

# **FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK**

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

**617**

Hermann-Konstantin Beckmann

**Einfluss der mechanischen und pneumatischen  
Anregung auf die Entmischung und  
Abscheidung in der  
Mähdrescherreinigungsanlage**

Dissertation

Stuttgart 2021

**Einfluss der mechanischen und pneumatischen Anregung auf die Entmischung und  
Abscheidung in der Mähdrescherreinigungsanlage**

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

**Vorgelegt von**

**Hermann-Konstantin Beckmann, M.Sc.**

**aus Bünde, Nordrhein-Westfalen**

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger

Mitberichter:

Prof. Dr. sc. agr. L. Frerichs

Tag der mündlichen Prüfung:

13.10.2020

Institut für Agrartechnik

Stuttgart 2021

## VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand im Wesentlichen in den Jahren 2014 bis 2019 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Grundlagen der Agrartechnik des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger für die Betreuung dieser Arbeit und für die konstruktive Unterstützung während des gesamten Projektes. Des Weiteren möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen und den daraus resultierenden Freiraum bei der Projektbearbeitung sowie der Möglichkeit zur persönlichen Entwicklung bedanken.

Prof. Dr. sc. agr. L. Frerichs danke ich für die Übernahme des Mitberichtes und die konstruktiven Anmerkungen. Diese waren sehr hilfreich für mich.

Mein herzlicher Dank gilt Prof. Dr.-Ing. T. Maier für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Diese Arbeit ist als Kooperationsprojekt zwischen der Universität Hohenheim und der Vorentwicklung der Firma CLAAS entstanden. Mein Dank gilt dem Projektpartner für das Vertrauen. Bedanken möchte ich mich besonders bei Dr.-Ing. M. Schwarz für die Betreuung sowie die fachliche Unterstützung bei der Durchführung und für die zahlreichen anregenden Diskussionen, die mich sehr inspiriert haben.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Agrartechnik gilt mein herzlicher Dank für die großzügige Hilfsbereitschaft und für das sehr angenehme Arbeitsklima. Die zahlreichen fachlichen Diskussionen habe ich genauso wie die gesellschaftlichen Anlässe sehr geschätzt. Des Weiteren gilt mein herzlicher Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Werkstatt für die Hilfe bei dem Aufbau von Prüfständen und Messtechnik. Auch möchte ich mich bei den zahlreichen wissenschaftlichen Hilfskräften und Studierenden bedanken, ohne die eine Durchführung der Versuche nicht möglich gewesen wäre.

Danken möchte ich meinen Eltern für ihre redliche Unterstützung und im Besonderen meiner Frau Jana. Sie hat mich in guten wie in schwierigen Zeiten beständig unterstützt und sich während der Anfertigung dieser Arbeit liebe- und aufopferungsvoll um unseren Sohn Linus gekümmert, dem ich diese Arbeit widme.

**INHALTSVERZEICHNIS**

FORMELZEICHEN .....	III
ABKÜRZUNGEN .....	X
KURZFASSUNG .....	XI
ABSTRACT .....	XII
1 EINLEITUNG.....	1
2 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK .....	3
2.1 Mähdrescheraufbau und Funktionsweise .....	3
2.2 Partikelentmischung granularer Medien in der Verfahrenstechnik.....	4
2.3 Konventionelle Mähdrescherreinigungsanlage .....	10
2.3.1 Aufbau und Funktionsweise .....	10
2.3.2 Theorie des Trennprozesses.....	12
2.3.3 Einfluss- und Bewertungsgrößen.....	17
2.4 Betriebsverhalten .....	23
2.4.1 Bewegungsverhalten .....	25
2.4.2 Luftströmung .....	27
2.5 Messtechnik .....	31
2.5.1 Positionsbestimmung.....	31
2.5.2 Strömungsmessung .....	33
2.6 Modellierung und Simulation.....	35
2.6.1 Physikalische Modellierung.....	36
2.6.2 Empirisch stochastische Modellierung.....	37
2.6.3 Physikalisch-stochastische Modellierung .....	39
2.6.4 DEM-CFD-Simulation .....	40
3 PRÄZISIERUNG DER AUFGABENSTELLUNG .....	44
4 BEWEGUNGSVERHALTEN VON KORN UND NICHTKORNBESTANDTEILEN.....	47
4.1 Stoffeigenschaften des Versuchsgutes .....	47
4.2 Aufbau der Versuchseinrichtungen.....	49
4.2.1 Miniaturprüfstand und Computertomografie .....	49
4.2.2 Grundlagen-Reinigungsprüfstand .....	52
4.3 Versuchsplanung und -durchführung .....	53
4.4 Methoden zur visuellen Auswertung.....	55
4.4.1 Einfluss der Abschwächung der Röntgenstrahlen.....	55
4.4.2 Methoden zur Detektion der Gutbestandteile .....	56
4.4.3 Bewertungsgrößen.....	57
4.5 Ergebnisse.....	58
4.5.1 Verifizierung der Bewertungsgrößen .....	58
4.5.2 Einfluss der Anregungsparameter.....	60
4.5.3 Einfluss der Schichthöhe.....	64
4.5.4 Einfluss von Wandeffekten .....	68
4.5.5 Einfluss der horizontalen Gutbewegung.....	73

4.6	DEM-CFD-Simulation .....	77
4.6.1	Modellierung .....	77
4.6.2	Verifizierung .....	78
5	EINFLUSSGRÖSSEN AUF DAS BEWEGUNGSVERHALTEN VON KORN UND NKB .....	82
5.1	Reinigungsprüfstand.....	82
5.2	Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung .....	84
5.3	Messtechnik.....	85
5.3.1	Hochgeschwindigkeitskamera.....	85
5.3.2	Laser-Doppler-Anemometrie.....	86
5.3.3	Heißfilm-Anemometrie .....	88
5.4	Kalibrierung der Versuchseinrichtung und der Messtechnik .....	89
5.4.1	Dosiergenauigkeit .....	89
5.4.2	Durchsatz-Verlust-Verhalten .....	89
5.4.3	Abgleich der Siebbewegung über die Heißfilmsensoren .....	90
5.5	DEM-CFD-Simulation .....	91
5.6	Ergebnisse.....	92
5.6.1	DEM-CFD-Simulation .....	92
5.6.2	Strömungsprofil .....	95
5.6.2.1	Stationäres Strömungsprofil ohne Siebbewegung .....	95
5.6.2.2	Einfluss der Siebbewegung und -frequenz .....	98
5.6.2.3	Einfluss des Luftdurchsatzes.....	99
5.6.2.4	Einfluss des Gutdurchsatzes.....	100
5.6.2.5	Einfluss der Sieböffnung .....	102
5.6.3	Partikelbewegung.....	104
5.6.3.1	Ausbildung der Gutschicht auf dem Obersieb .....	104
5.6.3.2	Kornabscheidung und -bewegung am Obersieb.....	107
5.6.3.3	Kornbewegung zwischen Ober- und Untersieb .....	109
5.6.3.4	Kornabscheidung und -bewegung am Untersieb .....	110
5.6.4	Verifizierung der Partikelbewegung und der Luftströmung .....	111
5.6.5	Verifizierung der DEM-CFD-Simulationen .....	114
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....	117
7	LITERATURVERZEICHNIS.....	120
8	ANHANG.....	137
8.1	Bewertungsgrößen des Trennprozesses .....	137
8.2	Messung der Geschwindigkeit einer beladenen Luftströmung .....	137
8.3	Heißfilm-Anemometrie .....	138
8.4	Laser-Doppler-Anemometrie.....	138
8.5	Prüfstandseinstellungen zur Bestimmung der Stoffeigenschaften .....	140
8.6	Versuchsplan Miniaturprüfstand und Grundlagen-Reinigungsprüfstand .....	141
8.7	Fächer-Dosierer.....	144
8.8	Grundeinstellungen des Reinigungsprüfstands bei der Versuchsdurchführung .....	145
8.9	Spezifikation der Heißfilmsensoren.....	145
8.10	Mit dem LDA-Verfahren verwendete DEHS-Partikel.....	146
8.11	Einfluss der Siebanregung auf das Strömungsprofil.....	147

**FORMELZEICHEN**

$a$	mm	Anregungsamplitude
$a_{\text{Horiz}}$	mm	horizontale Anregungsamplitude
$a_{\text{Ver}}$	mm	vertikale Anregungsamplitude
$b$	mm	Breite
$b_{\text{MD}}$	m	Mähdrescherbreite
$b_{\text{P}}$	mm	Prüfstandsbreite
$b_{\text{S}}$	mm	Siebbreite
$\check{b}_{\text{S}}$	$\text{m/s}^2$	Anlauf- und Bremsbeschleunigung
$d_{\text{A}}$	mm	Durchmesser Partikelfraktion A
$d_{\text{B}}$	mm	Durchmesser Partikelfraktion B
$d_{\text{DEHS}}$	nm	Durchmesser der Aerosolpartikel
$d_{\text{innen}}$	mm	Innendurchmesser
$d_{\text{Intruder}}$	mm	Durchmesser eines größeren Partikels
$d_{\text{j}}$	mm	Durchmesser Kreisring j
$d_{\text{LDA}}$	mm	Breite Streifenabstand im Interferenzstreifenmodell
$d_{\text{Partikel}}$	mm	Partikeldurchmesser
$d_{\text{w}}$	mm	Siebmaschenweite
$d_{\text{W}}$	$\mu\text{m}$	fokussierter Strahlendurchmesser
$d_{\text{Zyl}}$	mm	Zylinderdurchmesser
$e$	-	Restitutionskoeffizient
$\check{e}_{\text{Korn,RLB}}$	%	Kornanteil auf Rücklaufboden
$\check{e}_{\text{Korn,VB}}$	%	Kornanteil auf Vorbereitungsboden
$\check{e}_{\text{NKB,RLB}}$	%	NKB-Anteil auf Rücklaufboden
$\check{e}_{\text{NKB,VB}}$	%	NKB-Anteil auf Vorbereitungsboden
$f$	Hz	Anregungsfrequenz, Siebfrequenz
$f_{\text{CT}}$	Hz	Aufnahmefrequenz Hochgeschwindigkeitsröntgen
$f_{\text{HF}}$	Hz	Aufnahmefrequenz Heißfilmsensor
$f_{\text{HS}}$	Hz	Aufnahmefrequenz Hochgeschwindigkeitskamera
$f_{\text{LDA}}$	Hz	Doppler-Frequenz LDA-Verfahren
$f_{\text{R}}$	Hz	Aufnahmefrequenz Radiografie-Verfahren
$f_{\text{Shift}}$	Hz	Shift-Frequenz LDA-Verfahren

$g$	$\text{m/s}^2$	Gravitationsbeschleunigung
$h$	mm	Höhe
$h_{\text{Füll}}$	mm	Füllhöhe, maximale Schichthöhe
$h_{\text{OS}}$	mm	Schichthöhe auf dem Obersieb
$h_{\text{P}}$	mm	Prüfstandshöhe
$h_{\text{Schicht}}$	mm	Schichthöhe
$h_{\text{Schicht,theor.}}$	mm	theoretische Schichthöhe
$h_{\text{Schicht,0}}$	mm	Anfangsschichthöhe
$\bar{h}_{\text{VB}}$	mm	mittlere Aufenthaltshöhe auf dem Vorbereitungsboden
$k$	%	Abweichung, Fehler
$k_{\text{Isel}}$	mm	Positioniergenauigkeit der Isel-Linearmodule
$\check{k}_{\text{Dosier}}$	%	Dosiergenauigkeit
$\check{k}_{\text{Dosier,Gesamt}}$	%	Dosiergenauigkeit aus NKB- und Korndosierung
$\check{k}_{\text{Dosier,Korn}}$	%	Dosiergenauigkeit der Korndosierung
$\check{k}_{\text{Dosier,NKB}}$	%	Dosiergenauigkeit der NKB-Dosierung
$\check{k}_{\text{HF}}$	%	Genauigkeitsbereich Heißfilmsensor
$\check{k}_{\text{LDA}}$	$\text{m/s}$	Genauigkeitsbereich LDA-Verfahren
$l$	m	Länge
$l_{\text{BW}}$	mm	Linsenbrennweite
$l_{\text{F}}$	m	Förderlänge
$l_{\text{LDA}}$	mm	Länge LDA-Messvolumen
$l_{\text{NKB}}$	m	mittlere Häcksellänge
$l_{\text{Obj}}$	m	Absorptionslänge der Röntgenstrahlen
$l_{\text{OS}}$	mm	Obersieblänge
$l_{\text{P}}$	mm	Prüfstandslänge
$l_{\text{S}}$	m	Sieblänge
$l_{\text{S,Ende}}$	m	Siebende
$l_{\text{S,Korn}}$	m	mit Korn bedeckte Sieblänge
$l_{\text{S,NKB}}$	m	mit NKB bedeckte Sieblänge
$l_{\text{S,0}}$	m	Siebanfang
$l_{\text{US}}$	mm	Untersieblänge
$l_{80}$	m	Sieblänge bei 80 % Kornabscheidung

$\checkmark_{RLB}$	mm	Aufgabepunkt Rücklaufboden
$\checkmark_{VB}$	mm	Aufgabepunkt Vorbereitungsboden
$\checkmark_{VB-RLB}$	mm	Übergabepunkt Vorbereitungsboden - Rücklaufboden
$m_A$	kg	Masse Partikelfraktion A
$m_B$	kg	Masse Partikelfraktion B
$m_{MD}$	t	Mähdreschermasse
$m_{Korn}$	kg	Kornmasse
$m_{Korn,ges}$	kg	Gesamtmasse Korn
$m_{Korn,ges,br}$	kg	berechnete Gesamtmasse Korn
$m_{Korn,Schicht,Grundlagen-RA}$	g	Masse der Korn-Schicht im Grundlagen-RA
$m_{Korn,Schicht,Miniatur}$	g	Masse der Korn-Schicht im Miniaturprüfstand
$m_{Korn,SK}$	kg	Siebdurchgang Korn
$m_{Korn,V}$	kg	Kornverlustmasse, Reinigungsabgang Korn
$m_{Korn,Überkehr}$	kg	Kornmasse in Überkehr
$m_{NKB,Abgang}$	kg	Reinigungsabgang NKB
$m_{NKB,ges}$	kg	Gesamtmasse NKB
$m_{NKB,Schicht,Grundlagen-RA}$	g	Masse der NKB-Schicht im Grundlagen-RA
$m_{NKB,Schicht,Miniatur}$	g	Masse der NKB-Schicht im Miniaturprüfstand
$m_{NKB,SK}$	kg	Siebdurchgang NKB
$m_{NKB,Überkehr}$	kg	NKB-Masse in Überkehr
$m_{rH}$	%	relatives Gewicht
$m_R$	%	Restkornmasse
$\dot{m}_{EM}$	%/s	bezogener Entmischungsmassenstrom
$\dot{m}_{ges}$	kg/sm	Gesamtdurchsatz (auf Siebbreite bezogen)
$\dot{m}_{Korn}$	kg/sm	Korndurchsatz (auf Siebbreite bezogen)
$\dot{m}_{NKB}$	kg/sm	NKB-Durchsatz (auf Siebbreite bezogen)
$n_{Gabl}$	1/min	Gebläsedrehzahl
$n_{Gabl,HK}$	1/min	Gebläsedrehzahl Hauptkanal
$n_{Gabl,FS}$	1/min	Gebläsedrehzahl 1. Fallstufe
$n_{Korn}$	-	Anzahl Körner
$n_{OS}$	-	Anzahl Obersieblamellen
$n_{US}$	-	Anzahl Untersieblamellen

$r$	mm	Zylinderradius
$S_{\text{Korn}}$	%	ausgetragener Kornanteil
$S_{\text{NKB}}$	%	ausgetragener NKB-Anteil
$\bar{s}$	mm	Abstand
$\check{s}$	%	Korn-NKB-Massenverhältnis
$t$	s	Zeit
$t_{\text{Auslauf}}$	s	Auslaufzeit
$t_{\text{Einlauf}}$	s	Einlaufzeit
$t_{\text{Hub},j}$	s	Zeit vor Oszillationshub $j$
$t_{\text{Mess}}$	s	Messzeit
$t_{\text{Mess,theor.}}$	s	theoretische Messzeit
$t_{\text{Sim}}$	s	Simulationszeit
$t_{80}$	s	Durchgangszeit bei 80 % Kornabscheidung
$t_{95}$	s	Durchgangszeit bei 95 % Kornabscheidung
$U$	-	Kornmassenverteilung
$v_A$	m/s	Luftgeschwindigkeit am Ausdehnungspunkt
$v_{\text{EM}}$	mm/s	Entmischungsgeschwindigkeit
$v_{\text{EM,rel}}$	-	relative Entmischungsgeschwindigkeit
$v_{\text{Exp}}$	m/s	Fördergeschwindigkeit messtechnisches Experiment
$v_F$	m/s	Fördergeschwindigkeit
$v_{\text{Fl}}$	m/s	Fluidisierungsgeschwindigkeit
$v_{\text{Fl,NKB}}$	m/s	Fluidisierungsgeschwindigkeit NKB
$v_L$	m/s	Luftgeschwindigkeit
$v_{L,LDA,i}$	m/s	Luftgeschwindigkeiten LDA-Partikel $i$ in einem Messpunkt
$v_{L,max}$	m/s	maximal auftretende Luftgeschwindigkeit
$v_{L,ver}$	m/s	vertikale Luftgeschwindigkeit
$v_{\text{mech}}$	m/s	Fördergeschwindigkeit: mechanische Förderung
$v_{\text{mech,Exp}}$	m/s	Fördergeschwindigkeit messtechnisches Experiment: mechanische Förderung
$v_{\text{mech,Sim}}$	m/s	Fördergeschwindigkeit Simulation: mechanische Förderung
$v_{\text{Partikel}}$	mm/Zyklus	Partikelgeschwindigkeit
$v_{\text{pneu}}$	m/s	Fördergeschwindigkeit: pneumatische Förderung

$V_{\text{pneu,Exp}}$	m/s	Fördergeschwindigkeit messtechnisches Experiment: pneumatische Förderung
$V_{\text{pneu,Sim}}$	m/s	Fördergeschwindigkeit Simulation: pneumatische Förderung
$V_{\text{rel}}$	m/s	relative Luftgeschwindigkeit
$V_{\text{Schw}}$	m/s	Leerrohrgeschwindigkeit
$V_{\text{Sim}}$	m/s	Fördergeschwindigkeit Simulation
$V_{\text{Sink}}$	mm/s	Sinkgeschwindigkeit
$V_{\perp}$	m/s	orthogonale Partikelgeschwindigkeit
$\bar{V}_{\text{HK}}$	m/s	mittlere Luftgeschwindigkeit im Hauptkanal
$\bar{V}_{\text{Korn,x}}$	m/s	mittlere horizontale Korngeschwindigkeit
$\bar{V}_{\text{Korn,y}}$	m/s	mittlere vertikale Korngeschwindigkeit
$\bar{V}_{\text{Sink}}$	mm/s	mittlere Sinkgeschwindigkeit
$w_{\text{OS}}$	mm	Öffnungsweite Obersieb
$w_{\text{US}}$	mm	Öffnungsweite Untersieb
$x$	mm	Position, Weg in x-Richtung
$y$	mm	Position, Weg in y-Richtung
$z$	mm	Position, Weg in z-Richtung
$z_{\text{M1}}$	mm	Weg in z-Richtung der Messebene 1
$z_{\text{M2}}$	mm	Weg in z-Richtung der Messebene 2
$z_{\text{Schicht}}$	mm	Schichttiefe
$A_{\text{S}}$	m <sup>2</sup>	Siebfläche
$D_{\text{Sink}}$	-	Dispersionsterm
$E$	-	Zustand
$F_{\text{S}}$	N	Strömungskraft
$Fr$	-	Froudezahl
$Fr_{\text{V}}$	-	Wurfkennzahl
$GW$	-	Grauwert
$GW_0$	-	Grauwert NKB
$I$	mA	Strom
$I_{\text{A}}$	Ns	Impuls
$I_{\text{CT,0}}$	W/m <sup>2</sup>	Anfangsintensität der Röntgenstrahlen
$I_{\text{R}}$	W/m <sup>2</sup>	Intensität der Röntgenstrahlen

$N$	-	Anzahl
$P$	-	Prozessparameter, Frequenzanteile
$P_{MD}$	kW	Motorleistung
$Q$	-	Trennqualität
$R$	%	Kornrest
$R_{Korn}$	%	Kornreinheit
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
$\bar{R}^2$	-	korrigiertes Bestimmtheitsmaß
$T$	°C	Temperatur
$\check{T}$	°C	Granulare Grenztemperatur
$\check{T}_A$	°C	Granulare Grenztemperatur A
$\check{T}_B$	°C	Granulare Grenztemperatur B
$U$	V	Spannung
$\ddot{U}_{Korn}$	%	Kornanteil in Überkehr
$\ddot{U}_{NKB}$	%	NKB-Anteil in Überkehr
$V_A$	m <sup>3</sup>	Volumen Partikelfraktion A
$V_B$	m <sup>3</sup>	Volumen Partikelfraktion B
$V_{ges}$	%	Gesamtvolumen
$V_{Hohlraum}$	%	Hohlraumvolumen
$V_{Korn}$	%	Kornverluste
$\bar{V}_L$	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·s	bezogener Luftdurchsatz
$\dot{V}_{L,HK}$	% · m <sup>2</sup>	durch das Obersieb strömender, bezogener Volumenstrom
$Z$	%	Kornabscheidung
$Z_{OS}$	%	Kornabscheidung Obersieb
$Z_{US}$	%	Kornabscheidung Untersieb
$\alpha$	°	Neigung
$\alpha_{OS}$	°	Neigung Obersieb
$\alpha_{Sieb}$	°	Siebneigung
$\alpha_{US}$	°	Neigung Untersieb
$\alpha_{VB}$	°	Neigung Vorbereitungsboden
$\beta$	°	Schwingungsrichtungswinkel
$\beta_{OS}$	°	Schwingungsrichtungswinkel Obersieb

$\beta_{\text{Sieb}}$	°	Schwingungsrichtungswinkel Sieb
$\beta_{\text{US}}$	°	Schwingungsrichtungswinkel Untersieb
$\beta_{\text{VB}}$	°	Schwingungsrichtungswinkel Vorbereitungsboden
$\gamma_{\text{S}}$	°	Sieböffnungswinkel
$\delta_{\text{V}}$	°	Strömungsrichtungswinkel
$\check{\delta}_{\text{HF}}$	m/s	Ansprechempfindlichkeit der Heißfilmsensoren
$\overline{\delta}_{\text{V}}$	°	mittlerer Strömungsrichtungswinkel
$\epsilon$	-	Porosität
$\kappa$	%	abgeschiedene Kornmasse
$\kappa_{\text{max}}$	%	maximal abgeschiedene Kornmasse
$\lambda$	-	Auflockerungsverhältnis
$\lambda_{\text{LDA}}$	nm	Wellenlänge Laserstrahlen
$\lambda_{\text{max}}$	-	maximales Auflockerungsverhältnis in der Gutschicht
$\mu_{\text{CT}}$	-	Abschwächungskoeffizient
$\omega$	1/s	Winkelgeschwindigkeit
$\varphi_{\text{OS}}$	°	Winkel Heißfilmsensor zum Obersieb
$\rho_{\text{Korn}}$	kg/m <sup>3</sup>	Schüttdichte Korn
$\rho_{\text{NKB}}$	kg/m <sup>3</sup>	Schüttdichte NKB
$\rho_{\text{Partikel}}$	kg/m <sup>3</sup>	Partikeldichte
$\rho_{\text{rein}}$	kg/m <sup>3</sup>	Reindichte
$\rho_{\text{Schicht}}$	kg/m <sup>3</sup>	Haufwerksdichte
$\rho_{\text{Schütt}}$	kg/m <sup>3</sup>	Schüttdichte
$\sigma_{\text{Dosier}}$	-	Standardabweichung Dosiergenauigkeit
$\sigma_{\text{L}}$	%	Standardabweichung Luftgeschwindigkeit
$\overline{\sigma}_{\text{V,OS}}$	%	mittlere Standardabweichung der Luftgeschwindigkeit im Obersieb
$\Phi$	-	Gesamtfeststoffanteil
$\Phi_{\text{LDA}}$	°	Kreuzungswinkel Laserstrahlen
$\Psi$	mm	Abstand Kornschicht - Sieb
$\Upsilon_{\text{DEHS}}$	%	summierte Häufigkeit der DEHS-Partikel
$\Upsilon_{\text{rH}}$	%	relative Häufigkeit

**ABKÜRZUNGEN**

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
<i>A, B, D</i>	Koeffizienten
BNE	Brazil-Nut-Effekt
CFD	Computational Fluid Dynamics, Strömungssimulation
CT	Computertomografie
DEM	Diskrete Elemente Methode, Partikelsimulation
DGL	Differentialgleichung
DEHS	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat
D	Dimension
<i>FOC</i>	Brennfleck
FS	Fallstufe
HS	Hochgeschwindigkeitskamera
K1	Komponente K1
K2	Komponente K2
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
MD	Mähdrescher
NKB	Nichtkornbestandteile
OT	Oberer Totpunkt
PIV	Particle Image Velocimetry
RA	Mähdrescherreinigungsanlage
RLB	Rücklaufboden
RBNE	Reverse-Brazil-Nut-Effekt
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TKG	Tausendkorngewicht
UT	Unterer Totpunkt
VB	Vorbereitungsboden

## KURZFASSUNG

Aufgrund der Begrenzung der maximalen Maschinenbreite erfolgt die Steigerung der Durchsatzleistung durch die Weiterentwicklung der Mähdrescher-Verfahrenstechnik. Voraussetzung dazu ist die genaue Kenntnis über die ablaufenden Prozesse. Ziel dieser Arbeit ist die messtechnische Untersuchung der Mähdrescherreinigungsanlage nach dem White-Box-Modell, indem das genaue Wirken der Teilprozesse herausgestellt wird. Dies erhöht das Prozessverständnis und ermöglicht die Validierung und Verifizierung von DEM-CFD-Simulationen.

Die Entmischung und Abscheidung wird anhand des Bewegungsverhaltens von Korn und Stroh bewertet. Dazu werden 2D-Hochgeschwindigkeitsröntgen-Aufnahmen, statische 3D-Rekonstruktionen und 2D-Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen analysiert. Die Entmischung in den unteren Schichten ist durch die Kompression der Gutschicht aufgrund des Eigengewichts eingeschränkt. Durch die höhere Porosität erfahren die Körner im wandnahen Bereich eine schnellere Entmischung. Zusätzliche Verschiebungen im Haufwerk treten durch den überlagerten Förderprozess auf. Die entstehenden Hohlräume werden zur Entmischung genutzt. Der Einfluss des Förderprozesses sinkt mit steigender mechanischer und pneumatischer Anregung in vertikaler Richtung.

Die Untersuchung der Einflussgrößen auf das Bewegungsverhalten der Gutbestandteile erfolgt an einem Reinigungsprüfstand. Das Strömungsprofil über der Sieblänge zeigt im unbeladenen Zustand einen abfallenden Verlauf. Höhere Siebbeladungen bewirken eine flachere Strömung. Dadurch sind die maximal auftretenden Luftgeschwindigkeiten unter dem Untersieb zu größeren Sieblängen verschoben. Aufgrund hoher Luftgeschwindigkeiten im vorderen Obersiebbereich ist die Siebbeladung gering. Das Ausweichen der Luft zu diesen geringer belasteten Bereichen bedingt eine Steigerung der Geschwindigkeit im vorderen Obersiebbereich. Die hohen Luftgeschwindigkeiten in den Fallstufen ermöglichen eine hohe Trennung. Durch eine hohe Komponente der Luftgeschwindigkeit zwischen den Sieben in Förderrichtung entsteht eine Partikelförderung auf dem Untersieb. Dies bedeutet eine Verschiebung der Untersiebabscheidung zu größeren Längen. Der Luftdurchsatz muss in den Grenzen zwischen einer ausreichenden Gutauflockerung und einer geringen Partikelförderung liegen.

Neben der Identifikation von Entwicklungspotential werden die Erkenntnisse zur Verifizierung von DEM-CFD-Simulationen genutzt. Es zeigen sich Abweichungen im Bewegungsverhalten von Korn und Stroh. Die Einflussfaktoren sind qualitativ anhand der Simulation untersuchbar.

**ABSTRACT**

Due to the legal limitation of the maximum machine width the throughput increase is realized by further developing of the process technology. This requires precise knowledge of the ongoing processes. The aim of this work is the metrological investigation of the combine cleaning system according to the white-box model by analyzing the process sequence of the sub-processes. This enhances process understanding and enables the validation and verification of DEM-CFD-simulations.

The evaluation of the segregation and separation process is based on the movement behavior of grain and straw. For this purpose, 2D high-speed x-ray images, static 3D reconstructions and 2D high-speed camera images are analyzed. The segregation in the lower layers is limited by the compression of the material layer due to its own weight. Due to the higher porosity the segregation of the grain near the wall is slightly faster. Additional relative movements of the material based on the superimposed conveying process. The resulting voids are used for a faster segregation. The influence decreases with increasing mechanical and pneumatic excitation in vertical direction.

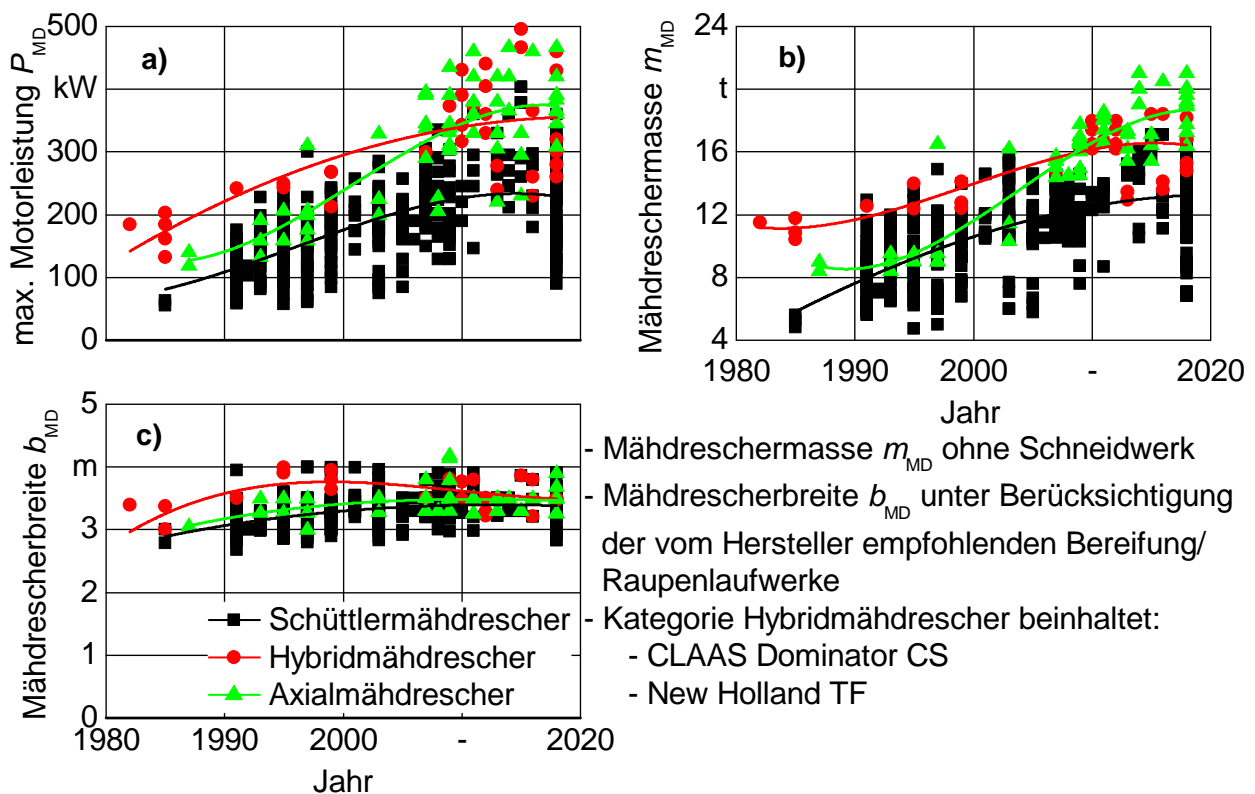
The influencing factors on the movement behavior of the material in the cleaning system is investigated with a test-rig. In the unloaded state the airflow decreases along the sieve. Due to higher sieve loads the airflow is flatter. Therefore the maximum air speed under the lower sieve is shifted to larger sieve lengths.

The front area of the upper sieve is less loaded. The air passes by these areas and causes an increase of the air speed. High air speeds in the winnowing steps result in a high grain separation. A high component of the air velocity in the conveying direction between the sieves causes a shift of the separation on the lower sieve to longer lengths. The air throughput must be within the limits between a sufficient material fluidisation and a low conveying process on the sieves.

In addition to identifying development potential, the results are used to verify DEM-CFD-simulations. There are deviations of movement behavior between grain and straw. Nevertheless, the influencing factors can also be examined qualitatively on the basis of the simulations.

## 1 EINLEITUNG

Die Steigerung der Durchsatzleistung von Mähdreschern erfolgt aufgrund der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) nicht durch eine Verbreiterung der Aggregate, sondern durch die Weiterentwicklung der verfahrenstechnischen Prozesse und durch die optimale Ausnutzung des vorhandenen Bauraums. Dies ist an der zeitlichen Entwicklung der Mähdreschermasse und -breite ersichtlich, **Bild 1 b-c)**. Die Mähdrescherbreite stagniert unabhängig von der Bauart in den maximal möglichen Grenzen. Die geringfügige Reduzierung bei den Hybridmähdreschern ab dem Jahr 1995 ist mit der vermehrten Verwendung von Bandlaufwerken in Kombination mit der strengeren Vergabe von Ausnahmegenehmigungen begründbar. Die Steigerung der Mähdreschermasse lässt auf die Weiterentwicklung der verfahrenstechnischen Prozesse schließen. Diese verläuft analog zur Erhöhung der maximalen Motorleistung, Bild 1 a).



**Bild 1:** Zeitliche Entwicklung der Mähdreschermotorleistung, der -masse und der -breite der in Deutschland neu vorgestellten Mähdrescher

Die Basis für die Weiterentwicklung ist das genaue Verständnis über die ablaufenden Teilprozesse sowie deren verfahrenstechnischer Zusammenhang zum Gesamtprozess. Häufig werden diese Prozesse ausgehend von einem Black-Box-Modell untersucht. Dazu werden Ausgangsgrößen in Abhängigkeit von Eingangsgrößen aufgenommen und bewertet und so Erkenntnisse über

den Prozess gewonnen. Bei der messtechnischen Untersuchung nach dem White-Box-Modell wird das genaue Wirken des zu untersuchenden Prozesses herausgestellt. Im Gegensatz zur Untersuchung nach dem Black-Box-Modell wird so der Prozess selbst betrachtet. Dies erlaubt eine Auswertung auf einem höheren Detaillierungsniveau und eröffnet die Möglichkeit, Entwicklungspotential zu identifizieren. Die Notwendigkeit der Verifizierung und Validierung von DEM-CFD-Simulationen [1] fordert ebenfalls diese Art der messtechnischen Untersuchung.

Diese Arbeit befasst sich im Wesentlichen mit der messtechnischen Untersuchung der Reinigungsanlage (RA) nach dem White-Box-Modell. Hierfür werden in **Kapitel 2** die Grundlagen und der Stand der Technik im Bereich der Mähdrescherreinigung und der verfahrenstechnischen Partikelentmischung umrissen. Des Weiteren werden geeignete Bewertungsgrößen identifiziert sowie entsprechende Messtechnik analysiert.

Die grundlegende Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Korn und Nichtkornbestandteilen (NKB) während der Entmischung und Abscheidung wird in **Kapitel 4** vorgestellt und erfolgt an einem luftdurchströmten, vertikal schwingenden Sieb. Mittels optischer Messverfahren werden Einflüsse analysiert und mit den identifizierten Bewertungsgrößen ausgewertet. Der Einfluss der Gutförderung auf die Entmischung und Abscheidung wird weiterhin an einem Grundlagen-Reinigungsprüfstand untersucht, der eine unabhängige Einstellung der vertikalen und horizontalen Anregungen ermöglicht.

Die messtechnische Untersuchung der mechanischen und pneumatischen Einflussgrößen auf das Bewegungsverhalten der Gutbestandteile in der Reinigungsanlage erfolgt in **Kapitel 5** an einem Reinigungsprüfstand. Durch die gegenseitige Wechselwirkung zwischen Strömungsprofil und Gutbeladung wird die Ausbildung und Interaktion der Luftströmung im Gesamtprozess untersucht. Die Untersuchung der Teilprozesse Förderung und Abscheidung wird an Ober- und Untersieb getrennt durchgeführt.

