen in der Gutschicht unter Berücksichtigung der Bewegungseigenschaften von Partikelschwärmen [14,15,73-80]
- Anwendung der Ähnlichkeitsphysik über dimensionslose Kennzahlen zur Abbildung eines experimentell nachgewiesenen physikalischen Effektes auf einen Modellvorgang [81]

Der zuletzt genannte Ansatz wird im Folgenden den stochastischen Modellansätzen zugeordnet, da die experimentell geführte Verifizierung der empirischen Annahmen auf messwertbasierten Regressionsfunktionen beruht.

Heutige Rechentechnik erlaubt es, neben der beschriebenen Einteilung nach Baumgarten [6], die auf Basis der komplexen molekulardynamischen Betrachtungsweise entstandene DEM, vergleiche Kapitel 2.1, auch für technisch relevante hohe Partikelanzahlen einzusetzen [82]. Die Abbildung von Wirbelschichtsystemen polydisperser Schüttungen benötigt neben der Modellierung der einzelnen Partikel und ihrer Wechselwirkungen mittels der DEM die Modellierung der Gasphase, welche mit Hilfe der Navier-Stokes-Gleichungen in der numerischen Strömungsmechanik (Computational-Fluid-Dynamics, kurz CFD) beschrieben wird [83,84]. Götz [85] erläutert eine Möglichkeit, diese beiden Methoden bei dichten Gas-Feststoff-Systemen mit Feststoffvolumenanteilen größer 10 % zu koppeln und verweist dabei auf die Leistungsfähigkeit dieser Werkzeuge. Der Validierungsaufwand der DEM hält sich dabei aufgrund der geringen Modellkomplexität in Grenzen. Zur Beschreibung sind nur wenige Stoffparameter erforderlich. Hierzu zählen die Stoßzahl, Reibungsbeiwerte sowie die Federkonstanten [85]. Diese Aussage gilt eingegrenzt für starre Körper, die unabhängig von den Umgebungsbedingungen ihre definierten Stoffeigenschaften beibehalten.

Zur Modellierung von verfahrenstechnischen Förder- und Entmischungsvorgängen biologischer und speziell landwirtschaftlicher Güter sind die Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen. Die aufgrund der Sortenvielfalt auftretenden Spreizungen beeinflussen die genannten Stoffparameter [86]. Eine Zusammenstellung zu Stoffeigenschaften von Körnerfrüchten gibt Kutzbach [87] an.

Beck [16] nimmt eine grundsätzliche Einteilung von Stoffparametern in einfache physikalische, komplexe physikalische und technologische Stoffeigenschaften vor. Die der Einteilung untergeordneten Parameter wie beispielsweise Zugfestigkeit, E-Modul und Federrate fordern aufgrund der Inhomogenität in Geometrie und Zusammensetzung gerade bei Korn und Nichtkornbestandteilen eine äußerst aufwendige messtechnische Erfassung. Die zur industriellen Anwendung der DEM am Markt befindliche Simulationssoftware bietet standardmäßig eingeschränkte Möglichkeiten zur Einbindung detaillierter physikalischer Stoffparameter. Die notwendigen Materialmodelle zur Beschreibung des komplexen Partikelverhaltens sind nicht integriert. Erste Ansätze zur Abbildung und Einbindung des Bruchverhaltens von Getreidekörnern in DEM-Simulationen hat Mümken angeführt [88-91].

Es erscheint sinnvoll, DEM-Simulationen von Korn-NKB-Gemischen nicht nur mit Stoffparametern auf Basis von Einzelpartikelbetrachtungen zu parametrisieren, sondern diese durch den schrittweisen experimentellen Abgleich nach den angeführten einfachen, komplexen und technologischen Stoffeigenschaften herbeizuführen. Pförtner hat Herangehensweisen zur Ermittlung und Validierung von Stoffparametersätzen für Korn und Nichtkornbestandteile beschrieben, die zur Abbildung der Abscheidekennlinien aus Durchdringungsversuchen geeignet sind. Die Herangehensweisen ermöglichen die Darstellung des Schwebeverhaltens von Korn und Nichtkornbestandteilen und bilden damit die Grundlage zur Modellierung von Wirbelschichtsystemen. [86,92]

Beckmann [93] und Pförtner [94] untersuchen die Entmischung von Korn-NKB-Gemischen an Grundlagenprüfständen und verifizieren diese unter Verwendung der dazugehörigen Stoffparametersätze anhand von CFD-DEM-Simulationen in Ein-Wege-Kopplung. Korn schildert die CFD-Modellierung einer bewegten Gutschicht in der Mähdrescher-Reinigung. Darin wird der Druckverlust in der Gutschicht und damit der Strömungswiderstand durch poröse Zonen abgebildet. Die Ermittlung des Strömungswiderstandes basiert auf der Gleichung nach Ergun [20]. Zur Bestimmung der Gutschichthöhe wird die Restkornfunktion nach Schreiber [95] genutzt. Die Anwendung der CFD zur Bestimmung der Strömungsverhältnisse in der Mähdrescher-Reinigung bei beladenem Zustand hat nach Korn bisher in Grenzen Einzug gehalten, da sich die experimentelle Verifizierung komplex gestaltet. [96]

Eine Einteilung der in der Literatur angeführten Modellierungsansätze der Mähdrescher-Reinigung und untergeordnet des Vorbereitungsbodens nach den technologischen Vorgängen Förderung, Entmischung und Abscheidung gelingt aufgrund der hohen Diversität nur bedingt, **Tabelle 1**.

technologischer Vorgang Modellansatz	Förderung	Entmischung und Abscheidung (För- derung implizit)	Entmischung, Abscheidung und Förderung
physikalisch	Baader [97], Zehme [7], Rochell [8] VB, Damm [44], Freye [3], Hübner [72], Timofeev [13] nur VB		Freye [3], Hübner [72]
stochastisch, empi- risch		Chrolikow [76], Kim und Gregory [98], Campbell [99] VB , Böttinger [15], Schreiber [95],	Huynh und Powell [78]
physikalisch und stochastisch			Beck [14] VB
diskret (DEM, CFD)			Korn [96]

Tabelle 1:	Literaturübersicht zur Modellierung der Mähdrescher-Reinigung

Zur Ermittlung des Bewegungsverhaltens von Gutschichten erlaubt die Betrachtung der Gutschicht als Punktmassensystem die überschlägige Berechnung der mittleren Fördergeschwindigkeit, Aussagen zur Gutschichtausdehnung, die Bestimmung der Abhebe- und Auftreffwinkel sowie der Zeitanteile der jeweiligen Bewegungsphase. Zahlreiche Autoren beschreiben die Förderung auf Schüttelrutschen sowie Schwingförderern in der mechanischen Verfahrenstechnik und analysieren das Bewegungsverhalten [56,100-106].

Die mathematische Beschreibung der Bewegungsphasen Ruhe, Gleiten und Wurf in einer Mähdrescher-Reinigung liefert Baader [97] in Form von Differentialgleichungen. Allerdings fehlt die Berücksichtigung der Strömungskomponente, welche Freye [3] erstmals in Verbindung mit vertikal und horizontal bewegten Korn-NKB-Gemischen einführte. Die Bewegungsgleichungen von Baader [97] werden um die Strömungswiderstandskraft F_s erweitert und beschreiben die Kräftebilanz am Einzelpartikel zur Modellierung des Sieb-Sicht-Prozesses. Freye [3] hat den theoretisch erarbeiteten Zusammenhang der Fördergeschwindigkeit als Funktion von mechanischen und pneumatischen Parametern anhand praktischer Versuche geprüft. Hübner [72] verwendet diese zur Bestätigung eines optimierten Bewegungsmodells, **Bild 20**.



Bild 20: Obere und untere Bewegungstrajektorien einer Gutschicht in einer Mähdrescher-Reinigung aufbauend auf dem optimierten Bewegungsmodell, nach Hübner [72]

Mit Kenntnis der Widerstandsbeiwerte der Gutgemischbestandteile nach Arbeiten von Matthies [107], Zabeltitz [108] und Keuneke [19] kann auf Basis der Ergun-Gleichung, Gl. (6), der Druckverlust in der Gutschicht und damit die Strömungswiderstandskraft berechnet werden [3]. Die auf Dichte- und Geometrieunterschiede zurückzuführende Ausdehnung der Gutschicht in der Wurfphase fordert eine zeitabhängige Vergrößerung der Porosität. Eine empirische Beschreibung leiten Lewis et al. [109] für stationäre, luftdurchströmte Gutgemische auf Basis des Ausdehnungsfaktors *k* = 0,0342 her. Freye [3] optimiert die Beschreibung anhand experimenteller Versuche und gibt unter Verwendung der von Keuneke [19] erhobenen Konstanten k_1 = 150 und k_t = 3,5 für Korn-NKB-Gemische den Ausdehnungsfaktor mit k = 0.041 an. Nach Hübner [72] zeigen sich bei niedrigen und mittleren Luftgeschwindigkeiten gute Übereinstimmungen zwischen Berechnung und Experiment. Bei hohen mittleren Luftgeschwindigkeiten wird das Auflockerungsverhältnis λ der Gutschicht unterbewertet, da die Kontraktion der Gutschicht nach dem Auftreffen der untersten Partikel unberücksichtigt bleibt. Unter Beachtung der von Keuneke [19] angegebenen Faktoren der turbulenten Mischbewegung δ sowie der Knickung, welche das Verhältnis der wahren Durchströmlänge durch die Gutschicht zur Gutschichthöhe angibt, führt Hübner [72] eine analytische Beschreibung der zeitabhängigen Porosität an. Anhand von Parameteranalysen wird der Faktor der turbulenten Mischbewegung zu δ = 0,6 sowie der Ausdehnungsfaktor zu *k* = 0,038 berechnet. Die Einbeziehung der Gutschichtkontraktion zeigt im Abgleich mit Messergebnissen nur geringe Differenzen [72].

Chrolikow hat unter der Voraussetzung, dass sich Entmischungs- und Abscheidevorgänge durch zeitdiskrete Markow-Ketten beschreiben lassen, ein Modell entwickelt [110]. Anhand von drei Zuständen wird der Korndurchgang durch Gut- und Grenzschicht beschrieben, **Bild 21**:

- 1 Ausgangszustand Korn in der Gutschicht,
- 2 Korn durchdringt die Gutschicht und
- 3 Korn wird an der Siebfläche abgeschieden. [76]



Bild 21: Trennvorgang auf einem Flachsieb, nach Chrolikow [76]

Der Wahrscheinlichkeit des Korndurchganges auf einem diskreten Siebabschnitt werden in den Fällen der Gutschichtdurchdringung und Abscheidung an der Grenzschicht verschiedene Faktoren zugeordnet. Mit vorgegebenen Anfangsbedingungen lässt sich daraus durch Integration die Gleichung des technologischen Siebvorganges entwickeln. Durch Versuche konnte Chrolikow die Eignung des Modells zur Bestimmung des Abscheidegrades bei Erbsen nachweisen. Aufgrund der Verknüpfung der Faktoren mit der Fördergeschwindigkeit auf den Sieben ist eine Optimierung der mechanischen Parameter möglich. [76]

Huynh und Powell erarbeiten parallel zu Chrolikow [76] den gleichen stochastischen Modellansatz empirischer Verteilungsfunktionen, der auf Entmischungs- und Abscheidewahrscheinlichkeiten beruht. Allerdings wird die Förderung im Vergleich zur integralen Beschreibung nach [76] durch physikalische Zusammenhänge auf die oszillierende Bewegung eines Lamellensiebes bezogen. Die Geometrie der Lamellen wird dabei nicht berücksichtigt. Mit der Modellierung werden Parametersätze identifiziert, welche die Entmischung und Abscheidung in der Mähdrescher-Reinigung optimieren. Durch Vergleich mit experimentellen Versuchen konnten die Modellgüte verifiziert sowie die theoretisch abgeleiteten Parametersätze bestätigt werden. [78]

Campbell [99] bildet den gesamten Mähdrescher unter Verwendung von gewöhnlichen Differentialgleichungen als dynamisches Modell ab. Durch die Verwendung von Übertragungsfunktionen mit Verzögerungsgliedern erster Ordnung wird das stationäre Verhalten der Gutgemischbewegung und mittels eines Totzeitgliedes die Systemdynamik modelliert. Als Anfangs- und Übergabewerte werden die Massenströme genutzt. Durch Kopplung der Übertragungsfunktionen kann die Mähdrescher-Reinigung vom Vorbereitungsboden bis zu den Sieben modelliert werden. Auf dem Vorbereitungsboden wird lediglich die Fördergeschwindigkeit sowie die Entmischung in Förderrichtung berücksichtigt. Abhängig von der Beladung wird das Gutgemisch pneumatisch oder mechanisch gefördert. Das häufig empirisch angenommene Übertragungsverhalten ohne physikalische Begründung erlaubt durch Anpassung der Koeffizienten eine gute Annäherung des Simulationsmodells an die tatsächlichen Verhältnisse. [99]

Den auf dem zweiten Fick'schen Gesetz basierenden Diffusionsansatz nach Gregory und Fedler [79] entwickeln Kim und Gregory zur Abbildung der Restkornfunktion für die Mähdrescher-Reinigung weiter. Dieser unterscheidet nicht zwischen Entmischung und Abscheidung. Korn diffundiert entlang eines Konzentrationsgefälles aus der Gutschicht durch ein als Membran gedachtes Trennmedium. Die Restkornfunktion zeigt in einem weiten Bereich eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Versuchsergebnissen und beschreibt den Verlauf ab dem Abscheidemaximum. Der zunächst ansteigende Verlauf der Siebrestfunktion wird durch eine Behinderung des Gutflusses vom Vorbereitungsboden auf das Obersieb erklärt. [80]

Böttinger [15] leitet den Zusammenhang zwischen Abscheide- und Restkornfunktion in der Mähdrescher-Reinigung unter Bezug auf den Diffusionsansatz von Kim und Gregory her [98]. Anders als weitere in der Literatur angeführte Modelle wird ein kombinierter Funktionsansatz erarbeitet, welcher neben dem im ersten Siebdrittel auftretenden Abscheidemaximums den exponentiellen Abfall des Restkornanteils bis zum Ende des Abscheidebereiches mit berücksichtigt [76,78]. Es werden verschiedene empirische Funktionsansätze zur Abbildung des exponentiellen Abfalls auf ihre Anwendbarkeit überprüft und die Restkornfunktion ermittelt. Die Koeffizienten beinhalten Einflüsse der mechanischen und pneumatischen Parametervariationen. Zur Bestimmung dieser Koeffizienten werden experimentelle Versuche durchgeführt, die dem Simulationsmodell zugrunde liegen. Unter den Annahmen: homogenes Gemisch zu Beginn der Trennelementlänge, konstante Fördergeschwindigkeit über dem Trennmedium sowie alle Entmischungs- und Abscheidebedingungen sind stetig über der Trennelementlänge zeigen die erarbeiteten Funktionsansätze eine hohe experimentelle Reproduzierbarkeit. Böttinger identifiziert abscheidespezifische Kennwerte in der Mähdrescher-Reinigung und bildet diese in einem Modellansatz ab. Der Zusammenhang zwischen NKB- und Korndurchsatz, Gebläsedrehzahl sowie Kornverlust wird durch die Abscheidefunktion abgebildet und bestätigt. Die Entmischung wird bei hohen spezifischen NKB-Durchsätzen der leistungsbegrenzende Parameter [8,97]. Die Herausforderung einer nachgewiesenen direkten Korrelation zwischen dem Restkornanteil auf dem letzten Trennelementdrittel und dem Kornverlust zur Regelung der Vorfahrtgeschwindigkeit im Mähdrescher kann nicht gelöst werden. [15]

Schreiber vereinfacht die definierten Funktionen für Restkornanteil und Abscheiderate zur Modellierung der Mähdrescher-Reinigung von Böttinger [15], indem er Parameter einer Grenzwertbetrachtung unterzieht und eliminiert. Die auf Basis von iterativen Verfahren bestimmten Kurven zeigen im experimentellen Abgleich mit Messdaten von Zhao [66] eine hohe Übereinstimmung. [95]

Rochell [8] nutzt zur Beschreibung des Bewegungsvorganges auf dem Vorbereitungsboden ebenfalls die Gleichungen von Baader [97] und erweitert diese durch die Einbindung der Stufengeometrie. Hierbei wird nicht zwischen Gleit- und Haftreibung unterschieden.

Das Modell des Vorbereitungsbodens von Timofeev [13] berechnet die auf die Gutschicht wirkenden Beschleunigungen anhand der kinematischen Parameter des ebenen Viergelenk-Koppelgetriebes. Aussagen zur detaillierten Förderung sowie zur Entmischung sind hieraus nicht ableitbar.

Die aufgeführten Modellierungsansätze eignen sich abhängig von der zu untersuchenden Zielgröße zur Abbildung von Teilvorgängen und können unterschiedlich kombiniert werden, **Tabelle 2**.

Tabelle 2:	Modellierungsansätze des Trennprozesses in der Mähdrescher-Rei-
	nigung

Ansatz	Eigenschaften		
 Physikalische Modelle zur Analyse der Förderung Punktmassenbewegung anhand von Differentialgleichungen 	Keine direkte Berechnung von Kornver- lust und Durchgangslänge <i>I</i> ₈₀ möglich; Zusammenhänge werden nach experi- mentellem Abgleich über Regressionen zu den Eingangsparametern erklärt.		
 Stochastische Modelle zur Beschrei- bung von Entmischung und Abschei- dung Markow'scher Punktvorgang Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen Diffusionsansatz (Fick'sches Gesetz) Differentialgleichungen 	Die Restkornfunktion $R_{\rm K}(I)$ setzt sich aus Teilmodellen der Entmischung (Korn durchdringt eine Gutschicht) sowie der Abscheidung (Korn wird an Sieböffnun- gen segregiert) zusammen; keine Aus- sagen zum Verhalten der Einzelpartikel möglich; Kornverlust und Durchgangs- länge I_{80} können ermittelt werden		
Kombination von Teilmodellen (stochas- tische und physikalische Modelle)	Der Bezug zwischen mechanischen und pneumatischen Eingangsparametern sowie Zielgrößen, wie Kornverlust und Durchgangslänge I_{80} ist möglich; der An- satz ist auf Partikelebene nicht umsetz- bar		
Diskrete Partikel in Kopplung mit Strö- mungsmodellierung, DEM und CFD	Modellierung von komplexen Bewe- gungs- und Trennvorgängen von der Be- trachtung auf Einzelpartikelebene bis hin zu Gutgemischen unter Anwendung von numerischer Strömungsberechnung		

Beck [14] entwickelt mathematische Beschreibungen für die Förderung, Entmischung und Abscheidung. Neben der Modellierung des Dreschvorganges und der Restkornabscheidung weist das Modell eine detaillierte Beschreibung der Mähdrescher-Reinigung auf. Bekannte Ansätze aus der Literatur werden mit eigenen kombiniert, **Tabelle 3**. Neu ist die Modellierung im Zweischrittverfahren, in dem zunächst Modellparameter aus Versuchsparametern bestimmt werden, die auf mathematische Beschreibungen zurückgeführt werden, und anschließend als Anfangsgrößen im jeweiligen Prozessmodell dienen [14].

Tabelle 3:	Untermodelle zur Beschreibung der Mähdrescher-Reinigung, nach	ch
	Beck [14]	

Baugruppe Teilvorgänge	Vorbereitungsbo- den	Fallstufe	Siebkasten		
Fördern	Freye [3]		Freye [3]		
Entmischen	Meinel und Schu- bert [30,33]	Beck [14]	Meinel und Schu- bert [30,33]		
Abscheiden		Beck [14]	Huynh und Powell [78]		

Beck nutzt zur Beschreibung der Entmischung den Ansatz von Meinel und Schubert [30,33], Gl. (8). Darin beschreibt der Konvektionsanteil die mittlere Sinkgeschwindigkeit des Kornmassen-Maximums in Richtung Trennfläche. Der Dispersionsanteil berücksichtigt die steigende Standardabweichung mit zunehmender Zeit, **Bild 22**. Die Kornmassenverteilung nach Gl. (8) führt allein unter Beachtung von Randbedingungen zu einer analytischen Lösung über die Gauß'sche Glockenkurve [30,33].



Bild 22: Schematische Darstellung der Kornbewegung aufgrund des Konvektions-Dispersions-Modells zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei zu Beginn unendlich dünner Kornschicht, nach Beck [14]

Nach Beck sind Konvektions- und Dispersionskonstante neben weiteren Modellparametern nicht oder nur mit hohem Aufwand messtechnisch ermittelbar. Die Kenntnis der die Entmischung beschreibenden physikalischen Größen ist jedoch zwingend erforderlich, um eine hohe Modellgüte zu erhalten. Beck führt eine Möglichkeit an, um die Modellparameter Konvektions- und Dispersionskonstante über die messbare Kornabscheidung mit Hilfe der Prozessmodelle zu berechnen. [14]

Anhand der Ansätze von Baader [97] und Freye [3] beschreibt Beck die Förderung am Vorbereitungsboden. Die Stufengeometrie wird nicht geometrisch, sondern durch einen Ersatzreibwert abgebildet. Beck verifiziert das Modell anhand experimenteller Abscheideversuche an einem perforierten Vorbereitungsboden, da die Entmischung in der Gutschicht messtechnisch nicht ermittelt werden kann. Die Bestimmung des Entmischungswiderstandes kann nicht unabhängig vom Abscheidewiderstand erfolgen, weshalb das Ergebnis einem systematischen Fehler unterliegt, Anhang 8.4. Im Kontext des Gesamtmähdreschermodells wird der Einfluss einer Variation der Vorbereitungsbodenlänge auf die Kornverluste in der Mähdrescher-Reinigung als gering bewertet. Hierbei wird gezeigt, dass die Körner nahezu verlustfrei in der Mähdrescher-Reinigung abgeschieden werden, wenn der Vorbereitungsboden lediglich den Abscheideabgang des Dreschwerks zur Fallstufe führt. Mithin liefert der Abgang der Restkornabscheidung den maßgeblichen Anteil des Kornverlustes in der Mähdrescher-Reinigung. Der Vergleich des theoretisch ermittelten Zusammenhanges zum Durchsatz-Kornverlust-Verhalten mit Ergebnissen auf Basis von Regressionsfunktionen experimenteller Versuche zeigt nach Anpassung der Modellparameter eine gute Übereinstimmung. [14]

Die aufgeführten Modelle sind geeignet, um die Förderung, Entmischung und Abscheidung in der Mähdrescher-Reinigung annähernd zu beschreiben. Allen aufgeführten Modellen gemein ist der über Koeffizienten geführte Abgleich mit experimentellen Versuchen auf Basis von Regressionsfunktionen. Dazu werden bei Untersuchungen an der Mähdrescher-Reinigung in der Regel die Bewertungsgrößen nach Anhang 8.1 herangezogen. Die Modellierungen verwenden selten Stützstellen, die eine messtechnische Verifizierung ermöglichen. Die Modellierung der Mähdrescher-Reinigung als "Black-Box" bleibt vorrangig erhalten, lediglich die Ansätze von Beck [14] beschreiben die Mähdrescher-Reinigung als "Gray-Box".

2.3 Messtechnische Erfassung der Entmischung

Die direkte experimentelle Ermittlung der Kornverteilung in einem bewegten Gutgemisch mit Nichtkornbestandteilen in hohen Beladungen bereitet nach wie vor Schwierigkeiten. Die Untersuchungen nach **Kapitel 2.2** beruhen auf verschiedenen indirekten Messverfahren. Neben diesen werden in der Literatur weitere physikalische Messverfahren beschrieben, **Bild 23**.



Bild 23: Messverfahren zur Bestimmung der Entmischung von Korn in NKB

Pippel [111] führt experimentelle Untersuchungen zur Längsentmischung von Feststoffen in Gas-Feststoff-Wirbelschichten mit radioaktiv markierten Partikeln durch.

Kernspinresonanzverfahren (NMR) erlauben die Bestimmung von Partikelverteilungen und dreidimensionaler Geschwindigkeitsfelder zur Untersuchung der Entmischung [112]. Die NMR-Technologie kann zur Abbildung verfahrenstechnischer Zusammenhänge im Modellmaßstab angewendet werden. Die Darstellung in realen Maschinengrößen ist sehr kostenintensiv und mit heutigen Kernspintomographen aufgrund der notwendigen kontinuierlichen Förderung nicht vorstellbar. Zur Erreichung einer hohen visuellen Ablesegüte bei der Bestimmung der mittleren Fördergeschwindigkeit von Korn im experimentellen Versuch färbt Rochell [8] die Körner im Gutgemisch ein. Freye [3] und Beck [14] verwenden Hochgeschwindigkeitskameratechnik, um die Förderung auf dem Vorbereitungsboden sowie das Gutschichtverhalten in der Fallstufe visuell zu bewerten.

Die Methode der Particle-Image-Velocimetry (PIV) erlaubt es, aus Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen die lokalen Partikelgeschwindigkeiten zu bestimmen und damit zweidimensionale Geschwindigkeitsfelder zu erzeugen. Die mit dieser Methode gewonnenen Erkenntnisse aus der Untersuchung flacher, transparenter Wirbelschichtsysteme in rechteckigen Volumina können im Reaktormaßstab bereits auf dreidimensionale Wirbelschichten übertragen werden [113]. Gerade bei hohen Partikelbeladungen muss die optische Zugänglichkeit gewährleistet sein, was dieses Verfahren zur Untersuchung der Entmischung in der Mähdrescher-Reinigung nur eingeschränkt einsetzbar macht.

Haiges [114] beschreibt geeignete Messverfahren, die eine Bewertung der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden ermöglichen. Der Nutzung von Terahertzstrahlung wird dabei ein hoher Stellenwert zugeschrieben. Dieses im Reflexionsoder Transmissionsverfahren arbeitende Messverfahren ermöglicht die Detektion von Partikeln in einem Gutgemisch. In einer aufbauenden Arbeit kann Locher [115] die experimentelle Eignung der Terahertz-Technologie jedoch nicht bestätigen.