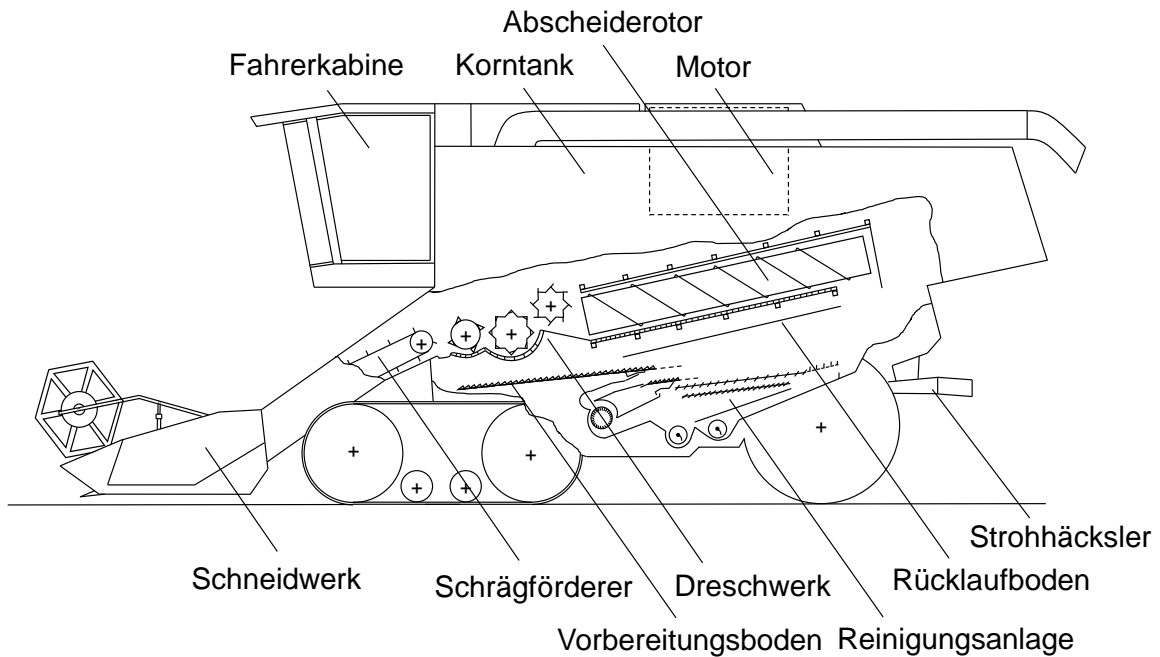
Alle Laborversuche werden parallel mithilfe der DEM-CFD-Simulation abgebildet. Dazu wird der von Pförtner [2–5] validierte Parametersatz verwendet.

Die Erkenntnisse werden zur Bewertung der Arbeitsweise der Reinigungsanlage und zur Identifikation von Entwicklungspotential genutzt. Des Weiteren werden die durchgeführten DEM-CFD-Simulationen verifiziert.

## 2 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

### 2.1 Mähdrescheraufbau und Funktionsweise

Der Mähdrescher (MD) ist eine universale Erntemaschine zur Ernte einer Vielzahl verschiedener Fruchtarten mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften, **Bild 2**. [6, 7]



**Bild 2:** Mähdrescher mit Tangentialdreschwerk und Abscheiderotor

Mithilfe der drei Hauptbaugruppen Dreschwerk, Restkornabscheidung und Reinigungsanlage (RA) werden die zu erntenden Früchte von den restlichen Pflanzenbestandteilen getrennt und separiert. Die ganze Pflanze wird vom Schneidwerk abgeschnitten, auf Kanalbreite zusammengeführt und über einen Schrägförderer an das Dreschwerk übergeben. Das Dreschwerk besteht aus mehreren Dreschtrommeln und -körben und löst durch eine reibende und schlagende Arbeitsweise bis zu 100 % der Körner aus den Ähren. Unter den relevanten Arbeitsbedingungen werden des Weiteren 70–90 % der Körner und 10–30 % Nichtkornbestandteile (NKB), die aus Kurzstroh und Spreu bestehen, durch den Dreschkorb auf den Vorbereitungsboden (VB) der Reinigungsanlage abgeschieden. 10–30 % der nicht durch den Dreschkorb separierten Körner gelangen mit dem Langstroh in die Restkornabscheidung. Bei einem konventionellen Mähdrescher ist diese als Hordenschüttler ausgeführt. Durch die kreisförmige Bewegung der Schüttlerhorden wird das Gut entgegen der Fahrtrichtung zum Heck gefördert. Dabei werden die restlichen Körner und weitere NKB aus dem Langstroh entmischt und über einen Rücklauf-

boden (RLB) ebenfalls der Reinigungsanlage zugeführt. In der Reinigungsanlage werden die beiden Gutströme zusammengefasst und die Körner mithilfe periodisch schwingender und zusätzlich luftdurchströmter Siebe von den NKB getrennt. Das Langstroh wird entweder im Schwad abgelegt oder gehäckselt und über die gesamte Schneidwerksbreite verteilt. Weiterführende Erläuterungen der Funktionsweise sind unter anderem in [8–15] beschrieben.

Neben dem konventionellen Mähdrescher mit Tangentialdreschwerk und Hordenschüttler werden nach der Wirkweise der eingesetzten Verfahrenstechnik der Axialmähdrescher und der Mähdrescher in Hybridbauweise charakterisiert. Der Axialmähdrescher nutzt ein oder zwei Rotoren für den Dreschprozess und die Restkornabscheidung. Der Gutfluss verläuft axial entlang der Rotoren. In der Hybridbauweise erfolgt der Ausdrusch über ein Tangentialdreschwerk, während die Restkornabscheidung mit ein oder mehreren Rotoren realisiert wird. [15, 16]

## 2.2 Partikelentmischung granularer Medien in der Verfahrenstechnik

Die Entmischung unterschiedlicher Partikel bedeutet die Aufspaltung in ihre ursprünglichen Fraktionen und wurde in der mechanischen Verfahrenstechnik häufig anhand zweier verschiedener Entmischungsprinzipien untersucht [17–35]. Das zu untersuchende Gemisch erfährt eine vertikal oszillierende Anregung und besteht aus einer

- gleichen Anzahl an Partikeln jeder Größenklasse oder
- aus einem von kleineren Partikeln umgebenen größeren Partikel (Intruder).

Die Oszillationszyklen können dabei kontinuierlich oder unterbrochen sein [18, 29, 30]. Größere Partikel können in einem Gemisch aufschwimmen (Brazil-Nut-Effekt, BNE), absinken (Reverse Brazil-Nut-Effekt, RBNE) oder kein Entmischungsverhalten zeigen. Diese Phänomene sind gegensätzlich zum Gesetz des Auftriebs bei Flüssigkeiten und abhängig vom Größen- und Dichteverhältnis der Partikel, der Größe und Geometrie des Gemisch-Volumens, der Stoffeigenschaften, der Anregungsamplitude und -frequenz, der Wandreibung sowie der interstitiellen Luft. Diese Vielzahl an Abhängigkeiten zeigt die große Komplexität. Die Beschreibung erfolgt anhand verschiedener Modellvorstellungen. [18, 19, 22]

Die Entmischung der Partikel eines Gemisches resultiert aus den vorhandenen Hohlräumen. Kleine Partikel besetzen diese mit einer größeren Wahrscheinlichkeit und entmischen so in Gravitationsrichtung. Große Partikel werden durch die kleineren verdrängt und führen eine Bewegung entgegen der Gravitationsrichtung aus. Die Wahrscheinlichkeit der Besetzung der

Hohlräume durch größere Partikel ist geringer und steigt mit größerer Anregungsbeschleunigung. [17–21]

Vanel [28] untersucht das Bewegungsverhalten einer Acrylkugel ( $d_{\text{Intruder}} = 25,4 \text{ mm}$ ), die umgeben von Acrylkugeln kleinerer Durchmesser ( $d_{\text{Partikel}} = 3,175 \text{ mm}$ ) ist, während einer vertikalen Oszillation. Bei kleinen Anregungsamplituden ( $a \leq 0,25 \cdot d_{\text{Partikel}}$ ) und hohen Anregungsfrequenzen ( $40 \text{ Hz} \leq f \leq 75 \text{ Hz}$ ) kann eine Kristallisation der Gutschicht nachgewiesen werden. Im Bereich der großen Kugel entstehen Fehlstellen in der Gitterstruktur, die die kleinen Partikel für Platzwechsel nutzen. Die Größe und Anzahl der Fehlstellen steigt mit dem Größenverhältnis der Partikel. Dies führt zur schnelleren Entmischung.

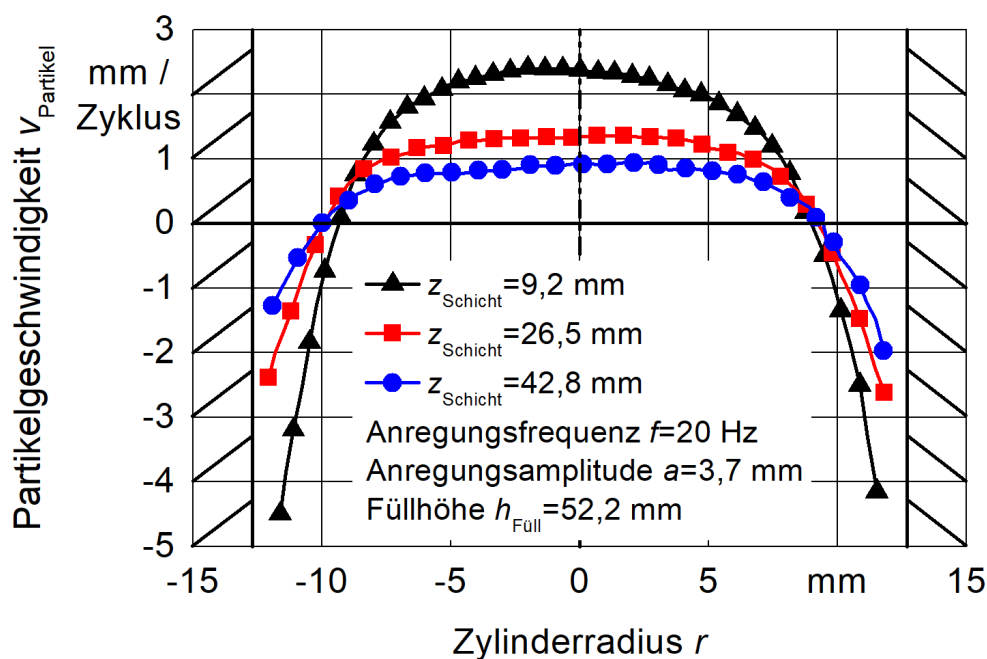
Cooke [26] untersucht die Entmischung eines großen Partikels in Abhängigkeit des Größenverhältnisses ( $d_A/d_B = 3\text{--}15$ ) und der eingeleiteten Beschleunigungen ( $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $a = 2,9\text{--}4,3 \text{ mm}$ ) während einer vertikalen Oszillation in einem zweidimensionalen Versuch. Hierfür befinden sich die Partikel in einer Schicht zwischen zwei vertikalen Glasplatten. Mithilfe von Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen und entsprechender Bildverarbeitung werden Bewegungstrajektorien erstellt und ausgewertet. Die Entmischungsgeschwindigkeit steigt mit steigendem Größenverhältnis und höheren Beschleunigungen. Diese Erkenntnisse werden durch weitere Untersuchungen bestätigt [27, 30].

Der Entmischungsprozess ist neben der unterschiedlichen Partikelgrößen auch von der Partikeldichte und damit von der Trägheit der Partikel abhängig. Bei einer wurfweisen Anregung ist die Wurfbewegung größerer Partikel mit einer höheren Dichte stärker ausgeprägt. Kleine Partikel können, wie oben beschrieben, die entstehenden Hohlräume für Platzwechsel nutzen. Die Entmischungsrichtung der großen Partikel ist nach oben, die der kleineren Partikel nach unten gerichtet. Bei geringer Dichte der großen Partikel wird die Wurfbewegung aufgrund von Kollisionen mit darüber liegenden Partikeln behindert, wodurch die Entstehung von Hohlräumen eingeschränkt ist. Die Entmischungsrichtung kann in diesem Fall umgekehrt sein. Dieser Effekt ist unabhängig von den Reibeigenschaften zwischen Gemisch und Behälter und abhängig von der Anregungsamplitude und der -frequenz. [23, 30]

Bei einer vertikalen Anregung wird das Gemisch unter Einwirkung der Aufwärtsbeschleunigung zusammengedrückt und die Scherkräfte aufgrund der Seitenwände werden in das gesamte Volumen eingeleitet. Bei der Abwärtsbewegung ist die Gutschicht aufgelockert und die Scherkraft bildet sich nur in wandnahen Bereichen aus. Dadurch entsteht eine resultierende Abwärtsbe-

wegung der Bestandteile in den Bereichen nahe der Seitenwände, während die Bestandteile in der Mitte aufsteigen. Bezogen auf die Schichthöhe bewegen sich die Bestandteile somit kreisförmig in der Gutschicht. Dieser Vorgang wird als Konvektion bezeichnet. Die Bestandteile führen entsprechend Konvektionsrollen aus. [18]

Die von den Partikeln auf die Zeit bezogene zurückgelegte Strecke definiert die Partikelgeschwindigkeit  $v_{\text{Partikel}}$ . **Bild 3** zeigt die ausgebildeten Konvektionsrollen anhand des radialen Geschwindigkeitsprofils einer Mohn-Schüttung (Ellipsenform: große Halbachse: 1 mm; kleine Halbachse: 0,7–0,8 mm) in einem Plexiglaszylinder  $r = 12,7$  mm während einer vertikalen Oszillation ( $f = 20$  Hz,  $a = 3,7$  mm) in Abhängigkeit der Schichttiefe  $z_{\text{Schicht}}$ . Der Plexiglaszylinder ist bis zu einer Füllhöhe von  $h_{\text{Füll}} = 52,2$  mm mit Mohn gefüllt. [27]



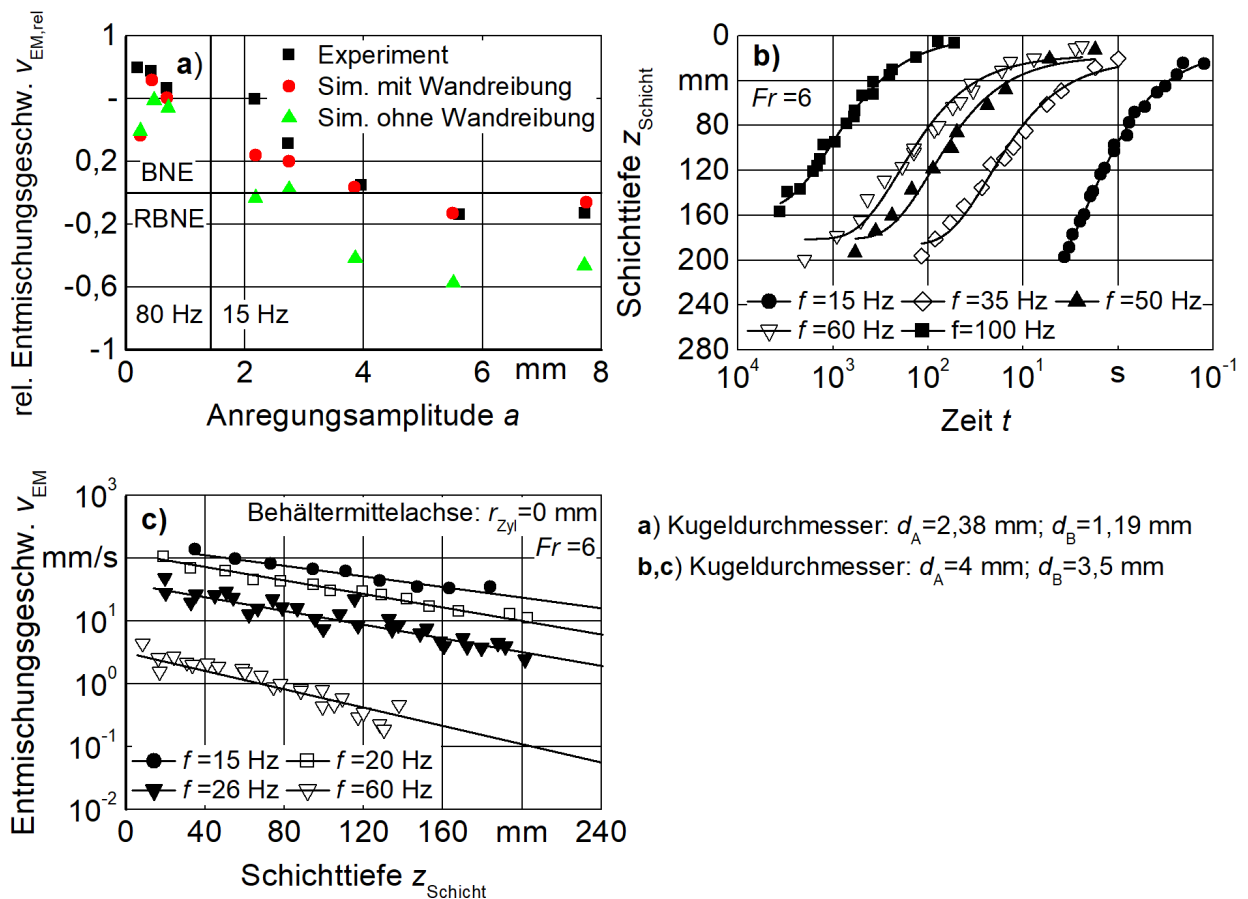
**Bild 3:** Ausbildung von Konvektionsrollen anhand des radialen Geschwindigkeitsprofils einer Mohn-Schüttung (Ellipsenform: große Halbachse: 1 mm; kleine Halbachse: 0,7–0,8 mm) in Abhängigkeit der Schichttiefe nach [27]

Partikel, die größer als der Bereich der Abwärtsbewegung an der Wand sind, verharren im oberen Bereich der Gutschicht, während ausreichend kleine Partikel an der Wand absinken und so Konvektionsrollen ausführen. Die Größe des Wandbereiches, in dem die Partikel nach unten sinken, steigt mit dem Behälterdurchmesser [27]. [18, 19, 24–27, 30, 34]

Die Untersuchung des Einflusses der Konvektion auf den Entmischungsprozess von Messingkugeln unterschiedlicher Durchmesser ( $d_A = 2,38$  mm,  $d_B = 1,19$  mm) mittels Experiment und validierter Molekulardynamik-Simulation ergibt unterschiedliches Verhalten für  $f = 15$  Hz und

$f = 80$  Hz, **Bild 4 a**). Für  $f = 80$  Hz ist der Einfluss der Konvektion gering und die Anregung führt zu einem Aufsteigen der größeren Partikel (Brazil-Nut-Effekt, BNE). Für  $f = 15$  Hz kann die Anregung ein Absinken der Körner bewirken (Reverse Brazil-Nut-Effekt, RBNE). Die Simulation mit periodischen Randbedingungen ohne Wandreibung zeigt den Einfluss der Konvektion auf die Entmischung. Bei Vernachlässigung der Konvektion wird der RBNE verstärkt. [18]

Knight [27] untersucht die Zeit zum Aufsteigen gefärbter Glaskugeln ( $d_A = 4$  mm), die umgeben von Glaskugeln kleinerer Durchmesser ( $d_B = 3,5$  mm) sind. Die Entmischung resultiert aus einer vertikalen Oszillation mit unterschiedlichen Anregungsfrequenzen und -amplituden. Bei konstanter Froudezahl von  $Fr = 6$  bewirkt eine schrittweise Reduzierung der Anregungsfrequenz im Bereich von  $f = 100$  Hz auf  $f = 15$  Hz eine Steigerung der Entmischungsgeschwindigkeit, Bild 4 b). Es zeigt sich eine sensible Abhängigkeit.



a) Kugeldurchmesser:  $d_A=2,38$  mm;  $d_B=1,19$  mm  
 b,c) Kugeldurchmesser:  $d_A=4$  mm;  $d_B=3,5$  mm

**Bild 4:** Einfluss der Konvektion auf den Entmischungsprozess und die Abhängigkeit zur Wandreibung und zur Schichttiefe nach [18, 27]

Pöschel [25] nutzt Molekulardynamik-Simulationen zur Untersuchung der Entmischung eines größeren Partikels, das in einem Behälter von kleineren Partikeln umgeben ist. Auch bei kleineren Frequenzen ( $f = 2, 8$  Hz;  $a = 20$  mm) ist eine Entmischung durch Konvektion festzustellen. Die

Konvektion ist von der Schichthöhe abhängig und bei Vorhandensein des großen Partikels stärker ausgeprägt, da der Impuls mit weniger dissipativem Verlust übergeben wird.

Knight [27] bestimmt die Entmischungsgeschwindigkeit  $v_{EM}$  über die mittlere Steiggeschwindigkeit der großen Partikel zwischen den einzelnen Oszillationszyklen in Abhängigkeit der Schichttiefe, Bild 4 c). Hier ist über alle Anregungsfrequenzen eine exponentielle Abnahme für größere Schichttiefen zu erkennen. Dies bestätigt die Ergebnisse von Pöschel [25]. In tieferen Schichten erfahren die Partikel in der Behältermitte eine geringere positive und an der Behälterwand eine geringere negative Entmischungsgeschwindigkeit, Bild 3. Dies wird mit der Möglichkeit des Platzwechsels der Teilchen in den Regionen zwischen Absinken und Aufsteigen begründet.

Die Konvektionsrollen sind nach Nahmady-Molinari [30] nicht bis zum Boden ausgebreitet. Dadurch ist nicht die Konvektion, sondern das Entmischungsverhalten aufgrund der Partikelträgheit hauptsächlich für die Entmischung verantwortlich. Es besteht eine Abhängigkeit zum Dichteverhältnis. Bei geringem Dichteverhältnis ist die Konvektion, bei großem Dichteverhältnis die Trägheit dominant.

Die Ausbreitung der Konvektionsrollen ist neben den oben beschriebenen Einflussfaktoren abhängig von der Wandreibung, wobei das genaue Zusammenspiel zwischen Reibkraft und Wandgeometrie Gegenstand aktueller Untersuchungen ist [24]. Nach Knight [24] verstärkt eine höhere Wandrauigkeit die Ausbreitung der Konvektionsrollen. Nahmady-Molinari [30] beobachtet eine Verzögerung des Aufsteigens der größeren Partikel bei größeren Reibkoeffizienten. Durch Änderung der Reibeigenschaften kann nach Brone [29] und Knight [27] die Konvektionsrichtung umgekehrt werden.

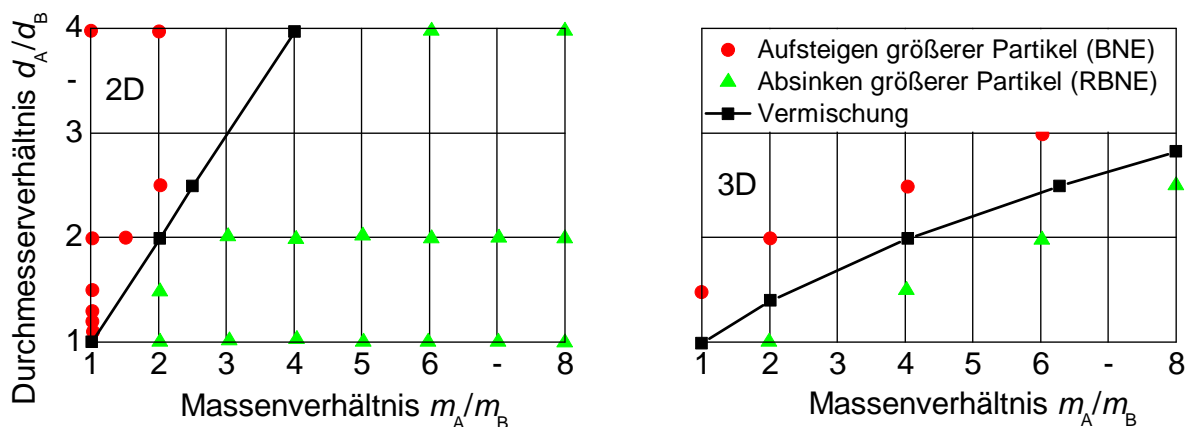
Bei Gemischen beeinflussen Kollisionen die Bewegung einzelner Partikel. Die zufällige Bewegung wird aufgrund der Ähnlichkeit zur Bewegung von Molekülen in einem Gas mit der granularen Temperatur beschrieben, die den Mittelwert der schwankenden Partikelgeschwindigkeiten ausdrückt. Diese basiert auf rein mechanischen Partikelkollisionen und entspricht der durchschnittlichen Energie der Partikelbewegung. Aus diesem Grund wird die granulare Temperatur zur Beschreibung des Entmischungsverhaltens herangezogen. [18, 31, 36]

Bei Erhöhung der Partikelbeschleunigungen durch die vertikale Oszillation geht das Gemisch in einen vibro-fluidisierten Zustand über und ist ab einer granularen Grenztemperatur  $\check{T}$  voll-

ständig fluidisiert. Die Grenztemperatur ist proportional zur Partikeldichte, den geometrischen Abmessungen der Partikel und der Schichthöhe ( $\check{T} \propto \rho_{\text{Partikel}} \cdot d_{\text{Partikel}}^3 \cdot h_{\text{Schicht}}$ ) und wird aus der kinetischen Energie der Partikel und dem potentiellen Energieäquivalent berechnet. Bei einem Gemisch aus zwei unterschiedlichen Partikelarten A und B kann die granulare Temperatur zwischen den Temperaturen  $\check{T}_A, \check{T}_B$  liegen. Dadurch entmischen die nicht fluidisierten Partikel. Unter Annahme gleicher partieller Schichthöhen kann die Entmischungsrichtung durch den Übergangszustand angegeben werden, **Gl.1.** [32, 33]

$$\left(\frac{d_A}{d_B}\right)^D \approx \frac{\check{T}_A}{\check{T}_B} = \frac{m_A \cdot d_A}{m_B \cdot d_B} \quad (1)$$

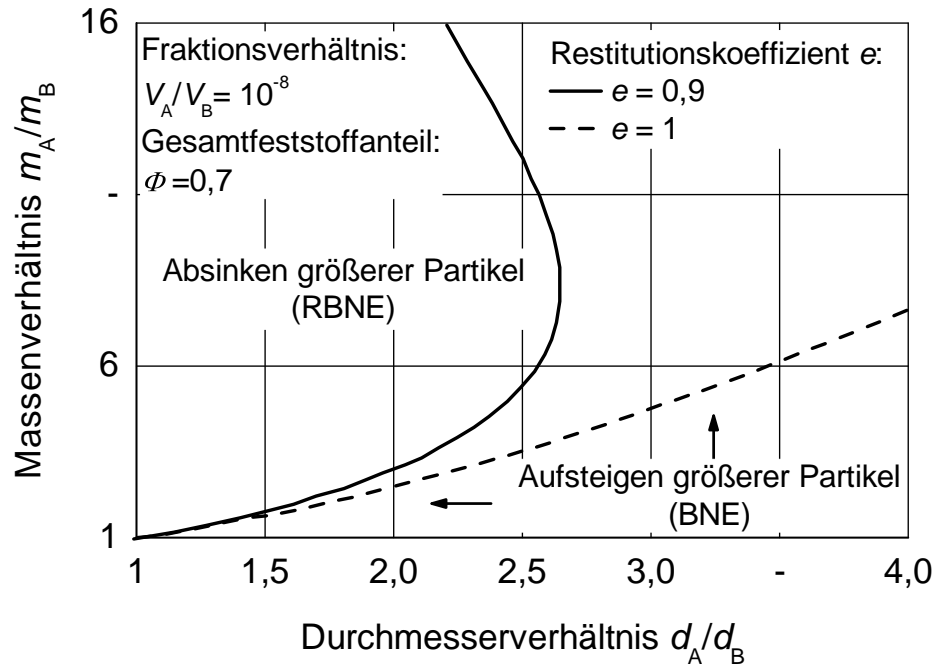
Die Dimension  $D$  beschreibt für den 2D-Fall einen linearen und für den 3D-Fall einen quadratischen Zusammenhang zwischen Massen- und Durchmesser Verhältnis, **Bild 5.** Das Verhältnis gibt die Entmischungsrichtung eines Zwei-Komponenten-Gemisches anhand der Partikelmassen und der -durchmesser an. [32]



**Bild 5:** Phasendiagramm zur Bestimmung der Entmischungsrichtung eines Gemisches aus zwei Komponenten auf Basis der granularen Temperatur nach [32]

Eine weitere Modellvorstellung [35] definiert die Entmischungsrichtung ausgehend von der Impulsbilanzgleichung durch die Gravitationskraft und der entgegenwirkenden stokeschen Reibungskraft. Basierend auf der granularen Temperatur geht Trujillo [35] von einem Ungleichgewicht der Energieverteilung im Gemisch aus und zerlegt die Gravitationskraft in eine pseudothermische Auftriebskraft, die der statischen Kompressionskraft und der Entmischung aufgrund von Hohlräumen entgegenwirkt. Für die Entmischung eines größeren Partikels, das von kleineren Partikeln gleicher Dichte umgeben ist, gibt es demnach einen kritischen Durchmesser, ab dem die Entmischung von einem Absinken in ein Ansteigen übergeht. Bei ungleichen Dichten kann die Entmischungsrichtung anhand der Durchmesser- und Massenverhältnisse in Abhängigkeit des Restitutionskoeffizienten  $e$  bestimmt werden, **Bild 6.** [18, 35]

Ein Vergleich zwischen den Verläufen (inelastisch, Restitutionskoeffizient  $e = 0,9$ ; elastisch  $e = 1$ ) zeigt den Einfluss der Partikelkollisionen auf das Entmischungsverhalten. Für inelastische Partikelkollisionen ist der Bereich, in dem RBNE auftritt, kleiner. [18, 35]



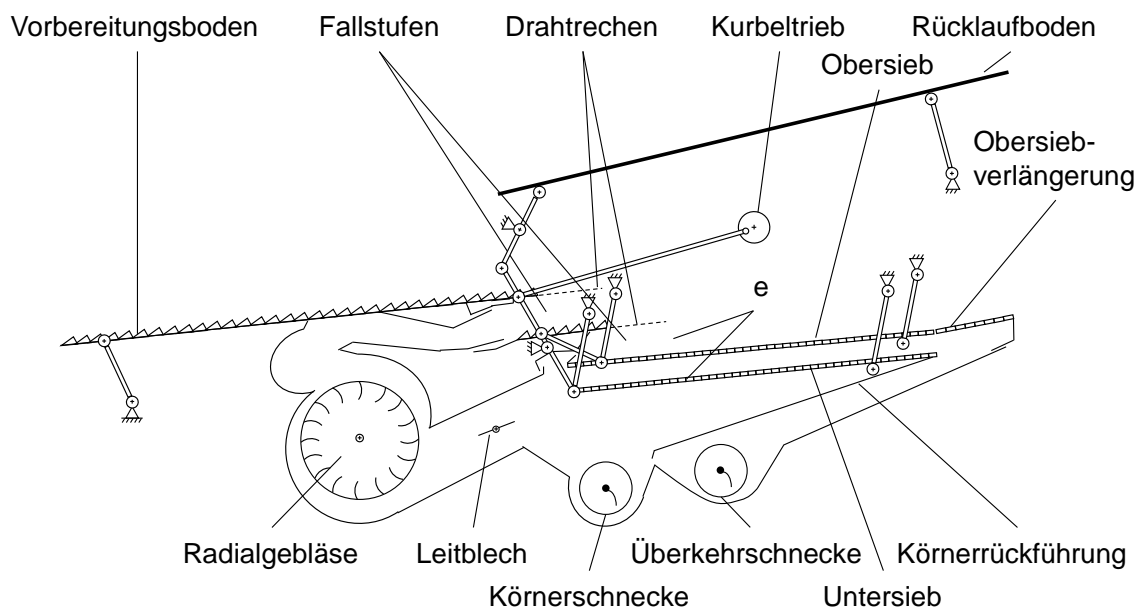
**Bild 6:** Phasendiagramm zur Bestimmung der Entmischungsrichtung (2D) eines Gemisches aus zwei Komponenten auf Basis der Impulsbilanzgleichung nach [35]

## 2.3 Konventionelle Mährescherreinigungsanlage

### 2.3.1 Aufbau und Funktionsweise

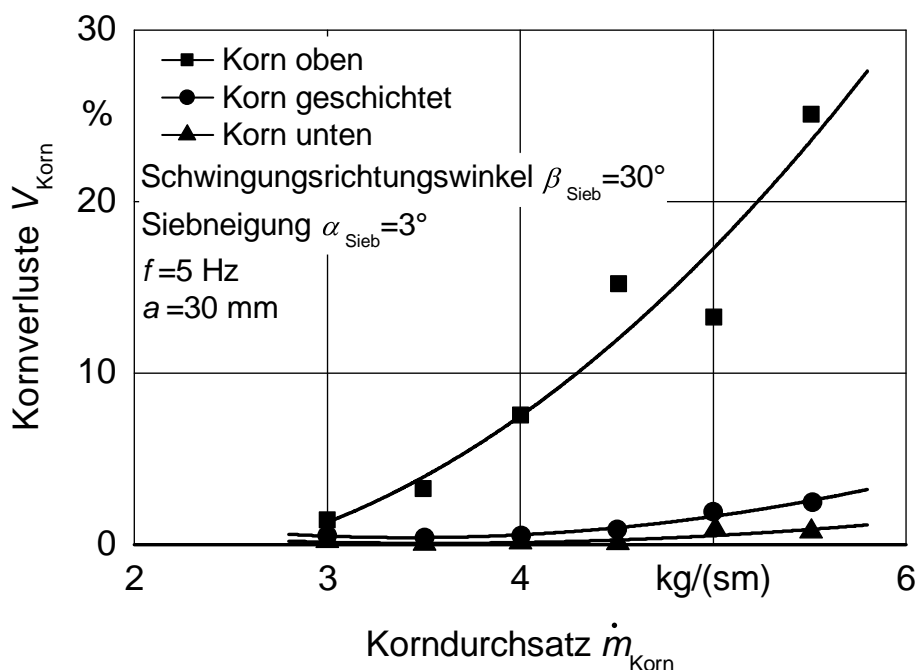
Die konventionelle Mährescherreinigungsanlage besteht aus zwei übereinander angeordneten, luftdurchströmten Sieben, einem Vorbereitungsboden (VB) als Zuführorgan und einer Fallstufe (FS) [9, 15, 37]. Dieser Aufbau bildet die Basis für weitere am Markt befindliche Reinigungsanlagen, die von Schwarz [13] nach ihrer Ausführung zusammengefasst werden. Hübner [37] entwickelt ein Modell zur Auslegung einer vertikal oszillierenden, gleichförmig rotierenden Reinigungsanlage und leitet Konstruktions- und Betriebsparameter ab, mit denen das Potential für eine Verbesserung des Trennprozesses vorhanden ist. Baumgarten [9] betont den hohen konstruktiven und baulichen Aufwand rotierender Reinigungsanlagen im Vergleich zu Flachsieben, weshalb diese nicht im Markt zu finden sind. Bei der Untersuchung eines Planetentrommelsortierers zur Trennung von Korn und NKB konnte Grobler [6] eine im Vergleich zum Flachsieb geringere Abscheideleistung feststellen. Kutzbach und Grobler [7] betonen den Vorteil der Neigungsunabhängigkeit von Verfahren, die zur Korntrennung zusätzliche Beschleunigungsfelder nutzen. Die Grundlagen müssen jedoch weiter ausgearbeitet werden. Die in **Bild 7** dargestellte

CLAAS Jet-Stream-Reinigung besitzt zwei luftdurchströmte Fallstufen. Diese stellt ein typisches Beispiel der am Markt eingesetzten Mährescherreinigungsanlagen dar.



**Bild 7:** Aufbau der CLAAS Jet-Stream-Reinigung [38]

Durch die annähernd linear oszillierende Bewegung des Vorbereitungsbodens (in Förderrichtung aufwärts, gegen die Förderrichtung abwärts) wird das Korn-NKB-Gemisch wurfweise Richtung Fallstufen gefördert [15]. Die dabei auftretende Vorentmischung bewirkt eine Schichtung NKB auf Korn, was eine Verbesserung der Reinigungsleistung bewirkt, **Bild 8** [39–46].



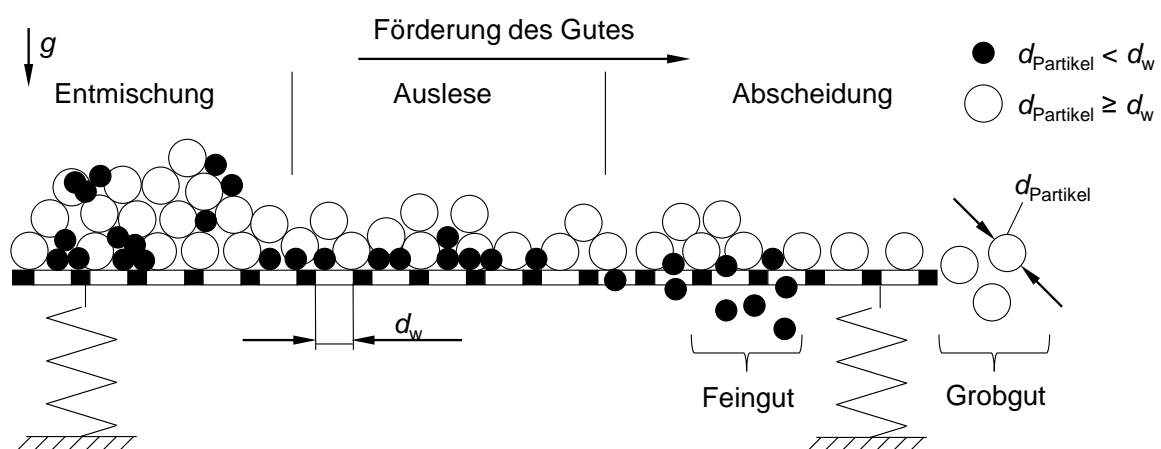
**Bild 8:** Einfluss der Schichtung des Reinigungsgutes auf die Entmischung nach [42]

Der Effekt der Vorentmischung auf dem als Schwingförderer ausgeführten Rücklaufboden (RLB) wird durch die Gutschichtumlagerung bei der Übergabe auf den Vorbereitungsboden teilweise aufgehoben [13].

In den Fallstufen findet aufgrund der von den Gebläsen erzeugten Luftgeschwindigkeit ein Querstrom-Sicht-Prozess statt. Ein Großteil der leichten Spreu- und Kurzstrohteile wird entsprechend ihrer Schwebegeschwindigkeiten pneumatisch getrennt und teilweise nach hinten ausgetragen. Die nicht von der Querstromsichtung getrennten Bestandteile gelangen auf das luftdurchströmte Obersieb. In einem Sieb-Sicht-Prozess werden die kleinen und schweren Bestandteile durch das Obersieb abgeschieden. Die analog zum Vorbereitungsboden annähernd linear oszillierende Bewegung ermöglicht die Abscheidung durch und die Förderung entlang des Siebs. Große Bestandteile, wie nicht vollständig ausgedroschene Ähren, werden über das Obersieb hinweg gefördert und können durch die Obersiebverlängerung abgeschieden werden. Dieser Durchgang wird dem Dreschprozess erneut zugeführt. Der vom Obersieb abgeschiedene Gutstrom erfährt auf dem Untersieb einen erneuten Sieb-Sicht-Prozess mit kleinerer Siebweite. Der Siebdurchgang wird zum Korntank, der Siebrückgang zusammen mit dem Gutstrom aus der Obersiebverlängerung dem Dreschprozess zugeführt. [9, 12, 13, 15, 16, 47]

### 2.3.2 Theorie des Trennprozesses

In der mechanischen Verfahrenstechnik gibt es verschiedene Möglichkeiten der Trennung disperser Stoffe in unterschiedliche Fraktionen, die den Stoffeigenschaften und Stoffverhältnissen entsprechen [48]. Der Trennprozess der Siebung kann nach Wessel [49] in Entmischung, Auslese und Abscheidung eingeteilt werden, **Bild 9**.



**Bild 9:** Der Siebprozess disperser Stoffe nach [49]



Sieb für die Entmischung verantwortlich, während die in Siebrichtung wirkenden Beschleunigungen die Förderung charakterisieren.

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

Für gleiche Wurfkennzahlen können Abweichungen im Bewegungsverhalten auftreten, da Amplitude und Frequenz die Entmischung verschieden beeinflussen [54]. Deshalb sollten neben der Wurfkennzahl immer auch die mechanischen Parameter angegeben werden.

Für ein horizontal ausgerichtetes, vertikal schwingendes Sieb ( $\beta = 90^\circ$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ) vereinfacht sich die Gleichung und wird als Froudezahl  $Fr$  ausgedrückt, **Gl. 3** [48, 53, 55–58]. Ab einer Froudezahl von  $Fr = 1$  wird die Normalkraft einer Einzelmasse im luftleeren Raum aufgehoben und das Gut geht in eine Wurfphase über [51]. In einem Froudezahl-Bereich von  $1 < Fr \leq 3$ , tritt ein Einfachwurf auf. [48, 53, 59]

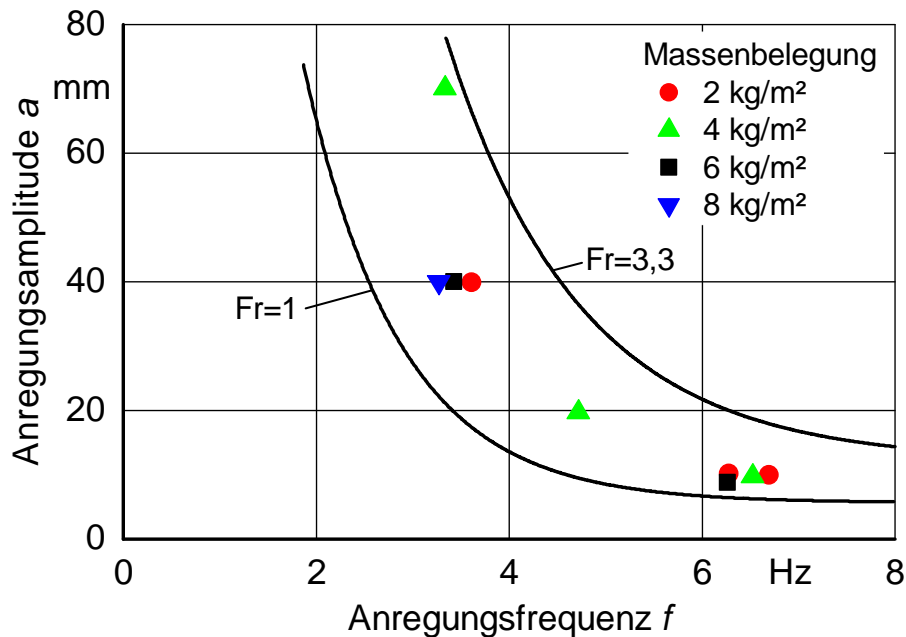
$$Fr = \frac{a \cdot \omega^2}{g} \quad (3)$$

Baader [51] merkt ein bedingt durch Kohäsion, Dämpfung und Elastizität abweichendes Bewegungsverhalten der Gutschicht von der Einzelmasse an. Dies tritt besonders bei größeren Schichthöhen auf. Durch die Verformung und dämpfenden Eigenschaften ist zum einen die theoretische Aufprallgeschwindigkeit und zum anderen die theoretische Abwurfgeschwindigkeit kleiner. Dies beeinflusst den Trennprozess negativ. Zusätzlich beeinflussen die oberen Schichten das Bewegungsverhalten der unteren. Dadurch verschieben sich die oben beschriebenen Wurfbereiche zu kleineren Froudezahlen. [48, 51]

Anhand theoretischer und praktischer Untersuchungen an einem Korn-Stroh-Haufwerk auf einer horizontalen, vertikal schwingenden Unterlage kann Baader [59] das für eine optimale Entmischung notwendige Verhältnis zwischen Anregungsamplitude und -frequenz in Abhängigkeit der Massenbelegung ermitteln, **Bild 11**.

Eine optimale Entmischung wird dann erreicht, wenn die Frequenz der eingeleiteten Impulse der Erregerfrequenz entspricht und die oberste Haufwerksschicht vom Einfachwurf in den Doppelwurf übergeht. Baader [59] merkt außerdem die Abhängigkeit der mechanischen Anregungsparameter auf die Fördergeschwindigkeit an. Die Schichthöhe und die zur Entmischung verfügbare Zeit werden durch die Fördergeschwindigkeit definiert. Somit beeinflussen diese den Trennprozess. [48, 59]

Weitere Einflussfaktoren sind die Oberflächenstruktur sowie die verwendeten Materialien [13, 42]. Der Vorbereitungsboden ist als Stufenboden ausgeführt. Die Stufen unterstützen die Förderung durch Verhindern des Zurückgleitens von Gut entgegen der Förderrichtung [42]. Ein Korndurchgang tritt nicht auf [42]. Rochell [60] betont den positiven Effekt der profilierten Oberfläche zur Erreichung einer konstanten Fördergeschwindigkeit.



**Bild 11:** Optimales Verhältnis zwischen Anregungsamplitude und -frequenz für ein Korn-Stroh-Haufwerk auf einer vertikal schwingenden Unterlage nach [59]

Die Durchgangswahrscheinlichkeit der Körner auf den Sieben ist exponentiell von der Maschenweite abhängig [48, 49]. Freye [15] weist auf einen erleichterten Korndurchgang bei größerer freier Siebfläche hin. Die Siebe im Mähdrescher sind aufgrund der einfachen Verstellung der Öffnungsweite und somit auch der freien Siebfläche als Lamellensiebe ausgeführt. Durch die Lamellen bildet sich ebenfalls eine perforierte Oberfläche aus, die die Förderung zusätzlich unterstützt. Die Reihenschaltung von Ober- und Untersieb führt zu einer Verbesserung der Trennschärfe [48].

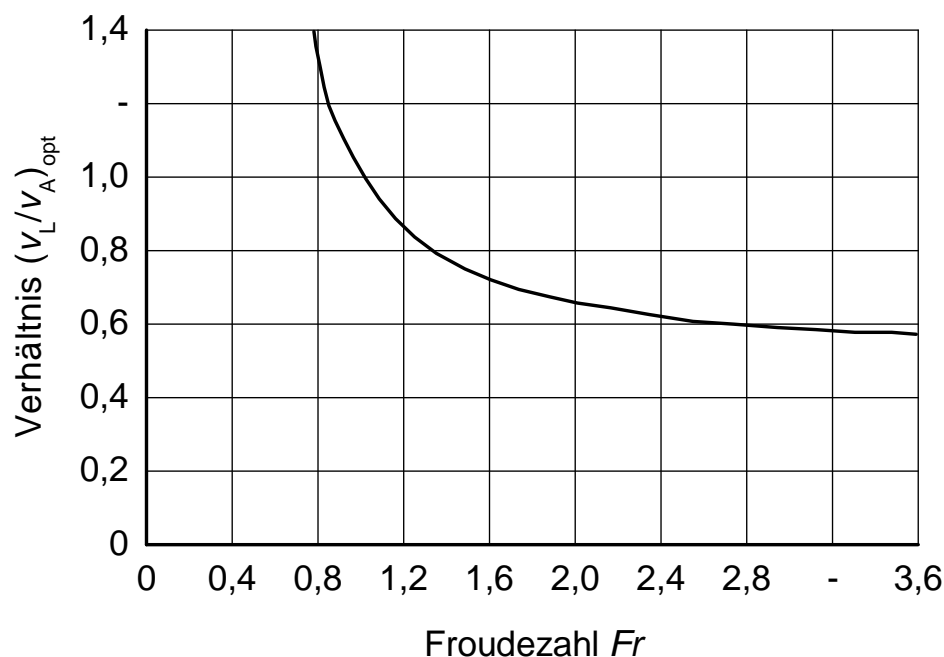
Analog zu den Teilprozessen beim Siebprozess teilt Wessel [61] den Sichtprozess in Auflösen der Bindekräfte des Haufwerks, Aufspalten in Grob- und Feingut anhand der strömungs- und masseabhängigen Kräfte sowie Abscheiden der verschiedenen Komponenten ein. Die Luftströmung durch die Siebe im Mähdrescher wird mit der Luftgeschwindigkeit, -verteilung und Anströmrichtung eindeutig beschrieben und bewirkt bei gleichen mechanischen Parametern eine längere Flugphase des Haufwerks und eine Lageänderung der Teilchen [47, 53, 57].

Beide Verfahren müssen nach Damm [53] zur optimalen Körnertrennung im Mähdrescher Anwendung finden. Die Dauer der Flugphase verschiedener Bestandteile des Haufwerks ist aufgrund der Abhängigkeit von der wirkenden Strömungskraft und den Stoffeigenschaften unterschiedlich. Die verschiedenen Flugphasen bewirken eine Relativbewegung der Bestandteile, was zu einer Entmischungswirkung führt. Gleichzeitig reduziert die Luftströmung die Aufprallgeschwindigkeit.

Damm [53] entwickelt eine auf empirischen Durchdringungszeit-Versuchen basierende Gleichung zur Berechnung der optimalen Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Froudezahl  $Fr$ , **Gl. 4, Bild 12**. Dabei nutzt er zur Bewertung der Korntrennung die Durchgangszeit  $t_{95}$ , nach der 95 % der Körner abgeschieden sind. Die Luftgeschwindigkeit  $v_L$  wird auf die Luftgeschwindigkeit am Ausdehnungspunkt  $v_A$  bezogen. [53]

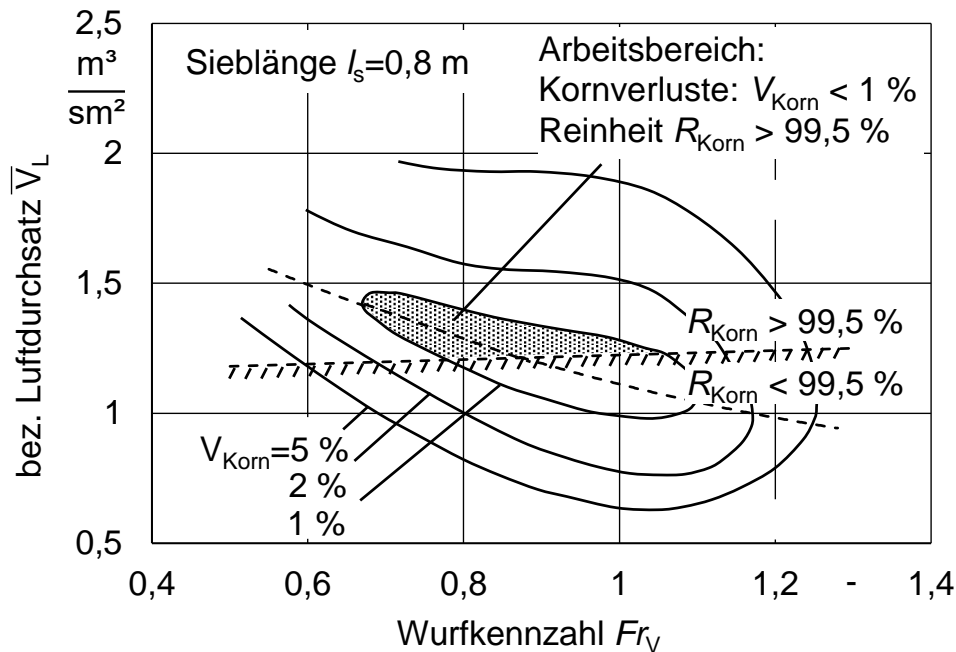
$$\left(\frac{v_L}{v_A}\right)_{\text{opt.}} = 0,526 + \frac{0,288}{(Fr - 0,3)^{1,5}} \quad (4)$$

Eine optimale Entmischung bei einer Froudezahl von  $Fr = 1$  tritt dann ein, wenn die Normalkraft des Haufwerks durch die Strömungskraft aufgehoben wird  $(v_L/v_A)_{\text{opt.}} = 1$ , Bild 12. Bei einer ausreichend hohen Luftgeschwindigkeit hat die Schichthöhe keinen Einfluss auf die Entmischung und Kornabscheidung. [53]



**Bild 12:** Gegenseitige Abhängigkeit der Froudezahl und der Luftgeschwindigkeit auf Basis einer empirisch ermittelten Gleichung nach [53]

Freya [15] kann ebenfalls eine in Grenzen mögliche Austauschbarkeit der mechanischen und pneumatischen Parameter feststellen, **Bild 13**. Diese ist einerseits durch die steigenden Kornverluste bei zu hoher, andererseits durch eine Steigerung der Verunreinigungen bei zu geringer pneumatischer Anregung begrenzt.



**Bild 13:** Austauschbarkeit der mechanischen und pneumatischen Anregungsparameter nach [15]

### 2.3.3 Einfluss- und Bewertungsgrößen

Die Trennqualität  $Q_i$  ist von den Stoffeigenschaften der zu trennenden Gemische und von den auftretenden Zuständen  $E_j$  (vermischt, entmischt, etc.) abhängig und kann allgemein über die Eigenschaftsfunktion beschrieben werden, **Gl. 5**. Bei bekannter Eigenschaftsfunktion und bekannten Stoffeigenschaften ist eine Bestimmung der Trennqualität durch die Messung der vorliegenden Zustände möglich. [48, 62, 63]

$$Q_i = f(E_1, E_2, \dots, E_j) \quad (5)$$

Die geforderten Zustände der dispersen Stoffe  $E_i$  werden wiederum durch die Trennprozesse und die eingestellten Prozessparameter  $P_j$  beeinflusst und mit der Prozessfunktion ausgedrückt, **Gl. 6**. [48, 64]

$$E_i = f(P_1, P_2, \dots, P_j) \quad (6)$$

Die Trennqualität der Mähdrescherreinigungsanlage wird anhand der Kornverluste  $V_{Korn}$  und der Kornreinheit  $R_{Korn}$  bewertet. Die Kornverluste definieren sich aus der Masse an Verlust-

körnern  $m_{\text{Korn},V}$ , die aus der Reinigungsanlage herausgetragen werden. Diese wird auf die Gesamtmasse an Korn  $m_{\text{Korn},\text{ges}}$  in der Reinigungsanlage bezogen, **Gl. 7.** [13, 15].

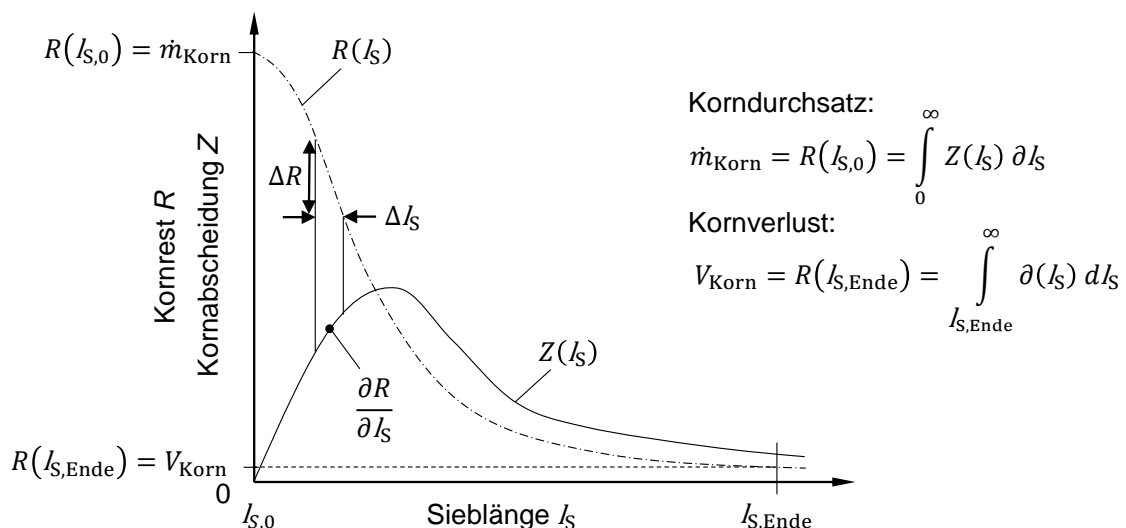
$$V_{\text{Korn}} = \frac{m_{\text{Korn},V}}{m_{\text{Korn},\text{ges}}} \cdot 100 \% = \frac{m_{\text{Korn},V}}{m_{\text{Korn},V} + m_{\text{Korn},\text{SK}}} \cdot 100 \% \quad (7)$$

Die Gesamtmasse setzt sich aus der Verlustkornmasse und dem Untersiebdurchgang  $m_{\text{Korn},\text{SK}}$  zusammen. Die Kornreinheit  $R_{\text{Korn}}$  beschreibt den Anteil der NKB im Korntank und definiert sich aus dem Quotienten der abgeschiedenen NKB  $m_{\text{NKB},\text{SK}}$  und der NKB-Gesamtmasse  $m_{\text{NKB},\text{ges}}$ . Die Gesamtmasse besteht aus der herausgetragenen  $m_{\text{NKB},\text{Abgang}}$  und der vom Untersieb abgeschiedenen  $m_{\text{NKB},\text{SK}}$  NKB-Masse, **Gl. 8.** [13, 15]

$$R_{\text{Korn}} = 100 \% \cdot \left(1 - \frac{m_{\text{NKB},\text{SK}}}{m_{\text{NKB},\text{ges}}}\right) = 100 \% \cdot \left(1 - \frac{m_{\text{NKB},\text{SK}}}{m_{\text{NKB},\text{Abgang}} + m_{\text{NKB},\text{SK}}}\right) \quad (8)$$

Weitere Größen zur Bewertung der Prozesse sind die Korn- und NKB-Anteile in der Überkehr (**Anhang 8.1**) sowie die Durchgangslänge  $l_{80}$  und die Durchgangszeit  $t_{80}$ . Diese definieren die Länge bzw. Zeit bei der 80 % der Körner abgeschieden sind.

Böttinger [12, 65, 66] beschreibt den theoretischen Verlauf der Kornabscheidung und des Restkorns über der Sieblänge. Die Kornabscheidung ist als negative erste Ableitung des Restkornverlaufes definiert. Auf Basis der Verläufe kann der Korndurchsatz  $\dot{m}_{\text{Korn}}$  und der Kornverlust  $V_{\text{Korn}}$  aus den Integralen der Kornabscheidung mit den jeweiligen Integrationsgrenzen berechnet werden, **Bild 14.**



**Bild 14:** Theoretischer Verlauf der Abscheidung und des Restkorns nach [12]

Wie aus Gl. 5 und 6 ersichtlich ist, beeinflussen die Stoffeigenschaften und die Prozessparameter die Arbeitsweise und damit die Leistungsfähigkeit der Reinigungsanlage. Des Weiteren ist entsprechend der Eigenschafts- und Prozessfunktion eine gegenseitige Beeinflussung möglich.

Der Einfluss der Stoffeigenschaften, der Konstruktions- und Einstellungsparameter sowie der vorgeschalteten Funktionsgruppen wurde in vielen Untersuchungen analysiert [11, 12, 15, 47, 54, 57, 67, 68].

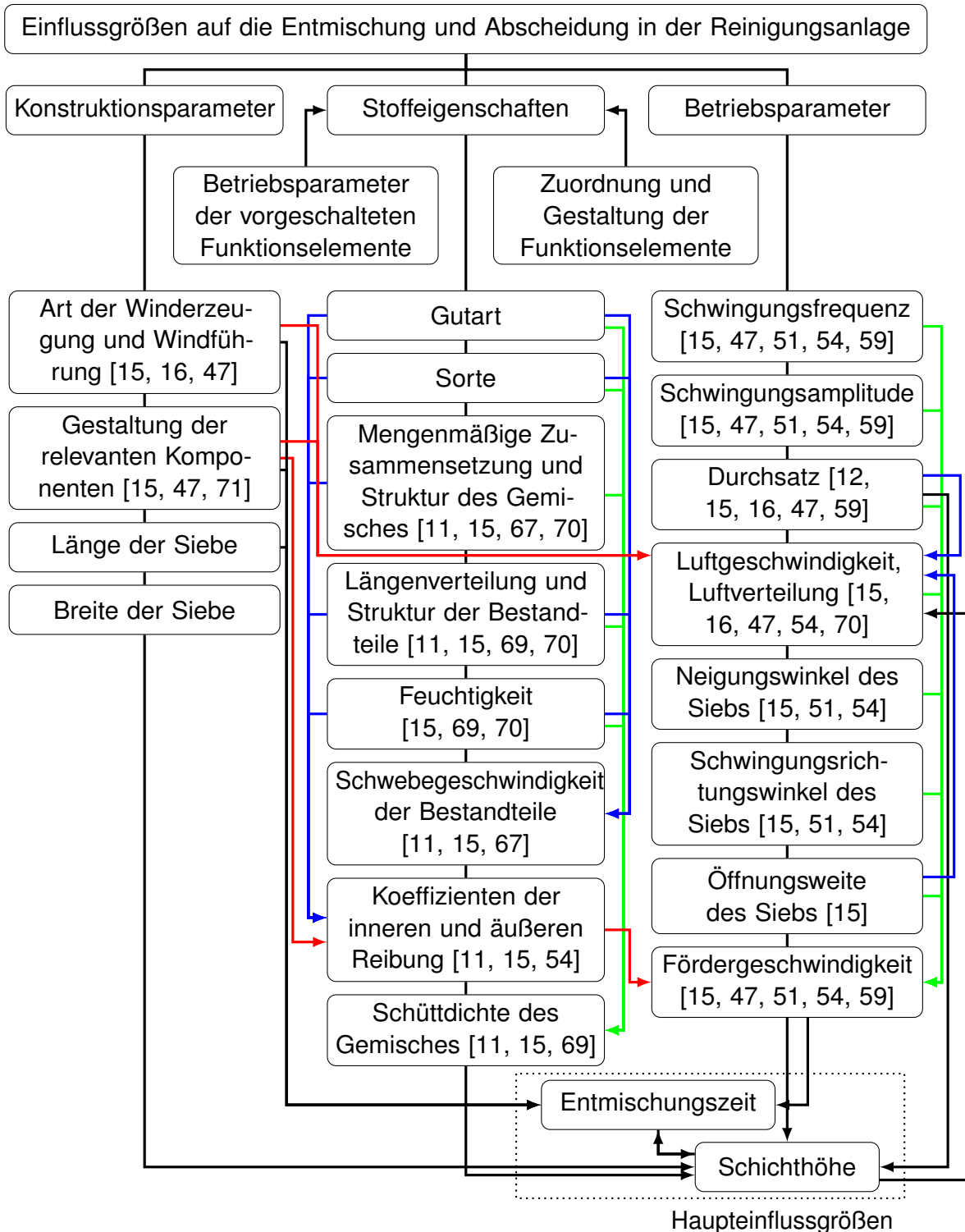
Zehme [57] sortiert die Einflussgrößen in die Hauptgruppen Konstruktions-, Stoff- und Betriebsparameter und beschreibt die Abhängigkeiten der Größen untereinander, **Bild 15**. Die Einflussgrößen sind um die zur Verfügung stehende Entmischungszeit erweitert. Diese definiert die Zeit, die zur Entmischung verfügbar ist und ist zusammen mit der Schichthöhe eine charakteristische Haupteinflussgröße, **Kapitel 2.3.2**. Die Haupteinflussgrößen werden primär durch die Fördergeschwindigkeit beeinflusst. Die Gestaltung der Siebe beeinflusst über die Reibkoeffizienten die Fördergeschwindigkeit ebenso wie die mechanischen und pneumatischen Betriebsparameter. Die Schichthöhe ist ebenfalls vom Durchsatz abhängig. Diese Parameter beeinflussen die Luftverteilung und die lokale Luftgeschwindigkeit in der Reinigungsanlage. Dadurch entsteht eine wechselseitige Abhängigkeit. [15, 16, 47, 57]

Huisman [69] erläutert die Abhängigkeit der Trennqualität vom Feuchtegehalt, der Längenverteilung und den Gleitreibungszahlen von Stroh, dem Elastizitätsmodul von Einzelhalmen und der Schüttdichte des Strohhauferwerks. Die Verteilung der Partikelgröße beeinflusst die Strohdichte und hat einen großen Einfluss auf die Korn-Stroh-Trennung. Signifikante Korrelationen zwischen weiteren gemessenen Stoffeigenschaften und der Trennqualität konnten nicht ermittelt werden.

Persson [67] betont den Einfluss der unterschiedlichen Stoffeigenschaften auf den Reinigungsvorgang. Er hebt die Größe der Partikel beim Siebprozess und die Schwebegeschwindigkeit beim Sichtprozess als charakteristische Eigenschaft hervor. Die Schwebegeschwindigkeit nicht kugelförmiger Partikel ist richtungsabhängig. Die Stoffeigenschaften sind für verschiedene Erntejahre und Bestände unterschiedlich, weshalb für bestands- und jahrgangsübergreifende Vergleichsmessungen eine Referenzmaschine verwendet werden muss [11, 67, 68].

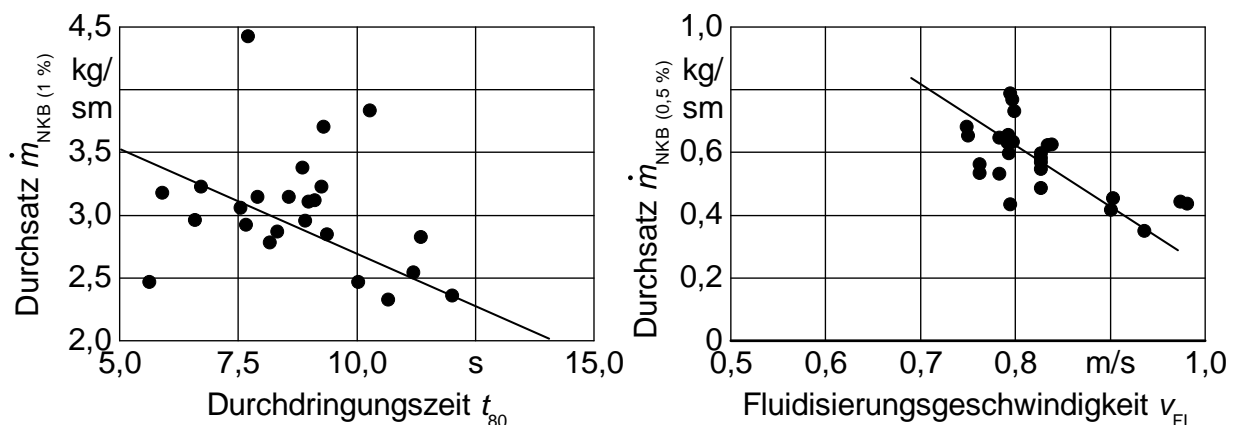
Spittel [70] charakterisiert die geometrischen Abmessungen sowie die Masse, Oberflächenbeschaffenheit und den Trockensubstanzgehalt der Einzelbestandteile als die für den Trennprozess relevanten Stoffeigenschaften. Er untersucht die Abhängigkeit der Trennqualität vom NKB-Anteil und der mittleren Längenverteilung an einem Prüfstand. Eine Vergrößerung des NKB-Anteils bewirkt eine Verringerung der Kornverluste und eine Erhöhung der Verunreinigungen. Dies wird durch die ähnlichen Abmessungen von Korn und NKB und mit einer Vergleichmäßigung der Gutschicht begründet. Durch eine Erhöhung der mittleren Längenverteilung wird die Abschei-

dung durch das Sieb erschwert, was die Kornreinheit erhöht. Gleichzeitig steigen aufgrund der größeren notwendigen Fluidisierungsgeschwindigkeit die Kornverluste an.



**Bild 15:** Einflussgrößen und deren Abhängigkeiten auf den Trennprozess nach [57]; **rot:** Gegenseitiger Einfluss von Konstruktions-, Betriebsparameter und Stoffeigenschaften; **blau/grün:** Einfluss innerhalb der Konstruktions-, Betriebsparameter und Stoffeigenschaften; **schwarz:** Einfluss auf/von Entmischungszeit und Schichthöhe

Zur Beurteilung der Leistung der Trennprozesse unterteilt Beck [11, 68] wichtige Stoffeigenschaften in drei Bereiche. Einfach physikalische Stoffeigenschaften lassen sich aus einfachen Messungen gewinnen und bilden Einzelkorneigenschaften ab, während Eigenschaften des Haufwerks mit komplex physikalischen Stoffeigenschaften beschrieben werden. Technologische Stoffeigenschaften werden aus Teilprozessen abgeleitet und charakterisieren nicht mehr analytisch beschreibbare Abhängigkeiten als Kennwert. Beck [11, 68] weist darauf hin, dass die einfach physikalischen Stoffeigenschaften die Trennqualität beeinflussen, aufgrund der komplexen Abhängigkeiten im Haufwerk jedoch keine eindeutige Korrelation aufweisen. Dies zeigt die Notwendigkeit, die komplex physikalischen und technologischen Stoffeigenschaften mit trennprozessnahen Messverfahren zu untersuchen und bei der Bewertung der Trennqualität zu berücksichtigen. Ein Vergleich der Durchgangszeit und der Fluidisierungsgeschwindigkeit mit der Schüttler- und Reinigungsleistung zeigt lineare Abhängigkeiten, **Bild 16**. Die Leistung ist hier als NKB-Durchsatz definiert, bei dem ein festgelegter Kornverlust (Schüttler:  $V_{\text{Korn}} = 1\%$ ; Reinigungsanlage:  $V_{\text{Korn}} = 0,5\%$ ) erreicht wird.

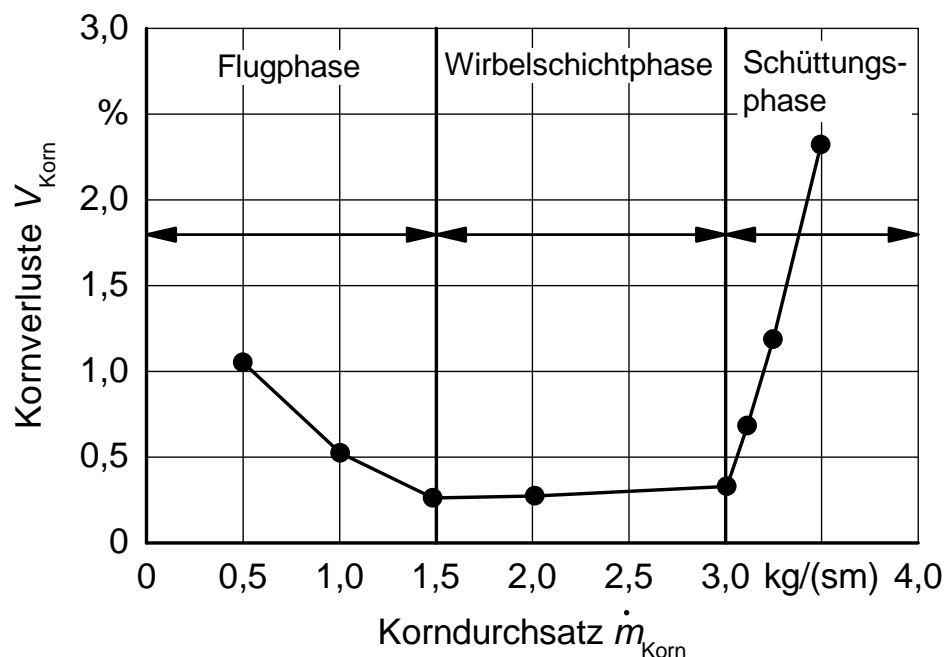


**Bild 16:** Abhängigkeit der Durchdringungszeit und der Fluidisierungsgeschwindigkeit auf die Schüttler- und Reinigungsleistung nach [11, 68]

Böttinger [12] weist auf die große Abhängigkeit der Trennqualität vom Gutdurchsatz hin. Die Leistungsfähigkeit der Mährescherreinigungsanlage wird mit dem NKB-Durchsatz  $\dot{m}_{\text{NKB}}$  angegeben, bei dem die Kornverluste den Wert  $V_{\text{Korn}} = 0,5\%$  erreichen. [11, 12]

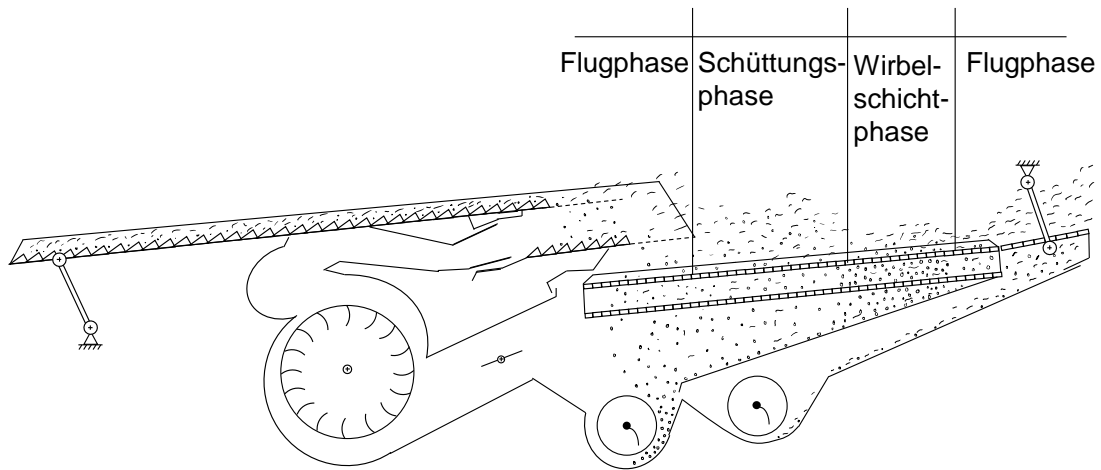
Eine Möglichkeit der Erhöhung des spezifischen Durchsatzes bei gleichzeitig niedrigen Kornverlusten ist der Einsatz eines Strohrechens am Ende des Vorbereitungsbodens. Durch die zusätzliche mechanisch-pneumatische Vorsortierung ist bei großen Schichtdicken eine verbesserte Reinigungsleistung trotz späterer Aufgabe auf das Obersieb nachgewiesen. [71]

Freye [15] untersucht die Förderung und die Abscheidung in Abhängigkeit der Siebfläche, den Stoffeigenschaften sowie den pneumatischen und mechanischen Parametern. Die Abhängigkeit der Kornverluste vom Durchsatz zeigt die drei Bereiche Flug-, Wirbelschicht- und Schüttungsphase, **Bild 17**. Diese Bereiche sind stark von der Luftströmung abhängig. In der Flugphase bildet sich keine geschlossene Gutschicht aus. Die zu hohe Luftströmung sorgt für einen Kornaustrag. Die Wirbelschichtphase charakterisiert einen vollständig fluidisierten Zustand der geschlossenen Gutschicht auf dem Sieb. Dies hat geringe Kornverluste zur Folge. Bei weiterem Anstieg des Durchsatzes bildet sich die Schüttungsphase aus, die durch eine unvollständige Auflockerung der Gutschicht infolge der hohen Siebbelastung gekennzeichnet ist. [15, 41]



**Bild 17:** Durchsatz- und strömungsabhängige Betriebsphasen nach [15, 41]

Dahany [16] beschreibt die Ausbildung der Phasen auf dem Obersieb der Reinigungsanlage. Durch die Abscheidung der Körner verringert sich die Gutbeladung auf dem Sieb, Bild 14. Dadurch bedingt und durch die Gebläseanordnung bildet sich lediglich ein kleiner Bereich der Wirbelschichtphase auf dem Sieb aus, **Bild 18**. Eine verbesserte Entmischungswirkung stellt sich mit einem größeren Bereich der Wirbelschichtphase ein. Um dies zu erreichen, muss die Luftverteilung der Siebbelastung angepasst sein. Dies bedeutet eine über der Sieblänge abfallende Luftgeschwindigkeit bei einer konstanten Strömungsrichtung. Generell bewirkt die Strömungskomponente in Förderrichtung eine Erhöhung der Fördergeschwindigkeit. Die Normalkomponente bewirkt eine bessere Auflockerung und reduziert damit die Kornverluste. [11, 16, 47, 54]



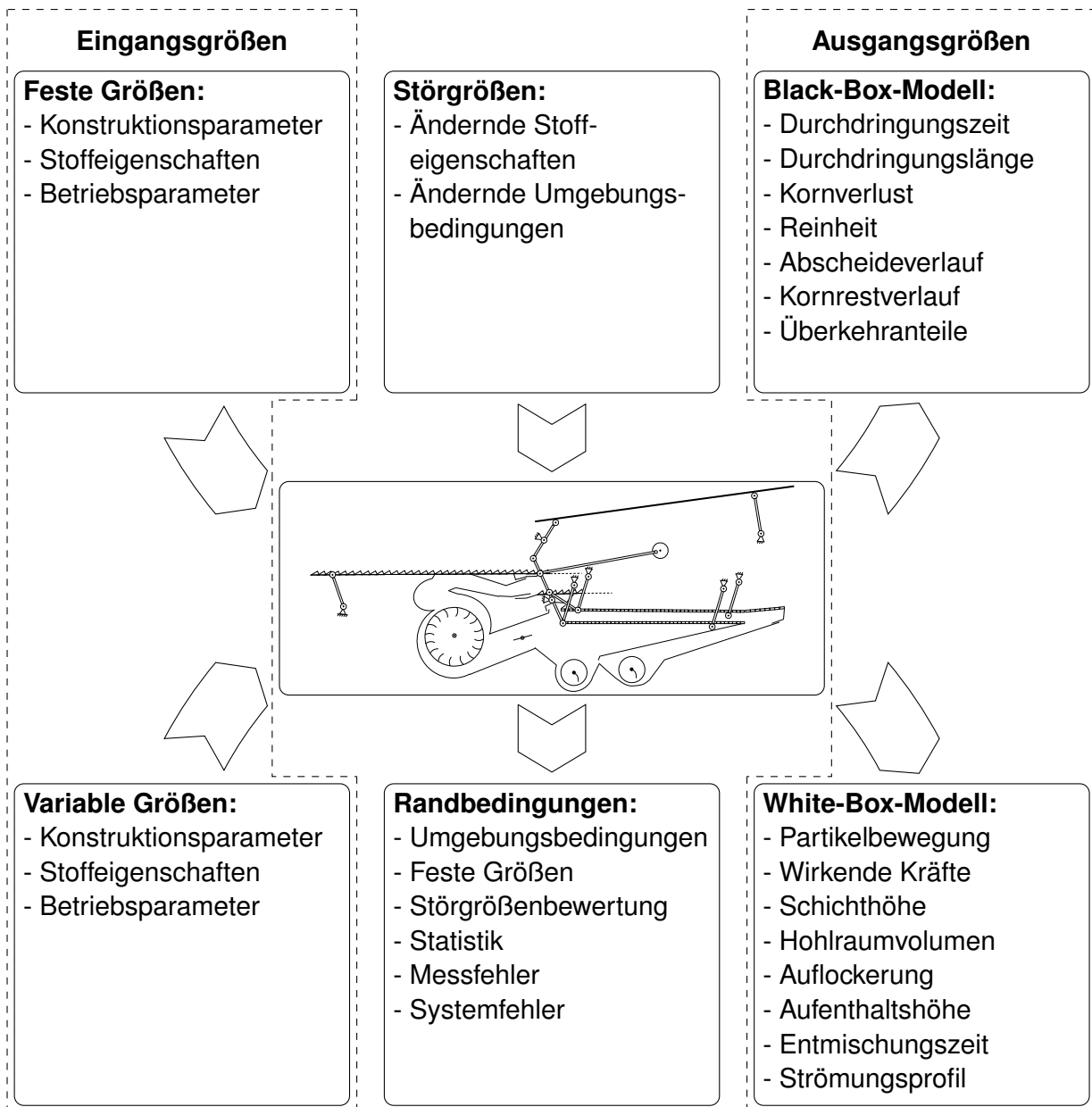
**Bild 18:** Bereiche der Flug-, Wirbelschicht- und Schüttungsphase auf dem Obersieb nach [16]

Zhao [47] bestätigt die Aussagen von Dahany und schlägt eine abfallende Luftgeschwindigkeitsverteilung über dem Sieb vor. Der gesamte Luftdurchsatz sollte dabei abhängig von der Siebbeladung gewählt werden. Eine größere Gutschicht benötigt eine größere Luftgeschwindigkeit zur Auflockerung. Bei zu hoher Luftgeschwindigkeit wird der Korndurchgang durch das Sieb behindert und das Gemisch zu schnell gefördert. Er empfiehlt für hohe Korndurchsätze eine optimale Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 4,5 - 5 \text{ m/s}$  im vorderen und  $v_L = 2 - 2,5 \text{ m/s}$  im hinteren Siebbereich.