Beckmann führt Untersuchungen zur Entmischung an Korn-NKB-Gemischen auf einem miniaturisierten, vertikal oszillierenden Siebboden durch. Diese werden anhand von Hochgeschwindigkeitskameratechnik kombiniert mit einem zeitauflösenden, dynamischen Computertomographie-Verfahren analysiert. Eine 3D-Bildrekonstruktion der Entmischung gelingt jedoch nicht. Allerdings wird auf Basis der differierenden Strahlungsabsorption für Korn und Nichtkornbestandteile der momentane mittlere Abstand der Kornschicht vom Siebboden sowie die mittlere Ausdehnung der Kornschicht im unteren Totpunkt (UT) der vertikalen Oszillation mit Hilfe umgewandelter Binärdaten detektiert. Der von Beck [14] theoretisch beschriebene Entmischungs- und Abscheideverlauf wird qualitativ nachgewiesen. [116,117]

3 PRÄZISIERUNG DER AUFGABENSTELLUNG

3.1 Parameteranalyse am Vorbereitungsboden

Die These, dass eine pneumatische Unterstützung am Vorbereitungsboden die Entmischung des Korn-NKB-Gemisches steigert, bedarf einer Betrachtung der mechanischen Parameter am zu untersuchenden Vorbereitungsboden nach Bild 6. Dazu werden Versuchsdaten von Rochell [8] mit dem Funktionsansatz von Böttinger [15] analysiert. Das erarbeitete Regressionsmodell soll eine Aussage zum Entmischungs- und Förderverhalten am zu untersuchenden Vorbereitungsboden erlauben. Grundlage des Regressionsmodelles bildet die Interpolation des Korndurchganges am Vorbereitungsboden. Die mechanischen Parameter am Vorbereitungsboden nach **Kapitel 2** sind: $a_{VB} = 0,034$ m, $\alpha_{VB} = 5^{\circ}$, $\beta_{VB} = 29,5^{\circ}$ sowie $\omega_{VB} = 30,2$ rad·s⁻¹. Die Parametergrenzen der Versuchsdaten von Rochell [8] gestatten eine überschlägige Bestimmung der mittleren Fördergeschwindigkeit und der Durchgangslänge I_{80} . Um die Kennwerte nutzen zu können, wird der Schwingungsrichtungswinkel um den Anstellwinkel $\alpha_{VB} = 5^{\circ}$ korrigiert, **GI. (11), Bild 24**.

$$\beta_{\rm VB, korr.} = \beta_{\rm VB} - \alpha_{\rm VB} \tag{11}$$





Zur Approximation der mittleren Fördergeschwindigkeit und der Durchgangslänge I_{80} wird ein Regressionsmodell unter Berücksichtigung linearer Wechselwirkungen für Fr = 1,5 erstellt. Zur Berechnung des Körnerdurchganges wird die Restkornfunktion von Böttinger [15] herangezogen, **GI. (12)**. Die Bestimmung der Koeffizienten D_1 und D_2 erfolgt iterativ nach dem Algorithmus der orthogonalen Distanzregression, die im Gegensatz zur linearen Regression die Residuen in x- und yRichtung einbezieht [118]. Durch das Bilden der Umkehrfunktion **GI. (14)** aus **GI. (13)** wird bei $D_{\rm K}$ = 0,8 die Durchgangslänge I_{80} berechnet.

$$R_{\rm K}(I) = e^{\left(\frac{-D_1}{D_2+1}\right) \cdot I^{D_2+1}}$$
(12)

$$D_{\rm K}(l) = 1 - R_{\rm K}(l)$$
 (13)

$$I_{80} = \sqrt[(D_2+1)]{(D_2+1) \cdot \ln(1-D_K)} -D_1$$
(14)

Die aus der Regression, **Bild 25** ableitbaren Aussagen sind identisch zu denen der Datenbasis, Bild 18, **Kapitel 2.2.3**.



Bild 25: Interpolierte Durchgangslänge I_{80} und mittlere Fördergeschwindigkeit $\bar{v}_{Fö}$ für Fr = 1,5 auf Basis eines Datensatzes von Rochell [8] durch Anwendung der Regressionsfunktion von Böttinger [15]

Unter Berücksichtigung des gesamten Froudezahlenbereiches, Bild 18, wird ein weiteres Regressionsmodell erstellt und die Kennwerte nach der angeführten Vorgehensweise berechnet. Das Regressionsmodell unterliegt einer Fehleranhaftung aufgrund der geringen Anzahl an Stützpunkten. Die Ursache dafür ist die Versuchsdurchführung ohne statistische Versuchsplanung. Die Genauigkeit soll jedoch zur Ableitung einer Tendenz genügen, **Bild 26**.



Bild 26: Approximierte Durchgangslänge I_{80} und mittlere Fördergeschwindigkeit $\overline{v}_{Fö}$ für die mechanischen Parameter $a_{VB} = 0,034$ m, $\beta_{VB,korr.} = 24,5^{\circ}$ des Vorbereitungsbodens nach Bild 6 auf Basis des Datensatzes von Rochell [8] durch Anwendung der Regressionsfunktion von Böttinger [15]

Die hohe approximierte Durchgangslänge *I*₈₀ von 2,2 m bei den gegebenen mechanischen Parametern zeigt, dass der zu betrachtende Vorbereitungsboden nicht auf optimale Entmischung abgestimmt ist, Bild 26. Diese Tatsache begründet sich in der Notwendigkeit einer Sicherstellung des Gutflusses bei schwierigen Erntebedingungen und hohen Gutdurchsätzen durch eine hohe Fördergeschwindigkeit. Für eine deutliche Erhöhung der Entmischung sollte die Froudezahl kleiner als zwei sein. Damit einhergehend verringert sich die mittlere Fördergeschwindigkeit auf 0,3 m·s⁻¹. Spittel [5] beschreibt die Ergebnisausprägung in gleicher Weise und empfiehlt die Auslegung der mechanischen Parameter am Vorbereitungsboden zu Gunsten einer hohen Fördergeschwindigkeit, die zur Sicherstellung des Gutflusses dient. Unter der Voraussetzung einer Mindestfördergeschwindigkeit liegen die Parameter Amplitude, Antriebsfrequenz und Schwingungsrichtungswinkel des zu untersuchenden Vorbereitungsbodens im optimalen Bereich und werden deshalb nachfolgend nicht variiert.

3.2 Motivation und Ziele

Die Auswertung des Standes der Technik zeigt, dass die Entmischung von Korn-NKB-Gemischen in der Mähdrescher-Reinigung bei Kopplung von mechanischer und pneumatischer Anregung gesteigert wird, Kapitel 2. Daraus leitet sich die These ab, dass die Entmischung durch Einbringung von pneumatischer Energie am Ende des Vorbereitungsbodens und unter Berücksichtigung bestehender geometrischer Grenzen positiv beeinflusst werden kann. Ziel ist das Umsortieren der Bestandteile des Gutgemisches aus Dreschwerk und Restkornabscheidung derart, dass mehr Korn in der unteren Schicht des Gutgemisches angelagert wird.

Die für die Förderung optimierten Parameter Amplitude, Antriebsfrequenz und Schwingungsrichtungswinkel des Vorbereitungsbodens sowie die feste Kopplung an den Siebrahmen führen zu Restriktionen bei der Untersuchung, **Kapitel 3.1**. Die festen mechanischen Parameter am Vorbereitungsboden sind: $a_{VB} = 0,034$ m, $\omega_{VB} = 30,2$ rad·s⁻¹ und $\beta_{VB} = 29,5^{\circ}$.

Anhand der experimentellen Analyse des Bewegungsverhaltens der Gutschicht auf dem konventionellen und dem pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden wird geprüft, inwieweit der Modellierungsansatz einer Punktmassenbetrachtung das Bewegungsverhalten abbildet. Damit verbunden wird auf die Möglichkeiten der DEM zur Modellierung von Bewegungsvorgängen auf dem Vorbereitungsboden eingegangen.

Für die Beschreibung des Einflusses der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden auf die Entmischung wird ein stochastisches Modell mit wenigen Parametern entwickelt. Dieses basiert auf empirischen Messwerten von Durchdringungszeit- und Fluidisierungsprüfstand. Das Modell wird durch Stützstellen am Vorbereitungsboden experimentell verifiziert. In diesem Zusammenhang wird geklärt, inwieweit eine Färbung der Kornanteile, getrennt für die Vorbereitungsboden- und Rücklaufbodenbeschickung, eine Möglichkeit zur Verifizierung der Entmischung bietet. Weitere experimentelle Untersuchungen sollen den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung bei konventionellem und pneumatisch unterstütztem Vorbereitungsboden aufzeigen. Die pneumatische Unterstützung am Vorbereitungsboden wird durch Veränderung von Luftgeschwindigkeit und Strömungsrichtung variiert. Daneben wird die gesamte Luftverteilung in der Mähdrescher-Reinigung optimiert.

Zur Bewertung der Entmischung wird der Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung abhängig vom Beschickungsort des Gutgemisches ermittelt. Die Beschickung an Vorbereitungs- und Rücklaufboden erlaubt weiterhin die Untersuchung des Einflusses variabler Korn-NKB-Anteile abhängig vom Beschickungsort und der Länge des Vorbereitungs- und Rücklaufbodens.

Allen Untersuchungen am Vorbereitungsboden gemein sind die Sicherstellung der Förderung des Gutgemisches, der Vorsortierung des Gutgemisches und die Homogenisierung der Gutschichtung in Längs- und Querrichtung. Weitere untergeordnete Anforderungen führt Spittel [5] an.

4 THEORETISCHE UNTERSUCHUNG AM PNEUMATISCH UNTERSTÜTZTEN VORBEREITUNGSBODEN

4.1 Punktmassen-Modell der Förderung

4.1.1 Grundlagen

Die Untersuchung des Bewegungsvorganges des Gutgemisches auf dem zusätzlich pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden basiert auf dem Punktmassenansatz nach **Kapitel 2.2.4** [3,8,14,72,97]. Das ebene Viergelenk-Koppelgetriebe des Vorbereitungsbodenantriebes wird dabei idealisiert durch einen Linearschwinger abgebildet, **Bild 27**.



Bild 27: Idealisierter Vorbereitungsbodenantrieb

Zur mathematischen Beschreibung der Bewegungstrajektorien werden drei Koordinatensysteme definiert, **Bild 28**:

- x-y: Inertialsystem,
- *Ξ-H*: Relativsystem Vorbereitungsboden,
- ξ - η : Relativsystem Stufung

Eine Überführung der Koordinatensysteme wird über die jeweiligen Transformationsmatrizen erreicht. Die Darstellung im Relativsystem der Stufenebene minimiert den Berechnungsaufwand, da im Fall einer Auflage des Gutgemisches der Ortsvektor allein durch den ξ -Anteil beschrieben wird. Eine ortsabhängige Eliminierung der Strömungswiderstandskraftkomponente im Berechnungsmodell von Freye [3] ermöglicht die Beschreibung eines oszillierenden und teilweise pneumatisch unterstützten Vorbereitungsbodens. [119]



Bild 28: links: Skizze kombinierter Vorbereitungsboden, konventionell (I) - pneumatisch unterstützt (II); rechts: Kräfte am Einzelkorn in einer Schüttung auf dem pneumatisch unterstützten Vorbereitungsbodenabschnitt, nach [119]

Die Kraftkomponenten am freigeschnittenen Einzelkorn in einer Schüttung errechnen sich aus den Vorschriften [3]:

Gewichtskraft:
$$F_{\rm G} = m_{\rm K} \cdot g = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot \rho_{\rm K} \cdot d_{\rm K}^3 \cdot g$$
 (15)

Trägheitskraft:
$$F_{\rm T} = m_{\rm K} \cdot \ddot{a}_{\rm H} = -m_{\rm K} \cdot a_{\rm VB} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega_{\rm VB} \cdot t)$$
 (16)

Reibungskraft:
$$F_{\rm R} = \mu \cdot F_{\rm N}$$
 (17)

Strömungswiderstandskraft: $F_{\rm S} = \left(\frac{2 \cdot k_{\rm l} \cdot v_{\rm L} \cdot (1 - \varepsilon_{\rm Gut})}{v_{\rm L,rel} \cdot d_{\rm K}} + k_{\rm t}\right) \cdot \frac{\pi \cdot d_{\rm K}^2}{6 \cdot \varepsilon_{\rm Gut}^3} \cdot \frac{\rho_{\rm L}}{2} \cdot v_{\rm L,rel}^2$ (18)

Der Bewegungsvorgang des im ξ - η - Relativsystem wird unter der geometrischen Vereinfachung der Betrachtung des Differenzwinkels, **GI. (19)** mit den richtungsabhängigen Beschleunigungsgleichungen von Newton beschrieben, **GI. (20)** und **GI. (21)**.

$$\gamma = \beta_{\rm VB} - \alpha \tag{19}$$

$$m_{\rm K} \cdot \frac{{\rm d}^2 \xi}{{\rm d}t^2} = -F_{\rm R} - F_{\rm T} \cdot \cos \gamma - F_{\rm G} \cdot \sin \alpha + F_{{\rm S},\xi}$$
(20)

$$m_{\rm K} \cdot \frac{{\rm d}^2 \eta}{{\rm d}t^2} = F_{\rm N} - F_{\rm T} \cdot \sin \gamma - F_{\rm G} \cdot \cos \alpha + F_{{\rm S},\eta}$$
(21)

Die Berechnung der Strömungswiderstandskraft am Einzelkorn in einer Schüttung nach Freye [3], Gl. (18) setzt die Kenntnis der relativen Luftgeschwindigkeit $v_{L,rel}$ zwischen dem Einzelkorn und der ambienten Luft voraus, **Bild 29**.



Bild 29: Modellierung der relativen Luftgeschwindigkeit am konventionellen und pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden, nach [119]

Eine zusätzliche Luftbeaufschlagung am Vorbereitungsboden fordert die Beachtung der relativen Luftgeschwindigkeit zwischen dem Einzelkorn und der ambienten Luftbewegung [3], **GI. (22)**.

$$v_{\text{L,rel}} = \sqrt{\left[v_{\text{L,\xi}} - \left(v_{\text{VB},\xi}(t) + \frac{\mathrm{d}\xi}{\mathrm{d}t}\right)\right]^2 + \left[v_{\text{L,\eta}} - \left(v_{\text{VB},\eta}(t) + \frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}t}\right)\right]^2}$$
(22)

Zur Bestimmung der Förderung auf dem konventionellen Vorbereitungsbodenabschnitt wird idealisiert angenommen, dass sich die Luftschicht mit der Oszillationsfrequenz des Vorbereitungsbodens bewegt und damit ein im ξ - η - Relativsystem ruhendes Gutgemisch keine Relativgeschwindigkeit zur ambienten Luft erfährt. Damit vereinfacht sich Gl. (22) zu **Gl. (23)**. [3]

$$v_{\rm L,rel} = \sqrt{\left(-\frac{\mathrm{d}\xi}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \left(-\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}t}\right)^2} \tag{23}$$

Die Berechnung der Strömungswiderstandskraftkomponenten im ξ - η - Relativsystem muss der Zerlegbarkeit in kartesische Koordinaten genügen [72,119], **GI. (24)** und **GI. (25)**.

$$F_{\mathrm{S},\xi} = F_{\mathrm{S}} \cdot \cos \varphi_{\mathrm{L,rel}} = F_{\mathrm{S}} \cdot \frac{V_{\mathrm{L},\xi} - \left(V_{\mathrm{VB},\xi} + \frac{\mathrm{d}\xi}{\mathrm{d}t}\right)}{V_{\mathrm{L,rel}}}$$
(24)

$$F_{\rm S,\eta} = F_{\rm S} \cdot \sin \varphi_{\rm L,rel} = F_{\rm S} \cdot \frac{V_{\rm L,\eta} - \left(V_{\rm VB,\eta} + \frac{\rm d\eta}{\rm dt}\right)}{V_{\rm L,rel}}$$
(25)

Nach Wildemann [119] wird die detaillierte Geometrie der Perforierungen am pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden nicht berücksichtigt, sondern dieser als vollständig luftdurchlässig abgebildet. Eine Pulsation des Luftstromes in der Mähdrescher-Reinigung zeigt nach Dahany [61] keinen signifikanten Einfluss auf Kornverlust und -reinheit, weshalb die Auswirkung der Oszillation des Vorbereitungsbodens auf Betrag und Richtung der Luftgeschwindigkeit im Modell nicht integriert wird [119]. Die analytische Beschreibung der Auswirkungen einer Lufteinleitung auf das Bewegungsverhalten eines Gutgemisches wird in der Literatur ausführlich behandelt [3,14,72,119]. Zur Ermittlung der am Einzelkorn in einer Schüttung auftretenden Strömungswiderstandskraft, Gl. (18) ist die Kenntnis der sich einstellenden Luftgeschwindigkeit im Gutgemisch von besonderer Bedeutung. Die Modellansätze in den Arbeiten von [3,14,72,120] setzen nach Wildemann [119] voraus, dass die Luftgeschwindigkeit in Betrag und Richtung bekannt ist und als konstant über die Länge der pneumatischen Unterstützung angenommen werden kann. Abhängig von den Strömungswiderständen der Geometrie und der Gutbeladung stellt sich in der Realität eine ungleichmäßige Luftgeschwindigkeitsverteilung über die Länge der pneumatischen Unterstützung ein. Im Hinblick auf eine differenzierte Bewertbarkeit von Vorbereitungsböden und deren Luftverteilungskonzepten wird die Modelleinbindung empirisch aufgezeichneter Strömungsprofile zur Berechnung der Luftgeschwindigkeiten im Gutgemisch angestrebt [119].

Wird die Annahme berücksichtigt, dass die Gutschicht ortsunabhängig den gleichen Strömungswiderstand aufweist und damit bei gleicher spezifischer kinetischer Energie der Anströmung $p_{dyn,An}$ den gleichen Druckverlust in der Strömung hervorruft, gilt nach Bernoulli für einen Stromfaden durch die Gutschicht [119], **GI. (26)**, **Bild 30**:

$$\rho_{\rm dyn,An} = \Delta \rho_{\rm Gut} + \frac{\rho_{\rm L}}{2} v_{\rm L,rel}^2$$
(26)



Bild 30: Stromfaden in einem Gutgemisch, nach [119]

Angelehnt an GI. (6) wird der Strömungswiderstand in einem ruhenden luftdurchströmten Gutgemisch unter Beachtung der wahren Durchströmlänge h'_{Gut} sowie der Berücksichtigung der transienten Schichtausdehnung $h_{Gut} \cdot h_{0,Gut}^{-1}$ nach Hübner [72], **GI. (27)** und **GI. (28)**, mit **GI. (29)** berücksichtigt [119].

$$h'_{\rm Gut} = \frac{h_{\rm Gut}}{\sin \varphi_{\rm L,rel}}$$
(27)

$$\frac{h_{\rm Gut}}{h_{0,\rm Gut}} = \frac{(1 - \varepsilon_{0,\rm Gut})}{(1 - \varepsilon_{\rm Gut})}$$
(28)

$$\Delta p_{\text{Gut}} = \left(k_{\text{I}} \cdot \frac{\rho_{\text{L}} \cdot \nu_{\text{L}}}{d_{\text{k}}^{2}} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{\text{Gut}})^{2}}{\varepsilon_{\text{Gut}}^{3}} \cdot v_{\text{L,rel}} + k_{\text{t}} \cdot \frac{\rho_{\text{L}}}{2 \cdot d_{\text{k}}} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{\text{Gut}})}{\varepsilon_{\text{Gut}}^{3}} \cdot v_{\text{L,rel}}^{2} \right)$$

$$\cdot \frac{1}{\sin \varphi_{\text{L,rel}}} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{0,\text{Gut}})}{(1 - \varepsilon_{\text{Gut}})} \cdot h_{0,\text{Gut}}$$
(29)

Der Laminar- und Turbulenzfaktor wird nach Keuneke [19] durch die GI. (30) und GI. (31) berechnet [72].

$$k_{\rm I} = 72 \cdot \left(\frac{h'_{\rm Gut}}{h_{\rm Gut}}\right)^2 \tag{30}$$

$$k_{\rm t} = 1,5 \cdot \delta \cdot \left(\frac{h'_{\rm Gut}}{h_{\rm Gut}}\right)^3 \tag{31}$$

Zur Beschreibung des funktionalen Zusammenhanges von Knickungsfaktor $h'_{Gut} \cdot h_{Gut}^{-1}$ und relativer Porosität wird der theoretische Ansatz von Hübner [72] auf Basis einer Regressionsanalyse mit Messwerten von Damm [44] und Keuneke [19] verwendet [119], **GI. (32)**.

$$\frac{h'_{Gut}}{h_{Gut}} = -0.4083 \cdot \varepsilon_{Gut}^2 - 0.1617 \cdot \varepsilon_{Gut} + 1.57$$
(32)

Die Ermittlung der relativen Porosität baut auf einer empirischen Formulierung von Lewis [109] auf [3,72,119], **GI. (33)**.

$$\varepsilon_{\text{Gut}} = 1 - \frac{\left[\sqrt{d_{\text{K}}} - k \cdot \left(v_{\text{L,rel, y}} - v_{\text{L,rel, y}}(t_{\text{ab}})\right)\right] \cdot \left(1 - \varepsilon_{0,\text{Gut}}\right)}{\sqrt{d_{\text{K}}}}$$
(33)

Unter der Einbindung der Vorschläge zur Optimierung des Faktors der turbulenten Mischbewegung δ und des Ausdehnungsfaktors *k* von Hübner [72] wird Gl. (33) erweitert [119], Kapitel 2.2.4.

Nach der Vergrößerung der relativen Porosität in der Wurfphase verringert sich diese ab dem Überschreiten der Maximalausdehnung des Gutgemisches und dem

Auftreffen der untersten Bestandteile bis zum Erreichen der Porosität der Ruheschüttung. Der dazu von Hübner [72] gelieferte mathematische Ansatz zur Beschreibung der Kontraktionsphase, **GI. (34)** und **GI. (35)** wird ohne Berücksichtigung der Stufenprofilierung angewendet, da die Abnahme der Gutschichthöhe beim Überfliegen der Stufenkanten komplex zu berechnende Unstetigkeiten aufweist [119].

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{Ko}} = 1 - \left[(1 - \boldsymbol{\varepsilon}_{0,\text{Gut}}) \cdot \frac{h_{0,\text{Gut}}}{\left(\frac{1 - \boldsymbol{\varepsilon}_{0,\text{Gut}}}{1 - \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{max},\text{Gut}}}\right) \cdot h_{0,\text{Gut}} - |\boldsymbol{\zeta}|} \right]$$
(34)

$$\zeta = -(\eta - \eta_{auf}) \cdot \cos \alpha - (\xi - \xi_{auf}) \cdot \sin \alpha$$
(35)

Zur Ermittlung der aktuellen relativen Porosität ε_{Ko} in der Kontraktionsphase nach GI. (34) wird die Stufe des Auftreffens betrachtet und der Ansatz der vertikalen Verschiebung der Wurfparabel um den Wert der Maximalausdehnung nach Hübner [72] angewendet [119], **Bild 31**.





Um die sichere Förderung auf dem Vorbereitungsboden gewährleisten zu können, wird der Formschluss zwischen Unterlage und Gutgemisch angestrebt. Dieser beeinflusst maßgeblich das Zurückgleiten und den Abwurf des Gutgemisches an der Stufenkante. Im Gegensatz zu den Arbeiten von [3,14,72] bildet Rochell [8] die Geometrie der Stufenprofilierung am Vorbereitungsboden detailliert ab.

Die Stufenprofilierung wird durch die abschnittsweise gegebene Funktion $B(\Xi)$, **GI. (37)** eingesetzt in die Funktion $T(\Xi)$, **GI. (38)** mit der stufenzahlabhängigen Länge Ξ , **GI. (36)** beschrieben [119,121], **Bild 32**.

$$\overline{z} = i_{\rm St} \cdot I_{\rm St} \tag{36}$$

$$B(\overline{z}) = \left|\frac{\overline{z}}{J_{\text{St}}}\right| = z \quad \text{für } z \le \frac{\overline{z}}{J_{\text{St}}} < z + 1, \ z \in \mathbb{N}^*$$
(37)

$$T(\overline{z}) = \tan \alpha_{\rm St} \cdot \overline{z} - \left| \frac{\overline{z}}{I_{\rm St}} \right| \cdot h_{\rm St}$$
(38)



Bild 32: Modell der Stufenbodengeometrie, nach [119]

4.1.2 Bewegungsphasen

Neben den in Kapitel 2.2.4 angeführten Bewegungsphasen auf einem oszillierenden Vorbereitungsboden oder Sieb [3,8,14,72,97] wird aufgrund der Stufenbodendetaillierung eine weitere Bewegungsphase von Wildemann [119] definiert. Die Schubphase beschreibt den Zustand, in dem sich das zu betrachtende Partikel in der Stufenkehle befindet. Die Abhängigkeit der Strömungswiderstandskraft von der die Eigengeschwindigkeit des Partikels $\left(\frac{d\xi}{dt}, \frac{d\eta}{dt}\right)$ berücksichtigenden relativen Luftgeschwindigkeit führt zu einem System nichtlinearer, gekoppelter Differentialgleichungen [3], Gl. (20) und Gl. (21). Die Lösungen der Differentialgleichungen durch die Transformation in die Zustandsraumdarstellung mit Hilfe des Zustandsvektors, **Gl. (39)** und die zur Verkettung der einzelnen Bewegungsphasen notwendige randbedingungsabhängige Zuordnung werden auf Basis der Untersuchungen nach Beck [14] durchgeführt. [119]

$$\vec{X} = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4]^{\mathsf{T}}$$
(39)

$$X_1 = \xi \tag{40}$$

$$X_2 = \dot{X}_1 = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\xi \tag{41}$$

$$X_3 = \eta \tag{42}$$

$$X_4 = \dot{X}_3 = \frac{d}{dt}\eta \tag{43}$$

In der Ruhephase verharrt das Gutpartikel in relativer Ruhe zum Inertialsystem bis die Haftreibungsbedingung ihre Gültigkeit verliert. Die Schubphase beschreibt einen Zustand der Ruhephase, die den Formschluss des Gutpartikels an der Stufenkehle berücksichtigt. Im Gegensatz zur Ruhephase kann die Schubphase nur durch eine Bewegung des Gutpartikels in positive ξ -Richtung überwunden werden. Zwischen Stufenkehle und Gutpartikel beziehungsweise zwischen benachbarten Gutpartikeln in der Nähe der Stufenkehle entstehen beim Rückwärtsgleiten aufgrund der Stufenprofilierung hohe Reibkräfte. Um diese Gutstauung vor der Stufenkehle abzubilden, werden abhängig von der Bewegungsrichtung differenzierte Reibbeiwerte μ eingeführt. Im Detail bedeutet das die Erhöhung der Haft- und Gleitreibungsbeiwerte beim Rückwärtsgleiten. Die Beendigung der Gleitphase in positiver ξ -Richtung kann nur durch Ruhe- oder Wurfphase und in negativer ξ -Richtung durch Ruhe- oder Wurfphase in positive $\alpha < \beta$ wird nicht betrachtet, da die Parameter

einer Bewegungsrichtungsumkehr nach Rochell [8] bekannt sind. Eine Wurfphase stellt sich demnach nur nach dem Gleiten in positiver ξ -Richtung ein und lässt sich abhängig von der Richtung der Beschleunigung in zwei Zustände einteilen. Das aktive Abheben resultiert aus der Beschleunigung in positiver η -Richtung, $\frac{d^2\eta}{dt} > 0$ und das passive Abheben durch Übertreten der Stufenkante mit anschließendem freien Fall, $\frac{d^2\eta}{dt} \leq 0$. Die Zu- und Abnahme der relativen Porosität im Gutgemisch, Gl. (33) und Gl. (34) wird allein in der Wurfphase berücksichtigt. [119]

Zur Berechnung der Bewegungstrajektorie aus den einzelnen Bewegungsphasen wird der Zustandsvektor, GI. (39) um die aktuelle Simulationszeit *t*_{Sim} und eine festgelegte Kennung der nächstfolgenden Bewegungsphase erweitert [14,119], **An-hang 8.5**. Die numerische Berechnung der Bewegungsdifferentialgleichungen wird mit der Software MATLAB®, Version R2010b von MATHWORKS® durchgeführt.

4.1.3 Approximation der Luftgeschwindigkeit im Gutgemisch

Die Bestimmung des lokalen Druckverlustes, GI. (29) führt auf ein nichtlineares Gleichungssystem, welches neben GI. (26), GI. (29) und GI. (33) die geometrischen Abhängigkeiten nach Bild 29 und Bild 30 berücksichtigt [119], **Tabelle 4**. Eine geschlossene analytische Ermittlung des Druckverlustes ist aufgrund der funktionalen Abhängigkeit der relativen Größen Luftgeschwindigkeit, Strömungswinkel $\varphi_{L,rel}$ und relative Porosität nicht möglich.

Tabelle 4: Geometrische Abhängigkeiten zur Bestimmung von Δp_{Gut} ,nach [119]

Gleichung		unbekannte Variablen
$\sin \varphi_{\rm L,rel} = \frac{v_{\rm L} \cdot \sin \psi_{\rm L} - \left(v_{\rm F\eta} + \frac{d\eta}{dt}\right)}{v_{\rm L,rel}}$	(44)	$\sin arphi_{ ext{L,rel}}$; $v_{ ext{L}}$; $v_{ ext{L,rel}}$
$\cos \varphi_{\rm L,rel} = \frac{v_{\rm L} \cdot \cos \psi_{\rm L} - \left(v_{\rm F\xi} + \frac{d\xi}{dt}\right)}{v_{\rm L,rel}}$	(45)	$\cos \varphi_{\rm L,rel}; v_{\rm L}; v_{\rm L,rel}$
$ \begin{aligned} v_{\text{L,rel},y} &= v_{\text{L,rel}} \cdot (\sin \varphi_{\text{L,rel}} \cdot \cos \alpha + \cos \varphi_{\text{L,rel}} \cdot \sin \alpha) \\ &= v_{\text{L,rel}} \cdot \sin (\varphi_{\text{L,rel}} + \alpha) \end{aligned} $	(46)	$\sin arphi_{ m L,rel}; \ \cos arphi_{ m L,rel}; \ V_{ m L,rel}; \ V_{ m L,rel};$
$\sin^2 \varphi_{\rm L,rel} + \cos^2 \varphi_{\rm L,rel} = 1$	(47)	$\sin arphi_{ m L,rel}$; $\cos arphi_{ m L,rel}$

Das nichtlineare Gleichungssystem kann nur mit erheblichem numerischen Aufwand für jeden Zeitschritt erneut berechnet werden, weshalb Wildemann eine Abschätzung der relativen Luftgeschwindigkeit im Gutgemisch auf Basis der Anströmgeschwindigkeit entwickelt. [119]

Nach Wildemann [119] variiert abhängig vom Auflockerungsverhältnis, **GI. (48)** und der relativen Luftgeschwindigkeit der Druckverlust, GI. (29) im Gutgemisch.

$$\lambda = \frac{\varepsilon_{\text{Gut}}}{\varepsilon_{0,\text{Gut}}}$$
(48)

Die Auflockerung wird dabei von den pneumatischen und mechanischen Parametern beeinflusst [3], Bild 14. Anhand von vorgegebenen Luftgeschwindigkeiten im Gutgemisch, **Tabelle 5** erfolgt die Berechnung des mittleren Druckverlustes $\Delta \bar{p}_{Gut}$, Gl. (29) für eine Kurbelumdrehung des Vorbereitungsbodenantriebes auf Grundlage der angeführten Bewegungsdifferentialgleichungen, Anhang 8.5. Die vorgegebenen Luftgeschwindigkeiten im Gutgemisch bilden dabei den gesamten Bereich des Flug-, Wirbelschicht- und Schüttungsverhaltens, Bild 16 unter Zugrunde legen der von Damm [44] angeführten Lockerungspunkte für Korn von rund $v_{\rm L} = 1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und für Nichtkornbestandteile von rund $v_{\rm L} = 0,49 - 0,56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ab. [119]

Tabelle 5:VorgegebeneLuftgeschwindigkeitenimGutgemisch,nach [119]

<i>v</i> _{L,1}	<i>V</i> _{L,2}	<i>V</i> _{L,3}	<i>V</i> _{L,4}	<i>V</i> L,5	<i>v</i> _{L,6}
0 m·s⁻¹	0,3 m·s⁻¹	0,6 m·s⁻¹	0,9 m·s⁻¹	1,1 m·s⁻¹	1,3 m·s⁻¹

Mit Berücksichtigung des mittleren Druckverlustes und der vorgegebenen Luftgeschwindigkeiten in der Gutschicht wird die Anströmgeschwindigkeit der Luft berechnet, Gl. (26). Die Umkehrfunktion $S'(v_L) = p_{dyn, An}$ der quadratischen Näherungsfunktion $S(v_L) = p_{dyn, An}$ liefert abhängig von den mechanischen Parametern und dem vorgegebenen Strömungsfeld $p_{dyn, An}$ die überschlägige Luftgeschwindigkeit im Gutgemisch [119], **Bild 33**.


- $S(v_{\rm L}) = p_{\rm dyn, An}$ basierend auf GI. (26)
- d) Umkehrfunktion $S'(v_L) = p_{dyn, An}$ basierend auf GI. (26)
- **Bild 33:** Berechnete Anströmgeschwindigkeit am Vorbereitungsboden unter Berücksichtigung der Luftgeschwindigkeit im Gutgemisch, Tabelle 5 bei Verwendung eines Beispielparametersatzes, **Anhang 8.6**

4.1.4 Modellanwendung

Mit den Ergebnissen der theoretischen Untersuchungen zum Bewegungsvorgang einer Punktmasse auf einem bewegten, luftdurchströmten Sieb nach Freye [3] und Hübner [72] wird das Modell auf Plausibilität überprüft. Dabei ist zu erwähnen, dass die zum Teil auf empirische Zusammenhänge zurückzuführende Modellierung der Strömungswiderstandskraft Fehler verursacht, Kapitel 2.2.4. Luftgeschwindigkeiten im Gutgemisch von $v_L > 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ führen demnach zu Abweichungen. Allerdings werden in der Wirbelschichtphase von Korn-NKB-Gemischen keine größeren Luftgeschwindigkeiten im Gutgemisch erreicht, weshalb der empirische Modellierungsansatz seine Berechtigung findet [119]. Bezogen auf die Randbedingung fester mechanischer Parameter am Vorbereitungsboden, Kapitel 3.1 und den bekannten Zusammenhängen bei Variation der mechanischen Parameter an Vorbereitungsboden und Sieben der Mähdrescher-Reinigung [3,8,13,72] wird der Einfluss der pneumatischen Parameter auf die Einzelpartikelbewegung betrachtet. Zur Verifizierung der Theorie wird beispielhaft ein experimentell optimiertes Strömungsfeld, **Kapitel 5.3.2.1** herangezogen, **Bild 34**. Dieses veranschaulicht die Wirkung der Luftverteilung über der Länge der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden.



Bild 34: Ausschnitt eines zweidimensionalen, experimentell optimierten Strömungsprofiles (Beispiel) am pneumatisch unterstützten Bereich des Vorbereitungsbodens

Zur Beschreibung der Bewegungstrajektorien und zur überschlägigen Berechnung der mittleren Fördergeschwindigkeit, **GI. (49)** werden neben den Stoff- und Materialdaten von Freye [3] und Hübner [72] die vorgegebenen mechanischen Parameter des Vorbereitungsbodens verwendet, **Anhang 8.7**.

$$\bar{v}_{\text{Fö}} = \frac{i_{\text{St}} \cdot I_{\text{St}}}{t_{\text{Sim}}}$$
(49)

Wird das Strömungsprofil am Vorbereitungsboden nach Bild 34 zugrunde gelegt, muss sich die örtliche und zeitliche Ausdehnung der Wurfphase in Ξ - und *H*-Richtung im Vergleich zum konventionellen Vorbereitungsboden vergrößern, **Bild 35** b) rechter Bildrand. Damit einhergehend steigt die zugehörige mittlere Fördergeschwindigkeit, Bild 35 c). Die Wirkung der Schubphase wird durch den Sprung der mittleren Fördergeschwindigkeit bei konventionellem und pneumatisch unterstütztem Vorbereitungsboden deutlich, Bild 35 c).



- Bewegungsphasen im Inertialsystem a)
- b) Bewegungstrajektorie im bewegten Relativsystem
- Einfluss der Schubphase und mittlere C) Fördergeschwindigkeit
- (1)Beginn der Wurfphase
- Ende der Wurfphase und Beginn der Kontraktionsphase
- Ende der Kontraktionsphase und Beginn Schub-, Gleit- oder Ruhephase
- 2 3 4 Ende der Schub-, Gleit- oder Ruhephase und Beginn der nächsten Wurfphase
- (5) Ende der Wurfphase und Beginn der Kontraktionsphase
- Bild 35: Ausschnitt der simulierten Punktmassenbewegung auf konventionellem und pneumatisch unterstütztem Vorbereitungsboden der unteren Schicht im Gutgemisch

Die Auflockerung des Gutgemisches in der Wurfphase besitzt eine entscheidende Bedeutung für die Entmischung [3,44], Bild 36. Die pneumatische Unterstützung vergrößert die Gutschichtausdehnung in der Wurfphase. Das Übertreten der Stufenkante am Vorbereitungsboden wird durch den sprunghaften Anstieg der Gutschichthöhe deutlich, Bild 36 a). Wird die Profilierung des Vorbereitungsbodens nicht berücksichtigt, stellt sich die Gutschichtausdehnung nach Bild 36 b) ein.



- a) Bewegungsvorgang des Gutgemisches bei einer Ausgangsschichthöhe von 0,01 m
- Ausdehnungs- und Kontraktionsphase des Gutgemisches



- b) Partikeltrajektorie mit und ohne Berücksichtigung der Vorbereitungsbodenprofilierung
- **Bild 36:** Ausschnitt der simulierten Punktmassenbewegung auf konventionellem und pneumatisch unterstütztem Vorbereitungsboden

Um das Punktmassen-Modell hinsichtlich der Ergebnisgüte bewerten zu können, wird der Bewegungsvorgang von Gutpartikeln auf dem Vorbereitungsboden ohne Berücksichtigung einer pneumatischen Anregung mit der DEM-Software PASIMODO® des Institutes für technische und numerische Mechanik (ITM) der Universität Stuttgart abgebildet [122]. Unter der Voraussetzung eines vollkommen plastischen Dämpfungsverhaltens zwischen Gutpartikel und Vorbereitungsboden sowie der Anwendung der Parameter in **Anhang 8.8** stellt sich bei Auswertung der Wurfweite und -höhe ein ähnliches Bewegungsverhalten ein [123], **Bild 37**. Die Abwei-

chung resultiert aus den Parametern der Interaktionskomponenten und deren Verhalten beim Kontakt. Die Phasenverschiebung zwischen den Modellierungen mit plastischem Stoßverhalten beim zweiten Hub ist auf den Einfluss der Stufengeometrie zurückzuführen. Die Differenz in der Wurfweite entscheidet dabei über die Zahl der überflogenen Stufenkanten und ist damit für die unterschiedlichen Startbedingungen des nächsten Wurfes verantwortlich. Wird ein teilplastisches Verhalten vorausgesetzt, vergrößert sich die Wurfweite aufgrund der zusätzlichen Stoßenergie in der Stufenkehle. Des Weiteren ist ein unkontrolliertes Bewegungsverhalten des Gutpartikels aufgrund der Reflektionen an der Kontaktgeometrie zu beobachten.



Bild 37: Qualitativer Vergleich der Bewegungstrajektorien von Einzelpartikeln auf dem Vorbereitungsboden unter Verwendung verschiedener Modellierungswerkzeuge, nach [123,124]

Die Modellierung mit DEM-Werkzeugen ermöglicht neben der vergleichsweise einfachen Einbindung von Geometrie und Antriebskinematik die Berücksichtigung des Stoßverhaltens zwischen Gutpartikel und Geometrie sowie die Mehrpartikelbetrachtung [123,124]. Bei Vorliegen geeigneter Stoffparametersätze sind die Vorrausetzungen gegeben, um neben der Förderung auch die Entmischung in verschiedenen technischen Anlagen abzubilden. Auch wenn die Rechenzeit zur Darstellung des Bewegungsverhaltens von Punktmassen bei der analytischen Modellierung im Vergleich zur diskreten Beschreibung geringer ist, sollte aufgrund der einfachen Anwendung der Einsatz von DEM-Werkzeugen für zukünftige Modellierungen der Förderung und Entmischung vorrangig in Betracht gezogen werden.

4.2 Stochastisches Modell der Entmischung

4.2.1 Grundlagen

Angelehnt an die Ausführungen von Chrolikow [76] und Böttinger [15] wird der Entmischungsgrad $E_{\rm K}$ beim Fördervorgang eines Korn-NKB-Gemisches auf dem pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden anhand eines stochastischen Modellansatzes hergeleitet, **Bild 38**.



- 1) Idealisierter Vermischungszustand, Korn oben
- 2) Entmischungszustand, Korn unten

Bild 38: Modell zum Entmischungsverlauf

Im stochastischen Modellansatz wird das komplexe Interaktionsverhalten der Gutgemischbestandteile untereinander, abhängig von den jeweiligen Stoffeigenschaften, der Geometrie und den technologischen Randparametern der Energieeinleitung berücksichtigt. Die zur Beschreibung notwendigen Zusammenhänge zwischen mechanischen und pneumatischen Parametern auf die Entmischung werden über empirische Annahmen in das Modell eingepflegt [44]. Diese Vorgehensweise birgt unter Inkaufnahme eines nur qualitativen Prozessverständnisses den Vorteil einer schnellen Aussagefähigkeit hinsichtlich der Entmischung. Der horizontale Förderweg Δx auf dem Vorbereitungsboden wird mit **GI. (50)** beschrieben [76]. Auftretende Platzwechselvorgänge der Partikel im Gutgemisch werden durch den Entmischungskoeffizienten k_{Ent} berücksichtigt, welcher sich aus dem Quotienten der bedingten Wahrscheinlichkeit einer Entmischung P_{Ent} bezogen auf den horizontalen Förderweg am Vorbereitungsboden zusammensetzt, **GI. (51)**. Das Reibungs- und Stoßverhalten im Gutgemisch berücksichtigt der Entmischungskoeffizient.

$$\Delta x = \overline{v}_{\text{Fo}} \cdot t_{\text{Ent}, 12} \tag{50}$$

$$k_{\rm Ent} = \frac{P_{\rm Ent}}{\Delta x}$$
(51)

Um die Entmischung auf dem Vorbereitungsboden mit einem Poisson'schen Vorgang beschreiben zu können, muss die allgemeine Randbedingung einer örtlichen und zeitlichen Unabhängigkeit der diskreten Entmischungsereignisse vorliegen [121], Kapitel 2.2.4. Unter den Voraussetzungen, dass die Kontaktbedingungen über der Gutgemischhöhe h_{Gut} ähnlich sind, die Gutkompression vernachlässigt wird, der Übergang eines Partikels singulär ist und die Entmischung immer zu gleichartigen Ergebnissen führt, wird die allgemeine Randbedingung erfüllt [76]. Neben den allgemeinen Randbedingungen wird die Entmischung auf dem Vorbereitungsboden maßgeblich von der Gravitationskraft beeinflusst [76]. Bei Annahme von $\rho_{NKB} \ll \rho_{K}$ strebt das Korn stets in Richtung des Vorbereitungsbodens, Bild 38. Die zuordenbaren Wahrscheinlichkeiten $P_{Ent,i}$, **Bild 39** werden in der Matrix *Z* der Zustandsübergänge abgebildet [76], **GI. (52)**.





$$Z = \begin{pmatrix} P_{\text{Ent},11} & P_{\text{Ent},12} \\ P_{\text{Ent},21} & P_{\text{Ent},22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - P_{\text{Ent},12} & P_{\text{Ent},12} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - k_{\text{Ent},12} \cdot \Delta x & k_{\text{Ent},12} \cdot \Delta x \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(52)

Die Wahrscheinlichkeit einer Partikelbewegung durch die NKB-Schicht an der Stelle *x*+d*x* führt zu **GI. (53)** und **GI. (54)**, **Bild 40**.

$$P_{\text{Ent},1}(x + dx) = P_{\text{Ent},1}(x) \cdot P_{\text{Ent},11}(dx)$$
 (53)

$$P_{\text{Ent},2}(x + dx) = P_{\text{Ent},1}(x) \cdot P_{\text{Ent},12}(dx) + P_{\text{Ent},2}(x) \cdot P_{\text{Ent},22}(dx)$$
(54)



Bild 40: Wahrscheinlichkeit der Entmischung bei *x*+d*x*

Zur Herleitung des Entmischungsgrades werden die Terme von Gl. (53) und Gl. (54) unter Berücksichtigung der Annahmen von Gl. (52) jeweils in einen Differenzenquotient überführt, **Gl. (57)** und **Gl. (59)**.

=

$$P_{\text{Ent},1}(x + dx) = P_{\text{Ent},1}(x) \cdot (1 - k_{\text{Ent},12} \cdot dx)$$
(55)

$$P_{\text{Ent},1}(x) - P_{\text{Ent},1}(x) \cdot k_{\text{Ent},12} \cdot dx$$
 (56)

$$\frac{P_{\text{Ent},1}(x+dx) - P_{\text{Ent},1}(x)}{dx} = \frac{dP_{\text{Ent},1}(x)}{dx} = -P_{\text{Ent},1}(x) \cdot k_{\text{Ent},12}$$
(57)

$$P_{\text{Ent},2}(x + dx) = P_{\text{Ent},1}(x) \cdot k_{\text{Ent},12} \cdot dx + P_{\text{Ent},2}(x) \cdot 1$$
(58)

$$\frac{P_{\text{Ent},2}(x+dx) - P_{\text{Ent},2}(x)}{dx} = \frac{dP_{\text{Ent},2}(x)}{dx} = P_{\text{Ent},1}(x) \cdot k_{\text{Ent},12}$$
(59)

Die Lösungen der homogenen Differentialgleichungen erster Ordnung, Gl. (57) und Gl. (59), führen zu der Funktion des Entmischungsgrades, **Gl. (60)**, **Anhang 8.9**. Die ermittelte Euler-Funktion wird genutzt um die Entmischung auf dem Vorbereitungsboden mit und ohne pneumatische Unterstützung zu beschreiben.

$$E_{\rm K}(x) = P_{\rm Ent,2}(x) = -e^{-k_{\rm Ent,12}\cdot x} + 1$$
 (60)

(1)

(1)

2

4.2.2 Mechanische und pneumatische Parameter

Zur Bestimmung des Entmischungskoeffizienten wird der Versuch unternommen, die an standardisierten Vergleichsprüfständen gefundenen Zusammenhänge in den Entmischungskoeffizienten zu überführen und damit den Einfluss einer pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden abzuleiten [16,44], **Bild 41**. Bei Verwendung des Versuchsgutes werden die Durchgangszeiten t_{80} und t_{95} durch die Regressionsfunktion des Korndurchganges von Böttinger [15] berechnet, Gl. (13). Dabei muss die Abhängigkeit von der Durchgangslänge I_{80} in den Zeitbereich transformiert werden [16].



Bild 41: Berücksichtigung der Korn- und NKB-Stoffeigenschaften sowie der Gutgemischhöhe

Der Einsatz eines Drahtgewebes am Durchdringungszeitprüfstand von Beck [16] mit einem freien Siebanteil >95 % und die experimentelle Verifizierung erlauben die Vernachlässigung des Abscheidewiderstandes am vertikal schwingenden Siebboden. Die Durchgangszeit entspricht damit der Entmischungszeit. Um die Durchgangszeit am modellhaft arbeitenden Durchdringungszeitprüfstand im Vergleich zum kontinuierlich fördernden Grundlagenprüfstand berücksichtigen zu können, wird die Froudezahl herangezogen. Unter Beachtung einer auf eine Parametervariation zurückzuführende Änderung der Froudezahl werden die mechanischen Parameter am Durchdringungszeitprüfstand zunächst abhängig vom vorhandenen Einstellbereich und anschließend abhängig vom vertikalen Anteil der Schwingungsamplitude am Grundlagenprüfstand gewählt. Eine zusätzliche Luftströmung am Vorbereitungsboden wird über das Luftgeschwindigkeitsverhältnis nach Damm [44] einbezogen, Bild 13. Dieses berücksichtigt den spezifischen Luftvolumenstrom sowie die Anströmrichtung. Die Kombination von pneumatischer und mechanischer Energieeinleitung wird über empirische Zusammenhänge im Modell integriert. Dazu werden Datensätze von Damm [44] verwendet, der Entmischungsversuche mit Korn-NKB-Gemischen durchführt, **Bild 42**.



Bild 42: Verknüpfung von Froudezahl, Luftgeschwindigkeitsverhältnis und Durchgangszeit *t*₉₅ eines Korn-NKB-Gemisches

Der Zusammenhang zwischen Froudezahl und Durchgangszeit t_{95} wird über einen exponentiellen Regressionsansatz hergestellt, **GI. (61)**, Bild 42.

$$t_{95}(Fr) = r_1 + r_2 \cdot e^{r_3 \cdot Fr}$$
(61)

Neben der Betrachtung ohne Lufteinleitung ermöglicht die Funktion die Abbildung eines annähernd linearen Verlaufes mit einem Luftgeschwindigkeitsverhältnis nach Punkt zwei, Bild 42 bei Beachtung der Intervallgrenzen. Anzumerken ist, dass die Wechselwirkung von Schwingungsamplitude und -frequenz bei konstanter Froudezahl nicht berücksichtigt wird, da der Datensatz von Damm [44] diesbezüglich keine Aussagen zulässt. Dem Quotienten der jeweiligen Koordinatenpaare, Bild 42, unterliegen empirische Bestimmungen aus denen sich die Einflussfaktoren berechnen, **GI. (62) - GI. (65)**. 2

$$(1) \begin{array}{c} \text{ohne pneumatische} \\ \text{Unterstützung} \end{array} \qquad q_{\text{mech}} = \frac{t_{95}(A)}{t_{95}(B)} \tag{62}$$

$$q_{\rm pneum} = 1 \tag{63}$$

mit pneumatischer
$$q_{\text{mech}} = \frac{t_{95}(C)}{t_{95}(D)}$$
 (64)
Unterstützung $t_{95}(B)$

$$q_{\text{pneum}} = \frac{t_{95}(B)}{t_{95}(D)}$$
 (65)

Die Kopplung von mechanischer und pneumatischer Energieeintragung ergibt sich aus der Multiplikation der Einflussfaktoren, **GI. (66)**. Korrigiert um den Anregungsfaktor *q* folgt der Entmischungskoeffizient, **GI. (67)** aus dem überschlägigen horizontalen Förderweg auf dem Vorbereitungsboden nach GI. (50), eingesetzt in GI. (51). Die Entmischungszeit $t_{Ent,12}$ wird durch t_{95} ersetzt, welche die Wahrscheinlichkeit $P_{Ent,12}$ = 1 einer 95 %-igen Entmischung beschreibt.

$$q = q_{\rm mech} \cdot q_{\rm pneum} \tag{66}$$

$$k_{\text{Ent,12}} = \frac{P_{\text{Ent,12}} \cdot q}{\overline{v}_{\text{Fo}} \cdot t_{\text{K,95}}} = \frac{P_{\text{Ent,12}} \cdot q}{\Delta x}$$
(67)

Bei Annahme eines massestromabhängigen Korndurchganges, Bild 41 kann der Verlauf des Entmischungskoeffizienten mit einer Exponentialfunktion angenähert werden, **Bild 43**.



Bild 43: Qualitativer Zusammenhang zwischen Entmischungskoeffizient und Entmischungsgrad

4.2.3 Modellanwendung

Das stochastische Modell soll die Entmischung auf einem konventionellen und einem pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden beschreiben. Zur Verifizierung des Modells wird ein Sichtfenster im Bereich der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden eingesetzt, **Kapitel 5.2.1**. Ziel ist die Bestimmung des Entmischungsgrades aus der mittleren Aufenthaltshöhe der Kornschicht $\bar{h}_{\rm K}$. Der Entmischungsgrad am Abszissenwert $I_{\rm VB}$ ist zu Beginn des Bereiches der pneumatischen Unterstützung sowohl für den konventionellen, als auch für den pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden unbekannt. Für einen relativen Vergleich zwischen konventionellem und pneumatisch unterstütztem Vorbereitungsboden genügen gleiche Anfangsbedingungen bezüglich der Entmischung am Abszissenwert "Beginn pneumatische Unterstützung", die modellhaft angenommen werden, **Bild 44**.