## 2.4 Betriebsverhalten

Die Methode zur Versuchsdurchführung kann mit einem Blockdiagramm beschrieben werden, **Bild 19**. Bei der Auswertung mit den in **Kapitel 2.3.3** beschriebenen Bewertungsgrößen wird der verfahrenstechnische Prozess als Black-Box-Modell betrachtet, indem die Stör-, Eingangs-, Ausgangsgrößen und Randbedingungen berücksichtigt werden. Mithilfe dieser Größen wird der verfahrenstechnische Prozess bewertet.

Eine direkte Analyse des ablaufenden Prozesses bedeutet eine Auswertung nach dem White-Box-Modell. Hierbei wird das genaue Wirken von Einflussgrößen mithilfe prozessbeschreibender Bewertungsgrößen untersucht. Eine Versuchsauswertung nach dem White-Box-Modell ist aufgrund unzureichender Messtechnik aufwendiger [72–75]. Neben dem hohen Erkenntnisgewinn ist ebenfalls die Forderung der Validierung von gekoppelten DEM-CFD-Simulationen Treiber für die Untersuchung der verfahrenstechnischen Prozesse nach dem White-Box-Modell [3, 72, 76, 77].



**Bild 19:** Blockdiagramm zur allgemeinen Methode der Versuchsdurchführung und den wirkenden Eingangs-, Stör- und Ausgangsgrößen

In **Tabelle 1** sind die prozessbeschreibenden Bewertungsgrößen für die Teilprozesse Förderung, Entmischung und Abscheidung auf einem luftdurchströmten Sieb dargestellt. Die Partikelbewegung ist für diese Teilprozesse die dominante Bewertungsgröße. Aus diesem Grund sollte deren messtechnische Untersuchung primäre Bedeutung haben [78]. Des Weiteren muss aufgrund der Komplexität des Strömungsprofils und dessen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Reinigungsgutes die Luftströmung gesondert untersucht werden.

**Tabelle 1:** Prozessbeschreibende Bewertungsgrößen der Teilprozesse Entmischung, Abscheidung und Förderung auf einem luftdurchströmten Sieb

Entmischung, Abscheidung	Förderung
- Partikelbewegung normal zum Sieb: Sinkgeschwindigkeit, -beschleunigung	- Partikelbewegung in Siebrichtung: Fördergeschwindigkeit, -beschleunigung
- Wirkende Kräfte normal zum Sieb	- Wirkende Kräfte in Siebrichtung
- Zeit- und ortsabhängige Schichthöhe	- Durchsatz
- Zeit- und ortsabhängiges Hohlraumvolumen	
- Zeit- und ortsabhängiges Auflockerungsverhältnis	
- Mittlere Aufenthaltshöhe der Bestandteile	
- Zeit zur Entmischung und Abscheidung	- Zeit zur Förderung
- Luftgeschwindigkeit und -verteilung	

### 2.4.1 Bewegungsverhalten

Mehrere Arbeiten [10, 13, 15, 45, 60, 78–80] nutzen Bildaufnahmen zur Bestimmung der Schichthöhe, der Auflockerung und der Analyse der Bewegung der Bestandteile in unterschiedlichen Bereichen der Reinigungsanlage. Mümken [8] nutzt Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen zur Bestimmung der Aufprallrichtung bei der Festigkeitsuntersuchung von Weizen. Bernhardt [79] merkt die einfache Umsetzung und die gleichzeitige Aufnahme von Schichthöhe und Fördergeschwindigkeit bei der Verwendung von Bildaufnahmen an. Dem gegenüber steht der hohe Aufwand in der Auswertung. Mithilfe der Kontinuitätsgleichung [81] kann mit der Fördergeschwindigkeit  $v_F$  und der Schichthöhe  $h_{\text{Schicht}}$  bei gegebenem spezifischem Gesamtdurchsatz  $\dot{m}_{\text{ges}}$  die mittlere Haufwerksdichte  $\rho_{\text{Schicht}}$  berechnet werden, **Gl. 9**.

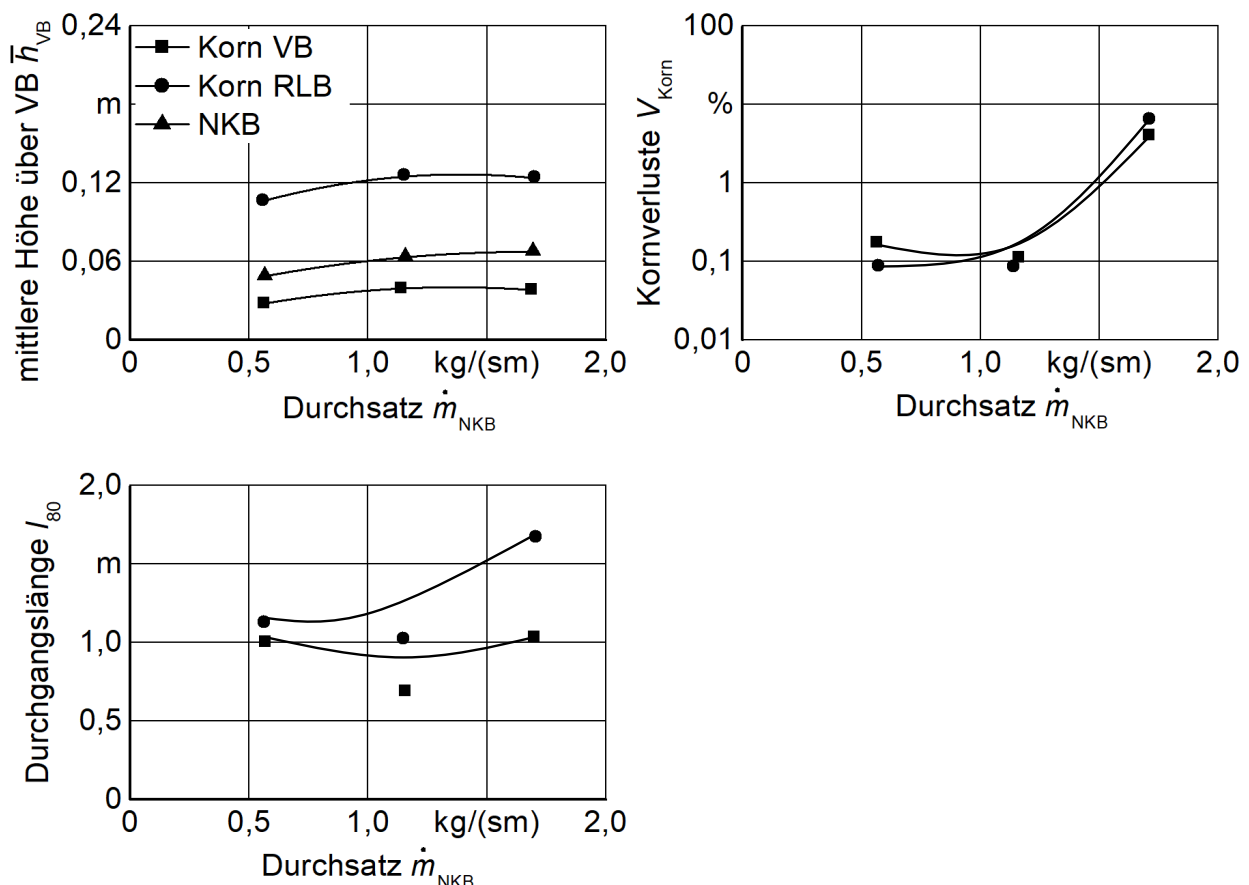
$$\rho_{\text{Schicht}} = \frac{\dot{m}_{\text{ges}}}{h_{\text{Schicht}} \cdot v_F} \quad (9)$$

Die Anzahl der über der gesamten Sieblänge  $l_S$  auf das Gemisch einwirkenden Impulse  $I_A$  wird aus der Fördergeschwindigkeit  $v_F$  und der Anregungsfrequenz  $f$  berechnet, **Gl. 10**. Bernhardt [79] nutzt diese zusätzlichen Bewertungsgrößen zur Bestimmung der optimalen Anregungsform bei einer elliptischen Anregung der Schüttlerhorden.

$$I_A = \frac{l_S \cdot f}{v_F} \quad (10)$$

Schwarz [13] listet als mögliche Messtechnik zur Untersuchung der Entmischung von Korn und NKB die Hochgeschwindigkeitskamera, die Particle Image Velocimetry (PIV) sowie die Gamma-, Röntgen- und Terahertzstrahlung auf und teilt diese nach den Messverfahren in Partikeltracking und Durchstrahlung ein. Die Zielgrößen beider Messverfahren sind zeitabhängige Raumkoordi-

naten, mit denen der Entmischungsverlauf quantitativ, örtlich und zeitlich aufgelöst werden kann. Mithilfe von Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen kann die Fördergeschwindigkeit und die Auflockerung auf dem Vorbereitungsboden untersucht werden. Zur Bewertung der Entmischung auf dem Vorbereitungsboden wird die mittlere Aufenthaltshöhe  $\bar{h}_{VB}$  der Körner in der Korn-NKB-Schicht optisch bestimmt. Durch eine Blaufärbung der vom Rücklaufboden kommenden Körner ist dies für beide Gutströme separat möglich. Rochell [60] färbt zur besseren Bestimmung der Fördergeschwindigkeit ebenfalls Gutanteile ein. Vergleiche der mittleren Aufenthaltshöhe  $\bar{h}_{VB}$  zur Durchgangslänge  $l_{80}$  und zum Kornverlust  $V_{Korn}$  zeigen den Zusammenhang und bekräftigen die Bewertung der Förderung und Entmischung anhand der mittleren Aufenthaltshöhe, **Bild 20**. Eine geringere mittlere Aufenthaltshöhe bedeutet einen höheren Entmischungsgrad. Durch die Analyse vor Eintritt in die Fallstufe kann das Prozessverständnis gesteigert werden. Diese Auswertung setzt geeignete und robuste Algorithmen zur Bildverbesserung, Detektion und Klassifikation voraus. [13, 78, 82]



**Bild 20:** Eignung der mittleren Aufenthaltshöhe von Korn und NKB auf dem Vorbereitungsboden zur Bewertung der Abscheidung nach [13]

Bei der Untersuchung mittels Hochgeschwindigkeitskamera wird aufgrund der eingeschränkten optischen Zugänglichkeit das Bewegungsverhalten wandnaher Bestandteile untersucht und

für das Bewegungsverhalten des gesamten Gutgemisches als charakteristisch angenommen. Dies ist für Vergleichsuntersuchungen akzeptabel [79]. Durch die fehlende dritte Dimension ist der Erkenntnisgewinn jedoch eingeschränkt [27, 72]. Aufgrund der Wandreibung kann das Bewegungsverhalten der wandnahen Bestandteile von dem Bewegungsverhalten der im Gut befindlichen Partikel abweichen [76]. Bei der Förderung einer Weizenkornschtüttung kann Rochell [60] eine Voreilung der Körner an der Wand nach einer Förderlänge von  $l_F = 1$  m feststellen. Dieses Phänomen tritt bei einem Spreu-Kurzstroh-Gemisch nicht auf, was bei der Kornschüttung mit einer im Vergleich zur inneren Reibung des Gutes höheren Wandreibung begründet werden kann. Bei der Untersuchung des Abscheideverhaltens auf Schüttlerhorden kann Böttinger [12] eine verzögerte Abscheidung an den äußeren Horden nachweisen. Aufgrund der Seitenwände ist das Bewegungsverhalten der Gutbestandteile behindert und die Abscheidung setzt verzögert ein.

Bei der Untersuchung der Entmischbarkeit von RFID-Markern und Weizenkörnern in einem zylindrischen Behälter kann Steinmeier [83] das Ausbreiten von Konvektionsrollen mithilfe der 3D-Computertomografie feststellen. Treiber für die Ausbreitung sind Reibkräfte zwischen Wand und Partikel. Durch die Konvektionsrollen ist das Bewegungsverhalten der wandentfernten und wandnahen Bestandteile unterschiedlich. Die verwendeten RFID-Marker haben ein geringfügig größeres Volumen. Deshalb können diese die Abwärtsbewegung an der Wand nicht ausführen. Aus diesem Grund ist ihre Konzentration in höheren Schichthöhen und wandnahen Bereichen größer [18]. Diese Erkenntnisse bestätigen das in **Kapitel 2.2** beschriebene Vorhandensein von Konvektionsrollen und dessen Einfluss auf die Entmischung.

### 2.4.2 Luftströmung

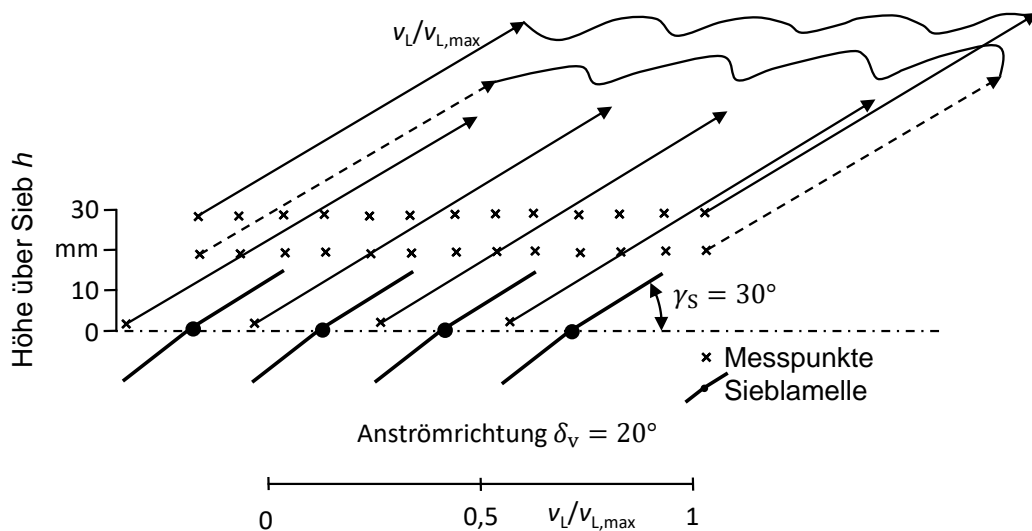
Persson [74] stellt eine ungleichmäßige Beeinflussung der Luftströmung durch das Reinigungsgut heraus. Aufgrund der praktischen Schwierigkeiten werden jedoch Druckmessungen ohne Gutbeladung und ohne Schüttler- bzw. Siebbewegung durchgeführt. Es zeigt sich eine über der Sieblänge höhere Luftgeschwindigkeit im vorderen Siebbereich. Außerdem ist im vorderen Siebbereich die Luftgeschwindigkeit in der Siebmitte höher und fällt zu den Siebrändern ab. Diese ungleichmäßige Verteilung wird mit der unzweckmäßigen Gebläseausführung begründet und bewirkt eine zeitlich spätere Siebbedeckung in dem Bereich hoher Luftgeschwindigkeiten. Bestätigt werden diese Aussagen bei der Aufnahme des gesamten Strömungsprofils einer Reinigungsanlage (Maßstab 1:2) in einem Wasserkanal. Durch aufgetragenes Aluminiumpulver

kann das Strömungsprofil aufgezeichnet und mit den aufgenommenen Messwerten ergänzt werden. Damit wird der strömungstechnische Zustand in jedem Punkt berechnet und Stromlinien abgeleitet. [74]

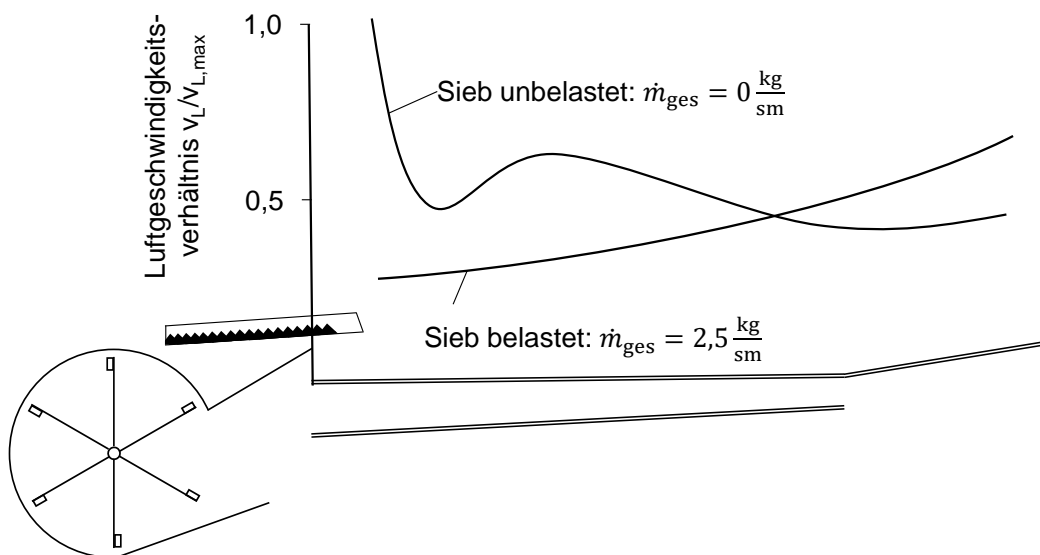
Eine Veränderung des statischen Drucks ist vom Druckabfall an den Sieben und der Schüttung auf dem Sieb abhängig. Der Druckabfall durch eine ruhende Schüttung wurde hinreichend untersucht und empirische Gleichungen zur Beschreibung abgeleitet [10, 15, 37, 84]. Segler und Freye [85] nutzen den statischen Druck im Gebläsediffusor zur Bestimmung des spezifischen Korndurchsatzes. Böttinger [86] kann durch Messung des statischen Drucks unter dem Obersieb für Labor- und Feldmessungen den Trennerfolg beurteilen, wobei eine Kalibrierung auf die Einstellung der Reinigungsanlage und die Guteigenschaften nötig ist. Die Möglichkeit der Durchsatzbestimmung anhand des statischen Drucks erlaubt die Regelung der Gebläsedrehzahl und somit die Anpassung der Luftgeschwindigkeit an den Durchsatz [87].

Aufgrund der kleinen Abmessungen und der im Vergleich zum Hitzdrahtanemometer hohen mechanischen Belastbarkeit, setzen Burkhardt und Freye [88] zur Messung der Luftgeschwindigkeit zwischen den Bereichen der Sieblamellen temperaturabhängige NTC-Widerstände ein. Diese besitzen durch ihren exponentiellen Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand eine im Vergleich zum Hitzdrahtanemometer 10-fach größere Temperaturabhängigkeit. Somit ist im Bereich kleiner Luftgeschwindigkeiten bis  $v_L = 5 \text{ m/s}$  eine ausreichend hohe Messempfindlichkeit gewährleistet. Die Verwendung der Sensoren im Konstanttemperaturverfahren erlaubt durch die Messung des Spannungsabfalls über den NTC-Widerstand einen Rückschluss auf die Luftgeschwindigkeit. Eine Temperaturkompensation verhindert eine Nullpunktverschiebung und eine Änderung der Messempfindlichkeit. Es zeigt sich eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über der Sieblänge und eine Umlenkung der Luftströmung durch die Lamellen, **Bild 21**.

Die Abhängigkeit des Strömungsprofils vom Durchsatz und damit von der Siebbeladung stellt Freye [15] heraus. Bei einem unbeladenen Sieb liegt eine hohe Luftverteilung im Bereich der Fallstufe und im vorderen Siebbereich vor, während bei zunehmender Siebbeladung höhere Luftgeschwindigkeiten im hinteren Siebbereich entstehen, **Bild 22**. Die Umlenkung der Luftströmung zu den geringer belasteten hinteren Bereichen bewirkt eine abnehmende Luftgeschwindigkeit im vorderen Siebbereich.



**Bild 21:** Luftgeschwindigkeitsverteilung über dem unbeladenen Lamellensieb anhand ausgewählter Geschwindigkeitsvektoren nach [88]; Geschwindigkeitsvektoren bei  $h = 20 \text{ mm}$  gestrichelt dargestellt; Geschwindigkeitsverlauf resultiert aus verbundenen Vektoren

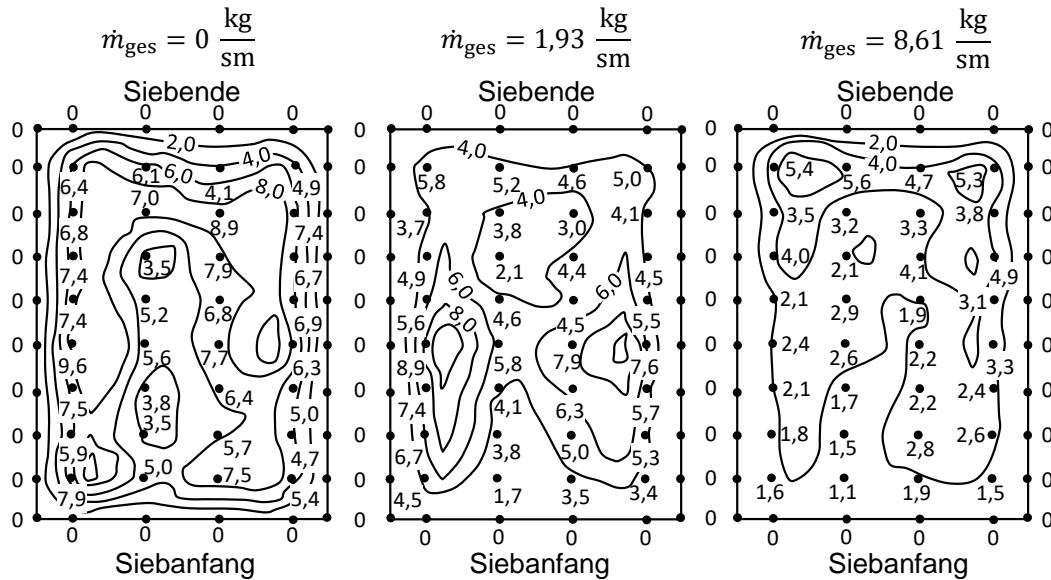


**Bild 22:** Strömungsumlagerung in Abhängigkeit der Gutbeladung auf dem Sieb nach [15]

Auch Streicher [89] benutzt 32 temperaturabhängige Widerstände zur Messung der Luftgeschwindigkeit im Obersieb bei unterschiedlichen Siebbeladungen. Individuelle Kalibrierungen der Sensoren für verschiedene Temperaturen ermöglichen eine Temperaturunabhängigkeit. Das Strömungsprofil ohne Beladung zeigt geringe Luftgeschwindigkeiten in der Siebmitte, was steile Geschwindigkeitsgradienten im vorderen und hinteren Bereich, sowie am linken und rechten Seitenrand bedeutet, **Bild 23**.

Bei einem spezifischen Gesamtdurchsatz von  $\dot{m}_{ges} = 1,93 \text{ kg/sm}$  ist eine Verringerung der Luftgeschwindigkeiten von  $v_L = 1 \text{ m/s}$  an den Seitenrändern und im vorderen Siebbereich zu

beobachten, Bild 23. Bei Steigerung des Durchsatzes auf  $\dot{m}_{\text{ges}} = 8,62 \text{ kg/sm}$  reduziert sich die Luftgeschwindigkeit um  $v_L = 2 \text{ m/s}$  an den Seitenrändern und  $v_L = 1 \text{ m/s}$  in der Siebmitte sowie im hinteren Siebbereich weiter. Es wird eine Geschwindigkeitsabnahme bei steigendem Durchsatz beobachtet, was eine Reduzierung des Luftdurchsatzes und eine Erhöhung des statischen Drucks bedeutet. Für mittlere und hohe Durchsätze ist außerdem eine Umlenkung der Luftgeschwindigkeit Richtung Siebende zu beobachten.



**Bild 23:** Strömungsprofil im Obersieb für verschiedene Durchsätze nach [89]

Reumschüssel und Zehme [90] nennen zur Erhöhung der Trennleistung bei hohen Durchsätzen und großen Schichthöhen die notwendige Auflockerung der Gutschicht. Die Erzeugung von Hohlräumen beschleunigt den Korndurchgang. Das Umlenken der Luft kann durch unterhalb der Siebe angeordnete Staubleche verhindert werden. Durch die Erhöhung des statischen Drucks unter dem Sieb wird die Luft am Siebanfang durch die Gutschicht geleitet, was eine Reduzierung der Kornverluste bei hohen Durchsätzen ermöglicht. Dies setzt eine steile Gebläsekennlinie voraus.

Lee und Winfield [91] können keinen Einfluss der Luftverteilung auf den Kornverlust feststellen. Für geringe Durchsätze basiert die Entmischung hauptsächlich auf den pneumatischen Kräften. Für eine optimale Entmischung bei hohen Durchsätzen sind ebenfalls mechanische Separationskräfte vonnöten. Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu den Untersuchungen von Dahany [16] und Zhao [47], die eine verbesserte Reinigungsleistung bei einer über der Sieblänge abfallenden Luftverteilung nachweisen konnten, **Kapitel 2.3.3**.

Farran und Macmillan [92] zeigen das Potential der Korn-NKB-Trennung in einer vertikalen

Luftströmung. Durch die rein pneumatische Anregung ist eine vollständige Trennung nicht möglich. Die Luftgeschwindigkeit muss im Zielkonflikt zwischen geringen Kornverlusten und geringen Verunreinigungen festgelegt werden.

Den Effekt der geringeren Siebbeladung durch einen vorherigen Austrag der NKB untersucht Jiang [93] mit einem pneumatischen Vorreiniger als Ersatz für den konventionellen Vorbereitungsboden. Dadurch kann das Korn-NKB-Verhältnis um 80 % reduziert werden, was eine schnellere Entmischung bewirkt. Jedoch steigt bei höheren Durchsätzen der Kornverlust, weil Korn durch ausgetragenes Kurzstroh mit ausgetragen wird.

Eine zusätzliche pneumatische Unterstützung der Vorentmischung im letzten Drittel des Vorbereitungsbodens steigert den Trennerfolg der Mähdrescherreinigungsanlage im Vergleich zum konventionellen Vorbereitungsboden ohne Luftunterstützung unter Laborbedingungen um 10 %. Besonders bei hohen Durchsätzen wird die Vorentmischung durch die erzeugte Wirbelschicht verbessert. [13]

## 2.5 Messtechnik

### 2.5.1 Positionsbestimmung

Zur Untersuchung der Entmischung nach dem White-Box-Modell ist die zeitaufgelöste Positionsbestimmung der Kornbestandteile notwendige Voraussetzung. Eine parallele Bestimmung der NKB-Positionen erhöht die Analysegenauigkeit. Die Forderung der Untersuchung eines volumetrischen Probenraumes und dass die verwendete Messtechnik den ablaufenden Entmischungsprozess nicht beeinflusst, beschränkt die Messverfahren auf Partikeltracking und Durchstrahlung, **Tabelle 2**.

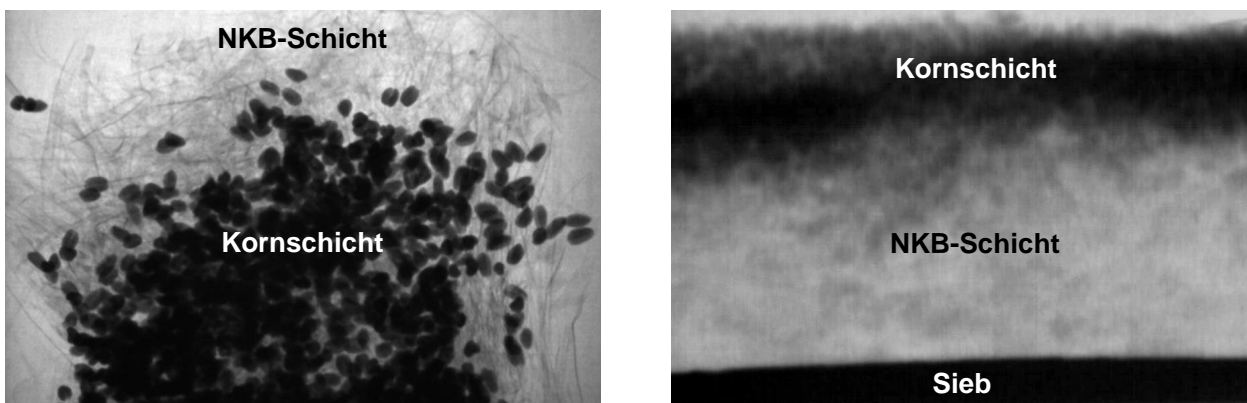
**Tabelle 2:** Messverfahren zur dreidimensionalen Untersuchung der zeitaufgelösten Positionsbestimmung von Korn und NKB während der Entmischung

Nr	Partikeltracking	Durchstrahlung
1.	Radioaktives Partikeltracking [94, 95]	Röntgen-Computertomografie [96, 97]
2.	RFID [83, 98]	Radiografie [99–101] (Neutronenstrahlung)
3.	Induktives Partikeltracking [102]	Terahertz-Strahler [13]

Beim Partikeltracking müssen Tracerpartikel als Kornerersatz in den Entmischungsprozess eingebracht werden. Die Erstellung von Partikeln mit gleichen Eigenschaften in Bezug auf die Entmischbarkeit und das Bewegungsverhalten ist aufwendig. Bei der radioaktiven Anregung der

Kornpartikel verändert sich die Dichte und damit das Entmischungsverhalten. Nach Schwarz [13] ist die Terahertz-Strahlung zur Untersuchung des Entmischungsprozesses nicht geeignet.

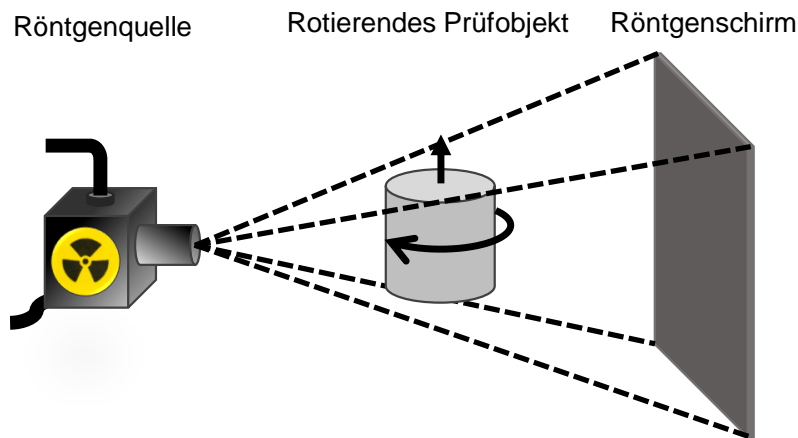
Machbarkeitsstudien mit dem Radiografie-Verfahren an der Radiografie- und Tomografieanlage Antares [99, 100] zeigen im statischen Fall einen starken Kontrast zwischen Korn und NKB, **Bild 24, links**. Über die Durchstrahlung wird die dritte Dimension berücksichtigt. Bei dynamischen Aufnahmen wird eine Aufnahmezeit von  $f_R = 100$  Hz erreicht. Durch die radioaktive Aktivierung des Versuchsgutes bei der Untersuchung ist der Versuchsaufwand größer als bei der Computertomografie mittels Röntgenstrahlung. Hierbei zeigten Machbarkeitsstudien [72, 76] gleiche Ergebnisse. Der Bildausschnitt der in Bild 24 rechts dargestellten Röntgenaufnahme ist größer als bei dem Radiografie-Verfahren. Diese kann durch Systemeinstellungen an den Aufnahmegaräten angepasst werden. Des Weiteren ist die Körneranzahl in der Röntgenaufnahme deutlich höher und die Blickrichtungen auf die Aufnahmen unterschiedlich.



**Bild 24:** Statische Aufnahme von Korn und NKB mit der Radiografie- (links, Draufsicht: Breite des Ausschnitts: 120 mm) und der Röntgen-Computertomografie [72, 76] (rechts, seitliche Ansicht: Breite des Ausschnitts: 240 mm)

Die dreidimensionale Computertomografie ermöglicht die berührungslose und zerstörungsfreie Messung innerer und äußerer Strukturen mit hoher geometrischer Auflösung und Genauigkeit. Das Messprinzip der Röntgen-Computertomografie basiert auf der Abschwächung von Röntgenstrahlen aufgrund von Absorption und Streuung durch das Prüfobjekt. Diese ist abhängig von der Geometrie, Dichte und Zusammensetzung und wird mittels Röntgenschild als Grauwertbild aufgezeichnet. Die Aufnahme von Röntgenbildern aus unterschiedlichen Winkelpositionen erlaubt eine mathematische Rekonstruktion zu einem 3D-Modell [103], in dem die Grauwerte in den Voxeln (3D-Pixel) gespeichert sind, **Bild 25**. Dabei rotiert das Prüfobjekt mit einer dem Aufnahmeprozess angepassten Rotationsgeschwindigkeit um die eigene Achse. Durch Methoden der 3D-Bildanalyse können die Voxel-Daten entsprechend ausgewertet werden [104–106].

Weitere Informationen zu Eigenschaften der Röntgenstrahlung, technischen Systemen und Komponenten sowie Einflussfaktoren sind in [96, 97] zu finden. [72, 76, 96, 97, 107–109]



**Bild 25:** Messprinzip der dreidimensionalen Röntgen-Computertomografie [72]

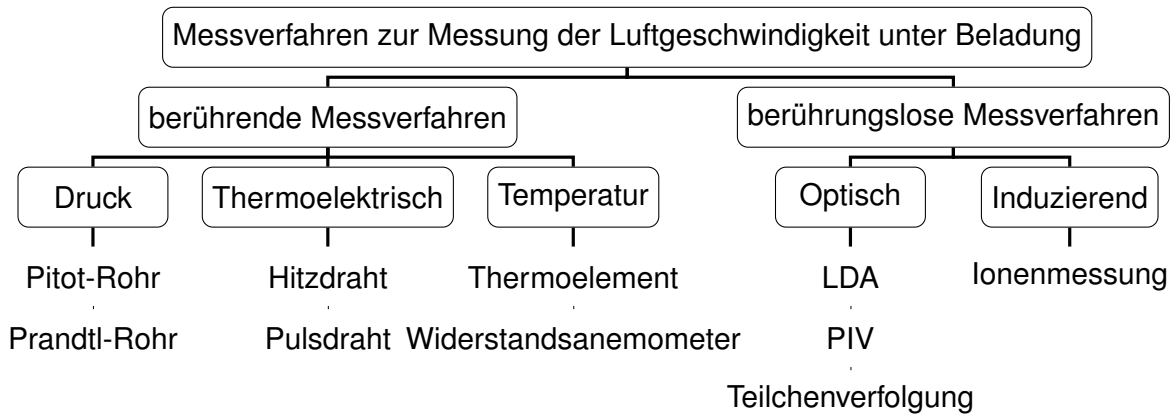
Zur Abbildung dynamischer Vorgänge wird der Röntgenschirm durch ein Hochgeschwindigkeitsröntgenkamera-System ersetzt. Dadurch können Aufnahmezeiten von  $f_{CT} = 2000$  2D-Röntgenbilder/s erreicht werden. Aufgrund der hohen Beschleunigungen der Gutbestandteile während des Entmischungsprozesses ist eine 3D-Rekonstruktion nicht möglich. Über die Abschwächung der Röntgenstrahlen wird die dritte Dimension dennoch in der Auswertung berücksichtigt. Die Versuchsprobe rotiert während der Aufnahme nicht. [72]

### 2.5.2 Strömungsmessung

Das Strömungsprofil der Luftströmung in der Mähdrescherreinigungsanlage ist stark von der Geometrie abhängig, weshalb eine messtechnische Untersuchung mittels vereinfachter Prüfstände unzulässig ist. Der große Einfluss des vorhandenen Reinigungsgemisches bedingt die Untersuchung an einer beladenen Reinigungsanlage, **Kapitel 2.4.2. Bild 26** zeigt die Einteilung der Messverfahren, die zur Messung der Luftgeschwindigkeit in einer mit Korn- und Strohpartikeln beladenen Dreiphasenströmung prinzipiell geeignet sind.