Bild 44: Verifizierungsansatz zum Entmischungsgrad

Die der Versuchsstandgeometrie geschuldete geringe Länge des Auswertebereiches am Vorbereitungsboden schränkt die Darstellung des Verlaufes des Entmischungsgrades ein. Es sind zu wenig Stützstellen zur Verifizierung der Modellierung vorhanden. Um eine Aussage zur Entmischung treffen zu können, wird idealisiert ein proportionales Verhalten zwischen mittlerer Aufenthaltshöhe der Kornschicht und dem Entmischungsgrad angenommen, **GI. (68)**, **Bild 45**. Die Förderung und Entmischung kann als quasistationär behandelt werden, wenn die Voraussetzung einer stetigen Förderung im Auswertebereich erfüllt ist.

$$E_{\rm K} = u \cdot \bar{h}_{\rm K} + w \tag{68}$$

$$u = \frac{1}{\bar{h}_{\text{K,Ent}} - \bar{h}_{\text{K,Mix}}}$$
(69)

$$w = 1 - \left(\frac{1}{\bar{h}_{K,Ent} - \bar{h}_{K,Mix}}\right) \cdot \bar{h}_{K,Ent}$$
(70)



Bild 45: Zusammenhang zwischen Entmischungsgrad und mittlerer Aufenthaltshöhe der Kornschicht

Unter der Voraussetzung eines idealen Vermischungszustandes mit einer stetigen Gleichverteilung von Korn und Nichtkornbestandteilen zu Beginn der Gutaufgabe berechnet sich die mittlere Kornaufenthaltshöhe nach **GI.** (71) und dementsprechend im entmischten Zustand nach **GI.** (72). Diese Annahme ist gerechtfertigt, da die örtliche Verteilung des Gutgemisches im experimentellen Versuch aufgrund der Zufuhr über Schneckenförderer und Zellenradschleusen idealisiert einer solchen entspricht. Die zur überschlägigen Bestimmung von $\bar{h}_{K,Mix}$ und $\bar{h}_{K,Ent}$ notwendige Ausdehnung des Gutgemisches h_{NKB+K} im Ausgangszustand sowie die der entmischten Kornschicht h_{K} werden **GI.** (73) und **GI.** (74) herangezogen.

$$\bar{h}_{\mathrm{K,Mix}} = \frac{h_{\mathrm{NKB+K}}}{2} \tag{71}$$

$$\bar{h}_{\rm K,Ent} = \frac{h_{\rm K}}{2} \tag{72}$$

$$h_{\rm NKB+K} = \frac{\dot{m}_{\rm NKB+K}}{\rho_{\rm (NKB+K),Sch} \cdot \bar{\nu}_{\rm F\ddot{o}}}$$
(73)

$$h_{\rm K} = \frac{\dot{m}_{\rm K}}{\rho_{\rm K,Sch} \cdot \bar{\nu}_{\rm Fö}}$$
(74)

Das abgeleitete stochastische Modell zur Beschreibung der Entmischung auf einem Vorbereitungsboden soll einen Bezug zwischen dem messtechnisch ermittelten Kornaufenthalt bei realer Förderung und Entmischung sowie dem auf Basis von empirischen Zusammenhängen an Vergleichsprüfständen von Beck [16] berechneten Entmischungsgrad herstellen.

Aus der theoretischen Untersuchung folgt, dass die Modellierungen der Geometrie des Vorbereitungsbodens und eingeschränkt auch die Wechselwirkungen zwischen Partikel und Vorbereitungsboden mit Punktmassenansätzen möglich sind. Von weiteren Implementierungen wie des Stoßverhaltens und der exakten Partikelgeometrie ist abzusehen, da der Programmieraufwand für die zu erwartende Ergebnisgüte als zu hoch eingeschätzt wird. Die Entmischung kann unter Anwendung von empirischen Zusammenhängen auf einem Vorbereitungsboden abgebildet werden. Eine allgemeingültige Nutzung des Entmischungsmodells ist aufgrund der empirischen Zusammenhänge nur unzureichend möglich. Die Kombination der Modelle von Förderung und Entmischung wird nicht geprüft, da die Kopplung von DEM und CFD den Gesamtprozess bei voraussichtlich geringerem Programmieraufwand genauer abbildet.

5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG AM PNEUMATISCH UNTERSTÜTZTEN VORBEREITUNGSBODEN

5.1 Stoffeigenschaften

5.1.1 Versuchsgut

In allen Versuchsreihen wird Getreide der Gutart Winterweizen verwendet, **Anhang 8.10**. Bei der Entwicklung von Mähdrescher-Reinigungen wird aus Gründen der Verfügbarkeit gehäckseltes Stroh als Spreuersatzstoff eingesetzt. Die Untersuchung des verwendeten Kurzstrohhäcksels mit einem Siebanalysesystem [125] lässt eine qualitative Bewertung zu. Allerdings entsprechen die angegebenen theoretischen mittleren Partikellängen der Einzelfraktionen von neuem und gebrauchtem Kurzstrohhäcksel nicht denen der händisch Ermittelten, **Bild 46**. Die Einzelpartikelvermessung zeigt eine logarithmische Längenverteilung des Versuchsgutes, Bild 46.



- a) Auswertung mittels Kaskadensieb nach DLG-Standard [125]
- b) Einzelpartikelvermessung von 0,01 kg-Proben

Bild 46: Längenanalyse des Kurzstrohhäcksels

Die hohe Streuung zwischen den beiden Analysemethoden ist auf die unterschiedlichen Messgrößen Masse und Partikelanzahl sowie die Zuordnung der mittleren Häcksellängen bei gegebener Siebperforierung am Kaskadensieb zurückzuführen. Zur Längenanalyse von Kurzstrohgemischen ist das Kaskadensieb daher nur eingeschränkt geeignet.

5.1.2 Schwebekennlinie

Nach Persson ist die Schwebegeschwindigkeit die wichtigste Kenngröße zur Sortierung von Getreidebestandteilen [126]. Die Kennlinien zur Charakterisierung des Schwebeverhaltens werden am institutseigenen Prüfstand aufgezeichnet [14]. Das eingesetzte Versuchsgut besitzt eine hohe Homogenität auch über die große Spreizung des Versuchszeitraumes, weshalb ein Bezug zwischen den verschiedenen Versuchszeiträumen möglich ist, **Bild 47**. Weiterhin wird deutlich, dass die Längenklassen drei und vier der NKB-Klassierung nach dem DLG-Verfahren die höchsten Schwebegeschwindigkeiten aufweisen. In diesen beiden Klassen befinden sich vorzugsweise zylinderförmige Halmstücke mit geringem Aufspleißzustand. Diese NKB-Anteile beeinflussen demnach den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung maßgeblich. Zur Aufzeichnung der Schwebekennlinien für Nichtkornbestandteile werden die Gutportionen nach Längenklassen aufgegeben. Um Verhakungen zu vermeiden, werden die Gutportionen vor der Einbringung in den Prüfstand händisch vereinzelt. Die Bestimmung des Schwebegeschwindigkeitsverlaufes wird dadurch deutlich erschwert.



Bild 47: Mittlere Schwebekennlinien des Versuchsgutes

5.1.3 Fluidisierung

Das Auflockerungsverhalten der Gutgemischbestandteile wird durch den Druckverlust und die Luftgeschwindigkeit am Lockerungspunkt, im folgenden Fluidisierungsgeschwindigkeit genannt, beschrieben, Kapitel 2.1. Dazu wird der von Beck [16] etablierte Fluidisierungsprüfstand genutzt. Des Weiteren wird aus der Hysteresefläche das Setz- und Reibungsverhalten der Gutschicht abgeleitet.

Es zeigt sich, dass die Kurzstrohschicht aufgrund der Verhakung einzelner Strohteile angehoben wird und Kanäle entstehen. Die Drosselung aufgrund der Kanäle fordert bei weiter steigender Anströmgeschwindigkeit eine Erhöhung des Druckverlustes. Dieses Verhalten wird bei zusätzlicher Betrachtung der Gutmassenbelegung anschaulich, da diese auf die Fluidisierungsgeschwindigkeit keinen Einfluss haben darf, **Bild 48**. Eine vollständige Fluidisierung der Kurzstrohschicht kann nicht nachgewiesen werden und bestätigt damit die Aussagen von Dahany [61]. Der gutmassenunabhängige Lockerungspunkt von Korn bei der mittleren Fluidisierungsgeschwindigkeit von $\bar{v}_{\rm F} = 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wird durch geringe Standardabweichungen bekräftigt. Die hohe Regelmäßigkeit der Kornoberfläche bei geringen $c_{\rm W}$ -Werten führt zu einem ungehinderten Bewegungsverhalten der Körner. Bei der Untersuchung eines Gutgemisches aus Korn und Nichtkornbestandteilen überwiegt der Einfluss des Korns. Gleichwohl ist kein deutlicher Fluidisierungspunkt erkennbar.

Die Ausführung der Beladung des Prüfstandes besitzt einen entscheidenden Einfluss auf die Entmischung, weshalb der erste Durchlauf bei der NKB-Schicht zur Egalisierung der Anfangsschichtung notwendig ist, Bild 48 und **Bild 49**. Daneben entmischt sich das Korn-NKB-Gemisch im ersten Durchlauf. Neben der größeren Hysteresefläche, die auf einen hohen inneren Reibungsanteil verweist, beschreibt deren Schwankung die Höhe der Inhomogenitäten im Versuchsgut.

Bei reinem Korn werden die Einflüsse des Setzens und der inneren Reibung mit steigender Massenbelegung höher. Dieser Effekt kann bei Nichtkornbestandteilen und Korn-NKB-Gemischen nicht nachgewiesen werden, Bild 49.



Bild 48: Fluidisierungsverhalten des Versuchsgutes, NKB-Charge 2



Bild 49: Setz- und Reibungsverhalten des Versuchsgutes, NKB-Charge 2

5.1.4 Durchdringungszeit

Das Durchdringungsverhalten von Korn durch Kurzstroh unter vertikaler Schwingungsanregung wird an einem von Beck [16] konzipierten Prüfstand ermittelt. Die Beladungen lehnen sich an die spezifischen NKB- und Korndurchsätze der experimentellen Versuche an. Den Interpolierenden unterliegen jeweils fünf Wiederholungsmessungen, **Bild 50**.



Bild 50: Durchdringungsverhalten von Korn durch Kurzstroh, NKB-Charge 2

Es zeigt sich ein überproportionaler Anstieg der Durchgangszeit *t* bei Vergrößerung des spezifischen NKB-Durchsatzes [8,60]. Aufgrund der sehr hohen Durchgangszeit *t* ist davon auszugehen, dass die ermittelten Werte nur eingeschränkt für die in Gravitationsrichtung zeigende Entmischung mit überlagerten Fördervorgang gelten. Im Gegensatz zu den Aussagen von Damm [44], der lediglich die vertikal wirkenden Kräfte aus mechanischer und pneumatischer Anregung für die Entmischung verantwortlich macht, wird die Entmischung von Korn auf dem Vorbereitungsboden im Grundlagenprüfstand steigen.

5.2 Versuchsumgebung

5.2.1 Grundlagenprüfstand

Zur Erzeugung einer Gutbeschickung, die der in einer Mähdrescher-Reinigung annähernd entspricht, werden die Korn-NKB-Gemische in einer reproduzierbaren Zusammensetzung verteilt über Vorbereitungs- und Rücklaufboden der Mähdrescher-Reinigung zugeführt, **Bild 51**. Die Zusammensetzung basiert auf einer stochastischen Durchmischung. Die in der Literatur angeführten Versuchsaufbauten verwenden eine geschichtete Gutzufuhr über den Vorbereitungsboden [3,6,9,13,15,61,66]. Der Versuchsaufbau ist demnach besser an den realen Prozess im Mähdrescher angepasst und kann gleichzeitig auf verschiedene Anforderungen umgerüstet werden. Die Basis des Grundlagenprüfstandes liefert die in Kapitel 2 angeführte CLAAS-JET-STREAM-Reinigung [42], **Tabelle 6**, Bild 6.

Tabelle 6: Technische Eckdaten des Grundlagenprüfstandes

Breite der Mähdrescher-Reinigung	0,5 m
Längsschnitt entspricht der CLAAS-JET-STREAM- Reinigung [42]	M 1:1
stationäre Messphase	10 s
instationäre Phase	20 s
Einlaufphase	17 s
Auslaufphase	3 s
max. NKB-Durchsatz im Auslegungspunkt bei $s_{\rm NKB}$ = 25%	12 t·h ⁻¹
Sichtfenster <i>I</i> x <i>h</i> , Bild 51	0,22 x 0,23 m

Es ist ein erheblicher technischer Aufwand zu betreiben, damit die Entmischung auf dem Vorbereitungsboden durch Detektion der Körner im Gutstrom ermittelt werden kann. Die Entmischung wird daher mit Hilfe einer nachgeschalteten Mähdrescher-Reinigung bewertet, Bild 6. Diese Vorgehensweise ist in zahlreichenden Arbeiten beschrieben [3,5,9,13-15,61,127].



- 1 Beschickung Vorbereitungsboden
- 2 pneum. unterstützter Vorbereitungsboden 8
- 3 Sichtfenster
- 4 adaptive Rücklaufbodenverlängerung (RLB-V)
- 5 Beschickung Rücklaufboden
- 6 Gebläse Vorbereitungsboden

- 7 Gebläse erste Fallstufe
 - Gebläse Ober- u Untersieb, zweite Fallstufe
- 9 Speicher Korn stationär
- 10 Speicher Korn instationär
- 11 Speicher NKB stationär
- 12 Speicher NKB instationär



Neben der Ausblendung der instationären Prozessphasen zu Beginn und am Ende der absetzigen Gutbeschickung können variable Gutaufgabepunkte sowie verschiedene Korn-NKB-Zusammensetzungen getrennt für Vorbereitungs- und Rücklaufboden dargestellt werden. Die Einstellung der Gutdurchsätze wird von automatisierten Gutdosierungseinheiten bewerkstelligt. Zur Bestimmung der Abscheidekennlinien und der dafür notwendigen Speicherung des Kornabganges sind zehn gleichmäßig verteilte Behälter in Längsrichtung unter dem Untersieb angebracht [128,130]. Die getrennte Luftzuführung an der ersten Fallstufe, des Ober- und Untersiebes mit der zweiten Fallstufe sowie von Teilen des Vorbereitungsbodens ist erforderlich, um differierende Luftverteilungen bei konstantem Gesamtluftvolumenstrom komfortabel darzustellen sowie neuartige Siebanordnungen integrieren zu können.

Um die Größe des Bereiches der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden festlegen zu können, muss die Luftführung in Zusammenhang mit der Rücklaufbodenbeschickung beachtet werden. Des Weiteren ist eine gleichmäßige Luftgeschwindigkeitsverteilung in Quer- und Längsrichtung vorteilhaft, um eine stabile Wirbelschicht zu erzeugen. Da keine Erkenntnisse hinsichtlich der Anzahl einzuleitender Impulse zur Erreichung einer quantifizierbaren Entmischung vorliegen und bei Berücksichtigung der Durchgangszeiten von Durchdringungsversuchen die erforderliche Vorbereitungsbodenlänge übliche Bauräume übersteigt, wird die Länge der Lufteinleitung nach **Bild 52** festgelegt. Zur Unterbindung der Kornabscheidung wird ein feinperforiertes Profilblech eingesetzt. Eine vollkommen homogene Luftverteilung am Vorbereitungsboden kann unter Berücksichtigung der Stabilität der Baugruppe nicht erreicht werden.



Bereich konventioneller VB
 Bereich pneumatisch unterstützter VB
 Bild 52: Aufbau des pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden [52]

Zur Visualisierung der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden wird ein mitschwingendes Sichtfenster eingesetzt. Bauraumbedingt liegt der Anfangspunkt dieses Sichtfensters in der ersten Hälfte der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden, **Bild 53**. Die Versuchsdurchführung erfolgt im diskontinuierlichen Betrieb mit direkter Auswertung der Messdaten nach dem Versuch, **Anhang 8.11**.



Bild 53: Anordnung des Sichtfensters am pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden

5.2.2 Planung, Durchführung und Auswertung der Versuche

Der Entwicklungsstand am Markt befindlicher Mähdrescher-Reinigungen lässt die Vermutung zu, dass Steigerungen ihrer Effizienz nur mit erweitertem Gesamtprozessverständnis der verfahrenstechnischen Vorgänge möglich sind. Zur Erlangung des Gesamtprozessverständnisses sind bei der faktoriellen Versuchsdurchführung unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen sowie deren Wechselwirkungen untereinander zahlreiche Versuche notwendig [131]. Die Komplexität des Gesamtprozesses lässt eine analytische Beschreibung nur in Grenzen zu, weshalb die Einflussfaktoren $n_{\text{Gebl,HK}}$, $n_{\text{Gebl,FS}}$ und $n_{\text{Gebl,VB}}$ mit den zur Bewertung heranzuziehenden Zielgrößen Kornverlust, Verunreinigungsanteil, Durchgangslänge I₈₀ sowie Überkehrkorn- \ddot{U}_{K} und NKB-Anteil \ddot{U}_{NKB} , Anhang 8.1 über ein statistisches Prozessmodell in Beziehung gesetzt werden, Bild 54. Unterlegt durch die Ausführungen von Wember [132] und Schulz et al. [131] werden zur Analyse des pneumatisch unterstützten Vorbereitungsbodens, neben der faktoriellen Versuchsdurchführung, vorrangig Methoden der statistischen Versuchsplanung und -auswertung angewendet. Die determiniert optimierte Versuchsplanung eignet sich hierfür besonders, da vorhandenes Prozesswissen berücksichtigt wird.



Bild 54: Prozessmodell statistische Versuchsplanung, nach Wember [132]

Ferner kann der Versuchsplan bei Vorliegen gleicher Randbedingungen um Messwerte vorangegangener Untersuchungen erweitert werden. Detaillierte Erläuterungen der zugrundeliegenden Algorithmen einer determiniert optimierten Versuchsplanung finden sich bei Wember [132].

Im Folgenden wird am Beispiel des Zusammenhanges zwischen dem Einflussfaktor spezifischer NKB-Durchsatz und der Zielgröße Kornverlust die Modellerstellung erläutert. Der über Exponentialfunktionen beschreibbare Zusammenhang wird durch Logarithmieren in algebraisch einfach darstellbare Polynomfunktionen transformiert, die ihrerseits mit Taylorreihenentwicklungen hergeleitet werden können, **Bild 55**. Zur Berücksichtigung der Sättigung infolge der prognostizierten asymptotischen Annährung an das 100 % Kornverlustniveau wird ein Polynomansatz dritten Grades genutzt. Liegt ein eingeschränktes Erfahrungspotenzial zum grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgröße vor, müssen zunächst Terme höherer Ordnung sowie deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Es gilt diese im Vorversuch zu bewerten, damit im Hauptversuch eine Beschränkung auf die signifikanten Einflussfaktoren erfolgen kann und die Versuchsdurchführung effizienter wird.



a) Regressionsansätze angelehnt an [131,133,134]



- b) Wechselwirkung zwischen Gebläsedrehzahl und spezifischen NKB Durchsatz [3,44]
- **Bild 55:** Berücksichtigte Modellansätze zur Beschreibung des Kornverlustverhaltens in der Mähdrescher-Reinigung

Diese Herangehensweise wird zur Ableitung des Zusammenwirkens der drei separat einstellbaren Gebläse genutzt. Nach dem Durchführen der Versuche wird das Prozessmodell errechnet und dessen Güte anhand statistischer Methoden bestimmt [131]. Der Fokus der Versuche liegt auf dem Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung, abgebildet durch den Kornverlust. Die Qualität des gereinigten Korns bewertet durch den Verunreinigungsanteil stellt das zweite Optimierungsziel dar. Der Korn- und NKB-Anteil in der Überkehr werden gleich gewichtet. Die Priorisierung der Zielgrößen lautet 4:2:1:1 [131]. Aus den ermittelten Parametersätzen der Einflussgrößen wird das Optimum durch Bewertungskennlinien mit festen NKB-Durchsatzstufen nachgefahren, um die Modelle mit den darin getroffenen Annahmen zu bestätigen. Die Erstellung der deterministisch optimierten Versuchspläne sowie die Bewertung der abgeleiteten Modelle erfolgt mit der Software CORNERSTONE®.

5.2.3 Kalibrierung der Versuchseinrichtung

5.2.3.1 Abgleich der Luftverteilung

Zur Anpassung der Luftverteilung werden Kennfelder am Grundlagenprüfstand und an einer Referenzbaugruppe [135] mit Hilfe von statistischer Versuchsplanung und -auswertung erstellt. Zur Datenaufzeichnung werden Prandtl-Sonden verwendet, **Bild 56**. Das Ziel einer seriennahen Luftverteilung der auf einen Gebläseläufer begrenzten Baubreite am Grundlagenprüfstand wird mit den beiden Gebläsedrehzahlen $n_{\text{Gebl,FS}}$ = 480 min⁻¹ und $n_{\text{Gebl,HK}}$ = 1180 min⁻¹ erreicht.



Bild 56: Luftverteilung am Grundlagenprüfstand [135]

5.2.3.2 Zuführungs- und Dosiereinheiten

Alle Dosiereinheiten zeigen eine hohe Einstellgüte, **Bild 57**. Lediglich die Querverteilung auf Vorbereitungs- und Rücklaufboden lässt eine rechtsseitige Drift erkennen, Bild 57 c). Zur Bewertung der Querverteilung wird die Vorbereitungsbodenbreite in zwei symmetrische Bereiche aufgeteilt und jeweils die Korn- und NKB-Anteile ermittelt. Der NKB-Anteil auf Vorbereitungs- und Rücklaufboden ist an der förderelementzugewandten Seite geringer, da die einseitige Materialzufuhr durch die Schneckenförderer eine Entmischung im Wurf hervorruft. Einschnürbleche in den Zellenradschleusen verringern die Drift, können diese allerdings nicht vollständig beseitigen. Zur Minimierung der Dosierfehler werden die Sollwerteinstellungen mit einem Korrekturfaktor belegt, der auf Basis vorheriger Messabweichungen berechnet wird. Vergleiche über mehrere Messtage zeigen Schwankungen in der Ergebnisausprägung. Tagesspezifisch kann dagegen eine gute Reproduzierbarkeit erreicht werden.



- a) NKB-Dosierer [128], $\sigma_{max} = 0.09 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ $\sigma_{min} = 0.01 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
- c) NKB-Verteilung zwischen VB und RLB $\sigma_{max} = 1,90 \%$ $\sigma_{min} = 0,43 \%$

b) Korndosierer VB σ_{max} = 0,3 kg·s⁻¹·m⁻¹; σ_{min} = 0,01 kg·s⁻¹·m⁻¹ RLB σ_{max} = 0,05 kg·s⁻¹·m⁻¹; σ_{min} = 0,01 kg·s⁻¹·m⁻¹
d) Querverteilung der Zellenradschleusen bei Verwendung von Einschnürblechen VB s̄_{ges,links} = 49,8 %; σ = 4,5 % RLB s̄_{ges,links} = 40,3 %; σ = 11,5 %

Bild 57: Kalibrierung der Zuführungs- und Dosiereinheiten mit Angabe der Standardabweichungen der NKB-Durchsätze, nach [128]

Die Schwankungen innerhalb einer NKB-Charge sind auf Stoffeigenschaftsänderungen zurückzuführen, die in wechselnden Umgebungsbedingungen wie Luftfeuchte und -temperatur an den Versuchstagen begründet sein können, **Bild 58**. Luftfeuchte und -temperatur werden deshalb parallel aufgezeichnet.

Einen im Vergleich zur Dosiergenauigkeit höheren Einfluss auf die Spreizung der Messwerte besitzt die verwendete NKB-Charge, **Bild 59**. Um Aussagen treffen zu können, werden die Messreihen auf die zeitlich nächstgelegene Kurve der Referenzbaugruppe bezogen.



Bild 58: Auswirkungen der Dosierungenauigkeit auf den Arbeitserfolg in der Mähdrescher-Reinigung



Bild 59: Auswahl an Vergleichskurven

5.2.4 Einstell- und Messgrößen, Messtechnik

Die Einstellgrößen am Grundlagenprüfstand werden aus den Einsatz- und Einbaubedingungen am Beispiel der CLAAS-JET-STREAM-Reinigung [42] abgeleitet, **Anhang 8.12**. Der vorrangig zugrunde gelegte NKB-Anteil von $s_{NKB} = 25$ % ist angelehnt an die Erfahrungen der Universität Hohenheim [3,8,15] und der Technischen Universität Dresden [5,67], Anhang 8.3 sowie der Firma CLAAS [136]. Der Aufwand zur Entmischung eines Korn-Kurzstroh-Gemisches im Laborversuch ist höher als der im Feld auftretende für Gutgemische aus Korn, Spreu und Kurzstroh. Ein Grund dafür ist die Schwebegeschwindigkeit des reinen Kurzstrohhäcksels, die der von Korn ähnelt, **Kapitel 5.1.2**. Aus Sicht der Versuchstechnik bietet Kurzstrohhäcksel weitere Vorteile wie reproduzierbare Guteigenschaften, geringerer Gutverschleiß sowie leichte Zugänglichkeit. Die Messgrößen zur Bewertung des Arbeitserfolges am Grundlagenprüfstand, Bild 51 entsprechen bis auf die Durchgangszeit *t*₈₀ denen im Anhang 8.1. Sie werden abhängig vom Untersuchungsziel erweitert.

Um die Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, werden die Versuche vorrangig mit einer Rücklaufbodenverlängerung durchgeführt. Ziel ist es, beide Gutströme von Vorbereitungs- und Rücklaufboden zu berücksichtigen. Daneben muss zur Darstellung einer pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden der Rücklaufboden ohnehin verlängert werden, damit eine gerichtete Luftführung in die Mähdrescher-Reinigung gewährleistet bleibt.

Zur Bestimmung der beschickungsortabhängigen Durchgangslänge *I*₈₀ und des Kornverlustes werden für ausgewählte Versuche die jeweiligen Kornanteile in der Mähdrescher-Reinigung eingefärbt und weitere Hilfsmittel, wie die Probenteilung angewendet. Es gilt dabei den Aufwand bei der Handauszählung nach der Kornfarbe zu minimieren. Die Masse der Kornprobe beträgt rund 0,1 kg. [137,138]

5.2.5 Detektion der Entmischung

Die Bestimmung der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden erfolgt durch Bewertung der mittleren Aufenthaltshöhe der jeweiligen Gutgemischbestandteile auf dem Vorbereitungsboden [138], **Bild 60**. Genutzt werden dafür Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen am Sichtfenster des Vorbereitungsbodens, Bild 53.



- d) Transformation ins Relativsystem
 VB und Zuschneiden, NKB Identifizierung
 f) Korn der VB-Beschickung
- **Bild 60:** Vorgehensweise zur Detektion der mittleren Aufenthaltshöhe der Gutgemischbestandteile

NKB-Identifizierung

e) Korn der RLB-Beschickung

Zur automatisierten Bildanalyse nach Farb- und Formsegmentierungen wird eine am Institut für Phytomedizin, Fachgebiet Herbologie der Universität Hohenheim entwickelte Software adaptiert [138,139]. Eine detaillierte Beschreibung der angewandten Bildverarbeitung nehmen Weis et al. [139] vor.

Die Messung des Aufenthaltsortes der Gutgemischbestandteile startet mit einem Zeitversatz von 4 s parallel zum stationären Messbetrieb am Grundlagenprüfstand. Die Aufnahmephase beträgt 2 s, Bild 60 a) und b). Die Bestimmung der mittleren Aufenthaltshöhe des jeweiligen Gutgemischbestandteils ist unter Einbeziehung des gesamten Aufnahmezeitraumes erlaubt, Kapitel 4.2.3. Um Fehler wie Pixelrauschen und Farbsaumeffekte bei der automatisierten Farb- und Formsegmentierung zu minimieren, wird die maximale Bildrate der Kamera von 5000 Hz ausgenutzt [138]. Aus den empirisch ermittelten Parametersätzen der jeweiligen Farb- und Formsegmentierung werden Binärbilder der NKB-Fraktion und der Kornschicht für Vorbereitungs- und Rücklaufboden berechnet [138]. Die Anregung des Vorbereitungsbodens wird durch Transformation der Binärbilder in das mitbewegte Bezugssystem beachtet, Bild 60 c). Zur Bestimmung des Ordinatenwertes der Aufenthaltshöhe wird die Übertragungsfunktion des ebenen Viergelenk-Koppelgetriebes der Vorbereitungsbodenkinematik herangezogen, Anhang 8.13. Die horizontale Bewegung des Gutgemisches bleibt dabei unberücksichtigt. In den transformierten Binärbildern werden mit einer in MATLAB®, Version R2010b von MATHWORKS®, verfassten Routine die Ordinatenwerte aller identifizierten Flächenschwerpunkte gemittelt und die Standardabweichung bestimmt, Bild 60 d) bis e).

5.3 Ergebnisse

Die Bewertung der Parametervariationen wird weitestgehend anhand der Referenzbaugruppe mit den Einstellgrößen nach Anhang 8.12 durchgeführt. Um eine breite Aussagebasis zu erhalten, wird auf die Bewertungsgrößen Kornverlust, Verunreinigungsanteil, Überkehrkornanteil sowie Durchgangslänge *I*₈₀ nach Anhang 8.1 zurückgegriffen. Wird kein Hinweis gegeben, liegt eine faktorielle Versuchsdurchführung zugrunde.

5.3.1 Konventioneller Vorbereitungsboden

Um den Einfluss einer pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden bewerten zu können, bedarf es einer Untersuchung des konventionellen Vorbereitungsbodens. Das aus dem deterministisch optimierten Modellansatz nach **Kapitel 5.2.2** abgeleitete Optimum der Gebläsedrehzahleinstellung wird in der faktoriellen Versuchsdurchführung bestätigt. Ferner zeigt sich die hohe Güte des Modells in den beispielhaft angeführten Kombinationen der Gebläsedrehzahlen, **Bild 61**.



Bild 61: Einfluss der Luftverteilung aus Fallstufen- und Hauptkanal

Die Gebläsedrehzahlen von $n_{\text{Gebl},\text{FS}}$ = 480 min⁻¹ und $n_{\text{Gebl},\text{HK}}$ = 1180 min⁻¹ werden als Referenz festgelegt. Im Hinblick auf eine Steigerung des Arbeitserfolges der Mähdrescher-Reinigung liegt der Fokus der Bewertung auf dem hohen NKB-Durchsatzbereich. Die gewählte Grundeinstellung ist damit gerechtfertigt.

5.3.1.1 Einfluss des Beschickungsverfahrens

Um den Einfluss der Gutschichtung am Vorbereitungsboden auf die Entmischung bewerten zu können, werden Versuche mit Förderbandbeschickung durchgeführt, **Anhang 8.14**. Es wird deutlich, dass die Schüttdichte des Kurzstrohhäcksels die Entmischung stärker beeinflusst, als eine Vergrößerung der Vorbereitungsbodenlänge, **Bild 62**. Eine Erklärung für den geringen Arbeitserfolg in der Mähdrescher-Reinigung bei einer Vorbereitungsbodenlänge von 1,8 m und hoher NKB-Dichte kann das Verdichten und Setzen der NKB-Schicht sein. Eine Behinderung der Korndurchdringung ist die Folge. Bei Auswertung der Durchgangslänge *I*₈₀ wird deutlich, dass eine Erhöhung der Vorbereitungsbodenlänge über 0,78 m die Entmischung nicht steigert. Damit wird das Ergebnis von Spittel [5] bestätigt.



Bild 62: Einfluss der Gutaufgabe bei Förderbandbeschickung

Auffallend ist die erhöhte Verunreinigungsabscheidung bei geringer Länge des Vorbereitungsbodens. Eine Erklärung liefert die NKB-Abscheidung aus den verdichteten Gutschichten in Vorbereitungsbodennähe. Der Kornstrom reißt vermehrt NKB-Partikel aus den unteren Gutschichten mit durch die Siebe. Hinsichtlich der Absolutwerte der Verunreinigung kann dieser Effekt als untergeordnet betrachtet werden.

Zur Bewertung des Einflusses der Art der Gutzufuhr auf die Entmischung wird der Vergleich zwischen Zellenradschleusen- und Förderbandbeschickung mit verschiedenen Schichtungen geführt, **Bild 63**.



Bild 63: Einfluss des Beschickungsverfahrens bei konstanter Gutaufgabe am Vorbereitungsboden, $I_{VB} = 0,78$ m

Die bekannte Tendenz des positiven Einflusses einer Entmischung am Vorbereitungsboden auf den Arbeitserfolg in der Mähdrescher-Reinigung wird gezeigt. Neu ist die Erhöhung des Aufwandes zur Entmischung bei Beschickung mittels einer Zellenradschleuse. Eine Erklärung gibt der Ausgangszustand der Gutgemischbestandteile. Bei der Gutzufuhr Korn über Nichtkornbestandteilen ist die Kornschicht zusammenhängend angeordnet. Nach Timofeev [13] verdrängt diese Kornschicht die darunter angeordneten Nichtkornbestandteile bei mechanischer Anregung. Das
Ergebnis suggeriert eine verbesserte Entmischung. Diese modellhafte Schichtung liegt unter Feldbedingungen nicht vor, weshalb die Gutzufuhr mit Zellenradschleusen für Vorbereitungs- und Rücklaufboden angewendet wird.

Der Ersatz einer Rücklaufbodenbeschickung durch Sechs-Schicht-Belegung am Vorbereitungsboden nach Spittel [5], Kapitel 2.2.3 ist nur zum Teil nachweisbar, **Bild 64**. Die verbesserte Kornabscheidung bei Spittel [5] ist begründet in der Betrachtung ohne Siebeinrichtung. Fokussiert wird im Folgenden der Variantenvergleich der Gutzuführung. Der Gesamtdurchsatz von $\dot{m}_{ges} = 3,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ liegt im Bereich der Flugphase am Grundlagenprüfstand. Die Erhöhung der Durchgangslänge I_{80} und damit des Kornverlustes bei zusätzlicher Rücklaufbodenbeschickung ist verständlich. Bei Untersuchungen in der Wirbelschichtphase mit einem Gesamt-durchsatz von $\dot{m}_{ges} = 6,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ wird das Verhalten bestätigt, Anhang 8.14.



Bild 64: Einfluss des Beschickungsverfahrens auf den Restkornanteil NKB-Charge 2 im Vergleich zu Spittel [5], Legende nach **Anhang 8.15**

5.3.1.2 Einfluss der Gutaufgabeorte

Die Entmischung steigt mit zunehmender Vorbereitungsbodenlänge. Dagegen ist unabhängig vom NKB-Durchsatz ab $I_{VB} = 0,78$ m keine Steigerung nachweisbar, **Bild 65**. Offenbar kommt es bei Erhöhung der Vorbereitungsbodenlänge nicht nur zur Entmischung sondern auch zur Verdichtung und Setzung des Gutgemisches. Der Versuch wird mit differierender NKB-Charge wiederholt und bestätigt das von Rendell [56] beschriebene Verhalten, **Anhang 8.16**.



Bild 65: Einfluss der Gutaufgabe am Vorbereitungsboden ohne Rücklaufbodenbeschickung

Die Entmischung ändert sich bei Berücksichtigung von Vorbereitungs- und Rücklaufbodenbeschickung unwesentlich. Die Änderung des Gutaufgabepunktes am Vorbereitungsboden bei konstanter Gutaufgabelänge am Rücklaufboden hat einen geringfügig höheren Einfluss als eine solche am Rücklaufboden bei konstanter Gutaufgabelänge am Vorbereitungsboden [129], **Bild 66** und **Bild 67**. Eine Erklärung liefert die Gutübergabe von Rücklauf- auf Vorbereitungsboden in der Rücklaufbodenfallstufe, die eine vorherige Entmischung offenbar zunichtemacht.



Bild 66: Einfluss der genutzten Vorbereitungsbodenlänge bei konstantem Gutaufgabeort am Rücklaufboden



Bild 67: Einfluss der genutzten Rücklaufbodenlänge bei konstantem Gutaufgabeort am Vorbereitungsboden, nach [129]

5.3.1.3 Einfluss der Anteile von Korn- und Nichtkornbestandteilen

Es wird das Korn-NKB-Verhältnis des insgesamt zugeführten Gutgemisches in die Mähdrescher-Reinigung verändert. Die Verteilung der Korn- und NKB-Anteile zwischen Vorbereitungs- und Rücklaufboden wird nicht variiert, Anhang 8.12. Steigender Kornanteil auf Vorbereitungs- und Rücklaufboden verringert den Kornverlust in der Mähdrescher-Reinigung [129], **Bild 68**. Ein steigender NKB-Durchsatz reduziert den Einfluss des Korn-NKB-Verhältnisses auf den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung maßgeblich vom NKB-Durchsatz bestimmt wird. Mit steigendem Kornanteil auf dem Vorbereitungsboden sinkt der Kornverlust in der Mähdrescher-Reinigung [129], **Bild 69**. Des Weiteren erhöht sich in dieser der Trennerfolg bei konstantem NKB-Gesamtdurchsatz mit steigendem NKB-Anteil auf dem Vorbereitungsboden, **Bild 70**. Das beschriebene Verhalten wächst überproportional mit steigendem NKB-Durchsatz. Die Ergebnisse werfen die Frage auf, inwieweit die Rücklaufbodenanbindung optimiert werden muss. Das vorsortierte Gut sollte daher der Mähdrescher-Reinigung so zugeführt werden, dass keine Vermischung eintritt.



Bild 68: Einfluss des Korn-NKB-Verhältnisses bei konstanter Korn- und NKB-Verteilung zwischen Vorbereitungs- und Rücklaufboden, nach [129]



Bild 69: Einfluss eines variierenden Kornanteiles bei konstanter NKB-Verteilung zwischen Vorbereitungs- und Rücklaufboden, nach [129]



Bild 70: Einfluss eines variierenden NKB-Anteiles bei konstanter Kornverteilung zwischen Vorbereitungs- und Rücklaufboden

5.3.1.4 Einfluss des Übergabeortes am Rücklaufboden

Die Verlängerung des Rücklaufbodens in Fahrtrichtung nach vorn verbessert die Entmischung nicht. Damit stehen diese Untersuchungsergebnisse im Widerspruch zu einer in der Literatur vertretenen These [5]. Die Gutaufgabe des Gutstromes vom Rücklaufboden in die erste Fallstufe erzeugt den geringsten Kornverlust in der Mähdrescher-Reinigung, **Bild 71**. Die Annahme einer Erhöhung der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden durch Prozessraumvergrößerung bei einer größeren Verweilzeit und -strecke wird damit nicht bestätigt. Die verbesserte Entmischung auf dem Rücklaufboden bei Einsatz einer Rücklaufbodenverlängerung wirkt sich nachteilig auf die Entmischung am Vorbereitungsboden aus. Wiederholungsmessungen belegen diese Aussage, **Anhang 8.17**. Die Schichthöhe bei hohen Gutdurchsätzen ist ein Parameter, der die Entmischung beeinflusst. Kompressionseffekte behindern die Entmischung derart, dass Kornanteile vom Rücklaufboden nicht in untere Schichten auf den Vorbereitungsboden gelangen. Bei Berücksichtigung der auf sicheren Gutfluss konzipierten mechanischen Anregung am Vorbereitungsboden wird sich der beschriebene Effekt bei geringeren Fördergeschwindigkeiten verstärken.



Bild 71: Einfluss des Übergabeortes am Rücklaufboden

5.3.2 Pneumatisch unterstützter Vorbereitungsboden

5.3.2.1 Einfluss der Strömungsoptimierung

Zahlreiche Autoren untersuchen den Anströmwinkel der Sieblamellen in der Mähdrescher-Reinigung und leiten verschiedene Optimalwerte ab, **Tabelle 7**.

Tabelle 7:	Optimale Anströmwinkel ψ	4
------------	-------------------------------	---

Autor		Wert
Kanafojski	[140]	25 - 30°, abhängig von der Kanalhöhe
Jiang et al.	[62]	45°
Freye	[3]	30°, <i>v</i> _L = 1,1 m ³ ⋅s ⁻¹ ⋅m ⁻²
Mac Auley et al.	[69]	22°, v _L = 1,92 m ³ ·s ⁻¹ ·m ⁻²
Dahany	[61]	40°

Die im Hinblick auf die Gutflusssicherheit ausgelegte Kinematik des Vorbereitungsbodens mit einer Amplitude von *a* = 0,034 m lässt einen Anströmwinkel ψ_{L} = 40° nach [61] für eine hohe Entmischung zu, **Bild 72**.



1,2 Leitblech, h = 0,057 m; 3,4 Leitblech, h = 0,047 m; 5 Leitblech, h = 0,037 m Bild 72: Optimierte Leitblechanordnung unter dem Vorbereitungsboden [52]

Zur Gewährleistung einer flächigen Lufteinleitung am Vorbereitungsboden wird die Leitblechanordnung empirisch optimiert. Dazu werden die Luftgeschwindigkeit und die Strömungsrichtung 0,05 m über dem Bereich der pneumatischen Unterstützung mit Flügelradanemometern und Wollfäden ermittelt, **Bild 73**.



Bild 73: Einfluss der Leiteinrichtung auf Anströmwinkel und Strömungsgleichmäßigkeit am pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden

Angelehnt an die Vorgehensweise nach **Kapitel 5.3.1** wird ein Kennfeld zur Findung der Idealkombination der Gebläsedrehzahlen mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung und -auswertung erstellt, **Tabelle 8**.

Tabelle 8: Parametervariation

Parameter	Wert
spezifischer NKB-Solldurchsatz m _{NKB,soll}	0,3 - 1,9 kg⋅s ⁻¹ ⋅m ⁻¹
Gebläsedrehzahl Siebkasten n _{Gebl,HK}	850 - 1300 min⁻¹
Gebläsedrehzahl erste Fallstufe n _{Gebl,FS}	200 - 500 min ⁻¹
Gebläsedrehzahl Vorbereitungsboden n _{Gebl,VB}	0 - 900 min ⁻¹

Zunächst wird der Vergleich zwischen konventionellem und pneumatisch unterstütztem Vorbereitungsboden ohne Rücklaufbodenverlängerung geführt, **Bild 74**. Eine ungerichtete Luftführung am Rücklaufbodenende muss dabei in Kauf genommen werden. Die pneumatische Unterstützung wirkt auf das Gut der Vorbereitungsbodenbeschickung bei paralleler Aktivierung der Fallstufe am Rücklaufboden. Die pneumatische Unterstützung am Vorbereitungsboden verringert den Kornverlust mit steigendem NKB-Durchsatz überproportional.



Bild 74: Einfluss der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden

Bei Erhöhung der pneumatischen Energie arbeitet die Mähdrescher-Reinigung im geringen NKB-Durchsatzbereich vermehrt in der Flugphase. Eine Mehrzieloptimierung führt zu den Gebläsedrehzahlen $n_{\text{Gebl},\text{HK}} = 1180 \text{ min}^{-1}$, $n_{\text{Gebl},\text{FS}} = 480 \text{ min}^{-1}$ und $n_{\text{Gebl},\text{VB}} = 900 \text{ min}^{-1}$. Die abgeleiteten Parametersätze werden durch eine Kornverlustkennlinie mit festen NKB-Durchsatzstufen bestätigt, Kapitel 5.3.1. Ab einem spezifischen NKB-Durchsatz von rund 0,8 kg·s⁻¹·m⁻¹ werden eine stetige Verringerung von Kornverlust und Durchgangslänge l_{80} bei steigendem bezogenen Luftdurchsatz nachgewiesen, **Bild 75**.



Bild 75: Einfluss des spezifischen NKB-Durchsatzes auf die Durchgangslänge I_{80} , modellbasiert, $n_{\text{Gebl},\text{HK}} = 1180 \text{ min}^{-1}$, $n_{\text{Gebl},\text{FS}} = 480 \text{ min}^{-1}$

5.3.2.2 Einfluss des Übergabeortes am Rücklaufboden

Bei Verwendung einer Rücklaufbodenverlängerung zeigt sich eine leichte Verbesserung der Entmischung. Daraus folgt, dass die pneumatische Unterstützung am Vorbereitungsboden auch den Rücklaufbodenanteil der Gutbeschickung berücksichtigen und vorsortieren sollte. Daneben vermeidet die Rücklaufbodenverlängerung eine Rückströmung über den Rücklaufboden. Die Rückströmung kann nach eigenen Erfahrungen eine erhebliche Störung des Gutflusses hervorrufen. Die vergleichsweise hohen Werte von Kornverlust und Durchgangslänge *I*₈₀ im niedrigen und mittleren NKB-Durchsatzbereich ohne Rücklaufbodenverlängerung weisen auf einen zu hohen Eintrag an pneumatischer Energie bei alleiniger Berücksichtigung des Gutstromes der Vorbereitungsbodenbeschickung hin. Eine deutliche Erhöhung der Entmischung beim Einsatz einer Rücklaufbodenverlängerung zeigt sich nicht, **Bild 76**.



Bild 76: Einfluss des Übergabeortes am Rücklaufboden bei pneumatisch unterstütztem Vorbereitungsboden

5.3.2.3 Einfluss des Anstellwinkels des Vorbereitungsbodens

Um den Einfluss einer Prozessraumoptimierung des Bereiches der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden hinsichtlich effektiver Quersichtung in der Fallstufe zu verifizieren, wird der Anstellwinkel α_{VB} des pneumatisch unterstützten Vorbereitungsbodenbereiches variiert [130], **Bild 77**, **Bild 78** und **Bild 79**.



Bild 77: Skizze des angestellten Bereiches der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden, nach [130]



Bild 78: Einfluss des Anstellwinkels des pneumatisch unterstützten Vorbereitungsbodenbereiches bei konstantem Luftvolumendurchsatz, nach [130]



Bild 79: Einfluss des Anstellwinkels des pneumatisch unterstützten Vorbereitungsbodenbereiches bei konstanter Luftgeschwindigkeit, nach [130]

Die Vergrößerung des Anstellwinkels des pneumatisch unterstützten Bereiches am Vorbereitungsboden bedingt eine Erhöhung der Fallstufe. Um diesen Einfluss auf den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung zu berücksichtigen, wird die Luftgeschwindigkeit oder der Luftvolumendurchsatz in der Fallstufe konstant gehalten. Durch die Wechselwirkung zwischen Verweilzeit und Schichthöhe bei konstantem Gutdurchsatz wird ein Optimum für den Anstellwinkel von 5° ermittelt, Bild 78, Anhang 8.12. Aufgrund des gleichen Ergebnisses bei konstantem Luftvolumendurchsatz in der Fallstufe wird davon ausgegangen, dass die pneumatische Unterstützung den Gutfluss nicht stabilisiert, Bild 79. Den Anstellwinkel des Vorbereitungsbodens zu Gunsten einer höheren Fallstufe zu vergrößern, wird nicht empfohlen. [130]

5.3.3 Variantenvergleich

Bei einer pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden liegt die mittlere Leistungssteigerung in der Mähdrescher-Reinigung unter Berücksichtigung der Bewertungsgrenze von 0,3 % Kornverlust bei rund 10 %, **Bild 80**.



Bild 80: Vergleich von konventionellem und pneumatisch unterstütztem Vorbereitungsboden

Unter Berücksichtigung des begrenzten Bauraumes im Bereich der Übergabestelle von Rücklauf- auf Vorbereitungsboden kann die pneumatische Unterstützung am Vorbereitungsboden nur mit einer Rücklaufbodenverlängerung von 0,6 m kombiniert werden, **Bild 81**.



Bild 81: Vergleich konventioneller und pneumatisch unterstützter Vorbereitungsboden bei Berücksichtigung einer RLB-Verlängerung

5.3.4 Detektion der Kornanteile nach Beschickungsort

Das Gutgemisch des Rücklaufbodens wird auf das entmischte Gut des Vorbereitungsbodens geworfen. Darin begründet sich die bekannte These, dass die Körner vom Rücklaufboden beim nachfolgenden Sieb-Sicht-Prozess in der Mähdrescher-Reinigung schwerer abgeschieden werden, **Bild 82**. Die Auswertung der beschickungsortabhängigen Anteile des Kornverlustes auf dem konventionellen Vorbereitungsboden entsprechen bei geringen spezifischen NKB-Durchsätzen denen der aufgegebenen Korndurchsatzanteile, Anhang 8.12. Mit ansteigendem spezifischem NKB-Durchsatz verschiebt sich der Anteil der Körner vom Rücklaufboden an den Kornverlusten auf bis zu 80 %.



Bild 82: Einfluss des Beschickungsortes auf den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung

Die Beeinträchtigung der Entmischung und Abscheidung der Körner vom Rücklaufboden aufgrund des Durchdringungswiderstandes der NKB-Schicht wird bei hohen spezifischen NKB-Durchsätzen bestätigt. Die Auswertung der beschickungsortabhängigen Messgrößen Kornverlust und Durchgangslänge *I*₈₀ belegt die These, dass eine Entmischung auf dem Vorbereitungsboden bei hohen spezifischen NKB-Durchsätzen den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung erhöht. Bei geringen spezifischen NKB-Durchsätzen ist ein Überblaseffekt nachweisbar, Bild 82.

Das Kennfeld der Summenkornabscheidung des pneumatisch unterstützten Vorbereitungsbodens zeigt bei Auswertung der Kornanteile der Vorbereitungs- und Rücklaufbodenbeschickung eine geringere Durchgangslänge / im Vergleich zum konventionellen Vorbereitungsboden. Weiterhin ist die Spreizung des Kennfeldes der Durchgangslängen / am konventionellen Vorbereitungsboden in Richtung Siebende größer, was auf eine beeinträchtigte Entmischung zurückzuführen ist, **Bild 83**.



Bild 83: Kennfeld der Summenkornabscheidung am konventionellen und am pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden in Abhängigkeit vom Beschickungsort, NKB-Charge 2

Im Hinblick auf den Einfluss einer konstanten Rücklaufbodenverlängerung bestätigen sich die Ergebnisse von **Kapitel 5.3.1.4** und **Kapitel 5.3.2.2** unter Berücksichtigung der Beschickungsortabhängigkeit, **Anhang 8.18**. Es ist zu beachten, dass die Durchgangslängen /, Bild 83 nur einen Ausschnitt des Betriebsverhaltens nach Bild 16 zeigen. Die Durchgangslängen / werden sich bei höheren spezifischen NKB-Durchsätzen vergrößern.

5.3.5 Verifizierung der Förderung

Das Förderverhalten des Korn-NKB-Gemisches wird mit Hilfe der Bildvermessungssoftware IDT MOTION STUDIO 2.09.06 [141] analysiert. Zur Verfolgung der gesetzten Bildpunkte greift die Software auf Algorithmen der Kontrastanalyse und Kantenerkennung zurück [141]. Es wird die mit Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen aufgezeichnete Kornbewegung der oberen Schicht in der NKB-Schicht detektiert und mit den berechneten Bewegungstrajektorien verglichen, **Kapitel 4.1.4**. Dabei werden mehrere Kornpartikel gleichzeitig verfolgt und diese Vorgehensweise bewegungsphasenbezogen fünfmal wiederholt, **Bild 84**. Ein Anstieg des Hohlraumvolumens mit einer verbesserten Gutauflockerung in der Wurfphase ist am pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden nicht nachweisbar.





Das Auflockerungsverhältnis ist bei der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden größer als am konventionellen Vorbereitungsboden und unabhängig von der Bewegungsphase. Diese geringe Schwankung des Auflockerungsverhältnisses weist auf einen hohen Einfluss der Pneumatik hin. Des Weiteren ist die Gutauflockerung in der Wurfphase unabhängig vom spezifischen NKB-Durchsatz. Beim Vergleich der Fördergeschwindigkeiten lässt sich kein Einfluss der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden im Experiment nachweisen, **Tabelle 9**.