Die Eignungsuntersuchung der Messverfahren zur Geschwindigkeitsmessung unter Beladung erfolgt anhand einer vertikalen Luftströmung, **Bild 97** in **Anhang 8.2**. Die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) sowie die thermoelektrische Messung mittels Hitzdraht zeigen die besten Eigenschaften zur Messung einer mit Reinigungsgut beladenen Luftströmung. Die Hitzdraht-Anemometrie weist hinsichtlich der Empfindlichkeit der Sensorzerstörung Entwicklungspotential auf. Weitere Informationen befinden sich in **Anhang 8.3**. Die LDA ist als optisches Messverfahren

besonders aufgrund der eingeschränkten optischen Zugänglichkeit im Bereich der Sieblamellen geeignet. Das Funktionsprinzip sowie die Berechnungsgrundlagen sind **Anhang 8.4** entnehmbar.



**Bild 26:** Prinzipiell geeignete Messverfahren zur Messung der Luftgeschwindigkeit in Mäh-drescherreinigungsanlagen unter Beladung

LDA-Messungen zur Untersuchung der Geschwindigkeit einer gasförmig-festen Zweiphasenströmung in einer horizontalen Rohrströmung zeigen aufgrund der Schwerkraft ein unsymmetrisches Strömungsprofil. Die Zweiphasenströmung besteht aus Luft und Plastikpartikeln. Mit größerer Beladungsmenge stellt sich eine Abnahme der Luftgeschwindigkeit ein. Dies wird mit der zusätzlichen Energie begründet, die die Partikel zum Transport benötigen. Weiterhin hat das Vorhandensein der Feststoffpartikel großen Einfluss auf die Turbulenzentwicklung der Luftströmung. Abhängig vom Partikeldurchmesser kann die Turbulenz gesteigert oder unterdrückt werden. [110]

Ähnliche Ergebnisse konnten bei der Messung des Geschwindigkeitsprofils einer mit Plastikpartikeln beladenen Luftströmung in einem vertikalen Rohr ermittelt werden. Partikel mit einem großen Durchmesser steigern, kleinere Partikel unterdrücken die Turbulenzbildung. Das Geschwindigkeitsprofil verschiebt sich dabei in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers und der Beladungsmenge. Es zeigen sich höhere Geschwindigkeitsgradienten an der Rohrwand und eine asymmetrische Lage der maximalen Geschwindigkeit. [111]

Die Intensität der Lichtstreuung, die vom Partikel reflektiert werden, ist unter anderem von der Größe des Partikels abhängig. Tsuji [110, 111] nutzt dies zur gleichzeitigen Bestimmung der Luftgeschwindigkeit (Geschwindigkeitsbestimmung an sich schlupffrei bewegenden Tracer-Partikeln) und der Geschwindigkeit der Plastikpartikel, die in der Strömung vorhanden sind. Voraussetzung dazu ist, dass die Feststoffpartikel eine gleiche Form und Größe aufweisen,

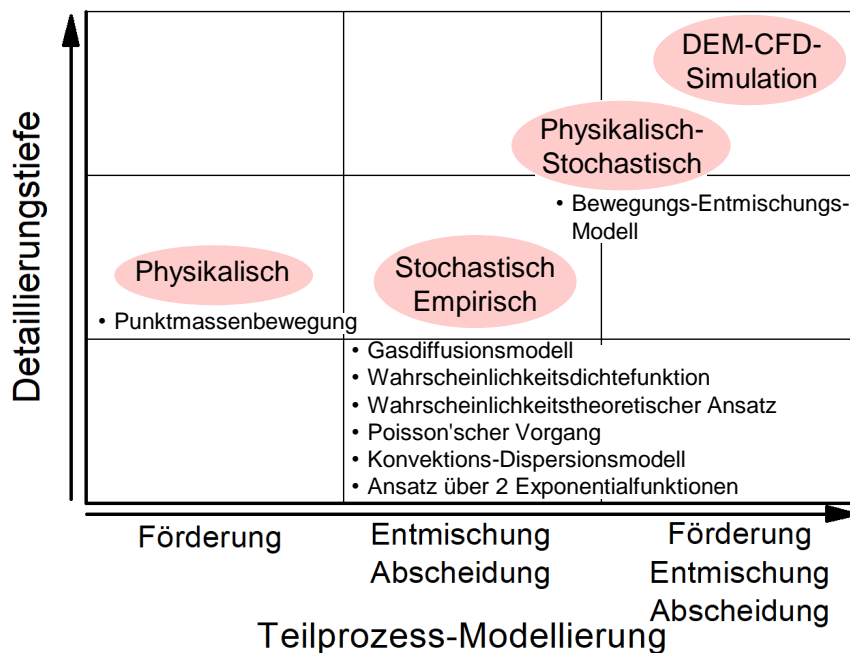
damit die Lichtstreuung eindeutig zugewiesen werden kann. Es zeigt sich eine zu erwartende geringere Geschwindigkeit der Feststoffphase. Den gleichen Ansatz benutzt Bordás [112] zur Messung des Durchmessers und der Geschwindigkeit von einzelnen Wassertropfen in der Luft. Dabei haben die Tropfen einen Durchmesser von  $d_{\text{Partikel}} = 1,7 - 3,3 \text{ mm}$ .

### 2.6 Modellierung und Simulation

Zur Beschreibung der ablaufenden Prozesse und für eine Erhöhung des Prozessverständnisses werden unterschiedliche Methoden zur Modellierung der Mähdrescherreinigungsanlage ausgearbeitet. Dabei erfolgt eine Einteilung nach [9, 13, 113] in

- physikalisch begründete, analytische,
- empirisch stochastische,
- physikalisch-stochastische Modellierung und
- Modelle zur Partikelsimulation; Diskrete-Elemente-Methode, optional in Verbindung mit Strömungssimulationen.

Kutzbach [113] unterteilt die empirisch stochastischen Modellansätze weiter in Ansätze mit einer und zwei Exponentialfunktionen. Eine Übersicht der Modellierungsmethoden mit der oben beschriebenen Einteilung zeigt **Bild 27**. Weitere Modellierungen sind in [113, 114] zu finden.



**Bild 27:** Methoden zur Modellierung der Mähdrescherreinigungsanlage

### 2.6.1 Physikalische Modellierung

Zur Abbildung des Bewegungsverhaltens von Schüttgut auf schwingenden Sieben nutzen Baader und Sonnenberg [51, 59] die Kenntnis über die Bewegung einer Einzelmasse auf schwingenden ebenen Unterlagen und entwickeln ein System gekoppelter Differentialgleichungen. Dabei wird die Bewegung der Einzelmasse relativ zur Oberfläche in Ruhe, Gleit- und Wurfbewegung unterteilt und das Haufwerk durch ein Feder-Dämpfer-Modell modelliert. Die Differentialgleichungen sind für die Bewegungszustände verschieden.

Freye [15] erweitert die Differentialgleichungen eines Einzelpartikels innerhalb einer Gutschicht um die Strömungskraft  $F_S$  und berechnet die Fördergeschwindigkeit, die Aufprallgeschwindigkeit, die Gleitbedingungen zwischen Sieb und Haufwerk sowie die Auflockerung des Haufwerks in Abhängigkeit der Anregungsparameter und Stoffeigenschaften. Hübner [37] optimiert Koeffizienten für eine exaktere Abbildung des Auflockerungsverhältnisses an dem von Freye aufgestellten Modell iterativ. Außerdem wird die Ermittlung des Hohlraumvolumens um die Kontraktionsphase erweitert und Reibkoeffizienten zwischen Korn und Rundlochsieb angepasst. Des Weiteren wird eine Methode zur Ermittlung der Luftverteilung und des Strömungsrichtungswinkels in Abhängigkeit der Sieblänge vorgestellt. Die Abhängigkeit zur Sieblänge beeinflusst die Fördergeschwindigkeit der Gutbestandteile maßgeblich.

Rochell [60] nutzt die angesprochenen Differentialgleichungen zur Beschreibung des Bewegungsvorganges auf dem Vorbereitungsboden und erweitert das Reibverhalten zur Abbildung der Stufengeometrie, unterscheidet jedoch nicht zwischen Haft- und Gleitreibung. Zur Berücksichtigung des Einflusses der Sieböffnung und der Siebform auf das Reibverhalten zwischen Haufwerk und Siebboden erweitert Beck [10] das Modell von Freye um einen Ersatz-Reibwert. Dieser wird in Abhängigkeit des Stufenwinkels anhand einer schiefen Ebene definiert. Außerdem werden Reibkoeffizienten zwischen NKB und Rundloch- bzw. Lamellensieb bestimmt und bei der Modellierung berücksichtigt. Durch den Formschluss zwischen NKB und Sieb ist die Reibung größer als bei einer glatten Oberfläche.

Schwarz [13] nutzt das Modell von Freye und Hübner zur Berechnung der Bewegungstrajektorien und des zeitabhängigen Auflockerungsverhältnisses auf einem luftdurchströmten Vorbereitungsboden. Dabei werden die Stufen- und die Lufteinlassgeometrie berücksichtigt. Ein Vergleich zu DEM-Simulationen [73] zeigt Abweichungen, da das Stoßverhalten sowie die exakte Partikelinteraktion in der DEM-Simulation mit einem höheren Detaillierungsgrad abgebildet werden.

## 2.6.2 Empirisch stochastische Modellierung

Ausgehend von der Modellvorstellung, dass der Entmischungsprozess zufällig durch willkürliches Auftreten von Korn-NKB-Kollisionen stattfindet, beschreiben Gregory und Fedler [115] den Restkornverlauf auf dem Hordenschüttler in Analogie zur Gasdiffusion mit dem Fick'schen Gesetz [116]. Das Modell wird für unterschiedliche Schüttlerlängen, Durchsätze und Stoffeigenschaften validiert. Eine Weiterentwicklung zur Beschreibung des Restkornverlaufes in der Mährescherreinigungsanlage auf Basis der mechanischen und pneumatischen Anregungen erfolgte durch Kim und Gregory [117]. Die Abnahme des Kornes über der Sieblänge beschreibt einen exponentiellen Verlauf. Verifizierungen mit messtechnisch aufgenommenen Versuchen ergeben ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,96$ .

Die separate Modellierung der Entmischung der Körner aus der NKB-Schicht und der Abscheidung durch das Sieb wird von Huynh und Powell [118] erarbeitet. Es wird eine Gleichung für den Kornverlust aus charakteristischen Verteilungsfunktionen entwickelt. Diese ist durch die Zeit definiert, die die Körner zur Durchdringung der NKB-Schicht und des Siebs benötigen. Weitere Gleichungen für den Transport entlang des Siebs und der Entmischung sowie der Abscheidung stellen eine Verbindung zu den Konstruktions-, Stoff- und Betriebsparametern her. Anwendungen zeigen den Einfluss des Durchsatzes, der Sieblänge, der Anregungsfrequenz, der Sieböffnung und der Siebneigung. Es wird eine Korrelation zu experimentellen Untersuchungen nachgewiesen, wobei einzelne Gleichungen nicht validiert werden. Pneumatische Kräfte aufgrund der Luftströmung werden außerdem vernachlässigt.

Chrolikow [119] modelliert den Entmischungs- und Abscheideprozess auf Annahme eines Poisson'schen Vorgangs mit Wahrscheinlichkeiten für die Entmischung und Abscheidung. Der Poisson'sche Vorgang kann als Markovscher Punktvorgang bestimmt werden. Durch Integration der Wahrscheinlichkeiten mit den gegebenen Systemgrenzen einer eindimensionalen Entmischungsrichtung ergibt sich der gleiche exponentielle Modellansatz, wie von Huynh und Powell erläutert. Die Förderung wird jedoch nicht über einen physikalischen Modellansatz abgeleitet, sondern mit Siebfaktoren verknüpft, die aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren experimentell bestimmt werden. Ein Vergleich der Abscheidung von Erbsen für unterschiedliche Durchsätze zeigt eine zufriedenstellende Genauigkeit. Schwarz [13] nutzt diesen Modellansatz in Verbindung mit dem Modellansatz von Böttinger [12] zur Herleitung des Entmischungsgrades bei der Förderung eines Korn-NKB-Gemisches auf einem pneumatisch unterstützten Vorbereitungsboden.

Böttiger [12] entwickelt einen Ansatz zur Beschreibung der Abscheidefunktion über die gesamte Trennelementlänge. Dabei werden die Entmischung und Abscheidung getrennt betrachtet und ein Ansatz aus zwei Exponentialfunktionen mit drei Parametern gewählt. Der Ansatz mit zwei Exponentialfunktionen bildet die Entmischung und Abscheidung genauer ab als ein einfacher exponentieller Ansatz [113]. So ist es möglich, alle Arbeitsverhältnisse der Trennelemente anhand der Kornrestfunktion abzuleiten, **Gl. 11**. Die Kornabscheidung kann als negative erste Ableitung der Kornrestfunktion interpretiert werden, **Gl. 12**, Bild 14. Die Parameterbestimmung erfolgt über Regressionsanalysen mit gemessenen Abscheidewerten, die Überprüfung anhand von aufgenommenen Labor- und Feldversuchen. Mit diesen werden die Betriebszustände der Trennelemente analysiert und Korrelationen von berechneten und tatsächlichen Kenngrößen aufgezeigt. Des Weiteren wird der Einsatz bei Mähdrescher-Regelsystemen diskutiert. Schreiber [120] entwickelt eine Methode zur Reduzierung der Parameteranzahl der von Böttiger [12] hergeleiteten Gleichungen. Des Weiteren substituiert er die von Böttiger [12] ermittelten Parameter durch physikalisch anschauliche Parameter.

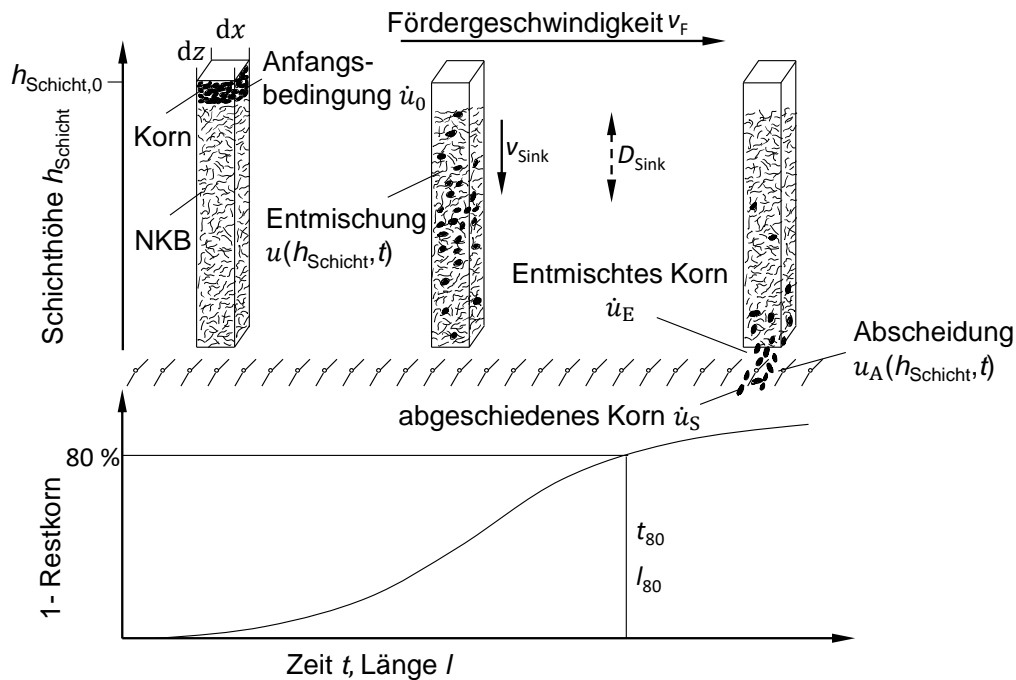
$$R_3(l) = \dot{m}_{\text{Korn}} \cdot \frac{1}{B - A} \cdot (B \cdot e^{-A/(D+1) \cdot l^{D+1}} - A \cdot e^{-B/(D+1) \cdot l^{D+1}}) \quad (11)$$

$$Z_3(l) = \dot{m}_{\text{Korn}} \cdot \frac{A \cdot B}{B - A} \cdot l^D \cdot (e^{-B/(D+1) \cdot l^{D+1}} - e^{-A/(D+1) \cdot l^{D+1}}) \quad (12)$$

Eine Modellierung der Entmischung durch die zeitliche Entwicklung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion anhand der Fokker-Planck Differentialgleichung [116, 121–123] erfolgt durch Beck [10]. Die Entmischung wird zum einen durch die gleichmäßige Bewegung der Körner durch die NKB-Schicht mit einer mittleren Sinkgeschwindigkeit  $v_{\text{Sink}}$  über den Konvektionsterm in der Fokker-Planck DGL beschrieben. Diese gibt die mittlere Entmischungsgeschwindigkeit aller in der Gutschicht befindlichen Körner an. Zum anderen werden willkürliche Kornbewegungen durch zufällige Stöße über den Dispersionsterm  $D_{\text{Sink}}$  berücksichtigt. Dieser ist ein Maß für die Streubreite der mittleren Sinkgeschwindigkeit. Bei steigender Dispersionskonstante steigt der Unterschied der Sinkgeschwindigkeit einzelner Körner. Die Kornmassenverteilung  $u$  ist eine Funktion von der Zeit und der Schichthöhe:  $u = u(t, h_{\text{Schicht}})$ , **Gl. 13**.

$$\frac{\partial}{\partial t} u(h_{\text{Schicht}}, t) = -v_{\text{Sink}} \frac{\partial u}{\partial h_{\text{Schicht}}} + D_{\text{Sink}} \frac{\partial^2 u}{\partial h_{\text{Schicht}}^2} \quad (13)$$

Eine weitere DGL bildet die Abnahme des zeitlichen Verlaufs des Restkorns auf dem Sieb mit einem exponentiellen Zusammenhang ab. **Bild 28** zeigt die Verknüpfung von Entmischung und Abscheidung. [10]



**Bild 28:** Verknüpfung des Entmischungs- und Abscheidungsmodells zur Modellierung der Korntrennung [10]

Die Anfangsverteilung beschreibt den Zustand Korn auf NKB. Die Entmischung in der Gutschicht wird mit der Konvektions-Dispersion DGL  $u(h_{\text{Schicht}}, t)$  beschrieben und beeinflusst den Kornmassenstrom  $\dot{u}_E$ , der auf dem Sieb entmischt wird, Gl. 13. Durch den Siebwiderstand werden die Körner nicht sofort abgeschieden. Die Abscheidung  $u_A(h_{\text{Schicht}}, t)$  definiert den vom Sieb abgeschiedenen Kornmassenstrom  $\dot{u}_S$ . Die Verknüpfung der einzelnen Teilmodelle erfolgt über die Massenbilanz. Die Bestimmung von  $v_{\text{Sink}}$  und  $D_{\text{Sink}}$  ist messtechnisch nicht möglich, da Ort und Bewegung des Kornes in der Gutschicht mit herkömmlichen messtechnischen Methoden nicht messbar sind [124, 125]. Aus diesem Grund werden die Modellparameter numerisch durch eine iterative Optimierung bestimmt. Mit dem Modell ist unter anderem die Vorhersage der Kornbewegung möglich und trägt so zum Verständnis der physikalischen Vorgänge bei [126]. [10]

### 2.6.3 Physikalisch-stochastische Modellierung

Beck [10] kombiniert das um den Reibbeiwert erweiterte Bewegungsmodell von Freye (**Kapitel 2.6.1**) mit dem Ansatz zur Entmischung und Abscheidung nach der Fokker-Planck Differentialgleichung, **Kapitel 2.6.2**. So ist es möglich die Gutförderung und den Trennprozess gemeinsam zu untersuchen. Eine Ausweitung auf Schüttler, Vorbereitungsboden und Obersieb und eine Erweiterung um ein Dreschwerks- und Fallstufenmodell erlaubt die Modellierung des gesamten Mähdreschers. Eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation zeigt ein Ver-

gleich der gemessenen und berechneten Kornverluste. Der starke Durchsatzeinfluss ist in den Simulationsergebnissen anhand unterschiedlicher NKB-Abscheidefaktoren ersichtlich.

#### 2.6.4 DEM-CFD-Simulation

Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) basiert auf einem partikelspezifischen Modellierungsansatz [73]. Für jeden Zeitschritt werden die Trajektorien aller Partikel aufgrund der wirkenden Kräfte berechnet [127] und so das Bewegungsverhalten loser Schüttgüter analytisch beschrieben. So ist die DEM ein gültiges Werkzeug zur Erforschung des Bewegungsverhaltens granularer Feststoffe [128]. Auch komplexe, nichtlineare Bewegungen von Schüttgütern können simuliert werden [127]. Die Kollisionen der Partikel untereinander und der Partikel mit der Wand werden dabei über Feder-, Dämpfer- und Reibelemente in Normal- und Tangentialrichtung modelliert [127, 128]. Durch den physikalischen Charakter sind die Einflussgrößen, anders als bei der stochastischen Modellierung, physikalisch begründet und können experimentell bestätigt werden. Hohe Partikelzahlen und kleine Schrittweiten bewirken jedoch eine große Rechenzeit. Außerdem müssen die aufgestellten Modelle validiert und verifiziert werden, was vor allem bei komplexen Materialverhalten aufwendig ist [13]. In der Landtechnik findet die DEM Anwendung in unterschiedlichsten Bereichen [129–135]. [3, 127, 134]

Die Kopplung der Diskreten-Elemente-Methode mit der numerischen Strömungssimulation (CFD) erlaubt eine Anwendung auch in Bereichen, in denen die Strömungskräfte die Partikelbewegung beeinflussen, wie dem Sieb-Sicht-Prozess in der Mähdrescherreinigungsanlage [73]. Dabei gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Kopplung.

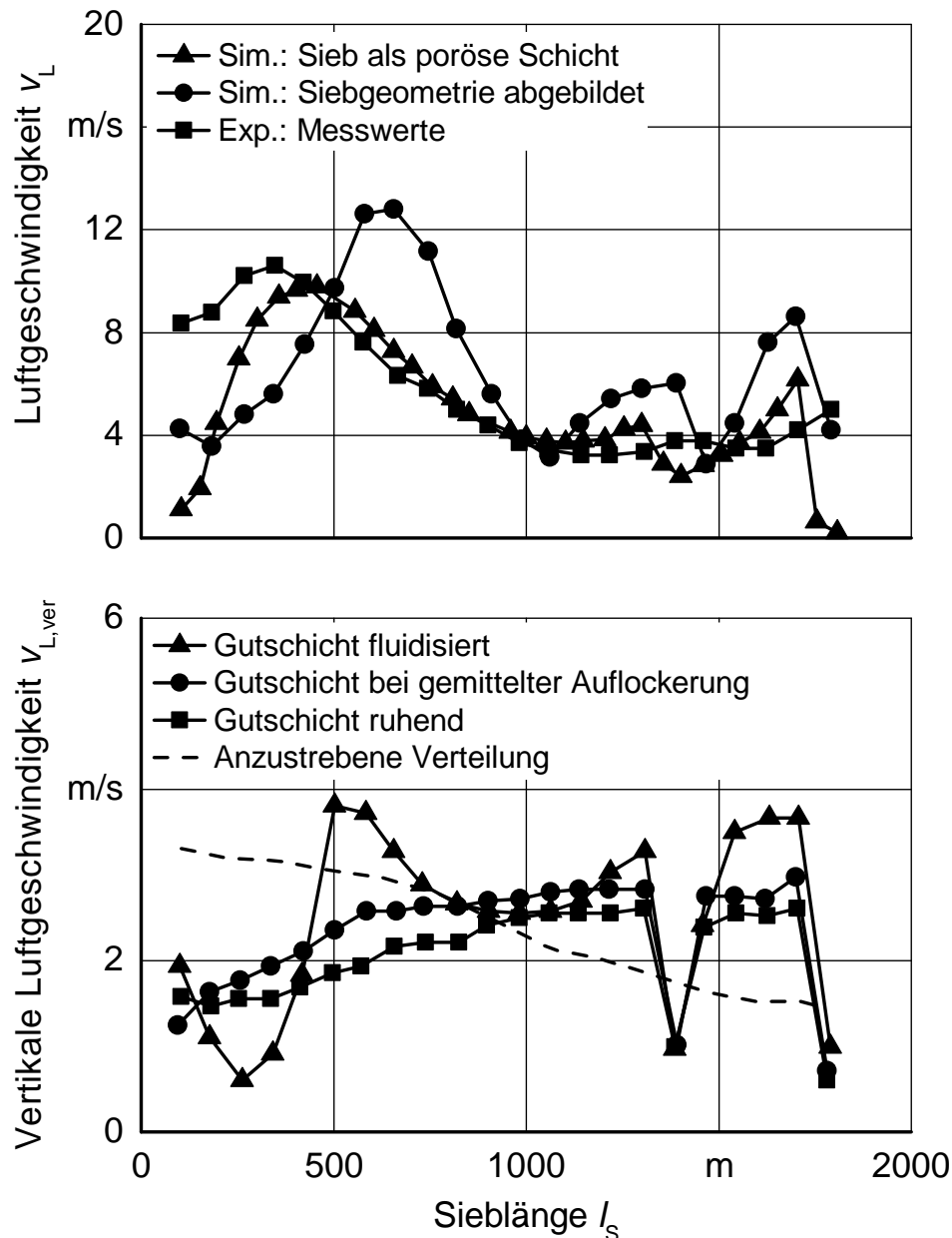
- **1-Wege-Kopplung:** Berechnung eines oder mehrerer stationärer Strömungsfelder (CFD-Simulation) ohne Vorhandensein von DEM-Partikeln. Implementierung in die Partikelsimulation (DEM-Simulation). Bei mehreren Strömungsfeldern kann über einen getriggerten Wechsel der Einfluss sich bewegender mechanischer Komponenten, wie oszillierende Siebe, berücksichtigt werden. Die Luftströmung hat eine Kraftwirkung auf die Partikel. Diese haben keine Rückwirkung auf das Strömungsfeld. Durch die einmalige Berechnung der Strömungsfelder ist die Rechenzeit gering. [2, 5, 77, 136, 137]
- **1,5-Wege-Kopplung:** Zur Berücksichtigung des Einflusses der vorhandenen Partikel auf das Strömungsfeld wird die nach der 1-Wege-Kopplung durchgeführte Partikelsimulation nach einer Simulationszeit  $t_{\text{Sim}}$  gestoppt und ein neues Strömungsfeld berechnet, welches die aktuelle Position der Partikel berücksichtigt. Dieses wird ab der Simulationzeit  $t_{\text{Sim}}$  in der

Partikelsimulation verwendet. Die Methode der 1-Wege-Kopplung bleibt dabei erhalten. Dieser Vorgang kann zur Erreichung höherer Genauigkeiten wiederholt und die Simulationszeit  $t_{\text{Sim}}$  entsprechend klein gewählt werden. [5]

- **2-Wege-Kopplung:** Zu jedem Zeitschritt der DEM-Simulation wird ein neues Strömungsfeld automatisiert berechnet und die wirkenden Strömungskräfte zur Berechnung der Bewegungstrajektorien genutzt. Der Aufenthaltsort der Partikel in der Simulation beeinflusst das Strömungsfeld zu jedem Zeitschritt. Diese Methode ermöglicht den höchsten Detaillierungsgrad. Durch die permanente Berechnung der Strömungsfelder ist der Rechenaufwand höher. [5, 77]

Die Ermittlung der Stoffeigenschaften landwirtschaftlicher Güter wurde bereits intensiv untersucht [138–140]. Aufgrund der hohen Abweichungen durch verschiedene Einflussfaktoren wie Sorte, Standort, Feuchte, etc. müssen andere Parametrierungs-, Verifizierungs- und Validierungsmethoden herangezogen werden [3]. Pförtner [2–4] nutzt die Einteilung von Beck [11, 68] zur Ermittlung relevanter Stoffeigenschaften, **Kapitel 2.3.3**. Es werden die DEM-Modelle anhand vereinfachter Prüfstände verifiziert und validiert. Korn [75, 77, 141] beschreibt ein strategisches Vorgehen zur Validierung von DEM-CFD-Simulationen in 5 Schritten. Es werden DEM-Partikel mit normalverteilten Längen und Durchmessern parametrisiert und neben geraden auch geknickte Strohpartikel modelliert. Die Implementierung der Partikelfeuchte erfolgt durch Anpassung der Stoffeigenschaften, die von der Feuchte beeinflusst werden, über einen quadratischen Regressionsansatz. Die Validierung muss noch erfolgen. Untersuchungen zeigen die bekannte starke Abhängigkeit zum Kornverlust.

Zur Untersuchung der Luftströmung führt Korn [142] CFD-Simulationen an einem zweidimensionalen Querschnitt einer Reinigungsanlage durch. Die Siebfläche und die Gutbeladung werden dabei als poröse Schicht modelliert und diese Vereinfachung untersucht. Als Grundlage für den Strömungswiderstand wird der Ansatz von Ergun [84] und die Erweiterung von Freye [15] und Hübner [37] verwendet, **Kapitel 2.6**. Ein Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung über dem unbeladenen Sieb zwischen Experiment und Simulation bestätigt die Eignung der Modellierung als poröse Schicht, **Bild 29**. Die größere Abweichung bei der Simulation mit geometrisch abgebildeten Lamellen wird mit der Reduzierung auf einen zweidimensionalen Untersuchungsraum begründet. Untersuchungen mit unterschiedlich stark fluidisierten Beladungszuständen zeigt die von Freye beschriebene, ansteigende Geschwindigkeitsverteilung, Bild 29.



**Bild 29:** CFD-Simulation der Geschwindigkeitsverteilung über dem Obersieb nach [142]

Gekoppelte DEM-CFD-Simulationen des Entmischungsprozesses von Reis und Kurzstroh für unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten werden von Li [143] durchgeführt. Dabei erfolgt die Modellierung der Reiskörner als Ellipsoid und des Kurzstrohs als Zylinder. Die Kopplung zwischen Partikel und Fluid ist bidirektional über den Impuls und die Strömungskraft. Vergleiche der Kornabscheidung über der Sieblänge für Simulation und Experiment zeigen hohe Übereinstimmungen. Die Erhöhung der Luftgeschwindigkeiten im Gebläsekanal beeinflusst lediglich das Geschwindigkeitsmaximum in dem Siebkasten und nicht die Geschwindigkeitsverteilung. Die Fördergeschwindigkeit von Korn und Stroh steigt mit steigender Luftgeschwindigkeit. Dabei ist die Ausdehnung der Kornschicht vernachlässigbar und die Ausdehnung der Strohschicht steigt

mit höheren Luftgeschwindigkeiten geringfügig.

Gekoppelte DEM-CFD-Simulationen und experimentelle Ergebnisse zur Untersuchung der mechanischen Siebanregung zeigen eine betragsmäßige mittlere Abweichung der  $l_{80}$ -Länge von  $|\overline{\Delta l_{80}}| = 6\%$ . Diese ausreichende Genauigkeit ermöglicht weiterführende Untersuchungen durch die Simulation. Hierbei wird eine 1-Wege-Kopplung realisiert. Eine Validierung kann durchgeführt werden. [136, 137].

Korn [75, 141] nutzt die 2-Wege-Kopplung zur Untersuchung des Entmischungsprozesses in der Mähdrescherreinigungsanlage. Vergleiche der Kornverluste von Simulation und Experiment für unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten zeigen besonders für niedrige und mittlere Durchsätze gute Übereinstimmungen. Somit ist auch bei diesen Untersuchungen die Anwendbarkeit der gekoppelten DEM-CFD-Simulation nachgewiesen.

### 3 PRÄZISIERUNG DER AUFGABENSTELLUNG

Die Arbeitsweise der einzelnen Prozesse in der Mährescherreinigung und die Einflüsse der Konstruktions-, Stoff- und Betriebsparameter wurden intensiv untersucht, **Kapitel 2.3**. Dabei sind die komplexen Abhängigkeiten der Einflussfaktoren untereinander berücksichtigt und analysiert worden, Kapitel 2.3.3. Besonders die gegenseitige Beeinflussung von Luftströmung und NKB-Durchsatz war Untersuchungsgegenstand. Die Ausbildung der Luftströmung beeinflusst die Arbeitsweise stark, Kapitel 2.4.2.

Die Auswertung der Versuche erfolgt dabei häufig anhand eines Black-Box-Modells, indem Ausgangsgrößen wie die Durchdringungszeit, -länge, Kornverlust, Reinheit und Abscheidelänge aufgenommen und unter Berücksichtigung der variablen und festen Eingangsgrößen sowie der Randbedingungen bewertet werden, Bild 19. Eine Analyse der eigentlich ablaufenden Prozesse ist hierbei nicht möglich.

Die Entmischung und Abscheidung granularer Medien unterschiedlicher Fraktionen resultiert aus dem komplexen Verhalten der beteiligten Partikel, Kapitel 2.2. Die auftretenden Phänomene sind gegensätzlich zu den Gesetzen des Auftriebs von Flüssigkeiten und abhängig von der Größe und Dichte der Partikel, der Eigenschaften des Gemisches und des umgebenden Behälters sowie der Anregungen. So sind unterschiedliche Modellvorstellungen zur Entmischung und Abscheidung entwickelt worden.

Dieses komplexe Verhalten von Gemischen tritt auch bei der Korn-NKB-Trennung in der Reinigungsanlage auf. Zur Identifikation von Entwicklungspotential ist deshalb die genaue Kenntnis über die in der Reinigungsanlage ablaufenden Prozesse vonnöten, was eine Auswertung nach dem White-Box-Modell bedingt, Bild 19. Hier hat sich das Bewegungsverhalten der einzelnen Bestandteile als dominante Größe zur Beschreibung der Prozesse herausgestellt, Tabelle 1.

Die DEM-CFD-Simulation bietet durch die detaillierte Abbildung physikalischer Vorgänge und die Einbindung komplexer Geometrien große Vorteile in der Untersuchung der verfahrenstechnischen Prozesse der Reinigungsanlage [13]. Die Bewertung auf Basis des Bewegungsverhaltens der einzelnen Bestandteile ermöglicht die Auswertung auf einer höheren Detaillierungstiefe, **Kapitel 2.6.4**. Die notwendige Verifizierung und Validierung der Modelle stellt ebenfalls die Forderung der messtechnischen Untersuchung des Bewegungsverhaltens nach dem White-Box-Modell.

Aufgrund der einfachen Anwendung ist die Nutzung von Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen zur Untersuchung von Schichthöhen, Auflockerungen und des Bewegungsverhaltens wandnaher Bestandteile favorisiert, **Kapitel 2.4.1**. Dabei wird das Verhalten wandnaher Bestandteile als charakteristisch für das gesamte Gemisch angenommen. Dies kann z. B. durch auftretende Konvektionsrollen unterschiedlich sein, Kapitel 2.2. Des Weiteren ist die Methode aufgrund der zweidimensionalen Betrachtung eingeschränkt.

Auf Basis der aufgeführten Erkenntnisse definiert sich das Forschungsziel der vorliegenden Arbeit in der Untersuchung der Entmischung, Abscheidung und Förderung von Korn und NKB in der Mährescherreinigungsanlage nach dem White-Box-Modell. Der hohe Detaillierungsgrad erlaubt eine Auswertung auf Basis der einzelnen Teilprozesse. Dadurch wird der Erkenntnisstand gesteigert, Entwicklungspotential identifiziert und eine Möglichkeit zur Verifizierung von DEM-CFD-Simulationen geschaffen.

Anhand von Entmischungsuntersuchungen mittels Computertomografie wird geprüft, inwieweit sich das Bewegungsverhalten zwischen wandnaher und von der Wand entfernter Bestandteile unterscheidet. Des Weiteren erfolgt eine Auswertung in Abhängigkeit der Anregungsparameter und des Durchsatzes, der die Schichthöhe auf dem Sieb definiert. Dazu wird das Bewegungsverhalten einzelner Bestandteile in einem Referenzvolumen aufgenommen und abhängig vom Aufenthaltsort ausgewertet sowie mit parallel aufgenommenen Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen verglichen. Die zusätzliche Bestimmung des Hohlraumvolumens in Abhängigkeit der Schichthöhe und des Wandabstandes ermöglicht neben der quantitativen Bewertung von Wandeffekten die detaillierte Beschreibung der Entmischung.

Der maximale Messbereich ist durch den Raum zwischen Röntgenquelle und -schirm, dem Aufbau der Röntgenquelle sowie den Geometrien und Materialien des Prüfobjektes begrenzt [72, 76, 97]. Deshalb wird die Entmischung mittels Miniaturprüfstand auf einem luftdurchströmten, vertikal schwingenden Sieb untersucht.