Parameter	Vorbereitungsboden		
	konventionell	pneumatisch unterstützt	
spezifischer NKB-Durchsatz ṁ _{NKB}	1,15	1,20	
Fördergeschwindigkeit Simulation $\overline{v}_{F\ddot{o}}$	0,35	0,43	
Fördergeschwindigkeit exp. Versuch v _{Fö}	0,48	0,47	

Die visuelle Analyse durch gemittelte Partikelverfolgungen lässt keine genaueren Aussagen zu. Zur besseren Auflösung der Bewegungstrajektorien der Partikel und der daraus berechneten mittleren Gutschichtbewegung können PIV-Auswertungen detailliertere Ergebnisse liefern.

Bei der Zuordnung der einzelnen Bewegungsphasen stellen sich Abweichungen ein, da physikalische Effekte wie das Stoßverhalten vernachlässigt und Partikelinteraktionen in der Gutschicht nicht abgebildet werden. Des Weiteren sind Gutschichten und deren Ausdehnungen mit Punktmassenansätzen schwer zu modellieren.

Sollen Gutfördervorgänge in der Mähdrescher-Reinigung bei hohem konstruktiven Detaillierungsgrad der Baugruppen untersucht werden, steigt der Aufwand zur idealisierten Modellierung mittels Punktmassenansätzen weiter an. Für zukünftige Analysen der Gutfördervorgänge in der Mähdrescher-Reinigung sollte daher bevorzugt die Methode der DEM angewendet werden, Kapitel 4.1.4.

5.3.6 Verifizierung der Entmischung

Unter Beachtung der Vorgehensweise nach Kapitel 4.2 erfolgt die Berechnung des Entmischungsgrades auf Basis empirischer Versuchsdaten und deren Kopplung mit Modellannahmen zur Einbeziehung einer pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden, Bild 85. Das Luftgeschwindigkeitsverhältnis ergibt sich aus der Luftgeschwindigkeit Lockerungspunkt Korn-NKB-Gemisches am eines von $v_{lock} = 1,096 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ nach Damm [44] und der mittleren vertikalen Anströmgeschwindigkeit unter Berücksichtigung des Leitblechwinkels von 40° bei Gutbeladung. Aus dem dynamischen Druckanteil im Anströmkanal bei gegebener Kanalund Vorbereitungsbodengeometrie wird durch Anwendung der Kontinuitätsgleichung die mittlere vertikale Anströmgeschwindigkeit mit 0.77 m s⁻¹ bestimmt. Der Anregungsfaktor, Gl. (66) basiert auf den Froudezahlen des Durchdringungszeitprüfstandes nach Beck [16] mit Fr = 1,78 und des Grundlagenprüfstandes mit Fr = 3,15, Bild 42 sowie den zugeordneten Durchgangszeiten t_{95} , Bild 50.



Bild 85: Berechneter Entmischungskoeffizient und Entmischungsgrad am Vorbereitungsboden

Da die absolute Partikelverteilung in der Gutschicht nicht bekannt ist, kann lediglich der relative Vergleich hinsichtlich des Entmischungsgrades geführt werden. Ein Vergleich der stochastischen Modellierung mit den Ergebnissen am Grundlagenprüfstand ist bei Berücksichtigung der Stoffeigenschaften des verwendeten Gutgemisches nicht möglich. Die der Verifizierung zugrunde liegenden Vertikalentmischungsversuche können den Einfluss der Förderung auf die Entmischung unzureichend widerspiegeln. Anhand der großen theoretischen Entmischungslängen auf dem Vorbereitungsboden wird die These bestätigt, dass die Horizontalbewegung der Gutschicht einen maßgeblichen Einfluss auf die Entmischung besitzt, **Tabelle 10**. Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen mit höheren Entmischungsgraden bei geringerer Vorbereitungsbodenlänge bestätigen diese Aussage, **Bild 86**.

Tabelle 10:	Variantenvergleich anhand dei	r Entmischungsparameter
-------------	-------------------------------	-------------------------

Parameter	Vorbereitungsboden		
	konventionell	pneumatisch unterstützt	
spezifischer NKB-Durchsatz m _{NKB}	1,2	1,2	
Fördergeschwindigkeit exp. Versuch $\overline{v}_{F\ddot{o}}$	0,48	0,47	
Luftgeschwindigkeitsverhältnis $\overline{v}_{An} \cdot v_{Lock}^{-1}$	0	0,7	
Entmischungszeit <i>t</i> _{K,95}	22,4	22,4	
Anregungsfaktor q	1,24	1,70	
theoretische Entmischungslänge Δx	8,60	6,19	
Entmischungswahrscheinlichkeit 95% P _{Ent}	1	1	
Entmischungskoeffizient k _{Ent}	0,116	0,161	
Entmischungsgrad <i>E</i> _K	0,045	0,061	



Bild 86: Kornaufenthalt bei pneumatischer Unterstützung am Vorbereitungsboden im Experiment, $n_{\text{Gebl,VB}} = 900 \text{ min}^{-1}$, $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

Die verbesserte Entmischung auf dem pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden wird durch die stochastische Modellierung abgebildet. Es sind jedoch Einschränkungen in Kauf zu nehmen, die das Modell im Hinblick auf die Beschreibung von Bauteilvarianten besitzt. Die phänomenologische Betrachtung im Black-Box-Versuch kann die Modellierung der detaillierten Entmischungsphysik mit diskreten Partikeln nicht ersetzen. Zur Analyse der Entmischung müssen die analytischen Bewegungsmodelle durch partikelspezifische Modellansätze erweitert werden. Die Punktmassenbetrachtung der Gutschicht eignet sich begrenzt zur Modellierung von Entmischungsvorgängen, da ansatzbedingt Platzwechselvorgänge nicht berücksichtigt werden. Im Hinblick auf die hohe Verfügbarkeit von DEM-Software und die Eignung zur Abbildung von Entmischungsvorgängen sollte von der genannten Erweiterung der Punktmassenansätze abgesehen werden.

Die Bewertung der Entmischung im Experiment wird anhand der mittleren Aufenthaltshöhe der Körner abhängig vom Aufgabeort der Beschickung durchgeführt. Diese Untersuchung findet am Sichtfenster des Vorbereitungsbodens statt, Bild 86. Die Nichtkornbestandteile werden dabei nicht beschickungsortabhängig detektiert.

Aus dem Verlauf der mittleren Aufenthaltshöhe der Körner der Vorbereitungsbodenbeschickung lässt sich bei einer pneumatischen Unterstützung eine längere Wurfphase im Vergleich zum konventionellen Vorbereitungsboden ablesen, **Bild 87**. Die mittleren Aufenthaltshöhen der Körner vom Vorbereitungsboden nahezu gleich. Damit werden die Ergebnisse von **Kapitel 5.3.4** bestätigt. Die mittlere Aufenthaltshöhe der Körner der Rücklaufbodenbeschickung ist unabhängig von einer pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden um rund 0,08 m höher im Vergleich zur mittleren Aufenthaltshöhe der Körner der Vorbereitungsbodenbeschickung. Die größere Standardabweichung der mittleren Aufenthaltshöhen der blau eingefärbten Körner vom Rücklaufboden ist auf die unzureichende Robustheit des Algorithmus der Farbsegmentierung zurückzuführen [138], Bild 87.



Bild 87: Periodische Aufenthaltshöhe über der Zeit am Vorbereitungsboden

Mit steigendem Anteil der in Schwebe gehaltenen Nichtkornbestandteile verbessert sich die Entmischung des Gutgemisches, da Platzwechselvorgänge der Körner erleichtert werden. Der Einfluss der Kornschichtausdehnung auf die Entmischung kann durch Filterung der mittleren Aufenthaltshöhe zum Zeitpunkt des oberen Totpunktes (OT), des Phasenwechsels und des unteren Totpunktes jeweils getrennt für jede Kornschicht verdeutlicht werden, **Bild 88**. Die nahe am Vorbereitungsboden liegenden Kornschichten der Vorbereitungsbodenbeschickung zeigen im unteren Totpunkt bei der größten Ausdehnung des Gutgemisches den Einfluss der Strömungswiderstandskraft bei pneumatischer Unterstützung.



Bild 88: Verlauf der periodischen Aufenthaltshöhe über der Zeit abhängig von der Phasenstellung

Im Gegensatz dazu erfahren die Kornschichten im oberen Totpunkt und im Phasenwechsel des Vorbereitungsbodens durch die mechanische Anregung bei beiden Varianten eine ähnliche Komprimierung, da kein Unterschied in der mittleren Aufenthaltshöhe nachgewiesen wird.

Eine Phasenabhängigkeit der mittleren Aufenthaltshöhe des Kornanteiles der Rücklaufbodenbeschickung ist aufgrund der hohen Streuung schwer darstellbar. Allein die Tatsache, dass sich der Kornanteil in Schichten fern der Vorbereitungsbodenoberfläche befindet und demnach die mechanische Anregung durch das Vorhandensein der NKB-Schicht gedämpft wird, liefert eine Begründung.

Die mittleren Aufenthaltshöhen über den Messzeitraum von 2 s (entspricht 9,6 Schwingspiele des Vorbereitungsbodens) zeigen den Vorteil der pneumatischen Unterstützung, **Bild 89**. Dieser wird maßgeblich vom Aufenthaltsort des Korn- und des NKB-Anteils der Rücklaufbodenbeschickung beeinflusst.



Bild 89: Gemittelte Aufenthaltshöhe über dem Vorbereitungsboden mit Standardabweichung, Zeitraum $t_{mess} = 2 s$

Der Entmischungsgrad der Körner der Vorbereitungsbodenbeschickung wird auf Basis der in Kapitel 4.2.3 getroffenen Annahme einer stetigen Gleichverteilung von Korn und NKB an der ersten Stützstelle (Mitte des Sichtfensters) berechnet. Die Gutgemischhöhe, Gl. (74) wird aus der mittleren Dichte der Korn-NKB-Zusammensetzung, Anhang 8.12 ohne Berücksichtigung der bewegungsphasenabhängigen Gutgemischausdehnung errechnet. Diese wird mit der mittleren experimentell bestimmten Gutgemischausdehnung aus Trackingversuchen verifiziert. Gleiches gilt für die mittlere Kornschicht, Gl. (73). Aufgrund der Gutzuführung über Zellradschleusen sowie der Auflockerung durch die mechanische und pneumatische Anregung ist eine zum Teil doppelt so hohe Ausdehnung des gesamten Gutgemisches im Vergleich von Experiment zu Berechnung feststellbar. Da die mittlere Abweichung bis zu 110 % beträgt, wird die gemessene Gutgemischhöhe als Ausgangspunkt festgelegt.

Zur Beschreibung des Entmischungsgrades der Körner der Rücklaufbodenbeschickung wird nicht die genannte Gleichverteilung angenommen, da die Dokumentation des Experimentes eine Entmischung auf dem Rücklaufboden zeigt, **Bild 90**. Abhängig von der Bewegungsphase wird ein mehr oder weniger ausgeprägtes Umklappen der entmischten Schichten beim Wurf vom Rücklaufboden nachgewiesen. Dieser Effekt tritt bei einer pneumatischen Unterstützung verstärkt auf.



Bild 90: Umklappeffekt Gutübergabe Rücklaufboden bei pneumatischer Unterstützung $n_{\text{Gebl,VB}} = 900 \text{ min}^{-1}$, $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

Basierend auf diesem Nachweis wird idealisiert eine über der NKB-Schicht und den Körnern der Vorbereitungsbodenbeschickung angeordnete Kornschicht der Rücklaufbodenbeschickung als Ausgangspunkt zur Ermittlung des Entmischungsgrades genutzt, **Tabelle 11**.

Parameter Vorbereitungsboden				
	konventionell pneumatisch unterstützt		atisch ützt	
Beschickungsort Korn	VB	RLB	VB	RLB
spezifischer NKB-Durchsatz <i>ṁ</i> _{NKB}	0,58	0,58	0,6	0,6
spezifischer Korndurchsatz <i>ṁ</i> K	2,3	1,0	2,4	1,1
exp. bestimmte Gutgemischhöhe gesamt h _{NKB+K}	0,155	0,148	0,195	0,187
exp. bestimmte Höhe Korn <i>h</i> _K	0,013	0,006	0,014	0,006
Kornaufenthalt ideal gemischt $\bar{h}_{K,Mix}$, Gl. (71)	0,078	0,148	0,098	0,187
Kornaufenthalt vollentmischt $\bar{h}_{K,Ent}$, Gl. (72)	0,007	0,003	0,007	0,003
exp. bestimmter Kornaufenthalt $ar{h}_{K}$		0,13	0,046	0,11
Entmischungsgrad <i>E</i> _K , GI. (68)		0,15	0,57	0,41

Tabelle 11:	Experimentell ermittelter	Entmischungsgrad
-------------	---------------------------	------------------

Je höher der Entmischungsgrad ist, umso besser ist die Entmischung. Die wichtigste Eingangsgröße für die Berechnung des Entmischungsgrades ist die mittlere Aufenthaltshöhe der Körner. Es wird deutlich, dass die Entmischung der Körner der Vorbereitungsbodenbeschickung im Experiment bei beiden Varianten ähnlich gut ist. Der Entmischungsgrad der Körner der Rücklaufbodenbeschickung ist am pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden um rund 63 % größer. Die qualitative Aussage einer besseren Entmischung bei pneumatischer Unterstützung am Vorbereitungsboden im Experiment bestätigt die theoretisch berechneten Entmischungsgrade, Tabelle 10.

Die theoretisch berechneten Entmischungsgrade sind rund eine Zehnerpotenz kleiner als die im Experiment ermittelten Entmischungsgrade. Die Führung eines quantitativen Vergleiches ist daher aus Gründen der beschriebenen Modellvereinfachung und den damit in Zusammenhang stehenden erheblichen Abweichungen des Entmischungsgrades nicht gestattet.

5.3.7 Überprüfung des Gesamtbewertungsverfahrens

Neben den Bewertungsgrößen Kornverlust und Durchgangslänge *I*₈₀ soll die Detektion der mittleren Aufenthaltshöhe der Körner vor Eintritt des Gutgemisches in die Fallstufe das Prozessverständnis in der Mähdrescher-Reinigung weiter verbessern. Die Unterscheidung der Körner nach dem Ort der Gutaufgabe ermöglicht eine Bewertung der Förderer hinsichtlich deren Auswirkung auf die Entmischung, **Bild 91**.

Mit steigendem spezifischen NKB-Durchsatz verringert sich die mittlere Aufenthaltshöhe der NKB-Schicht über dem Vorbereitungsboden bei pneumatischer Unterstützung. Das Hohlraumvolumen im Gutgemisch ist größer als das der Ruheschüttung und verbessert damit die Entmischung aufgrund des geringeren Durchdringungswiderstandes. Im Gegensatz dazu vergrößert sich die mittlere Aufenthaltshöhe der NKB-Schicht über dem Vorbereitungsboden ohne pneumatische Unterstützung. Dieses gegensätzliche Verhalten ist allein auf den Massenzuwachs zurückzuführen und bestätigt die Annahme einer Steigerung der Entmischung bei pneumatischer Unterstützung. Ferner gibt es Anlass zu einer dem spezifischen NKB-Durchsatz angepassten pneumatischen Unterstützung.

Die Verunreinigung der Körner ist bei hohem spezifischen NKB-Durchsatz am pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden geringer als beim konventionellen Vorbereitungsboden. Eine Begründung liefert die früher einsetzende Schüttphase beim konventionellen Vorbereitungsboden mit erhöhter NKB-Abscheidung.

Bei hohem spezifischen NKB-Durchsatz sollte die mittlere Aufenthaltshöhe der Körner der Rücklaufbodenbeschickung bei pneumatischer Unterstützung im Vergleich zum konventionellen Vorbereitungsboden auch größer sein. Ein Grund für die Diskrepanz sind die angeführten Fehler in der Farbsegmentierung zur Identifikation der blauen Körner in der NKB-Schicht. Diese Aussage wird bei Hinzuziehen von Kornverlust und Durchgangslänge *I*₈₀ bestätigt, da der Arbeitserfolg in der Mähdrescher-Reinigung bei pneumatischer Unterstützung im Vergleich zum konventionellen Vorbereitungsboden größer ist. Aufgrund der kompakten Gutschicht auf dem konventionellen Vorbereitungsboden und der behinderten Bewegungsmöglichkeit der Körner sind höhere Werte für Kornverlust und Durchgangslänge *I*₈₀ nachweisbar.



Bild 91: Bewertung des Arbeitserfolges einer Mähdrescher-Reinigung

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zur Verbesserung der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden wird eine pneumatische Anregung am Vorbereitungsboden umgesetzt. Ziele der Arbeit sind neben dem Aufzeigen der Grenzen konventioneller Modellierungsansätze die Erarbeitung einer Verifizierungsmöglichkeit der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden.

Die analytische Beschreibung der Förderung durch Punktmassenansätze unter Beachtung der exakten Vorbereitungsbodengeometrie fordert zeitintensive Programmierungen. Zur Erhöhung der Genauigkeit von Punktmassenansätzen müssen weitere physikalische Vorgänge wie die Abbildung des Stoßverhaltens berücksichtigt werden. Auf Basis stochastischer Ansätze werden bei der Modellierung von Entmischungsvorgängen unter Einbeziehung von experimentell bestimmten Entmischungsparametern qualitative Aussagen abgeleitet.

Mit Hilfe von hochfrequenten Bildfolgen werden Wurfbahnen am Grundlagenprüfstand ermittelt und mit theoretisch berechneten Wurfbahnen verglichen. Zur Bewertung der Förderung werden die Fördergeschwindigkeit und das Auflockerungsverhältnis herangezogen. Daneben werden die Bildfolgen genutzt, um die mittlere Aufenthaltshöhe von Korn- und NKB-Partikeln zu bestimmen. Die mittlere Aufenthaltshöhe der Körner innerhalb eines Gutgemisches dient neben der Durchgangslänge *I*₈₀ und dem Kornverlust als zusätzliche Messgröße zur Bewertung der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden.

Für die Untersuchung der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden und deren Auswirkungen auf den nachfolgenden Prozess in der Mähdrescher-Reinigung wird ein neuer Grundlagenprüfstand konzipiert und eingesetzt. Dieser verfügt über eine an den bestehenden Gutströmen im Mähdrescher ausgerichtete Beschickung über Vorbereitungs- und Rücklaufboden. Der Bezug zwischen Entmischung auf dem Vorbereitungsboden, Kornverlust und Durchgangslänge *I*₈₀ in der Mähdrescher-Reinigung wird an einem konventionellem und einem pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden hergestellt.

An einem konventionellen Vorbereitungs- und Rücklaufboden werden die Parameter Ort der Gutauf- und Gutübergabe, Korn-NKB-Anteil und Verfahren der Gutbeschickung variiert sowie deren Auswirkungen auf den Arbeitserfolg in der Mähdrescher-Reinigung ermittelt. Bei hohen spezifischen NKB-Durchsätzen kann der positive Einfluss einer möglichst großen Vorbereitungsbodenlänge auf die Entmischung nicht abgeleitet werden. Eine Vorbereitungsbodenlänge von rund 0,8 m ist demnach ausreichend.

Eine Veränderung des Gutaufgabepunktes am Rücklaufboden sowie die Verlängerung des Rücklaufbodens steigern den Arbeitserfolg in der Mähdrescher-Reinigung nicht. Der Übergabeort vom Rücklaufboden auf den Fallstufenrechen markiert das Optimum in Bezug auf den Arbeitserfolg in der Mähdrescher-Reinigung.

Mit steigendem spezifischem NKB-Durchsatz vergrößert sich der Anteil der über den Rücklaufboden zugeführten Körner überproportional zum gesamten Kornverlust in der Mähdrescher-Reinigung. Der Anteil des Korns der Rücklaufbodenbeschickung am Kornverlust verschiebt sich von $s_{RLB} = 30$ % bei geringen spezifischen NKB-Durchsätzen auf bis zu $s_{RLB} = 80$ % bei hohen spezifischen NKB-Durchsätzen. Zur weiteren Steigerung des Arbeitserfolges in der Mähdrescher-Reinigung muss die Rücklaufbodenanbindung optimiert werden.

Eine Schichtung Korn über Nichtkornbestandteilen lässt sich leichter separieren als ein verteiltes Gutgemisch. Daneben erweist sich die zusätzliche Beschickung des Rücklaufbodens analog zu der am Vorbereitungsboden als zielführend für Laboruntersuchungen an der Mähdrescher-Reinigung.

Eine pneumatische Unterstützung am letzten Drittel des Vorbereitungsbodens einer Mähdrescher-Reinigung steigert den Arbeitserfolg im Vergleich zu einer Referenzbaugruppe um rund 10 %. Es wird der Nachweis erbracht, dass bei hohen spezifischen NKB-Durchsätzen die Entmischung auf dem Vorbereitungsboden durch Erzeugen einer Wirbelschicht verbessert wird. Dazu muss der Rücklaufboden um die Länge der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden erweitert werden. Folgende Anregungen für anknüpfende Untersuchungen an der Mähdrescher-Reinigung ergeben sich aus den theoretischen und experimentellen Analysen:

Der bisherige Ansatz zur Modellierung der Förderung über Punktmassenansätze und stochastische Entmischungsmodelle sollte in Programmierumgebungen wie MATLAB® nur mit geringem Aufwand weiterverfolgt werden, da eine detaillierte Abbildung der physikalischen Vorgänge nicht möglich ist. DEM-Werkzeuge bieten Lösungsalternativen an, die genauer untersucht werden sollten. Darüber hinaus sind DEM-Werkzeuge bei der Einbindung komplexer Geometrien überlegen gegenüber den Punktmassenmodellen. Parallel zur mechanischen Anregung sollte die Pneumatik durch die Kopplung von DEM- mit CFD-Werkzeugen erwogen werden.

Die aus Durchdringungsversuchen an einem vertikal angeregten Prüfstand abgeleiteten Entmischungszeiten fordern hohe theoretische Förderlängen auf dem Vorbereitungsboden. Diese korrelieren unzureichend mit den experimentell am Grundlagenprüfstand ermittelten Förderlängen. Weitere Arbeiten sollten sich mit der Überlagerung von vertikalen und horizontalen Anregungen auf die Entmischung beschäftigen. Daneben besteht das Erfordernis einer parallelen mechanischen und pneumatischen Anregung am Durchdringungsprüfstand, um die Entmischungszeiten zu präzisieren.

Zur Ermittlung des transienten Entmischungsgrades am Grundlagenprüfstand sind weitere Sichtfenster im Bereich des Vorbereitungsbodens notwendig. Die Vorgehensweise zur Identifizierung der mittleren Aufenthaltshöhe von Körnern in Gutgemischen durch Farb- und Formsegmentierung ist hinreichend genau beschrieben. Eine optimierte Färbung der zu detektierenden Bestandteile kann die Streuung der Ergebnisse verringern und die Aussagefähigkeit verbessern. Gerade bei der Verifizierung von DEM kann dieses Verfahren hilfreich sein.

Die pneumatische Aktivierung der Rücklaufbodenfallstufe kann den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung steigern, da die Körner der Rücklaufbodenbeschickung eher abgeschieden werden. Bereits vereinzelte NKB-Partikel der Rücklaufbodenbeschickung bleiben länger in der Schwebe und verringern dabei den Durchdringungswiderstand des Gutgemisches.

7 LITERATUR

- [1] Böttinger, S.: Stand und Tendenzen der Mähdruschentwicklung. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik, 12./13.09.2013 Hohenheim, In: VDI-MEG, Mähdrescher, Heft 40. 2013, S. 7-12.
- [2] Bernhardt, G. und H. Müller: Das Axialdreschwerk und seine Bedeutung im Mähdrescher aus gegenwärtiger Sicht und seine Bedeutung der nächsten Jahre. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik, 17./18.03.1997 Düsseldorf, In: VDI-MEG, Mähdrescher, Heft 28. 1997, S. 1-11.
- [3] Freye, T.: Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des M\u00e4hdreschers. Dissertation Universit\u00e4t Hohenheim, 1980, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 47.
- [4] Kutzbach, H.D. und R. Scherer: Das Reibverhalten von Körnerfrüchten-Eine Schrifttumsübersicht. Grundlagen der Landtechnik 27 (1977), Heft 6, S. 213-219.
- [5] Spittel, A.: Optimierungsuntersuchung eines Rücklaufbodens der Reinigungseinrichtung dargestellt am Beispiel des Mähdreschers und der Fruchtart Weizen. Dissertation A Technische Universität Dresden, 1980 (unveröffentlicht).
- [6] Baumgarten, J.: Theoretisch experimentelle Untersuchungen zur Optimierung des Trennprozesses in einer Kaskadenreinigungseinrichtung des Mähdreschers. Dissertation A Technische Universität Dresden, 1988 (unveröffentlicht).
- [7] Zehme, C.: Beitrag zur Klärung der Kornabscheidung aus einem homogenen Korn-Stroh-Spreu-Gemisch mit Hilfe eines luftdurchströmten, in seiner Ebene schwingenden horizontalen Plansiebes, dargestellt am Beispiel der Gutart Weizen. Dissertation A Technische Universität Dresden, 1972 (unveröffentlicht).
- [8] Rochell, P.: Untersuchungen über den Fördervorgang auf dem Schwingförderer unter besonderer Berücksichtigung der Reinigungsanlage im Mähdrescher. Dissertation Universität Stuttgart, 1975, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 4.
- [9] Spittel, A.: Einfluß der Schichtung des Reinigungsgemisches auf die Leistungsfähigkeit der Reinigungsrichtung eines Mähdreschers. Agrartechnik 28 (1978) Heft 9, S. 399-401.
- [10] Timofeev, A., P. Wacker und S. Böttinger: Untersuchungen am Vorbereitungsboden von Mähdreschern. Landtechnik 62 (2007) Heft 2, S. 90-91.

[11]	Timofeev, A. und S. Böttinger: Die Entmischung und Förderung auf dem Vorbereitungsboden des Mähdreschers. VDI-MEG Kolloquium Landtech- nik, 22./23.03.2007 Dresden, In: VDI-MEG, Mähdrescher, Heft 39. 2007, S. 37-44.
[12]	Böttinger, S. und A. Timofeev: Fördervorgang und Vorentmischung auf dem Vorbereitungsboden von Mähdreschern. Landtechnik 65 (2010), Heft 5, S. 380-382.
[13]	• Timofeev, A.: Förderung und Entmischung auf dem Vorbereitungsboden des Mähdreschers. Dissertation Universität Hohenheim, 2013, For- schungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 527.
[14]	 Beck, F.: Simulation der Trennprozesse im M\u00e4hdrescher. Dissertation Universit\u00e4t Stuttgart, 1999, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 14: Landtech- nik/Lebensmitteltechnik 92.
[15]	 Böttinger, S.: Die Abscheidefunktion von Hordenschüttler und Reini- gungsanlage in Mähdreschern. Dissertation Universität Stuttgart, 1993, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebensmitteltechnik 66.
[16]	• Beck, T.: Meßverfahren zur Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher. Dissertation Universi- tät Stuttgart, 1991, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebens- mitteltechnik 54.
[17]	Wacker, P.: Einflüsse auf die Dreschleistung von Mähdreschern. Landtech- nik 40 (1985), Heft 6, S. 273-277.
[18]	 Beránek, J., D. Sokol und G. Winterstein: Wirbelschichttechnik. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1964.
[19]	 Keuneke, K.: Fluidisierung und Fließbettförderung von Schüttgütern klei- ner Teilchengröße. Düsseldorf: VDI-Verlag 1965.
[20]	Ergun, S. und A.A. Orning: Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. Industrial Engineering Chemistry 41 (1949), Heft 6, S. 1179-1184.
[21]	Schneider, R.U.: Eine harte Nuss. Neue Züricher Zeitung, Folio / Die Welt von Morgen / Das Experiment (2010), http://folio.nzz.ch/2010/septem- ber/eine-harte-nuss, 26.10.2014.
[22]	Möbius, M.E., B.E. Lauderdale, S.R. Nagel und H.M. Jaeger: Brazil-nut Effect, Size separation of granular particles. Nature 414 (2001), Heft 6861, S. 270.

- [23] Schlichting, H.J., V. Nordmeier und D. Jungmann: Die Großen landen immer oben. Entmischen durch Mischen. Physik in der Schule 34 (1996), Heft 5, S. 190-193.
- [24] Rosato, A., K.J. Strandburg, F. Prinz und R.H. Swendsen: Why the Brazil Nuts Are on Top: Size Segregation of Particulate Matter by Shaking. Physical Review Letters 58 (1987), Heft 10, S. 1038-1040.
- [25] Shinbrot, T. und F.J. Muzzio: Reverse Buoyancy in Shaken Granular Beds. Physical Review Letters 81 (1998), Heft 20, S. 4365-4368.
- [26] Hong, D.C., P.V. Quinn und S. Luding: Reverse Brazil Nut Problem: Competition between Percolation and Condensation. Physical Review Letters 86 (2001), Heft 15, S. 3423-3426.
- [27] Werther, J.: Wirbelschichttechnik Grundlagen. GVC VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Vortragstagung "Technik der Gas/Feststoffströmung Sichten, Abscheiden, Fördern, Wirbelschichten", 07./08.12.1981 Düsseldorf, S. 189-209.
- [28] Molerus, O. und H. Hoffmann: Darstellung von Windsichterkurven durch ein stochastisches Modell. Chemie-Ingenieur-Technik 41 (1969), Heft 5-6, S. 340-344.
- [29] Molerus, O.: Druckverlustgleichungen für die Durchströmung von Kugelschüttungen im laminaren und im Übergangsbereich. Chemie-Ingenieur-Technik 49 (1977), Heft 8, S. 675.
- [30] Meinel, A. und H. Schubert: Über einige Zusammenhänge zwischen der Einzelkorndynamik und der stochastischen Siebtheorie bei der Klassierung auf Stößelschwingsiebmaschinen. Aufbereitungs-Technik 13 (1972), Heft 7, S. 408-416.
- [31] Meinel, A. und H. Schubert: Zu den Grundlagen der Feinsiebung. Aufbereitungs-Technik 12 (1971), Heft 3, S. 128-133.
- [32 Schubert, H.: Zu den Grundlagen des Sortierens: Trennmerkmale Wirkprinzipien - Makroprozesse - Mikroprozesse. Aufbereitungs-Technik 45 (2004), Heft 3, S. 7-32.
- [33] Meinel, A.: Klassierung auf Stößelschwingsiebmaschinen. Dissertation Bergakademie Freiberg, 1974, Freiberger Forschungshefte A 537 Verfahrenstechnik, Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- [34] Hogue, C. und D.E. Newland: Computer Simulation of Ballistic Separation. Bulk 2000: Bulk Materials Handling - Towards 2000, Proc. Inst. of mech. Engineers International Conference, 29./31.10.1991 London, Vol. 1991-12, S. 217-224.

[35]	Taguchi, Y.H.: New Origin of a Convective Motion: Elastically Induced Convection in Granular Materials. Physical Review Letters 69 (1992), Heft 9, S. 1367-1370.
[36]	Herrmann, H.J.: Molecular Dynamics Simulations of Granular Materials. In- ternational Journal of Modern Physics (1993), Vol. 4, Heft 2, S. 309-316.
[37]	Tsuji, Y., T. Kawaguchi und T. Tanaka: Discrete particle simulation of two- dimensional fluidized bed. Powder Technology 77 (1993), S. 79-87.
[38]	Cundall, P.A. und O.D.L. Strack: A discrete model for granular assemblies. Géotechnique 29 (1979), Heft 1, S. 47-65.
[39]	Molerus, O.: Über die Axialvermischung bei Transportprozessen in kontinu- ierlich betriebenen Apparaturen. Chemie-Ingenieur-Technik 38 (1966), Heft 2, S. 137-145.
[40]	Ferrara, G. und U. Preti: A Contribution to Screening Kinetics. Proceedings XIth Intern. Mining Processing Congress, 20./26. 04.1975 Cagliari, Heft 7, S. 183-217.
[41]	Yang, W.C. und D.L. Keairns: Rate of Particle Separation in a Gas Fluid- ized Bed. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals 21 (1982), Heft 3, S. 228-235.
[42]	-,-: Produktdatenblatt CLAAS LEXION Mähdrescher, HRC / 103011010616 KK ME 0716 / 00 0248 804 4, CLAAS Vertriebsgesellschaft mbH, claas.de
[43]	Williams, J.C. und G. Shields: Die Körnertrennung im Vibrationsbett. Pow- der Technology (1967), Heft 1, S. 134-142.
[44]	• Damm, J.: Der Sortiervorgang beim luftdurchströmten Schwingsieb. Dis- sertation Technische Hochschule Stuttgart, 1972, Fortschritt-Berichte des VDI, Reihe 3, Nr. 37.
[45]	Wacker, P. und H.D. Kutzbach: Dresch- und Trenneinrichtungen moderner Mähdrescher. Landtechnik 47 (1992), Heft 6, S. 268-271.
[46]	-,-: Patentschrift, CNH America LLC: Harvester with cleaning system hav- ing early clean grain evacuation. US 2014/0200057 A1, 17.07.2014.
[47]	-,-: Produktdatenblatt NEW HOLLAND CX5000&CX6000 ELEVATION, TRIPLE-CLEAN [™] CASCADED CLEANING SYSTEM, www.newhol- land.com/uk, http://nhagproductsupport.btsadv.com/newholland/image- box/index.asp?Code=CX_14_G_014_TripleClean
[48]	-,-: Patentschrift, DEERE & COMPANY, Moline, IL 61265-8098 (US): Rei- nigungseinrichtung für einen Mähdrescher. EP 1 731 022 A1, 13.12.2006.

- [49] -,-: Patentschrift, DEERE & CO, Moline, III., US: Reinigungsvorrichtung für Mähdrescher. DE 35 03 950 A1, 07.08.1986.
- [50] -,-: Patentschrift, DEERE & COMPANY, 1 John Deere Road, Moline Illinois 61265 (US): Reinigungsvorrichtung für Mähdrescher. EP 0 121 094 A1, 10.10.1984.
- [51] -,-: Patentschrift, VEB Kombinat Fortschritt Landmaschinen Neustadt/Sachs., 8355 Neustadt, Schillerstraße 1: Pneumatische Abscheideeinrichtung an Mähdreschern. DD 133 511 A1, 03.11.1977.
- [52] -,-: Patentschrift, CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, 33428, Harsewinkel,DE: Wirbelschichtvorbereitungsboden. DE 10 2011 001 864 A1, 11.10.2012.
- [53] -,-: Patentschrift, AGCO: belüfteter RLB. WO 2014/082890 A1, 05.06.2014.
- [54] Wessel, J.: Grundlagen des Sieben und Sichtens, Das Siebklassieren, Teil II. Aufbereitungs-Technik 8 (1967), Heft 4, S. 167-180.
- [55] Bachmann, D.: Beitrag zur Klärung des Schwingmahlvorganges. Dissertation Technische Hochschule Karlsruhe, 1939.
- [56] Kluge, W.: Neuzeitliche Siebmaschinen für die Aufbereitung. Erdöl und Kohle 4 (1951), Heft 11, S. 705-711.
- [57] Wessel, J.: Siebmaschinen. Aufbereitungs-Technik 4 (1963), Heft 11, S. 449-461.
- [58] Reumschüssel, G.: Untersuchungen am Obersieb der ebenen Mähdrescher-Reinigungseinrichtung. Deutsche Agrartechnik 22 (1972), Heft 6, S. 264-267.
- [59] Reumschüssel, G. und C. Zehme: Untersuchungen am Obersieb einer ebenen Reinigungseinrichtung. Deutsche Agrartechnik 23 (1973), Heft 6, S. 280-283.
- [60] Baader, W., H. Sonnenberg und H. Peters: Die Entmischung eines Korngut-Fasergut-Haufwerkes auf einer vertikal schwingenden, horizontalen Unterlage. Grundlagen der Landtechnik 19 (1969), Heft 5, S. 149-157.
- [61] Dahany, A.: Verbesserung der Leistungsfähigkeit luftdurchströmter Schwingsiebe bei der Korn-Spreu-Trennung im Mähdrescher durch Optimierung der Luftverteilung. Dissertation Universität Hohenheim, 1994, Forschungsbericht des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 245.
- [62] Jiang, S., W.K. Bilanski und J.H.A. Lee: Parameters for an Aerodynamic Combine Precleaner for Separation of Grain from Straw and Chaff using a Multi-Air-Jet Sieve. Transactions of the ASAE 27 (1984), Heft 1, S. 36-44.
| [63] | • Rendell, M.: Separation of Particles by Sieving and Screening. Disserta-
tion University College London, 1966. |
|------|---|
| [64] | Lee, J.H.A. und R.G. Winfield: Influence of Oscillating Frequency on Separation of Wheat on a Sieve in an Airstream. Transactions of the ASAE 12 (1969), Heft 6, S. 886-888. |
| [65] | Segler, G. und T. Freye: Vibro-pneumatische Trennung von Stroh, Korn
und Spreu im Mähdrescher. Grundlagen der Landtechnik 27 (1977), Heft 4,
S. 101-108. |
| [66] | • Zhao, Y.: Einfluss mechanischer und pneumatischer Parameter auf die
Leistungsfähigkeit von Reinigungsanlagen im Mähdrescher. Dissertation
Universität Hohenheim, 2002, Forschungsbericht des Arbeitskreises For-
schung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) Nr. 387. |
| [67] | • Manig, G.: Beitrag zur Untersuchung der Auflösung eines aus einem Wei-
zenkorn-Stroh-Spreu-Gemisch bestehenden Strahles im Wirkungsbereich
einer horizontalen Luftströmung. Dissertation A Technische Universität
Dresden, 1974 (unveröffentlicht). |
| [68] | • Haase, A.: Beitrag zur Leistungssteigerung der Mähdrescherreinigungs-
einrichtung durch Intensivierung der Vorsortierung mittels Scheibentrom-
mel. Dissertation A Technische Universität Dresden, 1977 (unveröffen-
tlicht). |
| [69] | MacAulay, J.T. und J.H.A. Lee: Grain Separation on Oscillating Combine
Sieves as Affected by Material Entrance Conditions. Transactions of the
ASAE 12 (1969), Heft 5, S. 648-654. |
| [70] | Persson, S.: Die Arbeitsweise einer Mähdrescherreinigung. Landtechni-
sche Forschung 7 (1957), Heft 5, S. 133-137. |
| [71] | Baader, W.: Durchsatz- und Verlustmessung im Rahmen der Gebrauchs-
wertprüfung von Mähdreschern. Landbauforschung Völkenrode 16 (1966),
Heft 2, S. 93-98. |
| [72] | Hübner, R.: Entwicklung eines Modells zur Auslegung einer rotierenden
Reinigungseinrichtung im Mähdrescher. Dissertation Universität Dresden,
1999. |
| [73] | Nepomnjatschtschij, E.A.: Sostojanie i problemy statistichiskoj teorii separ-
irovanija (Stand und Probleme der statistischen Theorie der Abscheidung).
Traktory i selchozmashiny 42 (1971), Heft 6, S. 29-31. |
| [74] | Brauer, H. und H. Thiele: Bewegung von Partikelschwärmen. Chemie-Inge-
nieur-Technik 45 (1973), Heft 13, S. 909-912. |
| | |

- [75] Grozubinskij, V.A.: Opredelenie zakonomernosti pereraspredelenija i rassloenija dvuchkomponentnych smesej (Bestimmung der Gesetzmäßigkeiten bei der Umverteilung und Schichtung eines Zweikomponentengemisches). Traktory i selchozmachiny 43 (1973), Heft 8, S. 19-21.
- [76] Chrolikow, W.: Der technologische Vorgang bei der Trennung von Gemischen auf Schwingsieben. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 23 (1974), Heft 2, S. 431-433.
- [77] Shorenko, N.I.: Analiz vnutrisloevnykh prozessov pri separazii sypuchego materiala na reshetakh (Analyse der innerschichtigen Prozesse bei der Abschiedung des Schüttgutes mit Sieb). Zap. Leningradskogo sel'skochoz. Inst. leningrad 249 (1974), S. 59-62.
- [78] Huynh, V.M. und T.E. Powell: Cleaning Shoe Performance Prediction. ASAE Paper No. 78-1565 (1978), S. 1-33.
- [79] Gregory, J.M. und C.B. Fedler: Mathematical relationship predicting grain separation in combines. Transactions of the ASAE 30 (1987), Heft 6, S. 1600-1604.
- [80] Kim, S.H.: Combine Simulation Model to Evaluate Design and Operation Alternatives. Ph.D. Thesis, Texas Tech University, 1990 (unveröffentlicht).
- [81] Goncharov, E.S.: Modelirovanie processa separirovania zernovych materialov ploskimi i vibrocentrobeznymi resetami (Modellierung der Korn-abscheidung mit flachen virbozentrifugalen Sieben). Traktory i selchozmachiny 46 (1976), Heft 6, S. 23-25.
- [82] Cundall, P.A.: A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. Proceedings Symposium Int. Soc. Rock Mech., Nancy Metz Vol. 1 (1971), H. p. Paper II-8
- [83] Ferzinger, J.H. und M. Peric: Numerische Strömungsmechanik. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [84] Schäfer, M.: Numerik im Maschinenbau. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.
- [85] Götz, S.: Gekoppelte CFD/DEM-Simulation blasenbildender Wirbelschichten. Dissertation Universität Dortmund, 2006, Berichte aus der Strömungstechnik D 290.
- [86] Pförtner, J. und S. Böttinger: Validierungsstrategie für DEM-Modelle von Mähdrescherbaugruppen. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik, 12./13.09.2013 Hohenheim, In: VDI-MEG, Mähdrescher, Heft 40. 2013, S. 27-32.

[87]	Kutzbach, H.D., M. Kustermann und R. Scherer: Elastizitätsmodul, Kom-
	pressibilität und weitere mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten.
	Grundlagen der Landtechnik 35 (1985), Heft 6, S. 189-195.

- [88] Mümken, P.: Grundlagenuntersuchungen zum Tangentialdreschwerk, Erstellung eines Bruchmodells für Getreide. Dissertation Universität Stuttgart, 2015, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 551.
- [89] Ruoff, T., P. Mümken, J. Baumgarten und S. Böttinger: Grundlagen zu Betriebsfestigkeitsuntersuchungen von Getreide - Methodik zur Bruchanalyse für die Simulation. VDI-MEG Tagung Landtechnik, 19./20.11.2014 Berlin. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2226. Düsseldorf: VDI-Verlag 2014, S. 347-355.
- [90] Mümken, P., S. Böttinger und J. Baumgarten: Basic study of broken grain -Why, how and when breaks the grain? VDI-MEG Tagung Landtechnik, 08./09.11.2013 Hannover. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2193. Düsseldorf: VDI-Verlag 2013, S. 351-357.
- [91] Mümken, P., J. Baumgarten und S. Böttinger: Stoßzahlermittlung von Weizen bei hohen Aufprallgeschwindigkeiten - Methode zur Ermittlung von Kalibrierdaten für die DEM-Simulation. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik, 12./13.09.2013 Hohenheim, In: VDI-MEG, Mähdrescher, Heft 40. 2013, S. 19-26.
- [92] Pförtner, J., S. Böttinger, M. Schwarz und R. Bölling: Methode zur Modellierung und Verifizierung strömungstechnischer Eigenschaften von Kornund Strohpartikeln. VDI-MEG Tagung Landtechnik, 19./20.11.2014 Berlin. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2226. Düsseldorf: VDI-Verlag 2014, S. 325-331.
- [93] Beckmann, K., J. Pförtner und S. Böttinger: Untersuchung mechanischer Siebanregungen auf die Korn-Stroh-Trennung in der Mähdrescherreinigung. VDI-MEG Tagung Landtechnik, 22./23.11.2016 Köln. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2273. Düsseldorf: VDI-Verlag 2016, S. 429-436.
- [94] Pförtner, J., S. Böttinger, M. Schwarz und L. Schürmann: Simulation des Entmischungsprozesses von Korn und Kurzstroh. VDI-MEG Tagung Landtechnik, 22./23.11.2016 Köln. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2273. Düsseldorf: VDI-Verlag 2016, S. 361-367.
- [95] Schreiber, M. und H.D. Kutzbach: Modellierung des Abscheideverhaltensvon Mähdrescher-Reinigungsanlagen. Landtechnik 58 (2003), Heft 4, S. 236-237.
- [96] Korn, C., R. Hübner, T. Herlitzius, F. Rüdiger und J. Fröhlich: Numerische Untersuchung der Luftströmung in der Reinigungseinrichtung des Mähdreschers. VDI-MEG Tagung Landtechnik, 06./07.11.2012 Karlsruhe. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2173. Düsseldorf: VDI-Verlag 2012, S. 379-386.

[97]	Baader, W.: Das Verhalten eines Schüttgutes auf schwingenden Siebros- ten. Grundlagen der Landtechnik 11 (1961), Heft 13, S. 13-20.
[98]	Kim, S.H. und J.M. Gregory: Grain Separation Equations for Combine Chaffers and Sieves. ASAE paper Nr. 91-1603 (1991).
[99]	 Campbell, D.W.: Modelling the Combine Harvester. Dissertation Univer- sity of Saskatchewan, 1980 (unveröffentlicht).
[100]	Jung, R.: Die Gleitbewegung auf der schwingenden Ebene. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens (1952), Heft 1, S. 13-24.
[101]	 Böttcher, S.: Beitrag zur Klärung der Gutbewegung auf Schwingrinnen. Dissertation Technische Hochschule Hannover, 1957.
[102]	Seidel, H.: Die Wurfbewegung von Schüttgut auf der schwingenden Ebene, Ein Beitrag zur rechnerischen Behandlung von Schwingförderern, Teil I. Bergbautechnik 8 (1958), Heft 8, S. 434-437.
[103]	Seidel, H.: Die Wurfbewegung von Schüttgut auf der schwingenden Ebene, Teil II. Bergbautechnik 8 (1958), Heft 9, S. 482-487.
[104]	 Wehmeier, KH.: Untersuchungen zum Fördervorgang auf Schwingrin- nen. Dissertation Technische Hochschule Hannover, 1961.
[105]	Schmidt, W. und I.A.S.Z. Peschl: Zur Theorie der Bewegung von Schüttgü- tern auf Schwingrinnen. Fördern und Heben 15 (1965), Heft 8, S. 606-613.
[106]	Peschl, A.S.Z.: Einfluss der Guteigenschaften auf die Fördergeschwindig- keit bei der Förderung auf Schwingrinnen. Fördern und Heben 20 (1970), Heft 8, S. 442-447.
[107]	Matthies, H.J.: Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftli- cher Erntegüter. VDI-Forschungsheft 454 (1956).
[108]	• von Zabeltitz, C.: Über die Trennung von Körpern verschiedener Dichte in einem Fließbett. Dissertation Technische Hochschule Braunschweig, 1966, Fortschritt-Berichte des VDI, Reihe 14, Nr. 3.
[109]	Lewis, K.K., E.R. Gilliland und W.C. Bauer: Characteristics of fluidized par- ticles. Industrial & Engineering Chemistry 41 (1949), Heft 6, S. 1104-1117.
[110]	 Krengel, U.: Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik, 8. erweiterte Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH 2005.
[111]	Pippel, W., K. Runge, H. Geyer und Lehmann,W., Müller,F.: Über die Ver- mischung des Feststoffes in Gas-Feststoff-Wirbelschichten. Chemische Technik 20 (1963), Heft 12, S. 750-755.

[112]	• Reuter, S.: Partikeldynamik in Wirbelschichtsystemen - Geschwindigkeit
	und Zirkulation granularer Medien untersucht mit bildgebender und ge-
	schwindigkeitskodierter NMR. Dissertation Rheinisch-Westfälische Techni-
	sche Hochschule Aachen, 2011.

- [113] Börner, M.: Feststoffdynamik und Partikelverweilzeiten am Beispiel der Top-Spray Wirbelschichtgranulation. Dissertation Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2013.
- [114] Haiges, W.: Konzeption einer Messmethode zur Analyse der Gutschichtung über einem Wirbelschichtvorbereitungsboden. Masterarbeit M 183 H, 2012, Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, unveröffentlicht.
- [115] Locher, F.: Eignungsuntersuchung eines Terahertzstrahlers zur Detektion von Gutbestandteilen auf dem Mähdreschervorbereitungsboden. Bachelorarbeit B 693 S, 2014, Universität Stuttgart, Lehrgebiet Landmaschinen, unveröffentlicht.
- [116] Beckmann, K., S. Böttinger, M. Schwarz, R. Bölling, L. Frerichs und M. Eberhorn: Experimentelle Bestimmung des Entmischungsverlaufes unter Anwendung von Computertomografieverfahren. Landtechnik 71 (2016), Heft 4, S. 1-8.
- [117] Beckmann, K., S. Böttinger, M. Schwarz und R. Bölling: New method to detect grain in grain-MOG-mixtures. VDI-MEG Tagung Landtechnik, 06./07.11.2014 Hannover. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2251. Düsseldorf: VDI-Verlag 2015, S. 175-181.
- [118] Origin 9.1 Handbuch, Northampton: OriginLab Corporation, 2013.
- [119] Wilde von Wildemann, P.: Analytische Beschreibung der Gutbewegungsund Entmischungsvorgänge auf dem Mähdreschervorbereitungsboden mit Strömungsbeaufschlagung. Diplomarbeit D 293 S, 2011, Universität Stuttgart, Lehrgebiet Landmaschinen, unveröffentlicht.
- [120] Wengert, I.: Theoretische Betrachtung eines elliptischen Antriebes für Mähdrescher-Reinigungsanlagen. Studienarbeit HS 643 S, 2009, Universität Stuttgart, Lehrgebiet Landmaschinen, unveröffentlicht.
- [121] Bronstein, I.N., K.A. Semendjajew, G. Musiol and H. Mühlig (Hrsg.): Taschenbuch der Mathematik. Frankfurt am Main: Verlag Harry Deutsch,
 4. überarbeitete und erweiterte Auflage 1999.
- [122] -,-: Partikelsimulationspaket PASIMODO. Institut für Technische und Numerische Mechanik Universität Stuttgart, http://www.itm.uni-stuttgart.de/research/pasimodo/pasimodo_de.php, 19.09.2011.
- [123] Haselmaier, J.: Modellierung des Tranport- und Setzvorganges auf einer mit Korn und Kurzstroh beladenen Schwingrinne unter Verwendung der

DEM-Software PASIMODO. Studienarbeit HS 672 S, 2011, Universität Stuttgart, Lehrgebiet Landmaschinen, unveröffentlicht.

- [124] Schwarz, M., J. Pförtner, P. Mümken und S. Böttinger: Gutbewegungsvorgänge auf dem Vorbereitungsboden, Erfahrungen mit der DEM-Software PASIMODO. VDI-MEG Tagung Landtechnik, 06./07.11.2012 Karlsruhe. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2173. Düsseldorf: VDI-Verlag 2012, S. 363-369.
- [125] -,-: DLG-Prüfrahmen Mähdrescher 7f. Groß-Umstadt, 2008 unveröffentlicht.
- [126] Persson, S.: Eigenschaften des Reinigungsgutes in Mähdreschern. Landtechnische Forschung 5 (1957), Heft 2, S. 41-45.
- [127] Haase, A., P. Schmieder und D. Becker: Experimentelle Untersuchungen über den Einfluss einiger Kenngrößen auf das Trennergebnis bei der Strömungsklassierung. Forschungspraktikum 1972, Technische Universität Dresden, Sektion 16/I, unveröffentlicht.
- [128] Schwarz, M., W. Schulz, J. Baumgarten und S. Böttinger: Gutzuführungskonzept für Laboruntersuchungen von Mähdrescherreinigungsanlagen. Landtechnik 65 (2010), Heft 5, S. 376-379.
- [129] Schwarz, M., S. Böttinger und W. Schulz: New test rig for cleaning units and first results of parameter variation on a series preparation pan. VDI-MEG Tagung Landtechnik, 11./12.11.2011 Hannover. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2124. Düsseldorf: VDI-Verlag 2011, S. 55-62.
- [130] Schwarz, M., W. Schulz, J. Baumgarten und S. Böttinger: Untersuchungen am luftdurchstömten Vorbereitungsboden. Landtechnik 66 (2011), Heft 5, S. 358-362.
- [131] Schulz, W., T. Wember und M. Schwarz: Efficient and Compact Development of a Combine Harvester Cleaning System - Performance under Longitudinal Inclination Conditions. VDI-MEG Tagung Landtechnik, 11./12.11.2011 Hannover. In: VDI-MEG, VDI-Berichte Nr. 2124. Düsseldorf: VDI-Verlag 2011, S. 129-136.
- [132] Wember, T.: Technische Statistik und statistische Versuchsplanung. Datteln: Eigenverlag 2012.
- [133] Rademacher, T.: Bewertung von Verfahren zur Bestimmung der Druschkapazität von Mähdreschern. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik, 17./18.03.1997 Düsseldorf, In: VDI-MEG, Mähdrescher, Heft 28. 1997, S. 69-82.
- [134] Schneider, H.: Abscheideverläufe von Mehrtrommeldreschwerken. VDI-MEG Kolloquium, VDI-MEG Kolloquium Landtechnik, 17./18.03.2005 Hohenheim, In: VDI-MEG, Mähdrescher, Heft 38. 2005, S. 145-152.