Durchdringungszeitversuche auf einem vertikal angeregten Sieb ergeben tendenziell höhere theoretische Abscheidelängen, welche unzureichend mit experimentellen Untersuchungen einer Mährescherreinigungsanlage korrelieren [13]. Der Einfluss der zusätzlichen Gutbewegung in horizontaler Richtung wird weiterführend an einem Grundlagen-Reinigungsprüfstand untersucht. Dieser ermöglicht bei gleichen pneumatischen Einstellungen eine individuelle Anpassung der horizontalen und vertikalen Anregung [136, 137]. Da in der Reinigungsanlage die Teilprozesse

Förderung, Entmischung und Abscheidung koexistent sind, ist die Kenntnis über den Einfluss des Förderprozesses für das Gesamtprozessverständnis essentiell.

Das Bewegungsverhalten der Partikel resultiert aus den wirkenden Kräften, die aus der mechanischen Siebanregung und der pneumatischen Luftströmung entstehen. Diese Einflussgrößen werden an einem Reinigungsprüfstand untersucht, der im Längsschnitt eine CLAAS Jet-Stream-Reinigung im Maßstab 1:1 abbildet. Dabei wird besonders das Strömungsprofil und dessen Abhängigkeit vom Durchsatz betrachtet. Die starke Wechselwirkung bewirkt komplexe Abhängigkeiten in der Partikelbewegung. Die Aufzeichnung des Bewegungsverhaltens erfolgt dabei mit Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen. Zur Untersuchung des Strömungsprofils werden das LDA-Verfahren und die thermoelektrische Messung mittels Hitzdraht verwendet, **Kapitel 2.5.2**.

Anhand des Bewegungsverhaltens können die einzelnen Teilprozesse, wie der Sichtprozess in den Fallstufen, die Sieb-Sicht-Prozesse am Ober- und Untersieb sowie die Förderung auf den jeweiligen Komponenten individuell bewertet werden. Des Weiteren werden Rückschlüsse auf die angreifenden pneumatischen und mechanischen Kräfte geschlossen und so Entwicklungspotential identifiziert.

Die Verifizierung von durchgeführten DEM-CFD-Simulationen erfolgt anhand der gewonnenen Ergebnisse. Es wird die Genauigkeit der einzelnen Teilprozesse bewertet. Des Weiteren werden bei der Modellierung getroffene Vereinfachungen, wie die Kopplungsmethode zwischen DEM und CFD aus verfahrenstechnischer Sicht bewertet, Kapitel 2.6.4.

Zur Erstellung der Parametersätze und zur Ermittlung der Stoffeigenschaften für DEM-CFD-Simulationen sind aufwendige Vorversuche notwendig [79]. Deshalb wird für theoretische Untersuchungen auf Modellierungen und Simulationen aus der Literatur zurückgegriffen und die in dieser Arbeit durchgeführten DEM-CFD-Simulationen nutzen den von Pförtner [2–5, 137] entwickelten Parametersatz.

## 4 BEWEGUNGSVERHALTEN VON KORN UND NICHTKORNBESTANDTEILEN

### 4.1 Stoffeigenschaften des Versuchsgutes

Für alle experimentellen Untersuchungen wird die Getreideart Weizen und aufgrund der Verfügbarkeit von Spreu und Kurzstroh Strohhäcksel verwendet, **Tabelle 3**.

**Tabelle 3:** Stoffeigenschaften des Versuchsgutes und Einteilung nach Verwendung

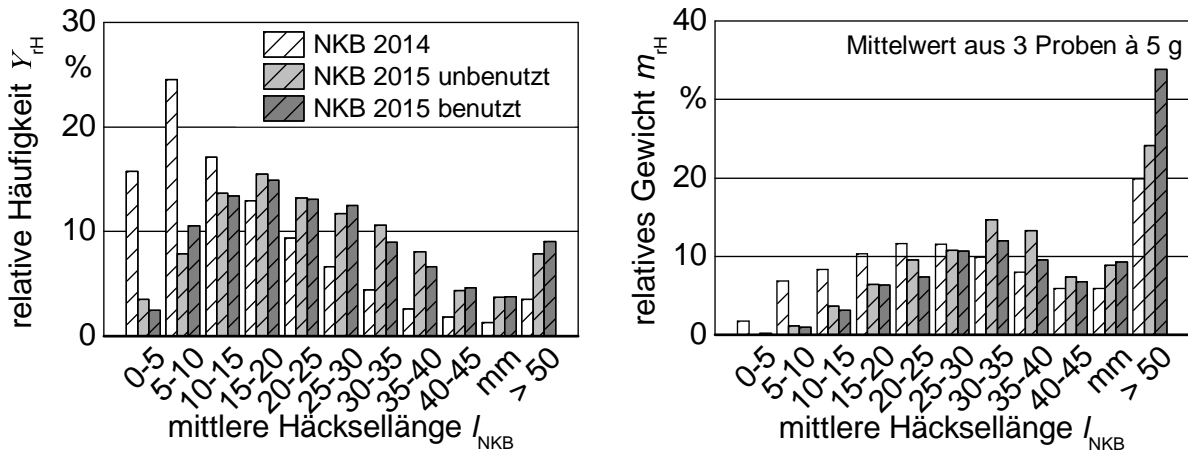
Korn			
1.	Sorte	Schamane 2014 Standort: Heidfeldhof	Miniaturprüfstand (Computertomografie)
	Tausendkorngewicht TKG	47 g	
	Kornfeuchte	12,8 %	
	Schüttdichte	766,5 kg/m <sup>3</sup>	
2.	Sorte	Pamir 2015 Standort: Heidfeldhof	Grundlagen-Reinigungsprüfstand, Reinigungsprüfstand
	Tausendkorngewicht TKG	45,83 g	
	Kornfeuchte	12,2 %	
	Schüttdichte	748,2 kg/m <sup>3</sup>	
NKB			
1.	Sorte	Hermann 2014 Standort: Harsewinkel	Miniaturprüfstand (Computertomografie)
	NKB-Feuchte	11,4 %	
	Schüttdichte	43,2 kg/m <sup>3</sup>	
2.	Sorte	Hermann 2015 Standort: Harsewinkel	Grundlagen-Reinigungsprüfstand, Reinigungsprüfstand
	NKB-Feuchte	11,6 %	
	Schüttdichte	34,9 kg/m <sup>3</sup>	

Schwarz [13] weist auf die eingeschränkte Eignung des Kaskadensiebs zur Längenanalyse von Kurzstroh hin, weshalb die Einzelpartikelvermessung herangezogen wird. Es zeigt sich für die Proben aus dem Erntejahr 2014 eine hoher Anteil an Bestandteilen mit einer mittleren Häcksellänge von  $l_{\text{NKB}} = 5\text{--}10$  mm, **Bild 30**.

Das Versuchsgut aus dem Erntejahr 2015, mit einer maximalen Häufigkeit bei Häcksellängen im Bereich  $l_{\text{NKB}} = 15\text{--}20$  mm, zeigt geringfügige Änderungen zwischen dem unbenutzten und benutzten Zustand. Da für die Untersuchungen mittels Computertomografie kein benutztes Versuchsgut aus dem Erntejahr 2014 verwendet wurde, ist hierzu keine Klassierung durchgeführt worden.

Neben den langen Bestandteilen weisen ebenfalls die  $l_{\text{NKB}} = 30\text{--}40$  mm-Fractionen große Massenanteile auf, Bild 30. Diese Bestandteile sind häufig unbeschädigte Halmfragmente mit

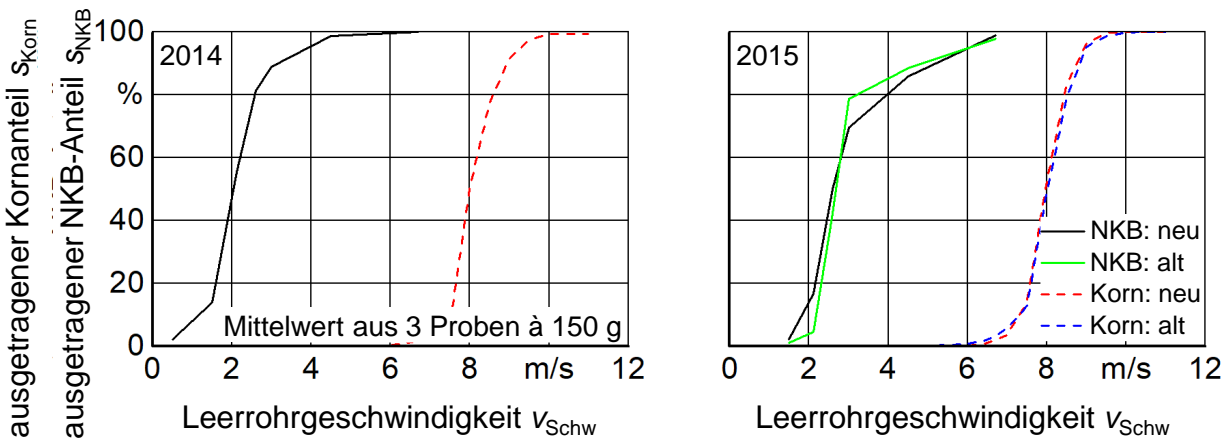
Internodien. Die aerodynamischen Eigenschaften dieser Halmfragmente sind ähnlich den aerodynamischen Korneigenschaften und beeinflussen somit den Arbeitserfolg der Mährescherreinigungsanlage stark.



**Bild 30:** Längenklassierung des verwendeten Versuchsgutes

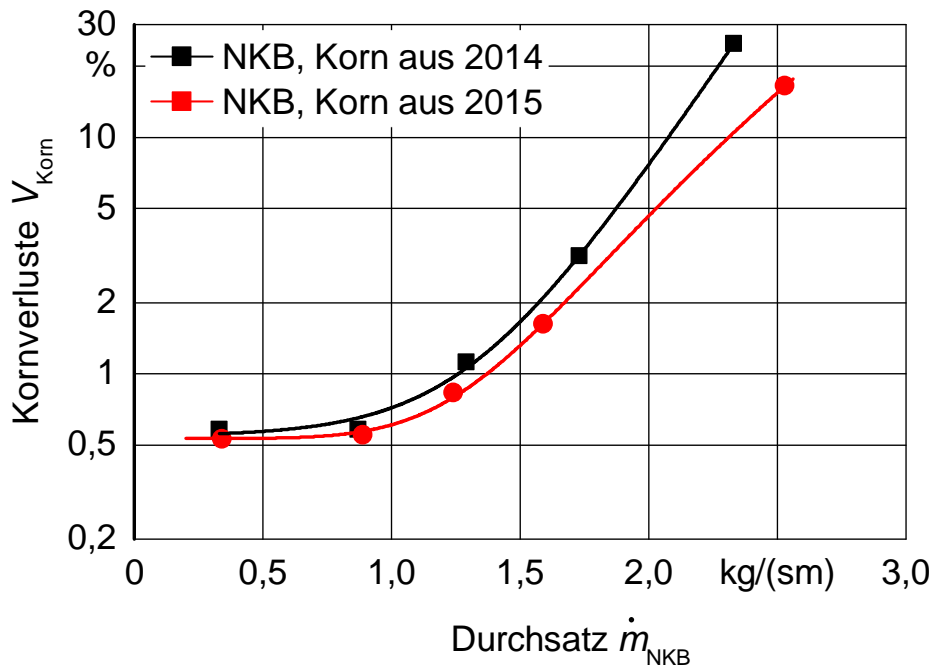
Ein Vergleich der Schwebekennlinien zeigt eine geringe Änderung zwischen den gleichen Bestandteilen über die Erntejahre sowie für benutztes (alt) und unbenutztes (neu) Material,

**Bild 31.**



**Bild 31:** Schwebekennlinien des verwendeten Versuchsgutes

Mit dem Reinigungsprüfstand [13] aufgenommene Durchsatz-Kornverlust-Kennlinien zeigen ein geringeres Verlustverhalten mit dem Erntegut aus 2015, **Bild 32**. Die Versuche wurden jeweils mit unbenutztem Material am selben Tag durchgeführt. Die Prüfstandseinstellungen befinden sich im **Anhang 8.5**



**Bild 32:** Durchsatz-Kornverlust-Kennlinien zur Bestimmung des Einflusses der Stoffeigenschaften; Prüfstandseinstellungen in Anhang 8.5

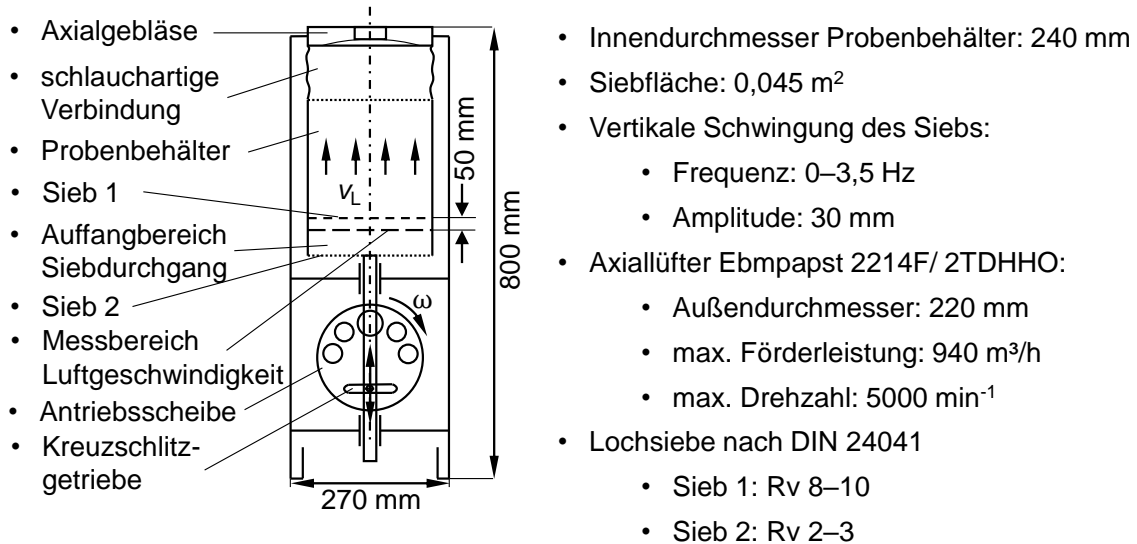
## 4.2 Aufbau der Versuchseinrichtungen

### 4.2.1 Miniaturprüfstand und Computertomografie

Der in [72] beschriebene Miniaturprüfstand ermöglicht die Untersuchung der Entmischung und Abscheidung an einem vertikal oszillierenden, luftdurchströmten Sieb. Die Abmessungen sind so gewählt, dass eine Untersuchung mittels Röntgen-Computertomografie möglich ist. Für eine annähernd sinusförmige Anregung wird der Antrieb durch ein Kreuzschlitzgetriebe ersetzt,

#### **Bild 33.**

Das als Sauggebläse installierte Axialgebläse [144] führt keine Schwingungen aus [2, 76]. Die über den Querschnitt gemittelte Luftgeschwindigkeit in einem Abstand von  $\bar{s} = 50$  mm unter dem belegten Sieb 1 wird über Pulsweitenmodulation der Gebläsedrehzahl eingestellt. Die Frequenz der vertikalen Schwingung sowie die Anlauf- und Bremsbeschleunigung sind über einen Getriebe-Schrittmotor [145] einstellbar. Bei einer festen Amplitude von  $a = 30$  mm wird die Froudezahl  $Fr$  nach Gl. 3 direkt über die Frequenz definiert. Der Siebdurchgang wird von dem luftdurchlässigen Sieb 2 aufgefangen. Für eine Untersuchung des Durchdringungsverhaltens [11] ist in Wiederholungsversuchen der Auffangbereich durch eine Waage ersetzt.



**Bild 33:** Aufbau des Miniaturprüfstands zur Untersuchung der Entmischung und Abscheidung mittels Röntgen-Computertomografie nach [72]

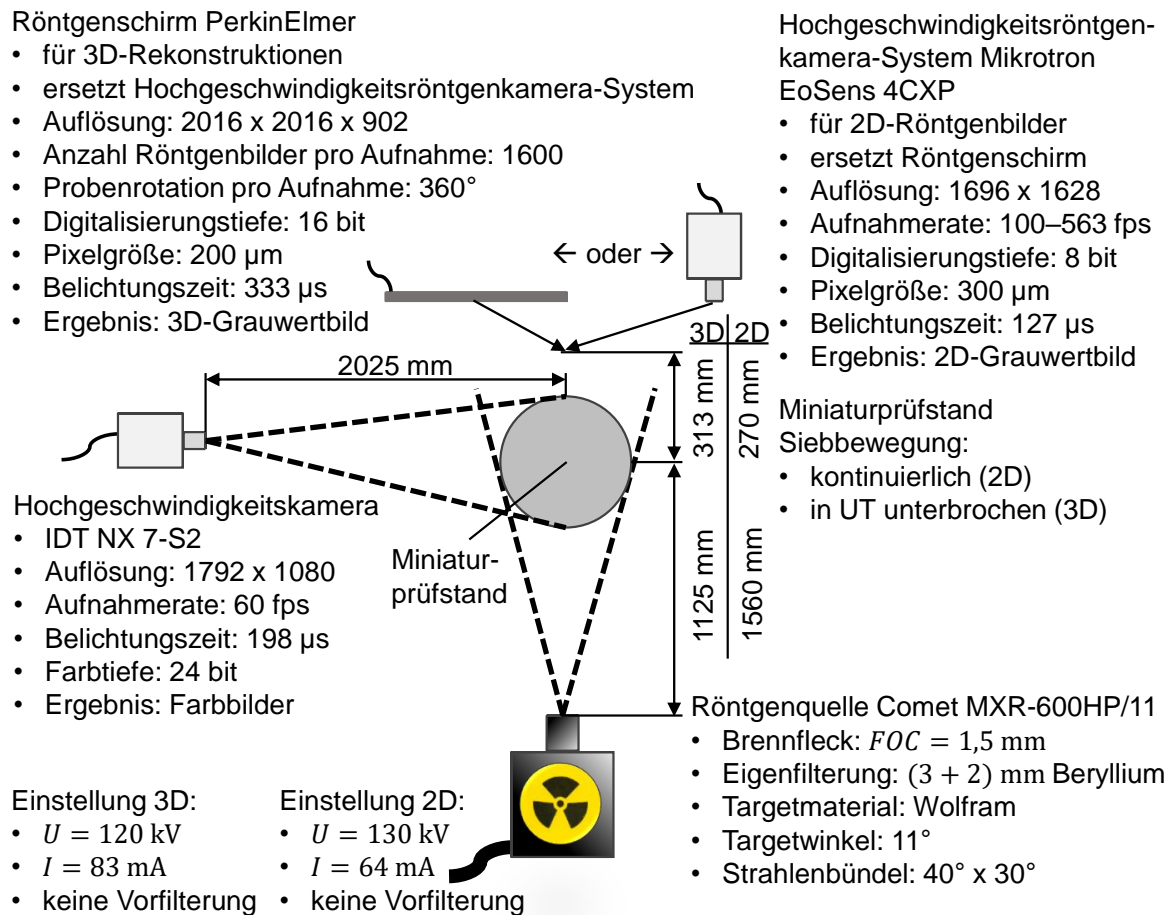
Zur Aufnahme von 2D-Röntgenbildern mit dem Hochgeschwindigkeitsröntgenkamera-System (2D-CT) ist die Aufnahmefrequenz in Abhängigkeit der Entmischungszeit im Bereich von 100–563 Bilder/s gewählt. Zeitgleich aufgenommene Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen (HS) mit einer Aufnahmefrequenz von 60 Bilder/s erlauben eine parallele Auswertung und einen Vergleich. Der Versuchsaufbau sowie die gewählten Einstellungen aller Komponenten sind in **Bild 34** ersichtlich.

Den 2D-Röntgenaufnahmen sind 3D-Rekonstruktionen (3D-CT) für die Versuche

1.  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,14 \text{ kg/sm}$ ,  $Fr = 1,31$ ,  $v_L = 0 \text{ m/s}$

2.  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,14 \text{ kg/sm}$ ,  $Fr = 1,31$ ,  $v_L = 1 \text{ m/s}$

nachgeschaltet. Diese werden vor jeder Schwingung im unteren Totpunkt (UT) erstellt. Dazu wird die Anregung im unteren Totpunkt für die Aufnahme unterbrochen. Die Anpassung der Anlauf- und Bremsbeschleunigungen anhand der Froudezahl auf  $\check{b}_S = 12,85 \text{ m/s}^2$  erlaubt dieses Vorgehen. Bedingt durch die Unterbrechung trifft das Versuchsgut immer im unteren Totpunkt auf das Sieb, was zu veränderter Zeit der Wurfphase und verändertem Auftreffwinkel führt. Zur zusätzlichen Kontrolle sind ebenfalls 2D-Röntgenaufnahmen während der absätzigen Anregung erstellt worden. Diese zeigen eine Gutbewegung wie beim kontinuierlichen Entmischungsvorgang. Der Einfluss der Anregungsunterbrechung ist vernachlässigbar. Die Erstellung der 3D-Rekonstruktionen ist nicht zeitgleich zu den 2D-CT-Aufnahmen möglich.

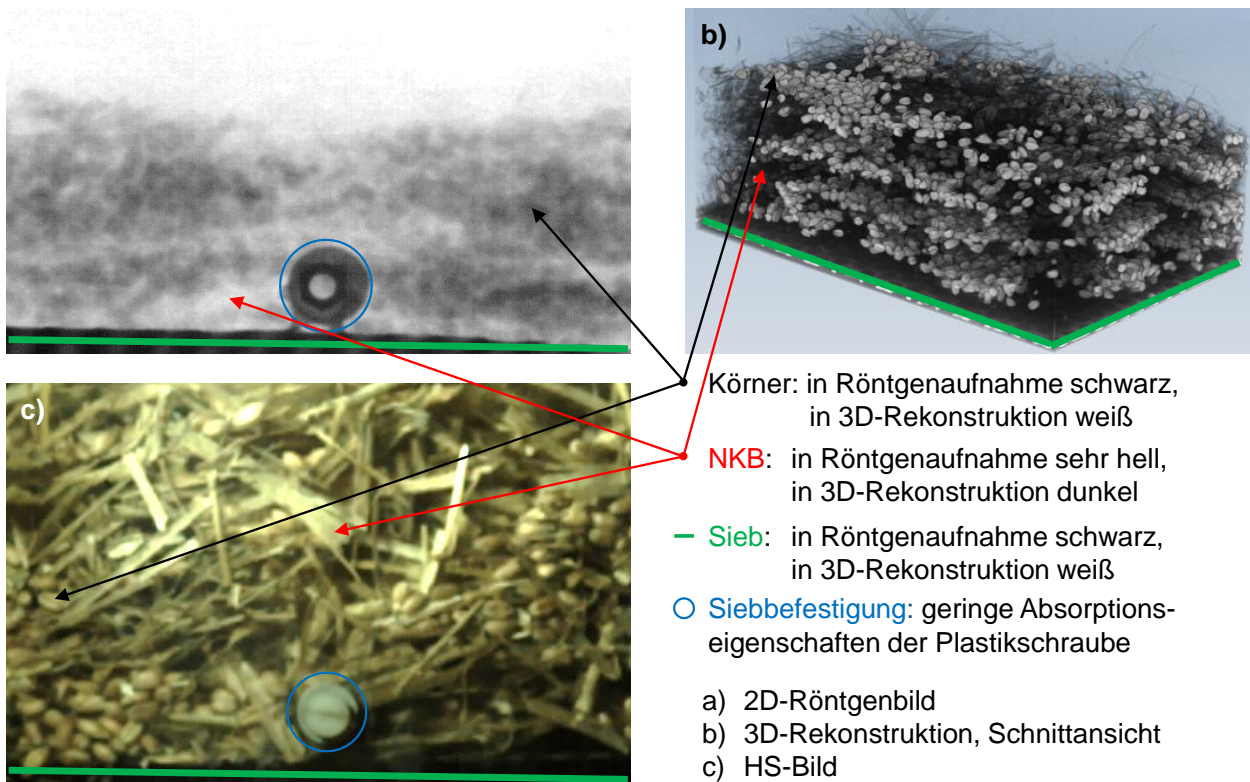


**Bild 34:** Versuchsaufbau zur Erstellung von 2D-Röntgen-, Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen und 3D-Rekonstruktionen (Draufsicht)

Die Einstellungen der Röntgenröhre und des Hochgeschwindigkeitskamera-Systems bzw. Röntgenschirms sind so gewählt, dass NKB schwach sichtbar und aufgrund des größeren Absorptionsvermögens Korn deutlich dargestellt ist, Bild 34. Der Kontrast wird abhängig von der Digitalisierungstiefe in zweckmäßigen Grenzen ausgenutzt.

2D-Röntgenbild:	Digitalisierungstiefe 8 bit	Grauwert-Abstufungen 0–255
3D-Rekonstruktion:	Digitalisierungstiefe 16 bit	Grauwert-Abstufungen 0–65.535
HS-Bild:	Digitalisierungstiefe 24 bit	Farbwert-Abstufungen R,G,B 0–255

Die Funktion des Hochgeschwindigkeitsröntgenkamera-Systems ist der Funktion einer Kamera angelehnt. Die stärkere Absorption der Körner bewirkt kleinere Grauwerte und somit dunklere Bereiche im Röntgenbild, **Bild 35 a**). Anhand der Funktion des Röntgenschirms besitzen Bereiche mit größerer Absorption in den 3D-Rekonstruktionen größere Grauwerte und werden somit heller dargestellt, Bild 35 b). Beispielhafte HS-Aufnahmen sind in Bild 35 c) ersichtlich.

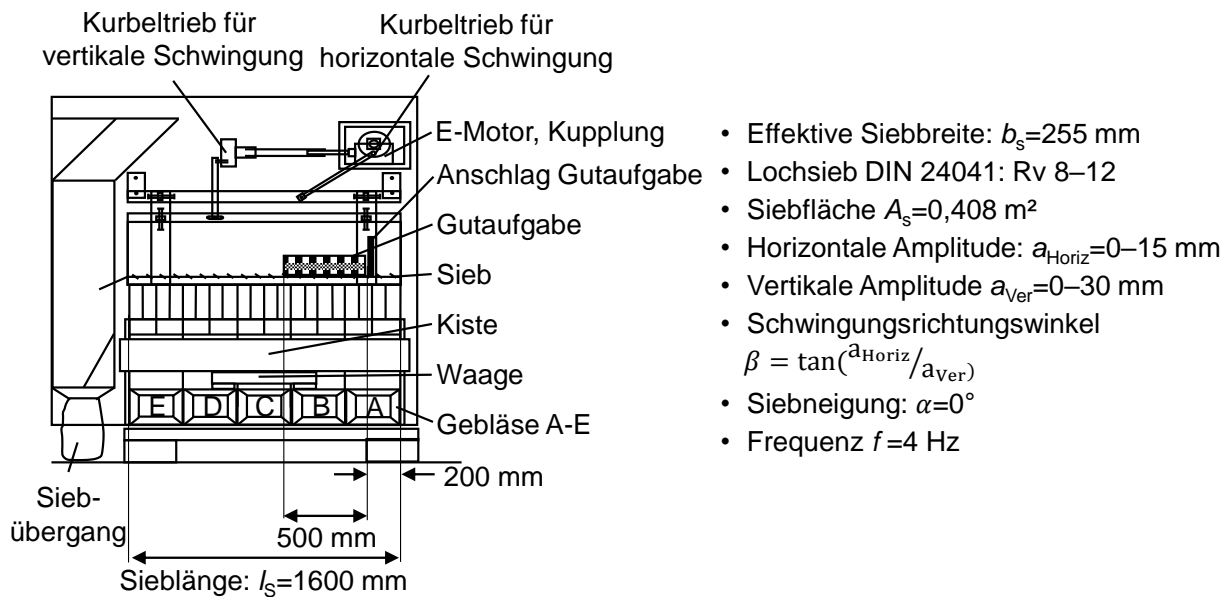


**Bild 35:** Beispielhafte 2D-Röntgen-, Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahme und 3D-Rekonstruktion

#### 4.2.2 Grundlagen-Reinigungsprüfstand

Zur Untersuchung des Einflusses der horizontalen Gutbewegung auf die Entmischung wird der Grundlagen-Reinigungsprüfstand verwendet, **Bild 36**. Die Aufzeichnung von Durchdringungszeitkurven ist durch eine Kiste und eine Waage gegeben, die unter dem Sieb installiert werden. Die Luftführung der Gebläse A-E ist analog zum Miniaturprüfstand normal zum Sieb. Die Luftgeschwindigkeit wird über die Gebläsedrosselung realisiert und durch Messungen mittels Heißfilmanemometer an mehreren Stellen unter dem Sieb kontrolliert.

Der Siebantrieb besteht aus getrennten Kurbeltrieben für die Horizontal- und Vertikalbewegung. Die entsprechenden Sinusschwingungen bilden die Komponenten der resultierenden Siebbewegung. Die Lamellenkupplung ermöglicht das Einstellen der Phasenverschiebung und somit die Art der Siebbewegung. Bei einer linearen Siebbewegung (Phasenverschiebung  $0^\circ$ ) wird der Schwingungsrichtungswinkel  $\beta$  über die Amplituden definiert. Ausgehend vom Miniaturprüfstand beträgt die horizontale Amplitude  $a_{\text{Horiz}} = 0$  mm, die vertikale Amplitude  $a_{\text{Ver}} = 30$  mm und somit der Schwingungsrichtungswinkel  $\beta = 90^\circ$ . Bei Erhöhung der horizontalen Amplitude steigt die Fördergeschwindigkeit an. [136, 137]



**Bild 36:** Grundlagen-Reinigungsprüfstand zur Untersuchung des Einflusses der horizontalen Gutbewegung auf die Entmischung und Abscheidung

### 4.3 Versuchsplanung und -durchführung

Die zu untersuchenden Einflussfaktoren sind unter Berücksichtigung von prüfstandsbedingten Einschränkungen an die Einstellungen der Mähdrescherreinigungsanlage angelehnt, **Tabelle 4**. Die Versuchspläne befinden sich in **Anhang 8.6**.

**Tabelle 4:** Mit dem Miniatur- und Grundlagen-Reinigungsprüfstand untersuchte Faktoren

<b>Miniaturprüfstand</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Durchsatz $\dot{m}_{\text{NKB}}$ / kg/sm	0,58	1,14	1,6	
Frequenz $f$ / Hz	3,3	2,88	2,15	
Amplitude $a_{\text{Ver}}$ / mm	30			
Froudezahl $Fr$ nach Gl. 3	1,31	1	0,56	
Luftgeschwindigkeit $v_L$ / m/s	0	0,5	1	
<b>Grundlagen-Reinigungsprüfstand</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Durchsatz $\dot{m}_{\text{NKB}}$ / kg/sm	0,58	1,14	1,6	
Frequenz $f$ / Hz	4			
Siebneigung $\alpha$ / °	0			
horizontale Amplitude $a_{\text{Horiz}}$ / mm	0	5	10	15
vertikale Amplitude $a_{\text{Ver}}$ / mm	0	15	30	
Froudezahl $Fr$ nach Gl. 3	0	0,97	1,93	
Luftgeschwindigkeit $v_L$ / m/s	0	1	2,5	

Das Versuchsgut wird für beide Prüfstände schichtweise in der Reihenfolge Korn auf Stroh aufgegeben, wobei der spez. NKB-Durchsatz die Anzahl der Schichten definiert, **Tabelle 5**.

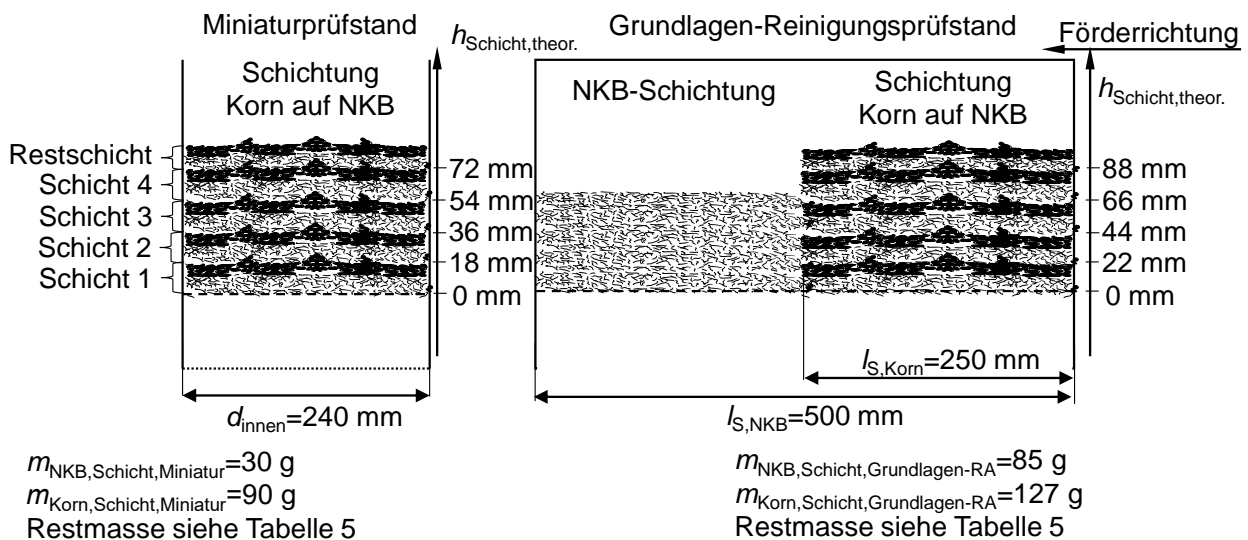
Zur Berechnung der Siebbelastung wird nach **Gl. 14** eine Fördergeschwindigkeit von  $v_F = 0,5 \text{ m/s}$  angenommen [13].

$$m_{\text{NKB,ges}} = \frac{\dot{m}_{\text{NKB}} \cdot A_S}{v_F} = \frac{m_{\text{Korn,ges}}}{\check{s}} \quad (14)$$

**Tabelle 5:** Spez. NKB-Durchsätze und Aufgabemengen

$\dot{m}_{\text{NKB}}$ kg/sm	NKB			Korn			Theor. Schicht- höhe mm
	$m_{\text{NKB,ges}}$ g	Schicht- anzahl	Restmasse g	$m_{\text{Korn,ges}}$ g	Schicht- anzahl	Restmasse g	
<b>Miniatuprüftand</b>							
0,58	52	1	22	157	1	67	31,1
1,14	103	3	13	309	3	39	61,6
1,6	145	4	25	434	4	74	86,7
<b>Grundlagen-Reinigungsprüftand</b>							
0,58	148	1	63	222	1	95	37,9
1,14	291	3	36	436	3	55	74,5
1,6	408	4	68	612	4	104	104,5

Die schichtweise Aufgabe erlaubt eine reproduzierbare Annäherung an das in der Reinigungsanlage vorhandene Gemisch. Die Massen der Schichten ergeben sich anhand der praktikablen Schichtbarkeit im Miniatuprüftand bei einem Korn-NKB-Massenverhältnis von  $\check{s} = 75 : 25$ , **Bild 37**. Die Siebflächenverhältnisse definieren die Schichten für den Grundlagen-Reinigungsprüftand. Zur Einhaltung des spezifischen Durchsatzes ist die Masse (Restmasse in Tabelle 5) der oberen Stroh- und Kornschicht geringer.



**Bild 37:** Methode zur schichtweisen Aufgabe des Versuchsgutes

Die Sieblänge, die mit NKB bedeckt ist, beträgt beim Grundlagen-Reinigungsprüfstand  $l_{S,NKB} = 2 \cdot l_{S,Korn} = 500$  mm. Dies verhindert die direkte Abscheidung am Rand liegender Körner, die während der Förderung von der Schichtung fallen, Bild 37.

Die in Tabelle 5 und Bild 37 aufgelistete theoretische Schichthöhe  $h_{Schicht,theor.}$  wird anhand der Siebbeladung und der Korn- bzw. NKB-Dichten berechnet, **Gl. 15**. Da die Schüttdichten entsprechend dem verwendeten Versuchsgut (Tabelle 3) für die Prüfstände unterschiedlich sind, ergeben sich für die theoretische Schichthöhe ebenfalls unterschiedliche Werte.

$$h_{Schicht,theor.} = \frac{m_{NKB,ges}}{\rho_{NKB} \cdot A_S} + \frac{m_{Korn,ges}}{\rho_{Korn} \cdot A_S} \quad (15)$$

Zur Erreichung einer reproduzierbaren Gutaufgabe in den schwer befüllbaren Probenbehälter vom Miniaturprüfstand wird das Korn mittels Fächer-Dosierer auf die NKB verteilt. Dieser besteht aus neun Öffnungen, die durch eine Drehbewegung verschließbar sind, **Bild 99** in **Anhang 8.7**. Dadurch stellt sich eine ungleichmäßige Flächenverteilung ein. Außerdem gelangt durch den Drehpunkt wenig Korn in die Mitte des Probenbehälters. Durch die reproduzierbaren Versuchsbedingungen sind die Ergebnisse vergleichbar.

Nach der Siebbelegung erfolgt die Versuchsdurchführung mit den zu untersuchenden Einflussfaktoren, Tabelle 4. Die Durchdringungszeitkurve wird aus dem Mittelwert von drei Versuchsgängen definiert. Während des Versuchs fallen ebenfalls kleine Anteile der NKB durch das Sieb. Um diesen Einfluss zu reduzieren, wird eine zusätzliche Durchdringungszeitkurve für reines NKB aufgenommen und diese von der Durchdringungszeitkurve für Korn und NKB subtrahiert.