- [135] -,-: Strömungskennfeld der CLAAS-JET-STREAM-Reinigung, 2008 unveröffentlicht.
- [136] Baumgarten, J.: Umgebungsbedingungen bei Feldversuchen zur Reinigung - Störgrößen oder erwünschte Variation? VDI-MEG Kolloquium Landtechnik, 22./23.03.2007 Dresden, In: VDI-MEG, Mähdrescher, Heft 39. 2007, S. 45-52.
- [137] Kunz, G.: Auswirkungen der Korneinleitung mittels Überkehrschnecke auf den Druschprozess. Studienarbeit HS 677 S, 2012, Universität Stuttgart, Lehrgebiet Landmaschinen, unveröffentlicht.
- [138] Weis, M., M. Schwarz und S. Böttinger: Analyse der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden. 06./07.05.2013 Berlin. In: Bornimer Agrartechnische Berichte, Potsdam Bornim, 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft, Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB), Volume 81. 2013, S. 170-179.
- [139] Weis, M., T. Rumpf, R. Gerhards und L. Plümer: Comparison of different classification algorithms for weed detection from images based on shape parameters. 27./28.08.2009 Potsdam-Bornim. In: M. Zude, Image analysis for agricultural products and processes, Bornimer Agrartechnische Berichte, 15. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB), Volume 69. 2009, S. 53-64.
- [140] Kanafojski, C.: Hinweise für Reinigungsgebläse, Grundlagen erntetechnischer Baugruppen, Berlin: Verlag Technik 1973, S. 270-271.
- [141] -,-: IDT-Motion-Studio, Bedienungsanleitung Version 2.12.15, http://media.idtvision.com/docs/manuals/mstudio_man_de.pdf, 18.12.2016.

8 ANHANG

8.1 Bewertungsgrößen in Mähdrescher-Reinigung

Tabelle 12: Bewertungsgrößen

Bewertungsgröße	Definition
Anteil Kornverlust	Körner (lose und in Ährenteilen), die durch mechani- sche und pneumatische Förderung aus der Mähdre- scher-Reinigung herausgetragen werden
	$V_{\rm K} = \frac{m_{\rm K,Verlust}}{m_{\rm K,SK} + m_{\rm K,Verlust}} \cdot 100\% $ (75)
Grad der Verunreinigung	NKB-Anteil im Siebkasten
	$VU = \frac{m_{\rm NKB,SK}}{m_{\rm NKB,OS-Abgang} + m_{\rm NKB,SK}} \cdot 100\% $ (76)
Kornanteil Überkehr	Körner (lose und in Ährenteilen), die sich in der Über- kehr befinden
	$\ddot{U}_{\rm K} = \frac{m_{\rm K, \ddot{U}berkehr}}{m_{\rm K, SK} + m_{\rm K, Verlust}} \cdot 100\% $ (77)
NKB-Anteil Überkehr	NKB die sich in der Überkehr befinden
	$\ddot{U}_{\rm NKB} = \frac{m_{\rm NKB, \ddot{U}berkehr}}{m_{\rm NKB, OS-Abgang} + m_{\rm NKB, SK}} \cdot 100\% $ (78)
Durchgangslänge I ₈₀	x-Koordinate auf dem Obersieb in Förderrichtung, bei welcher 80 % der Kornmasse $m_{\rm K}$ abgeschieden wird
	$I_{80} = I_{R_{K,20\%}} = -\int_{R_{K,100}}^{R_{K,20}} \frac{dI(R_{K})}{dR_{K}} \cdot dR_{K} $ (79)
Durchgangszeit <i>t</i> ₈₀	Zeitspanne, in welcher 80 % der Kornmasse $m_{\rm K}$ abgeschieden wird
	$t_{80} = -\int_{R_{\rm K,100}}^{R_{\rm K,20}} \frac{{\rm d}t(R_{\rm K})}{{\rm d}R_{\rm K}} \cdot {\rm d}R_{\rm K} $ (80)

8.2 Luftgeschwindigkeitsverteilung über der Sieblänge



Bild 92: Luftgeschwindigkeitsverteilung über der Sieblänge bei unbelastetem und belastetem Sieb, spezifischer Körnerdurchsatz \dot{m}_{K} = 2,5 kg·s⁻¹·m⁻¹, nach Freye [3]

8.3 Übersicht untersuchter Parameter am Vorbereitungsboden

Parameter		Rochell [8]	Spittel [5]	Timofeev [13]		
Kinematik	Kinematik					
Oszillationsfreque	enz	2,4 - 10,6°	4,33 - 5,5°	3 - 5,75°		
Amplitude		0,01/0,025/0,04 m	0,0235 - 0,0425 m	0,02 - 0,055 m		
Schwingungs-	vorn	20/40°	-9 - 26°	-9 - 42°		
richtungswinkel	hinten	-	-	-9 - 42°		
Anstellwinkel		-10/0/10°	-13 - 8°	-9 - 15°		
Differenzwinkel		-	-2 - 22°	-		
Hangneigung		-10/0/10°	-12 - 9°	-12 - 12°		
Übertragungswin	kel	-	90°	60 - 120°		
Schwingenlänge	vorn	1,5 m	0,34 m	0,6 - 1,2 m		
Schwingenlänge	hinten	1,5 m	0,34 m	0,6 - 1,2 m		
Geometrie						
Förderlänge		0 - 1,2 m	0,7 - 1,9 m	0,5 - 1,5 m		
Breite		0,27 m	0,6 m	0,5 m		
Stufung, Länge x	Höhe	0,01x0,005;0,01 m 0,04x0,005;0,01 m	0,04x0,01 m ohne	0,03x0,01 m		
Material						
Reibbeiwert		0,35/0,5/0,75	-	-		
Einbauten						
Drahtrechen		ohne	mit/ohne	mit/ohne		
Zusammensetzung Versuchsgut						
Korn/Spreu/Kurzstroh		75/17,5/7,5 % 80/20/ %	80/15/5 % 70 - 90/ / %	70/30 %		
Beschickung						
Vorbereitungsboden		Х	Х	х		
Rücklaufboden		-	-	-		
Durchsatz						
Gesamt		bis 6,67 kg·s ⁻¹ ·m ⁻¹	2,5 -	4,29 -		
			6 kg⋅s⁻¹⋅m⁻¹	7,86 kg⋅s⁻¹⋅m⁻¹		

Tabelle 13: Übersicht untersuchter Parameter am Vorbereitungsboden

8.4 Einfluss des Vorbereitungsbodens auf den Arbeitserfolg in der MD-RE



- a) exp. ermittelter Kornrest *R* am perforierten Vorbereitungsboden bei unterschiedlichen spez. Korndurchsätzen
- b) Simulationsergebnisse zum Einfluss der Vorbereitungsbodenlänge auf die Kornverluste
- **Bild 93:** Untersuchung zum Einfluss des Vorbereitungsbodens auf die Effizienz der Mähdrescher-Reinigung, nach Beck [14]

8.5 Bewegungsphasen



Bild 94: Programmablaufplan Zuordnung der Bewegungsphasen, nach [14,119]

	Randbedingur	ıgen	Phasenbedinç	bunt	Phasengleichungen	Endbedingur	рı
Ruhephase	$\dot{X}_2 = X_2 = 0$ $\dot{X}_4 = X_4 = 0$ $H = T(\Xi)$	(96) (97) (98)	$\mu_{h_{-}} \cdot F_{N} \ge F_{R_{-}}$ und $\mu_{h_{+}} \cdot F_{N} \ge F_{R_{+}}$	(91) (92)	negative ξ -Richtung: $F_{R_c} = F_T \cos \gamma + F_G \sin \alpha - F_{S,\xi,r}$ (85) positive ξ -Richtung: $F_{R_+} = -F_T \cos \gamma - F_G \sin \alpha + F_{S,\xi,r}$ (86) $F_{L_1} = F_T \sin \gamma + F_C \cos \alpha - F_{C,L}$ (87)	$\mu_{h_{-}} \cdot F_{N} < F_{R_{-}}$ oder $\mu_{h_{+}} \cdot F_{N} < F_{R_{+}}$	(81) (82)
Schubphase	$\vec{z} = i_{st} \cdot I_{st}$ mit $i_{st} \in \mathbb{N}^*$ Gl. (96), Gl. (97), Gl. (98)	(66)	Gl. (92)		Gl. (87) Gl. (87)	Gl. (82)	
Gleitphase	negatives Gleiten: $\chi_2 < 0$ positives Gleiten: $\chi_3 = konstant$ Gl. (97), Gl. (98)	(100) (101) (102)	negatives Gleiten: $\mu_{g} \cdot F_N = F_{R}$ positives Gleiten: $\mu_{g_+} \cdot F_N = F_{R_+}$	(93) (94)	$ \begin{vmatrix} \dot{X}_{1} \\ \dot{X}_{2} \\ \dot{X}_{3} \\ \dot{X}_{3} \\ \dot{X}_{4} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{m_{k}} (\mu_{g} \cdot (F_{T,n} + F_{G,n} - F_{S,n}) - F_{T,\xi} - F_{G,\xi} + F_{S,\xi}) \\ \dot{X}_{3} \\ \dot{X}_{4} \\ \dot{X}_{4} \\ \dot{X}_{2} \\ \dot{X}_{2} \\ \dot{X}_{3} \\ \dot{X}_{3} \\ \dot{X}_{3} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{m_{k}} (\mu_{g} \cdot (-F_{T,n} - F_{G,n} + F_{S,n}) - F_{T,\xi} - F_{G,\xi} + F_{S,\xi}) \\ \dot{X}_{4} \\ \dot{X}_{4} \\ \dot{X}_{4} \\ \dot{X}_{4} \end{vmatrix} $ (88)	$X_2 = 0$ positives Gleiten: $F_N < 0$ Gl. (99)	(83) (84)
Wurfphase	<i>X</i> ₄ ≠ 0	(103)	$F_{\rm N} = F_{\rm R} = 0$	(95)	$\begin{bmatrix} \dot{X}_{4} \\ \dot{X}_{2} \\ \dot{X}_{2} \\ \dot{X}_{3} \\ \dot{X}_{3} \\ \dot{X}_{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{M}_{K} \\ m_{K} \\ \dot{K} \\ \dot{X}_{4} \\ \dot{X}_{5,\eta} + F_{S,\eta} \end{bmatrix} $ (90)	Gl. (98)	

8.6 Parameter zur Approximation der Luftgeschwindigkeit

Tabelle 15: Ebener Vorbereitungsboden

Betriebspara	ameter	
f _{VB}	4,8 s ⁻¹	
a _{VB}	0,034 m	
$\beta_{\sf VB}$	29,5°	
α _{VB}	5°	
$\psi_{ m L}$	45°	
Stoffeigensc	haften	
d _K	0,0027 m [3]	charakteristischer Durchmesser mit Berück- sichtigung der tatsächlichen Oberfläche über Formfaktor
ε 0	0,44 [3]	
$ ho_{K}$	1380 kg·m⁻³ [3]	
k	0,038 [72]	
$\mu_{\rm h+o}$	0,5 [3]	Korn/Stahl
$\mu_{\rm h-}$	0,5 [119]	Korn/Stahl
$\mu_{\rm g^+}$	0,4 [3]	Korn/Stahl
$\mu_{g_{-}}$	0,4 [119]	Korn/Stahl
VL	15,1·10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹ [3]	
$ ho_{L}$	1,2 kg·m⁻³ [3]	

8.7 Parameter der Punktmassenmodellierung

Betriebspara	meter	
f _{VB}	4,8 s ⁻¹	
a _{VB}	0,034 m	
h _{St}	0,013 m	
I _{St}	0,031 m	
i _{St}	20	entspricht 0,63 m Länge der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden
β_{VB}	29,5°	
α _{VB}	5°	
ψ_{L}	45°	
VL	nach Bild 34	
	·	
Stoffeigensc	haften	
d _K	0,0027 m [3]	charakteristischer Durchmesser mit Berück- sichtigung der tatsächlichen Oberfläche über Formfaktor
ε ₀	0,44 [3]	
h _{Gut}	0,01 m	Höhe des Gutgemisches
ρ _K	1380 kg·m⁻³ [3]	
k	0,038 [72]	
$\mu_{\rm h^+}$	0,5 [3]	Korn/Stahl
μ _{h-}	0,5 [119]	Korn/Stahl
μ_{g^+}	0,4 [3]	Korn/Stahl
μ_{g}	0,4 [119]	Korn/Stahl
VL	15,1.10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹ [3]	
$ ho_{ m L}$	1,2 kg·m⁻³ [3]	

Tabelle 16: Gestufter, pneumatisch unterstützter Vorbereitungsboden

8.8 Parameter der DEM-Simulation

Tabelle 17: Vergleich mit DEM-Simulation

Betriebs	parameter	
f _{VB}	4,8 s ⁻¹	
a _{VB}	0,034 m	
h _{St}	0,013 m	
I _{St}	0,031 m	
i _{St}	20	entspricht 0,63 m Länge der pneumatischen Unterstützung am Vorbereitungsboden
β_{VB}	29,5°	
α_{VB}	5°	
Stoffeige	enschaften	
d _K	0,004 m	charakteristischer Durchmesser mit Berück- sichtigung der tatsächlichen Oberfläche über Formfaktor
ε 0	0,44 [3]	
h _{Gut}	0,01 m	Höhe des Gutgemisches
$ ho_{K}$	1380 kg·m⁻³ [3]	
k	0,038 [72]	
$\mu_{\rm h+}$	0,5 [3]	Korn/Stahl
$\mu_{\rm h-}$	0,5 [119]	Korn/Stahl
μ_{g^+}	0,4 [3]	Korn/Stahl
μ_{g}	0,4 [119]	Korn/Stahl
CI	10 ⁶ kg⋅m ⁻¹	Federsteifigkeit der Interaktionskomponente [123]
d	0,8 N·s·m ⁻¹	Dämpfungskonstante der Interaktionskompo- nente, plastisches Verhalten [123]
	0,3 N·s·m ⁻¹	Dämpfungskonstante der Interaktionskompo- nente, teilplastisches Verhalten [123]

8.9 Berechnung des Entmischungsgrades

Die homogenen Differentialgleichungen erster Ordnung, Gl. (57) und Gl. (59), werden nach der Integrationsmethode Trennung der Variablen gelöst [121].

(1)
$$\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{Ent},1}(x)}{P_{\mathrm{Ent},1}(x)} = -k_{\mathrm{Ent},12} \cdot \mathrm{d}x \tag{104}$$

$$\int \frac{dP_{\text{Ent},1}(x)}{P_{\text{Ent},1}(x)} = \int -k_{\text{Ent},12} \cdot dx$$
 (105)

$$\ln |P_{\text{Ent},1}(x)| + C_1 = -k_{\text{Ent},12} \cdot x + C_2, \text{ mit } C_3 = C_2 - C_1$$
 (106)

$$P_{\text{Ent},1}(\mathbf{x}) = e^{-k_{\text{Ent},12} \cdot \mathbf{x} + C_3}$$
(107)

Zur Ermittlung der Integrationskonstanten unterliegt die Lösungsfindung einer Anfangswertbetrachtung, **GI. (108)**. Alle Körner befinden sich zu Beginn der Entmischung auf der NKB-Schicht.

$$x = 0 \rightarrow P_{\text{Ent},1}(x) = 1$$
 (108)

$$1 = e^{-k_{\text{Ent},12} \cdot (0) + C_3} \to C_3 = 0$$
(109)

$$P_{\text{Ent},1}(x) = e^{-k_{\text{Ent},12} \cdot x}$$
(110)

Durch das Einsetzen der **GI. (110)** in die Differentialgleichung GI. (59) und unter Berücksichtigung der Randbedingung, dass sich zu Beginn kein Korn auf dem Vorbereitungsboden befindet, **GI. (114)** ergibt sich der Entmischungsgrad nach GI. (97).

$$\frac{dP_{\text{Ent},2}(x)}{dx} = e^{-k_{\text{Ent},12} \cdot x} \cdot k_{\text{Ent},12}$$
(111)

$$\int \frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{Ent,2}}(x)}{\mathrm{d}x} = \int \mathrm{e}^{-k_{\mathrm{Ent,12}} \cdot x} \cdot k_{\mathrm{Ent,12}}$$
(112)

$$P_{\text{Ent},2}(\mathbf{x}) = -e^{-k_{\text{Ent},12}\cdot\mathbf{x}} + C_4$$
(113)

$$x = 0 \rightarrow P_{\text{Ent},2}(x) = 0$$
 (114)

$$0 = -e^{-k_{\text{Ent},12} \cdot (0)} + C_4 \rightarrow C_4 = 1$$
 (115)

$$E_{\rm K}(x) = P_{\rm Ent,2}(x) = -e^{-k_{\rm Ent,12}\cdot x} + 1$$
 (97)

8.10 Stoffeigenschaften des Versuchsgutes

 Tabelle 18:
 Anbaujahr und Sorte des Versuchsgutes, NKB-Charge nach Lieferdatum

Korn Winterweizen, Raum Hohenheim	NKB Winterweizen, Raum Harsewinkel
2010, Dekan	2010, Hermann; 02/2010 Charge 1, 09/2010 Charge 2, 10/2010 Charge 3
2011, Toras	2011, Hermann; 09/2011 Charge 4

 Tabelle 19:
 Physikalische Stoffeigenschaften des Versuchsgutes

Korngeometrie $\overline{l} \pm \sigma_{\rm l} \times \overline{b} \pm \sigma_{\rm b} \times \overline{h} \pm \sigma_{\rm h}$	$(6,2 \pm 0,3 \times 3,6 \pm 0,2 \times 3,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ m
Tausendkorngewicht $\bar{m}_{\rm K} \pm \sigma_{\rm K}$	0,043 ± 0,006 kg
Kornfeuchte $\overline{U}_{K} \pm \sigma_{U}$	11,5 ± 0,1 %
Schüttdichte Korn $\overline{\rho}_{K,Sch} \pm \sigma_{\rho}$	769 ± 1,4 kg·m ⁻³
	·
NKB-Feuchte $\overline{U}_{NKB} \pm \sigma_{U}$	10,9 ± 0,9 %
Schüttdichte NKB $\overline{\rho}_{NKB,Sch} \pm \sigma_{\rho}$	32,8 ± 0,9 kg⋅m ⁻³
Schüttdichte Korn-NKB-Gemisch	160,3 ± 13,2 kg·m⁻³
$\overline{\rho}_{(NKB+K),Sch} \pm \sigma_{\rho}; s_{NKB} = 25\%$	

8.11 Beschreibung der Versuchsdurchführung

Zunächst wird der stationäre Kornabgang jeder Fraktion gewogen (1) und in einer Nachreinigung (2) von den Verunreinigungen getrennt. Der ermittelte Reinkornanteil wird gewogen (3). In einer weiteren Aufbereitungseinheit (6) werden nach vorherigem Wiegen (5) die Kornverluste von den Nichtkornbestandteilen in einer Grobabscheidung isoliert, nachgereinigt (8) und gewogen (10). Alle Kornanteile werden zur Separierung von Bruchkorn aufbereitet (4) und pneumatisch in die Vorratsbehälter gefördert. Aufgrund der mechanischen Belastung, des ökonomischen Einsatzes von Versuchsgut und der verbesserten Reproduzierbarkeit im Messprozess werden die Nichtkornbestandteile in einem Verhältnis von zwei Drittel Gebrauchten zu einem Drittel Neuen (7) dem Vorratsbehälter (11) zugeführt [13,66]. Die Massenanteile der instationären Phasen gelangen ohne Auswertung aufbereitet in die Vorratsbehälter (7,9), **Bild 95**.



Bild 95: Schema zum Versuchsablauf am Grundlagenversuchsstand, nach [128,129]

8.12 Grundeinstellungen bei der Versuchsdurchführung

Tabelle 20: Grundeinstellungen bei der Versuchsdurchführung

Parameter		Wert
NKB-Durchsatzanteil gesamt s _{NKB}		
$= \frac{\dot{m}_{\rm NKB}}{\dot{m}_{\rm NKB} + \dot{m}_{\rm K}} \cdot 100\%$	(116)	25 %
Korndurchsatzanteil gesamt s _K		
$= \frac{\dot{m}_{\rm K}}{\dot{m}_{\rm NKB} + \dot{m}_{\rm K}} \cdot 100\% = 1 - s_{\rm NKB}$	(117)	75 %
NKB-Durchsatzanteil auf dem VB <i>s</i> _{NKB,VB}		
$= \frac{\dot{m}_{\rm NKB,VB}}{\dot{m}_{\rm NKB}} \cdot 100\% = \frac{\dot{m}_{\rm NKB,VB}}{\dot{m}_{\rm NKB,VB} + \dot{m}_{\rm NKB,RLB}} \cdot 100\%$	(118)	50 %
Korndurchsatzanteil auf dem VB s _{K,VB}		
$= \frac{\dot{m}_{\rm K,VB}}{\dot{m}_{\rm K}} \cdot 100\% = \frac{\dot{m}_{\rm K,VB}}{\dot{m}_{\rm K,VB} + \dot{m}_{\rm K,RLB}} \cdot 100\%$	(119)	70 %
NKB-Durchsatzanteil auf dem RLB <i>s</i> _{NKB,RLB}		
$= \frac{\dot{m}_{\rm NKB,RLB}}{100\%} \cdot 100\% = \frac{\dot{m}_{\rm NKB,RLB}}{100\%} \cdot 100\%$	(120)	50 %
$\dot{m}_{\rm NKB}$ $\dot{m}_{\rm NKB,VB}$ + $\dot{m}_{\rm NKB,RLB}$	(,	
Korndurchsatzanteil auf dem RLB s _{K,RLB}		
$= \frac{m_{\rm K,RLB}}{\dot{m}_{\rm K}} \cdot 100\% = \frac{m_{\rm K,RLB}}{\dot{m}_{\rm K,VB} + \dot{m}_{\rm K,RLB}} \cdot 100\%$	(121)	30 %
spezifischer NKB-Nenndurchsatz m _{NKB,soll}		0,3 - 1,9 kg⋅s⁻¹⋅m⁻¹
Gutaufgabepunkt Vorbereitungsboden I _{VB}		0,780 m
Gutaufgabepunkt Rücklaufboden I _{RLB}		1,520 m
Öffnungsweite Obersieb		0,015 m
Öffnungsweite Untersieb		0,006 m
Anstellwinkel Vorbereitungsboden avb		5°
Gebläsedrehzahl Siebkasten n _{Gebl,HK}		1180 min ⁻¹ \cong 0,63 m ³ ·s ⁻¹
Gebläsedrehzahl erste Fallstufe n _{Gebl,FS}		480 min ⁻¹ \cong 0,29 m ³ ·s ⁻¹

8.13 Übertragungsfunktion der Bildtransformation



Bild 96: Ebenes Viergelenk-Koppelgetriebe am Vorbereitungsboden

$$j_1 \cdot \cos\left(\pi - \arctan\left(\frac{x}{y}\right) - \beta_{VB}\right) + j_2 \cdot \sin\omega_{VB}t + j_3 = 0$$
 (122)

$$j_1 = 2 \cdot l_4 \cdot (l_1 - l_2 \cdot \cos \omega_{VB} t)$$
 (123)

$$j_2 = -2 \cdot l_2 \cdot l_4 \cdot \sin \omega_{VB} t \tag{124}$$

$$j_3 = l_1^2 + l_2^2 - l_3^2 + l_4^2 - 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \omega_{\rm VB} t$$
(125)

$$\beta_{\rm VB} = \beta_{\rm VB}(\omega_{\rm VB}t) = \pi - \arctan\left(\frac{x}{y}\right) - 2 \cdot \arctan\left(\frac{j_2 \pm \sqrt{j_1^2 + j_2^2 - j_3^2}}{j_1 - j_3}\right)$$
(126)

8.14 Schema der Gutbeschickung



Bild 97: Schema Beschickung über Förderband oder Zellenradschleuse

8.15 Restkornanteil in Mähdrescher-Reinigung

 Tabelle 21:
 Legende Restkornanteil, nach Spittel [5]

erste Zahl	Untersuchungsjahr
zweite Zahl	spezifischer Dreschwerksdurchsatz in kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
dritte Zahl	0 - Schüttlerlänge 1,09 m 1 - Schüttlerlänge 2,69 m 3 DS - drei Doppelschichtbelegungen, Korn über NKB 100% K - Idealschichtung, Korn unter NKB



Bild 98: Einfluss des Beschickungsverfahrens auf den Restkornanteil NKB-Charge 2 im Vergleich zu Spittel [5]



8.16 Variation der Gutaufgabe am Vorbereitungsboden

Bild 99: Einfluss des Gutaufgabeortes bei I_{RLB} = 1,52 m



152



8.17 Variation des Übergabeortes am Rücklaufboden

Bild 100: Übergabeort RLB, Vergleich 2



Bild 101: Übergabeort RLB, Vergleich 3



8.18 Detektion der Kornanteile nach Beschickungsort

Bild 102: Kennfeld der Summenkornabscheidung abhängig vom Beschickungsort am konventionellen und pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden, NKB-Charge 2



Bild 103: Einfluss des Beschickungsortes auf den Arbeitserfolg der Mähdrescher-Reinigung bei konstanter Rücklaufbodenlänge