## 4.4 Methoden zur visuellen Auswertung

### 4.4.1 Einfluss der Abschwächung der Röntgenstrahlen

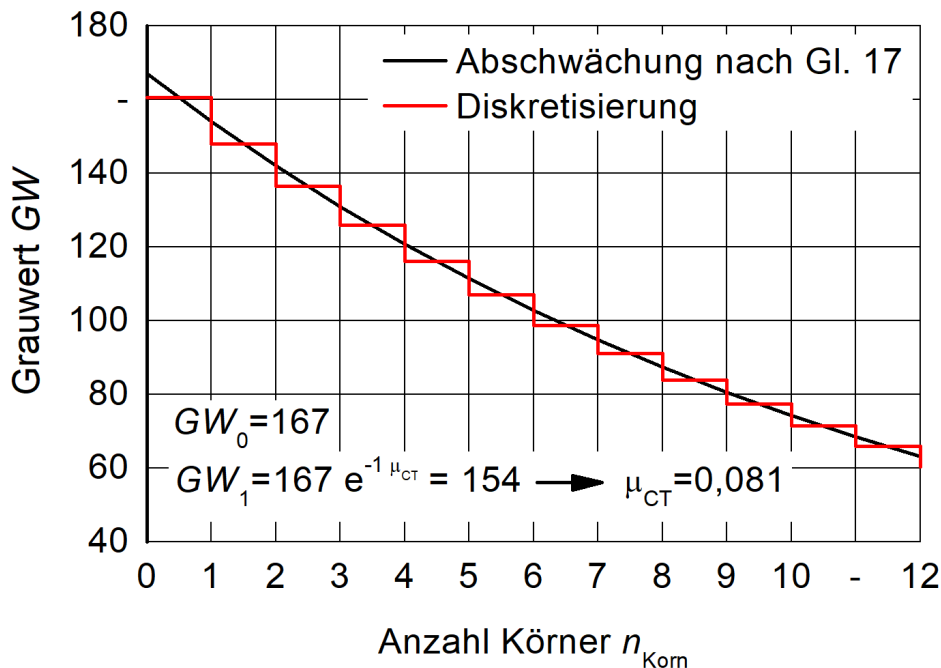
Die Reduzierung von Bildrauschen und Helligkeitsunterschieden erfolgt mittels Zwei-Punkt-Kalibrierung mit aufgenommenen Dunkel- und Referenzbildern [146]. Eine Abstrahierung der einzelnen Körner in den 2D-Röntgenbildern ist nicht möglich [72]. Deshalb erfolgt die Detektion und Positionsbestimmung auf Pixelbasis anhand der Grauwerte. In Strahlungsrichtung hintereinander liegende Körner verursachen eine größere Abschwächung und somit geringere Grauwerte, Bild 35 a). Die Abschwächung der Intensität der Röntgenstrahlen wird mit dem Lambert-Beer'schen Gesetz beschrieben [147], **Gl. 16**.

$$I_R = I_{CT,0} e^{-\mu_{CT} l_{Obj}} \quad (16)$$

Die Intensität  $I_R$  der Röntgenstrahlung wird durch den entsprechenden Grauwert  $GW$  definiert. Die Anfangsintensität  $I_{CT,0}$  entspricht dem Grauwert  $GW_0$ , wenn kein Korn die Strahlung abschwächt. Diese wird aus den Röntgenbildern bestimmt. Die ähnliche Geometrie der Weizenkörner und die geringe Absorptionseigenschaften der NKB erlauben eine Diskretisierung der Absorptionslänge  $l_{Obj}$  in die Körneranzahl  $n_{Korn}$ , **Gl. 17**. Der Abschwächungskoeffizient  $\mu_{CT}$  wird aus den Grauwerten für eine bekannte Anzahl an hintereinander liegenden Körnern bestimmt, **Bild 38**.

$$GW = GW_0 e^{-\mu_{CT} n_{Korn}} \quad (17)$$

Mittels Schwellwertbildung [148] erfolgt die Diskretisierung des Grauwert-Bereiches, der die Anzahl an Körnern in der Tiefe definiert, Bild 38. Eine Positionsbestimmung in der Tiefe ist dabei nicht möglich.



**Bild 38:** Abschwächungsverhalten der Röntgenstrahlen nach Gl. 17

#### 4.4.2 Methoden zur Detektion der Gutbestandteile

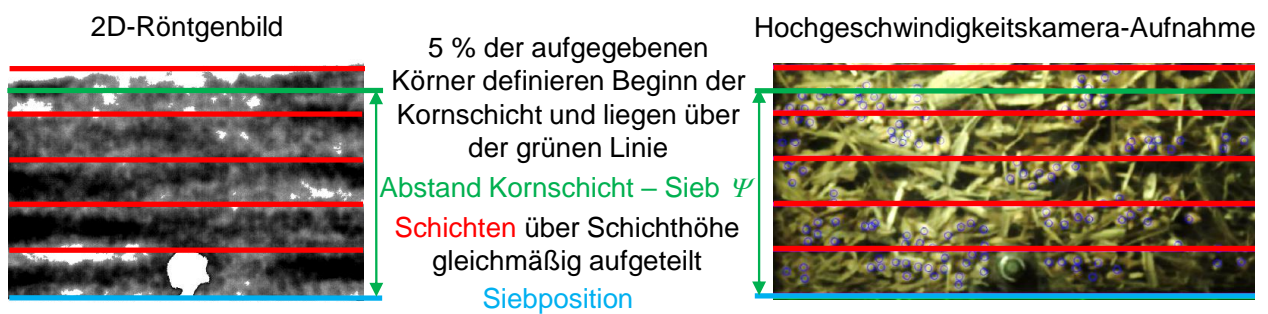
Die Auswertung der Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen beinhalten die Detektion von Korn in dem aufgenommenen Korn-NKB-Gemisch, Bild 35 c). Diese wird mit der Blob-Erkennung [149] aus der openCV-Sammlung [150] durchgeführt, **Bild 39**. Für eine höhere Genauigkeit werden die Detektionen manuell korrigiert.

3D-Rekonstruktionen werden als 3D-Matrix dargestellt. Die Position eines Elementes in der Matrix gibt den Ort, der Wert den entsprechenden Grauwert an. Die Umrechnung in mm erfolgt

direkt bei der Erstellung der Rekonstruktion. Die höhere Digitalisierungstiefe von 16 bit und die tatsächliche dreidimensionale Struktur erlauben die Unterscheidung von Korn, NKB und Luft anhand der Grauwerte. Dadurch ist es möglich Hohlräume und Körner in der Gutschicht zu detektieren und deren Position (x,y,z) anzugeben. Die Auswertung wird zum einen mit den Koordinaten der detektierten Körner durchgeführt. Sich berührende Körner werden dabei mithilfe der Wasserscheidentransformation [151–153] getrennt. Zum anderen erfolgt die Auswertung auf Basis der einzelnen Pixel, um die Auswertung der 2D-Röntgenbilder zu verifizieren.

#### 4.4.3 Bewertungsgrößen

Die Bewertung der Entmischung und Abscheidung erfolgt anhand des Abstandes der Kornschicht zum Sieb  $\psi$  und der Sinkgeschwindigkeit  $v_{\text{Sink}}$  [72], die als zeitliche Ableitung des Abstandes Kornschicht - Sieb definiert ist. 5 % der aufgegebenen Körner definieren den Beginn der Kornschicht, Bild 39.



**Bild 39:** Bewertung der Entmischung und Abscheidung mittels bildgebender Verfahren

Des Weiteren wird die Entmischung in Abhängigkeit der Schichthöhe bewertet. Dazu wird die gesamte Schichthöhe in Schichten entsprechend der Anzahl der aufgegebenen Schichten nach Bild 37 eingeteilt und die prozentuale Abnahme der Körneranzahl in den jeweiligen Schichten berechnet, Bild 39. Die über einen infinitesimalen Zeitbereich  $\partial t$  abgeschiedene Kornmasse  $\partial m_{\text{Korn}}$  ergibt den Entmischungsmassenstrom  $\dot{m}_{\text{EM}}$ , **Gl. 18**. Die Abbildung des Entmischungsverlaufes mittels linearer Regression ermöglicht die Bestimmung des Entmischungsmassenstroms mithilfe des Differenzenquotienten  $\Delta$ .

$$\dot{m}_{\text{EM}} = \frac{\partial m_{\text{Korn}}}{\partial t} = \frac{\Delta m_{\text{Korn}}}{\Delta t} \quad (18)$$

Die Auswertung wird für die Bilder durchgeführt, in denen sich die Gutschicht auf dem Sieb befindet und weder komprimiert noch expandiert ist. Über die Aufnahmefrequenz und Referenzgeometrien ist die Transformation in s und mm möglich.

Die Detektion des Siebs sowie der Schichthöhe erlaubt bei den 2D-Röntgenaufnahmen außerdem die Bestimmung des zeitlichen Bewegungsverhaltens der Gutschicht und somit des Auflockerungsverhältnisses.

Zur Auswertung wird auf Matlab® mit der Image Acquisition Toolbox™, der Image Processing Toolbox™ sowie auf weitere Funktionen [154–158] zurückgegriffen. Zur Visualisierung wird die Software VolumePlayerPlus® [159] und VGStudio MAX® [160] verwendet.

## 4.5 Ergebnisse

### 4.5.1 Verifizierung der Bewertungsgrößen

Die Verifizierung der Korndetektion erfolgt mit den 3D-Rekonstruktionen, die vor Versuchsbeginn aufgenommen wurden. Die detektierte Anzahl an Körnern wird mit der Körneranzahl verglichen, die über das Tausendkorngewicht (TKG) bestimmt wurde, **Tabelle 6**. Die Abweichungen von maximal  $k = 1,48\%$  liegen im Bereich der Standardabweichung des Tausendkorngewichts [13], was die Richtigkeit der Detektion in diesem Bereich nachweist.

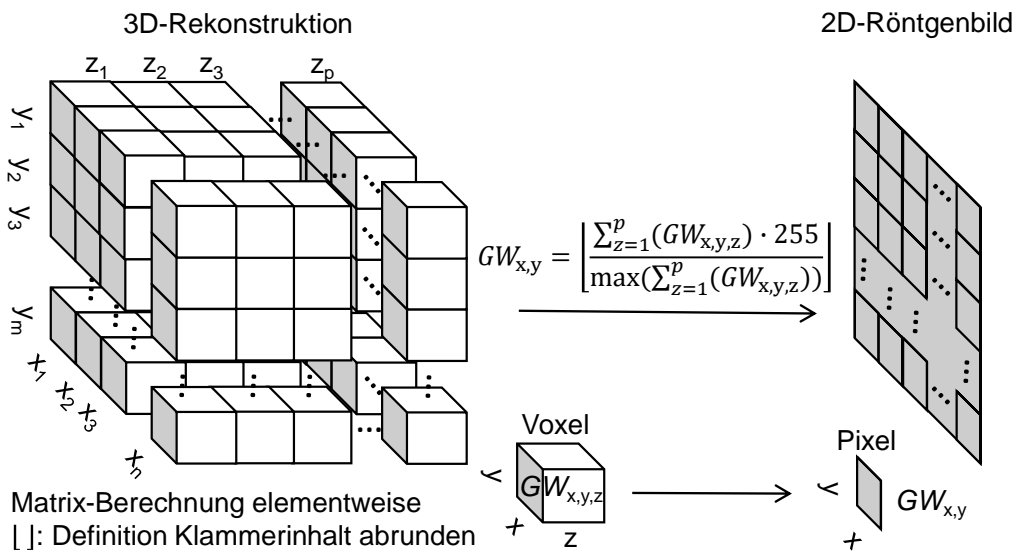
**Tabelle 6:** Verifizierung der Korndetektion bei den 3D-Rekonstruktionen

Versuch 1, 14 kg/sm	Bestimmung der Anzahl Körner		Abweichung	
	mittels Korndetektion	mittels TKG	Anzahl Körner	%
1: $v_L = 0$ m/s	6477	6574	97	1,48
2: $v_L = 1$ m/s	6558	6574	16	0,24

Die Verifizierung der Bestimmung hintereinander liegender Körner über das Abschwächungsverhalten der Röntgenstrahlen bei den 2D-Röntgenbildern wird ebenfalls mithilfe der 3D-Rekonstruktionen erreicht. Dazu wird das dreidimensionale Bild über eine Tiefenaddition der Grauwerte in ein zweidimensionales Röntgenbild überführt und entsprechend der 8 bit-Kodierung auf Grauwerte zwischen 0–255 skaliert, **Bild 40**. Das überführte Röntgenbild ist somit den aufgenommenen 2D-Röntgenbildern gleich und wird analog ausgewertet. Die Bestimmung des Abstandes der Kornsicht zum Sieb und die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit erfolgt bei den überführten Röntgenbildern auf Pixelbasis, bei den 3D-Rekonstruktionen anhand der detektierten Körner.

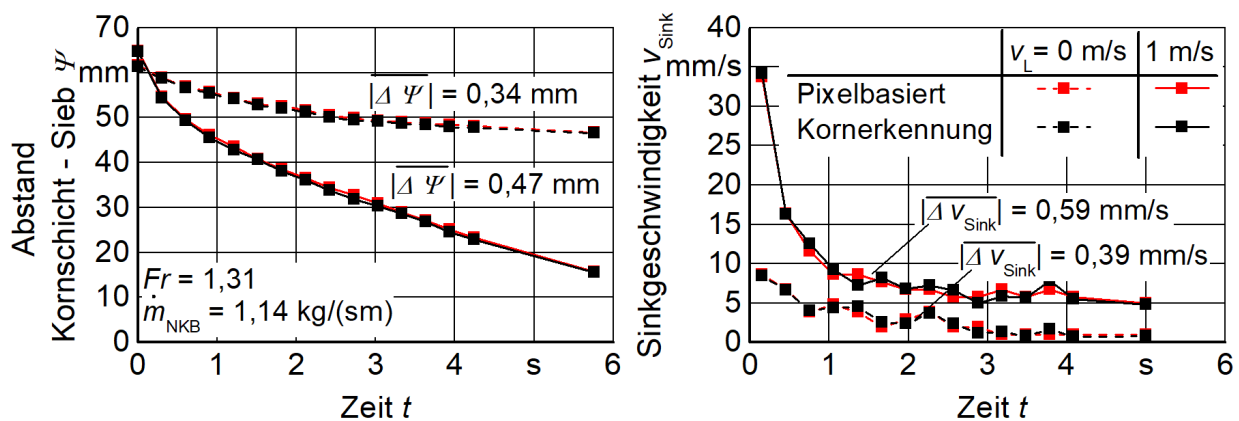
Die betragsmäßig mittlere Abweichung des Abstands Kornsicht - Sieb bei dem Versuch ohne Luftunterstützung beträgt  $|\overline{\Delta \Psi}| = 0,34$  mm, **Bild 41**. Bei einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 1$  m/s beträgt die Abweichung  $|\overline{\Delta \Psi}| = 0,47$  mm. Dies zeigt die hohe Genauigkeit der Auswertung hintereinander liegender Körner auf Pixelbasis und bestätigt die Zulässigkeit der Auswertungsmethode. Die Schichthöhe zu Versuchsbeginn ist bei gleichen Anfangsbedingungen

durch zufällige Störgrößen ähnlich. Durch das schlechtere Abscheideverhalten bei dem Versuch ohne Luft ist der Kurvenverlauf flacher.



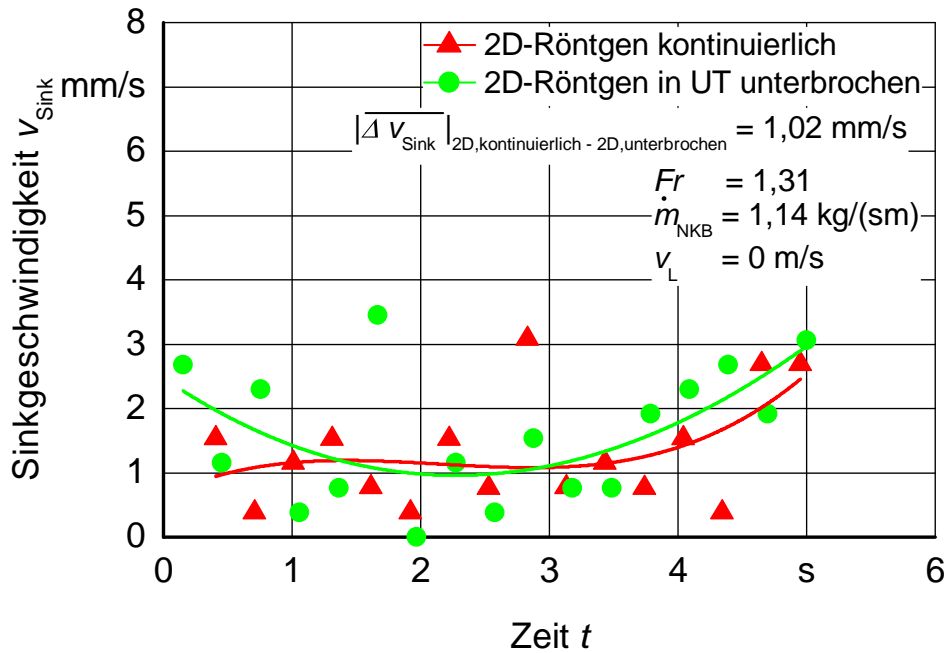
**Bild 40:** Überführung der 3D-Rekonstruktion in ein 2D-Röntgenbild

Die Verläufe der Sinkgeschwindigkeit zeigen höhere Werte zu Versuchsbeginn und eine annähernd lineare Abnahme im Zeitbereich ab  $t = 1$  s, Bild 41. Höhere Sinkgeschwindigkeiten bei Luftunterstützung bedeuten eine schnellere Entmischung.



**Bild 41:** Verifizierung der Bestimmung hintereinander liegender Körner in einem 2D-Röntgenbild

Ein Vergleich der Sinkgeschwindigkeit während der kontinuierlichen und der im UT unterbrochenen Anregung ermöglicht die Bewertung der unterbrochenen Siebbewegung. Es zeigt sich ein ähnlicher Verlauf mit einer betragsmäßig mittleren Abweichung von  $|\Delta v_{\text{Sink}}| = 1,02 \text{ mm/s}$ , **Bild 42**. Diese Abweichung ist kleiner als die stochastischen Schwankungen, weshalb der Einfluss der Unterbrechung vernachlässigbar ist.



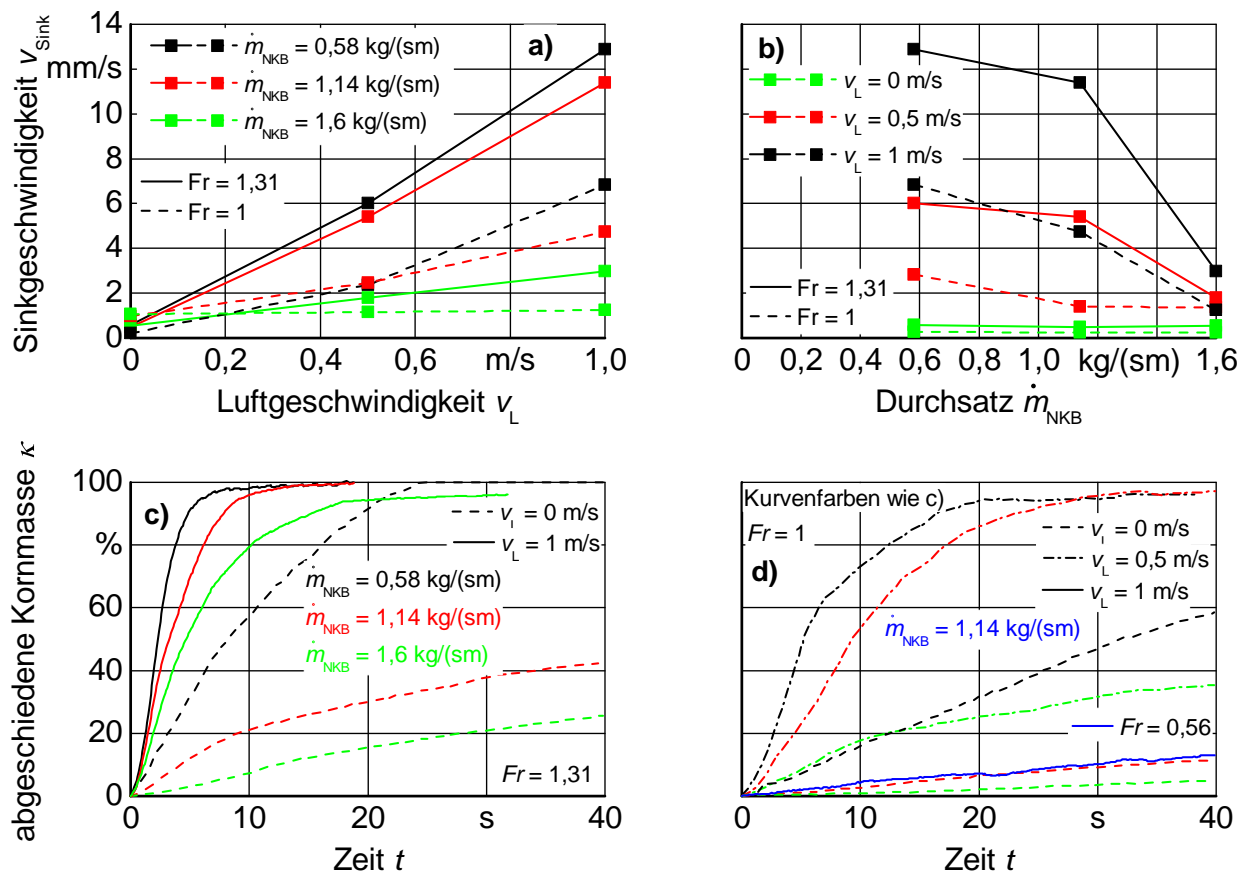
**Bild 42:** Einfluss der Unterbrechung der Siebbewegung im unteren Totpunkt

#### 4.5.2 Einfluss der Anregungsparameter

Eine schnellere Entmischung resultiert aus einer höheren Luftgeschwindigkeit. Dies bedeutet eine höhere Sinkgeschwindigkeit der Körner durch die Gutschicht, **Bild 43 a**). Eine größere mechanische Anregung beeinflusst die Entmischung ebenfalls positiv. Der Einfluss ist bei höheren Luftgeschwindigkeiten größer.

Die Sinkgeschwindigkeit als Bewertungsgröße erhöht das Prozessverständnis, da diese im Gegensatz zur Durchdringungszeit aus versuchstechnischer Sicht unabhängig von der Schichthöhe (der Entmischungs-Strecke der Körner durch die Gutschicht) ist. Höhere Schichthöhen führen bei theoretisch gleicher Sinkgeschwindigkeit zu längeren Entmischungs- und somit zu größeren Durchdringungszeiten. In Bild 43 b) ist dennoch eine negative Korrelation zwischen der Sinkgeschwindigkeit und dem Durchsatz erkennbar. Dies lässt auf Verdichtungen der unteren Haufwerkszonen bei größeren Schichthöhen schließen, die die Entmischung behindern, **Kapitel 4.5.3**.

Der Verlauf der Durchdringungszeitkurven korreliert mit der Sinkgeschwindigkeit, Bild 43 c)–d). Schnellere Abscheidungen resultieren aus höheren Luftgeschwindigkeiten und Froudezahlen sowie geringeren Durchsätzen. Die untersuchten Bereiche der Anregung sind zu gering und lassen keine Aussage bezüglich optimaler Einstellungen zu. Die Ergebnisse bestätigen dennoch die Auswertungen der Durchdringungszeit für unterschiedliche Anregungen von Damm [53].

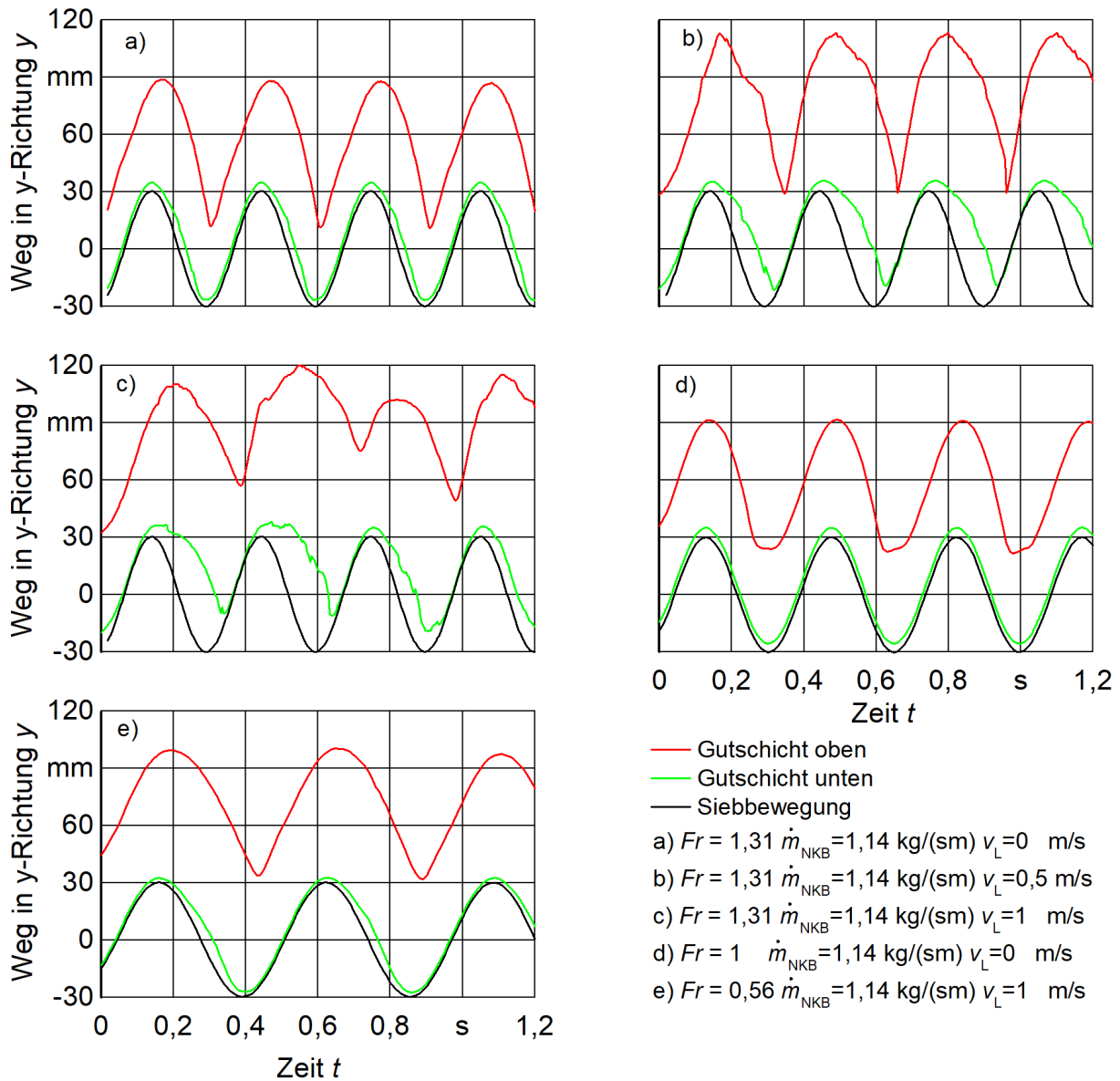


**Bild 43:** Einfluss der Luftgeschwindigkeit, Siebeschleunigung und Schichthöhe auf die Entmischung und Abscheidung

Die Entmischung und Abscheidung basiert auf den Gutbewegungen, die durch die Anregungen beeinflusst werden. Unterschiedliche Partikel führen verschiedene Flugbahnen aus. Dadurch entstehen Lageänderungen [53]. Eine hohe Kompression der Gutschicht beim Aufkommen auf das Sieb wird durch hohe Aufprallgeschwindigkeiten hervorgerufen und verhindert einerseits die Abscheidung. Andererseits wird eine impulsartige Abscheidung der Körner aufgrund der Massenträgheit bei hohen Aufprallgeschwindigkeiten erreicht. **Bild 44 a)–c)** zeigt den zeitlichen Bewegungsverlauf der Gutschicht für verschiedene Luftgeschwindigkeiten, einem Durchsatz von  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,14 \text{ kg/sm}$  und einer Froudezahl von  $Fr = 1,31$ . Die Flugphase ist durch ein Abheben der Gutschicht vom Sieb gekennzeichnet. Höhere Luftgeschwindigkeiten bewirken längere Flugphasen. Bei einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 1 \text{ m/s}$  geht die obere Schicht bereits von einem 1-fach Wurf in einen Wechselwurf über, Bild 44 c). Dadurch ist die Entmischung am effizientesten, was mit den Aussagen von Baader [59] übereinstimmt, Bild 43. [15, 37, 53]

Die Gutbewegung bei einer Froudezahl von  $Fr = 1$  und keiner Luftunterstützung  $v_L = 0 \text{ m/s}$  weist keine Ablösung von der Sieboberfläche auf, Bild 44 d). Eine Ablösung ist bei einer Froudezahl von

$Fr = 0,56$  und einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 1 \text{ m/s}$  ersichtlich, Bild 44 e). Die Abscheidung ist größer, Bild 43 d).



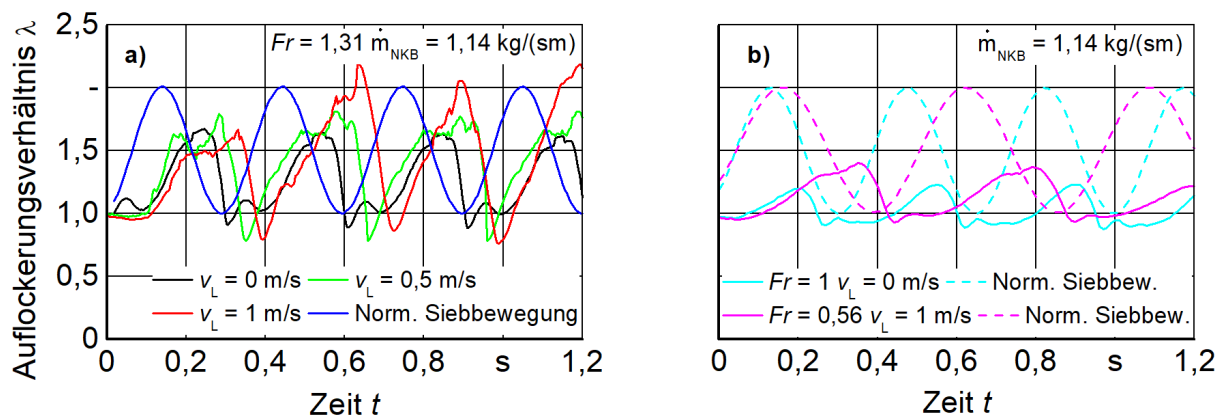
**Bild 44:** Zeitlicher Bewegungsverlauf der Gutschicht in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit und der Froudezahl

Das Bewegungsverhalten impliziert ebenfalls die Auflockerung der Gutschicht im oberen Totpunkt (OT) sowie die Kompression beim Aufkommen auf das Sieb. Freye [15] nimmt bei der Definition des Auflockerungsverhältnisses  $\lambda$  eine über der Schichthöhe gleichmäßige Verteilung des Hohlraumvolumens an. In Anlehnung dazu wird das Auflockerungsverhältnis mit der momentanen Schichthöhe ausgedrückt. Dies ist auf die Schichthöhe vor Versuchsbeginn bezogen,

**Gl. 19.**

$$\lambda = \frac{h_{\text{Schicht}}}{(h_{\text{Schicht}})_{\text{Versuchsbeginn}}} \quad (19)$$

Der zeitliche Verlauf des Auflockerungsverhältnisses zu den in Bild 44 a)–c) dargestellten Gutbewegungen zeigt eine geringe Auflockerung, wenn keine Luft durch die Gutschicht strömt, **Bild 45 a)**. Anhand der normierten Siebbewegung ist die zeitliche Siebposition ersichtlich,  $\lambda = 2$ : OT,  $\lambda = 1$ : UT. Aufgrund der Wechselwürfe bei einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 1 \text{ m/s}$  sind die maximalen Werte der Auflockerung für die jeweiligen Würfe unterschiedlich. Die Auflockerungen sind im Vergleich zu geringeren Luftgeschwindigkeiten maximal und bewirken eine optimale Entmischung. Die unteren Schichten führen weiterhin 1-fach Würfe aus. Dadurch ist eine ausreichende Zeit auf der Sieboberfläche gegeben, die zur optimalen Abscheidung notwendig ist. Das Auftreffen auf dem Sieb ist durch einen starken Abfall des Auflockerungsverhältnisses ( $\lambda < 1$ ) ersichtlich, was eine Kompression bedeutet. Aufgrund längerer Flugphasen tritt dies bei höheren Luftgeschwindigkeiten zeitlich später ein. Des Weiteren sind höhere Werte der Kompression zu beobachten. Der nachteilige Einfluss auf die Entmischung ist geringer als der positive Effekt der Auflockerung. [15, 37]

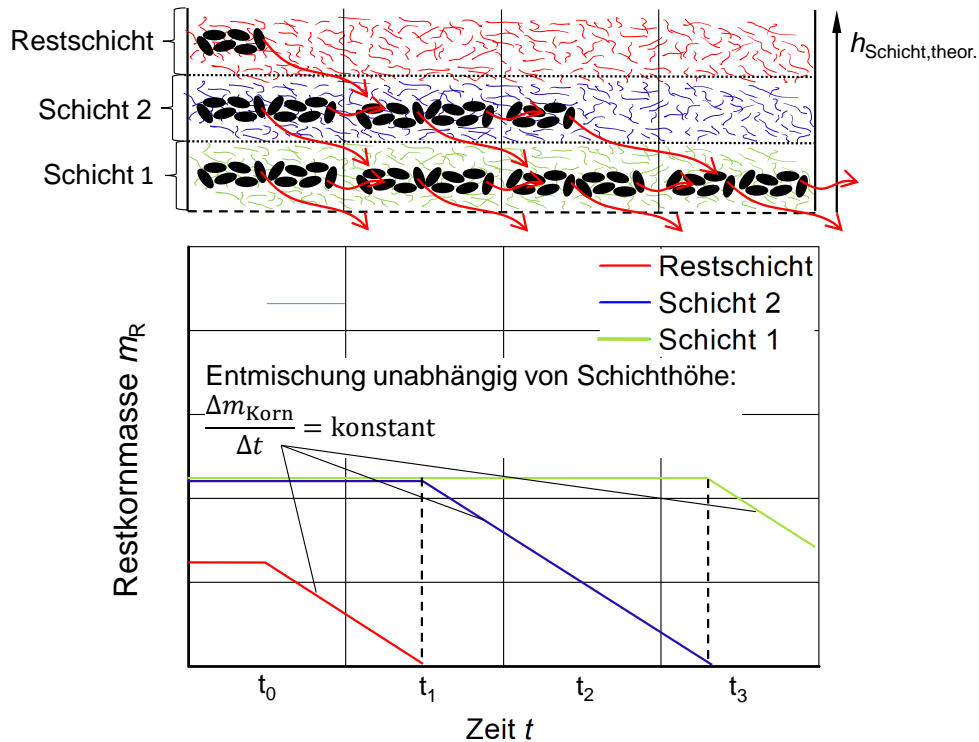


**Bild 45:** Zeitlicher Verlauf des Auflockerungsverhältnisses in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit und der Froudezahl; zeitliche Siebposition anhand normierter Siebbewegung sichtbar  $\lambda = 2$ : OT,  $\lambda = 1$ : UT

Bei einer Froudezahl von  $Fr = 1$  und einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 0 \text{ m/s}$  beträgt die maximale Auflockerung der Gutschicht in der Flugphase  $\lambda_{\max} = 1,23$ , Bild 45 b). Die Kompression ist aufgrund der geringen Anregung und der damit verbundenen reduzierten Aufprallgeschwindigkeit gering ausgeprägt. Ein Vergleich zu der Anregung mit  $Fr = 0,56$  und  $v_L = 1 \text{ m/s}$  zeigt die geringere Auflockerung. Dieses resultiert aus der fehlenden Luftunterstützung. Deshalb ist der Abscheideverlauf flacher, Bild 43 d). Diese Ergebnisse bestätigen die Aussagen von Freye [15], Hübner [37] und Damm [53].

### 4.5.3 Einfluss der Schichthöhe

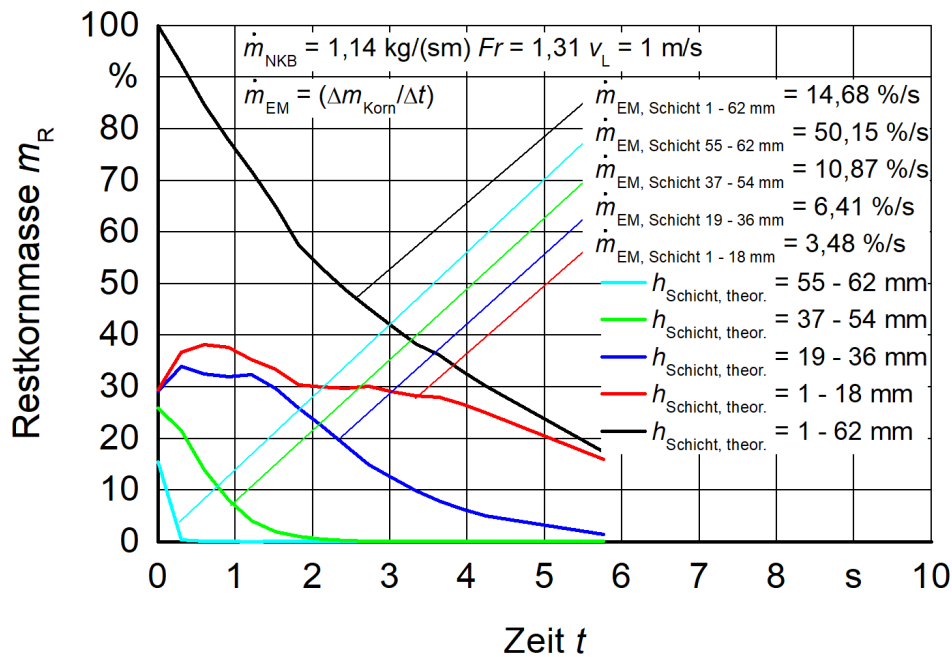
Bei Vernachlässigung stochastischer Einflüsse erfolgt die Entmischung schichtweise von oben nach unten, da die Körner der oberen Schicht in der Zeitspanne  $\Delta t$  in die darunter liegende Schicht wandern, **Bild 46**. Der Entmischungsmassenstrom  $\dot{m}_{EM}$  ist unabhängig von der Schichthöhe.



**Bild 46:** Erwarteter Entmischungsverlauf bei Vernachlässigung stochastischer Einflüsse

Aufgrund von Verdichtungen in den unteren Haufwerkszonen ist die Entmischung behindert. Dies bedeutet geringere Entmischungsmassenströme in diesem Bereich. **Bild 47** zeigt den Verlauf der schichtweisen Entmischung für einen Durchsatz von  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,14 \text{ kg/sm}$ , einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 1 \text{ m/s}$  und einer Froudezahl von  $Fr = 1,31$ .

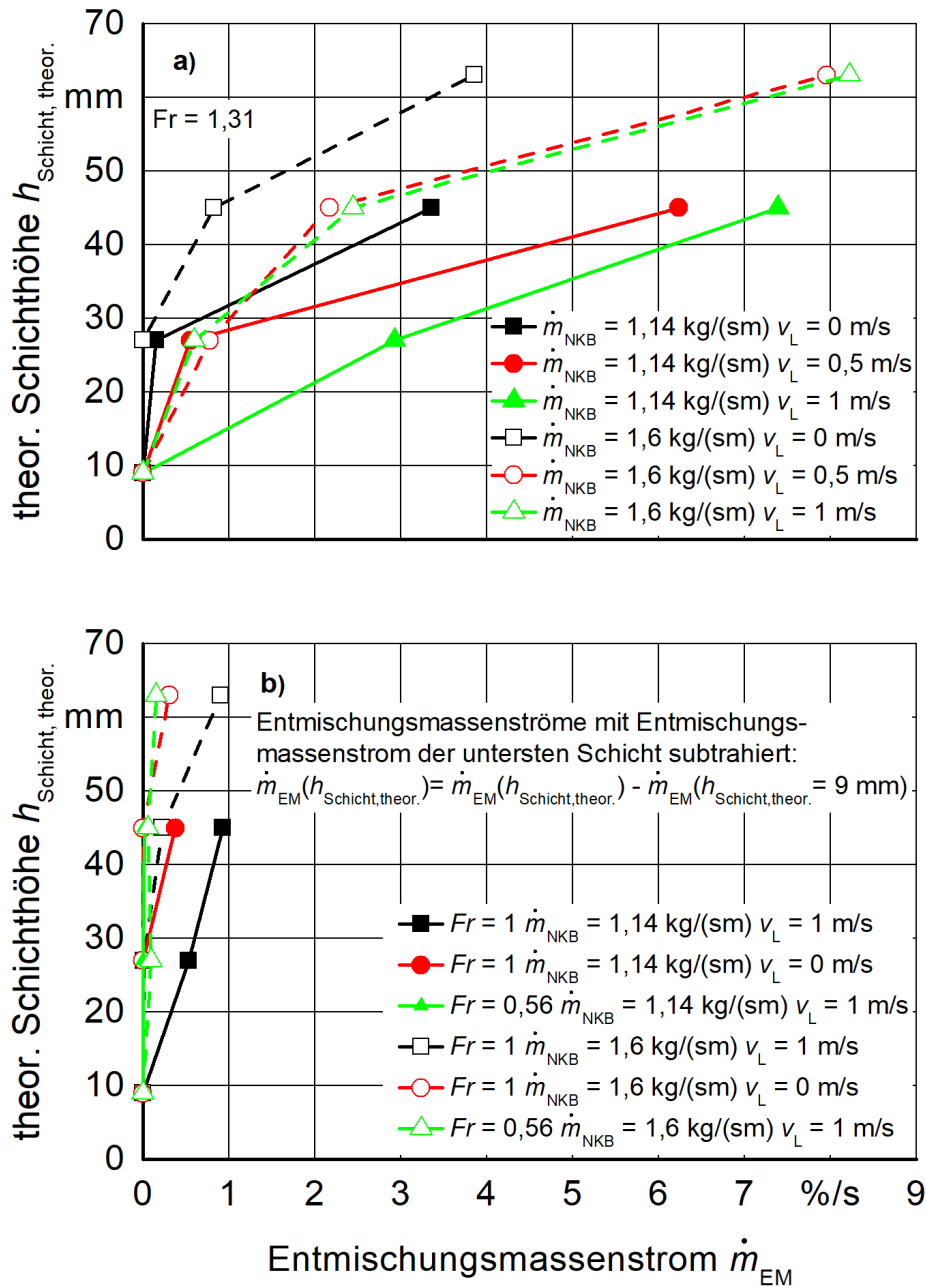
Die Entmischungsmassenströme steigen mit größerer Entfernung zum Sieb. Dies führt zu einem zeitweisen Anstieg der Restkornmasse in den unteren Schichten. Sichtbar ist dies für die theoretischen Schichthöhen von  $h_{\text{Schicht,theor.}} = 1\text{--}18 \text{ mm}$  und  $19\text{--}36 \text{ mm}$  im Zeitbereich von  $t = 0\text{--}1,2 \text{ s}$ . Der Entmischungsmassenstrom der gesamten Gutschicht setzt sich aus denen der einzelnen Schichten zusammen.



**Bild 47:** Entmischungsverlauf in Abhängigkeit der Schichthöhe

Für alle Versuche ist durchsatzunabhängig der Entmischungsmassenstrom bei höheren theoretischen Schichthöhen größer, **Bild 48 a**). Bei einem Durchsatz von  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,6 \text{ kg/sm}$  und einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 1 \text{ m/s}$  beträgt die maximale Differenz zwischen oberer und unterer Schicht  $\dot{m}_{\text{EM}} = 8,22 \text{ \%/s}$ . Die Entmischungsmassenströme sind jeweils mit dem Massenstrom in der untersten Schicht subtrahiert. Die oberste Restschicht ist nicht in der Auswertung berücksichtigt, da bedingt durch die unterschiedlichen Durchsätze die absolute Kornmasse in dieser Schicht unterschiedlich ist. Die große Schichthöhenabhängigkeit lässt auf Verdichtungen der unteren Haufwerkszonen schließen, was kleinere und weniger Hohlräume bedeutet. Höhere Luftgeschwindigkeiten bewirken über die gesamte Schichthöhe größere Entmischungsmassenströme. Die Fluidisierung ist somit in der ganzen Schicht gleichmäßig ausgeprägt.

Bedingt durch die geringeren mechanischen Anregungen von  $Fr = 1$  und  $Fr = 0,56$  ist der Entmischungsmassenstrom über der gesamten Schichthöhe kleiner, **Bild 48 b**). Dies ist ebenfalls anhand der Durchdringungsverläufe ersichtlich, **Bild 43**. Auch bei diesen Anregungen ist eine Abhängigkeit von der theoretischen Schichthöhe erkennbar. Im Bereich  $h_{\text{Schicht, theor.}} = 0\text{--}45 \text{ mm}$  treten Entmischungsmassenströme von  $\dot{m}_{\text{EM}} = 0 \text{ \%/s}$  auf. Die Anregung ist zur Auflockerung der Schicht zu gering. Eine Entmischung ist aufgrund des Eigengewichts in diesem Bereich nicht gegeben.



**Bild 48:** Einfluss der Schichthöhe auf die Entmischung

Die Porosität  $\epsilon$  ist als Verhältnis von Hohlraumvolumen  $V_{Hohlraum}$  zu Gesamtvolumen  $V_{ges}$  definiert,

**Gl. 20.** Der zeitliche Verlauf wird mithilfe der 3D-Rekonstruktionen ermittelt.

$$\epsilon = \frac{V_{Hohlraum}}{V_{ges}} = 1 - \frac{\rho_{Schütt}}{\rho_{rein}} \tag{20}$$

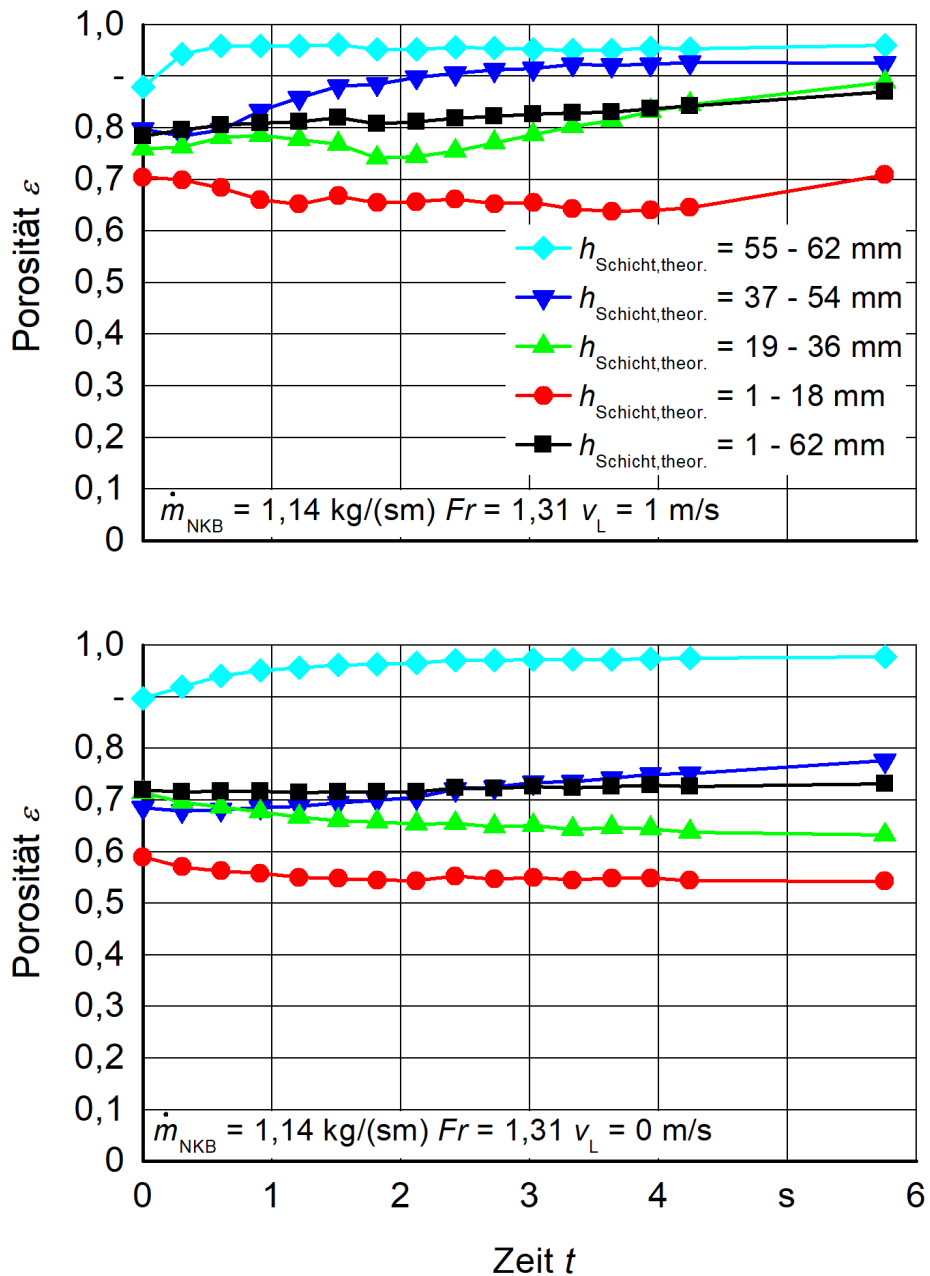
Unabhängig von der Luftunterstützung steigt die Porosität mit größerem Abstand zum Sieb,

**Bild 49.** Dies bestätigt die Vermutung der größeren Verdichtung der unteren Haufwerkszonen.

Die Luftgeschwindigkeit erhöht die Porosität in der Schicht bis  $h_{Schicht,theor.} = 54 \text{ mm}$  im Mittel um

$\epsilon = 0,1$ . Die unterschiedlichen Porositäten in den Schichten bleiben somit auch bei Luftunter-

stützung erhalten. Deshalb steigt der Entmischungsmassenstrom in der gesamten Schicht, Bild 48. Die Änderung im zeitlichen Verlauf zeigt die Abhängigkeit von der Kornmenge, die in der Schicht enthalten ist, Bild 47. Das Vorhandensein von Körnern bewirkt eine geringere Porosität, da die Körner eine dichtere Packung erlauben. Ohne Luftunterstützung ist die Entmischung besonders in den unteren Haufwerkszonen gering, Bild 48. Durch diese migriert nur wenig Korn. Der zeitliche Verlauf der Porosität stagniert in diesem Bereich, Bild 49.

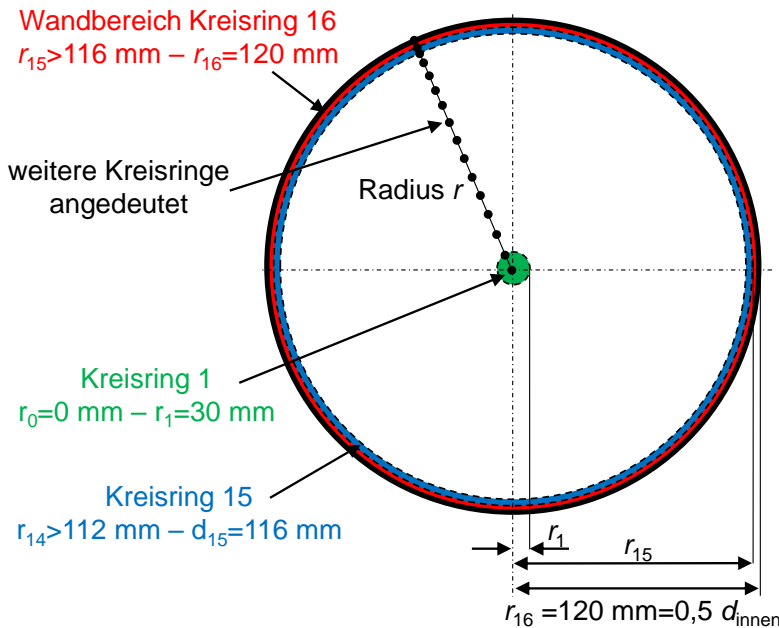


**Bild 49:** Zeitlicher Verlauf der Porosität in Abhängigkeit der Schichthöhe

#### 4.5.4 Einfluss von Wandeffekten

Zur Untersuchung des Einflusses der Wand auf die Entmischung erfolgt die Auswertung des Abstandes Kornschicht - Sieb, des Hohlraumvolumens und der Körneranzahl für die 3D-Rekonstruktionen in Abhängigkeit vom Zylinderradius. Dabei werden 16 Kreisinge entsprechend gleicher Flächengrößen auf dem Radius angeordnet und separat ausgewertet, **Bild 50**.

Probenbehälter: Ansicht von oben



Kreisinge entsprechend gleicher Flächengröße gewählt

$$\pi(r_1^2 - r_0^2) = \pi(r_2^2 - r_1^2) = \dots = \pi(r_{15}^2 - r_{14}^2) = \pi(r_{16}^2 - r_{15}^2)$$

Größere Radius wird als Bezeichnung verwendet

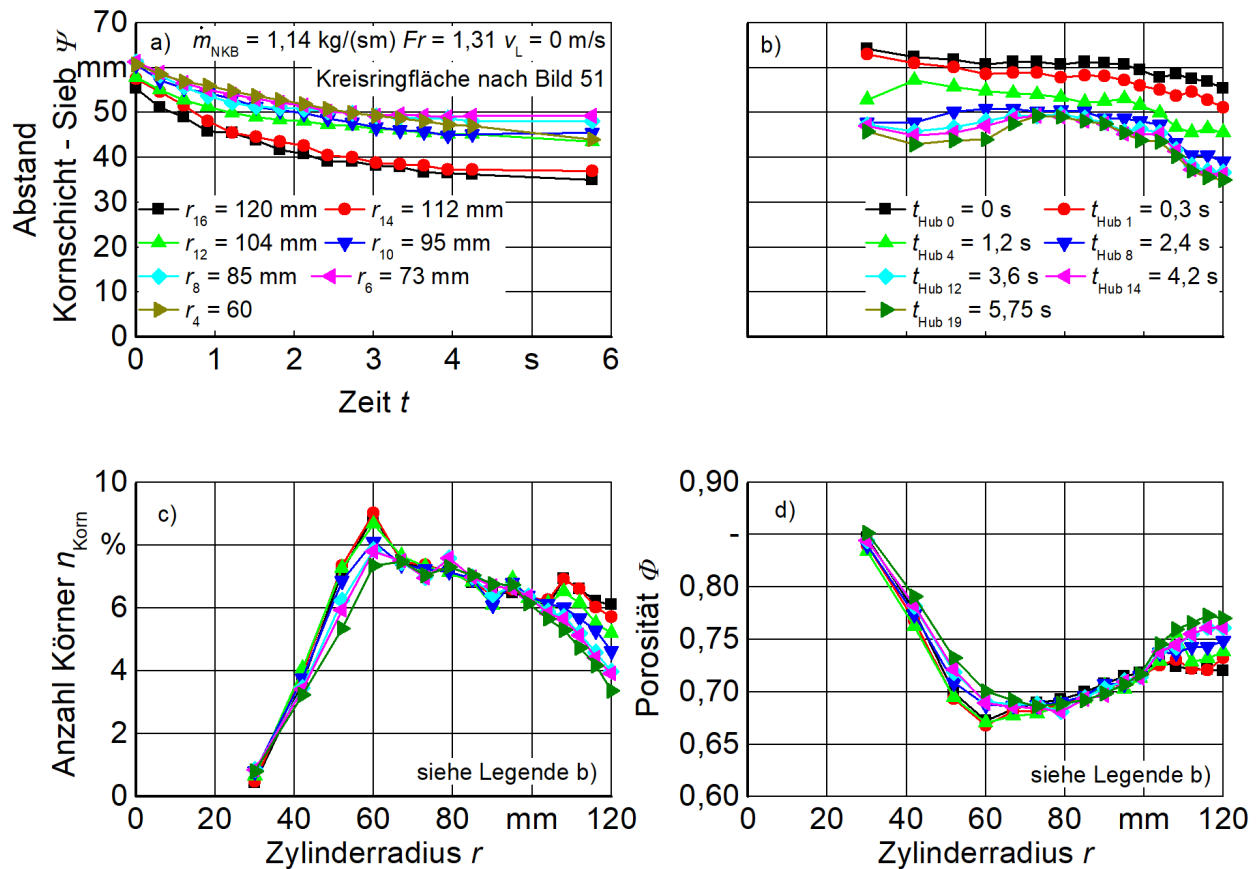
Kreisring	Radius / mm
16	$r_{15} > 116 - r_{16} = 120$
15	$r_{14} > 112 - r_{15} = 116$
14	$r_{13} > 108 - r_{14} = 112$
13	$r_{12} > 104 - r_{13} = 108$
12	$r_{11} > 99 - r_{12} = 104$
11	$r_{10} > 95 - r_{11} = 99$
10	$r_9 > 90 - r_{10} = 95$
9	$r_8 > 85 - r_9 = 90$
8	$r_7 > 79 - r_8 = 85$
7	$r_6 > 73 - r_7 = 79$
6	$r_5 > 67 - r_6 = 73$
5	$r_4 > 60 - r_5 = 67$
4	$r_3 > 52 - r_4 = 60$
3	$r_2 > 42 - r_3 = 52$
2	$r_1 > 30 - r_2 = 42$
1	$r_0 = 0 - r_1 = 30$

**Bild 50:** Methode zur Untersuchung des Wandeinflusses; fettgedruckte Radien in folgenden Abbildungen als Legende

Der zeitliche Verlauf des Abstandes Kornschicht - Sieb für den Versuch ohne Luftunterstützung zeigt über den gesamten Zeitbereich geringere Werte in den wandnahen Bereichen, **Bild 51 a)**. Dabei beträgt die maximale Differenz nach einer Entmischungszeit von  $t = 5,75$  s zwischen dem Zylinderradius  $r_{16} = 120$  mm und  $r_6 = 73$  mm  $\Psi = 14,29$  mm. Dies entspricht ungefähr zwei Weizenkornlängen. Die Zylindermitte bis zu einem Radius von  $r_3 = 52$  mm wird bei dieser Bewertung nicht berücksichtigt, da bedingt durch die Gutaufgabe (**Kapitel 4.3**) die Anzahl der Körner in diesem Bereich geringer ist, Bild 51 c).

Der Wandbereich, in dem geringere Werte des Abstandes Kornschicht - Sieb festzustellen sind, weist eine Vergrößerung mit steigender Versuchszeit auf, Bild 51 b). Bei  $t_{\text{Hub}19} = 5,75$  s ist dieser bis  $r_6 = 73$  mm ausgebildet. Ab einer Versuchszeit von  $t_{\text{Hub}12} = 3,6$  s reduziert sich der Abstand

der Kornschicht zum Sieb unabhängig vom Zylinderradius unwesentlich, was eine stagnierende Entmischung bedeutet. Dies findet in der behinderten Entmischung aufgrund der geringeren Porosität der unteren Haufwerkszonen Begründung, Bild 49.



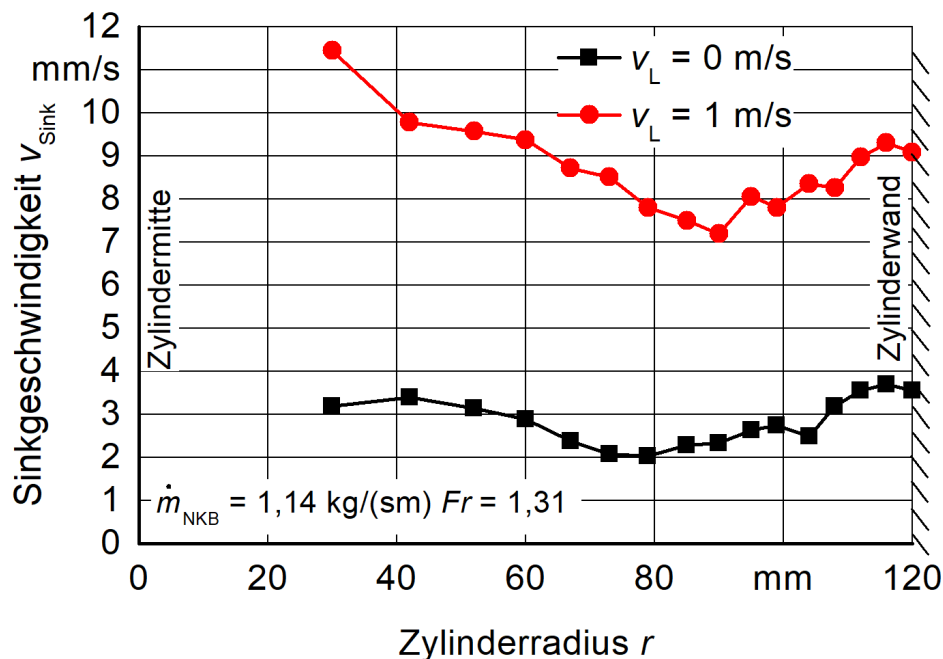
**Bild 51:** Ohne Luftunterstützung: Einfluss der Wand auf die Entmischung in Abhängigkeit der Zeit und des Zylinderradius

Die über den Zylinderradius aufgetragene Körneranzahl ist auf die Anzahl der Körner vor Versuchsbeginn bezogen. Im zeitlichen Verlauf zeigt sich eine Abnahme im Wandbereich ( $r_{16} = 120$  mm) von  $n_{Korn} = 2,74$  %, Bild 51 c). Im Bereich von  $r_5 = 67$  mm bis  $r_{11} = 99$  mm ist keine Verringerung ersichtlich. Durch die Verdichtungen der unteren Haufwerkszonen migrieren die Körner in die siebnahen Schichten, ohne zum Sieb zu gelangen. Die Körneranzahl bleibt trotz fallendem Abstand Kornschicht - Sieb konstant.

Die Porosität im Wandbereich ist um  $\epsilon = 0,04$ – $0,08$  größer, Bild 51 d). Dies bewirkt die schnellere Entmischung und Abscheidung. Der Verlauf der Porosität über den Zylinderradius für verschiedene Zeitpunkte bestätigt die in Kapitel 4.5.3 angesprochene Abhängigkeit des Hohlraumvolumens von dem Vorhandensein der Körner, Bild 51 d). Größere Werte der Porosität resultieren aus einer geringen Anzahl vorhandener Körner. Aufgrund der geringen Änderung

der Körneranzahl im Bereich von  $r_5 = 67 \text{ mm}$  bis  $r_{11} = 99 \text{ mm}$  ist die Änderung der Porosität ebenfalls gering. Bei einem Zylinderradius von  $r_4 = 60 \text{ mm}$  ist die Anzahl der Körner am größten und die Porosität am geringsten. Der Wandeinfluss ist somit hauptsächlich durch eine höhere Porosität gekennzeichnet. Die zusätzlichen Hohlräume bewirken eine schnellere Entmischung und Abscheidung.

Anhand der Sinkgeschwindigkeit, die durch den Differenzenquotienten der Schichthöhe zu Versuchsbeginn ( $t = 0 \text{ s}$ ) und -ende ( $t = 5,75 \text{ s}$ ) definiert ist, lässt sich der Wandeinfluss quantifizieren, **Bild 52**. Die Sinkgeschwindigkeit beim Versuch ohne Luftunterstützung ist im wandnahen Bereich im Mittel um  $v_{\text{Sink}} = 0,8 \text{ mm/s}$  größer. Die schnellere Entmischung bei Luftunterstützung erklärt die höheren Werte der Sinkgeschwindigkeit. Im wandnahen Bereich ist die Sinkgeschwindigkeit im Mittel um  $v_{\text{Sink}} = 1,1 \text{ mm/s}$  größer. Die höheren Werte der Sinkgeschwindigkeit in der Zylindermitte korrelieren unabhängig von der Luftunterstützung mit dem über den Zylinderradius aufgetragenen Abstand Kornschicht - Sieb, Bild 51 b). Dieses Verhalten lässt sich mit der geringeren Körneranzahl in der Zylindermitte und dem damit verbundenen größeren Hohlraumvolumen erklären, Bild 51 c)–d). Dadurch ist der Widerstand der Körner bei der Entmischung reduziert.

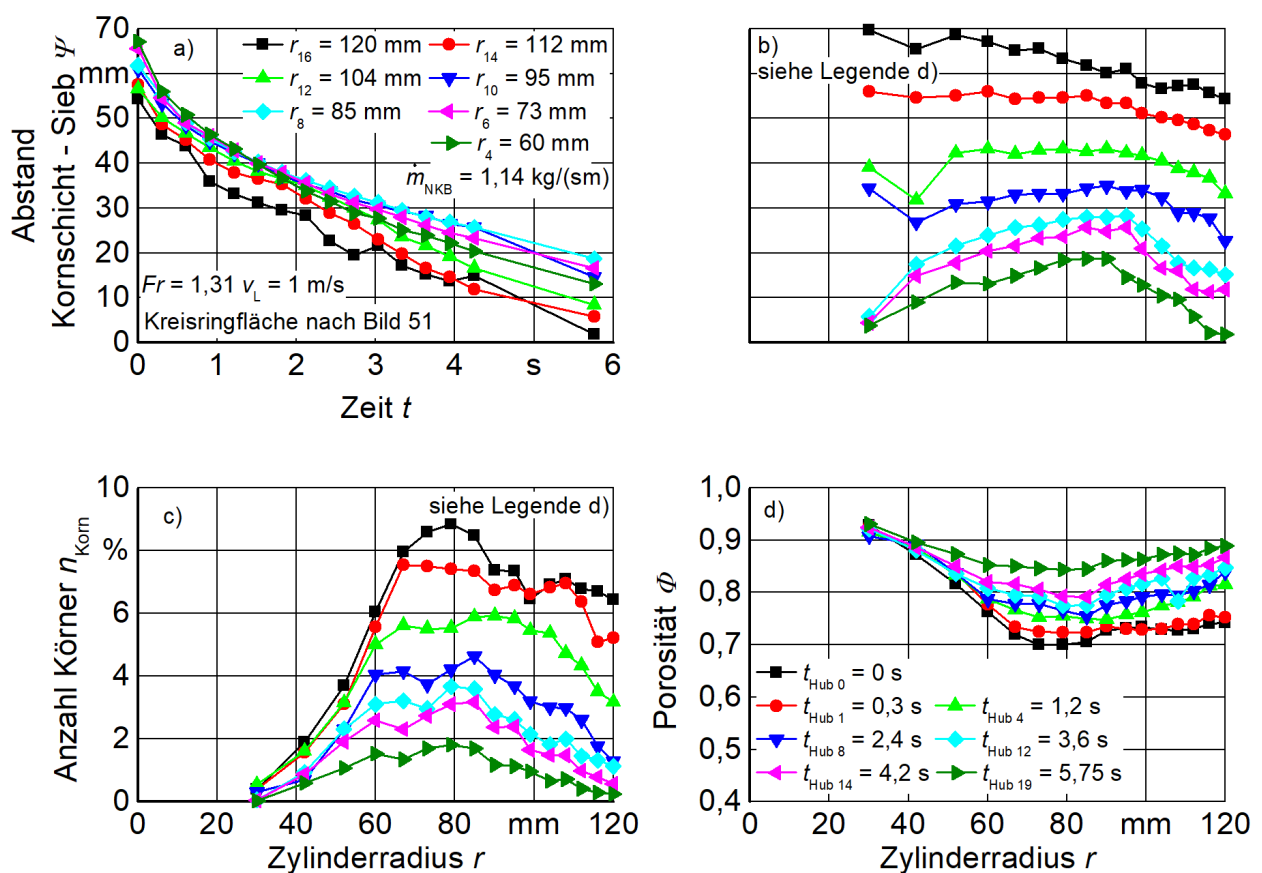


**Bild 52:** Einfluss der Wand auf die Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Zylinderradius und der Luftgeschwindigkeit

Auch bei Luftunterstützung ( $v_L = 1 \text{ m/s}$ ) stellen sich geringere Werte des Abstandes Kornschicht - Sieb im wandnahen Bereich ein, **Bild 53 a**). Nach einer Entmischungszeit von  $t = 5,75 \text{ s}$  beträgt die maximale Differenz  $\Psi = 16,7 \text{ mm}$ . Die Werte sind mit denen ohne Luftunterstützung ver-

gleichbar. Somit bewirkt die Luftgeschwindigkeit unabhängig vom Zylinderradius eine schnellere Entmischung in allen Bereichen. Aufgrund der geringeren Anzahl an Körnern wird auch bei dieser Auswertung die Zylindermitte bis zu einem Radius von  $r_3 = 52$  mm nicht berücksichtigt, Bild 53 c).

Der über den Zylinderradius aufgetragene Verlauf des Abstandes Kornschicht - Sieb zeigt ebenfalls das schnellere Entmischungsverhalten aufgrund der Luftströmung, Bild 53 b). Die Ausprägung des Wandbereiches mit geringerem Abstand Kornschicht - Sieb ist ähnlich zu dem Versuch ohne Luftunterstützung. Der Wandbereich ist nach einer Entmischungszeit  $t_{Hub19} = 5,75$  mm bis zu einem Radius von  $r_9 = 90$  mm ausgebildet.



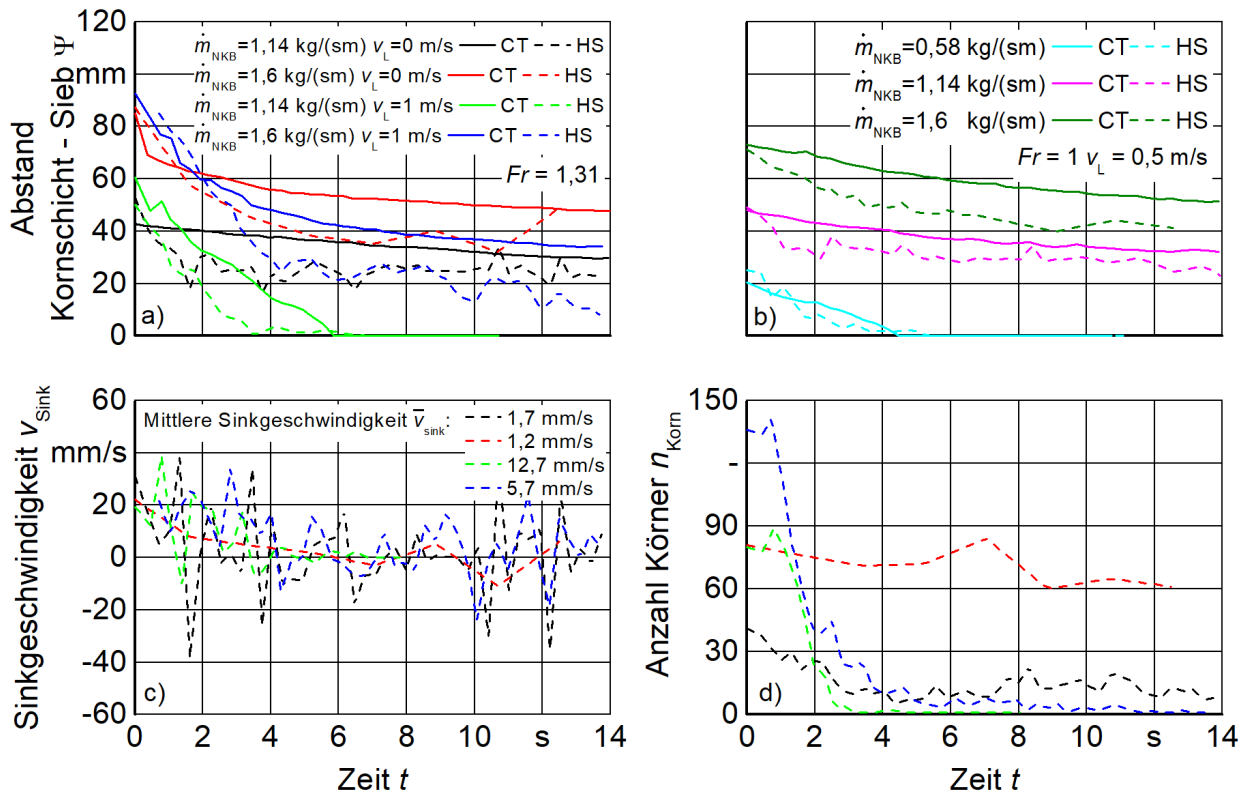
**Bild 53:** Luftgeschwindigkeit  $v_L = 1$  m/s: Einfluss der Wand auf die Entmischung in Abhängigkeit der Zeit und des Zylinderradius

Der zeitliche Verlauf der Körner, die sich in den Kreisringen befinden, zeigt das gleiche Verhalten wie beim Versuch ohne Luftunterstützung, Bild 53 c). Durch die Luftunterstützung werden jedoch über den gesamten Radius Körner abgeschieden.

Die Auswertung der Porosität veranschaulicht zum einen die starke Abhängigkeit zur Körneranzahl, Bild 53 d). Bei einer Versuchszeit von  $t_{Hub19} = 5,75$  s befinden sich wenig Körner

in der Gutschicht, weshalb die Porosität über dem gesamten Radius am größten ist. Zum anderen ist auch bei Luftunterstützung ein höhere Porosität von  $\epsilon = 0,03 - 0,06$  im Wandbereich ersichtlich.

Der zeitliche Verlauf des Abstandes Kornschicht - Sieb ist ebenfalls mit den Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen auswertbar, die zeitgleich mit den 2D-Röntgenbildern aufgenommen wurden. Die Auswertung der HS-Bilder berücksichtigt die Körner im Wandbereich, die Auswertung der Röntgenbilder die Körner im gesamten Probenvolumen. Es zeigt sich die gleiche tendenzielle Abhängigkeit gegenüber dem Durchsatz und den Anregungsparametern, **Bild 54 a) - b)**. Der Abstand Kornschicht - Sieb der Körner im Wandbereich ist für alle Versuche geringer. Die über alle Versuche gemittelte Differenz beträgt  $\bar{\Psi} = 6,3$  mm. Dies entspricht ungefähr einer Weizenkorlänge.



**Bild 54:** Einfluss der Wandbereiches auf das Bewegungsverhalten der Körner

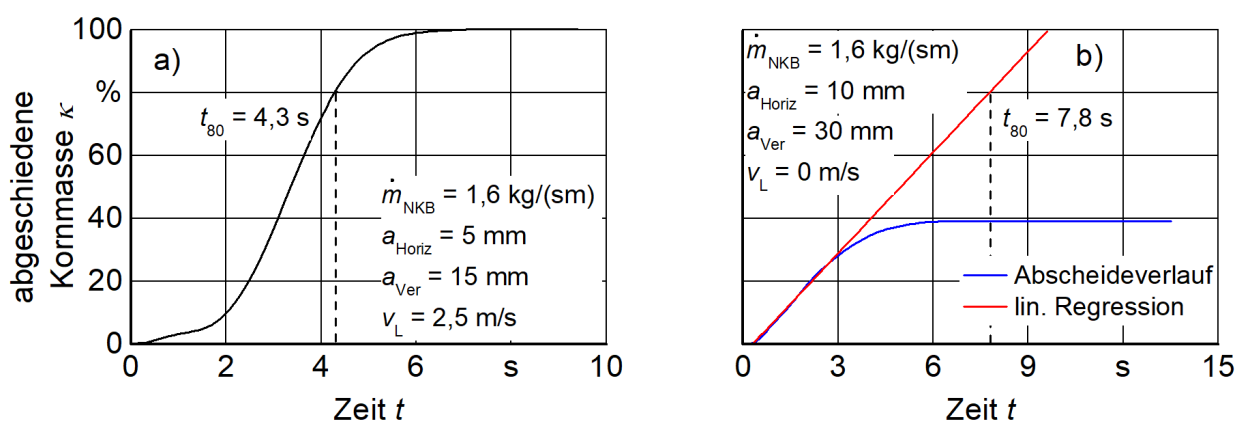
Obwohl sich Schwankungen im Verlauf des Abstandes Kornschicht - Sieb verstärkt im zeitlichen Verlauf der Sinkgeschwindigkeit wiederfinden, sind die Auswirkungen der Einflussgrößen auch anhand der Sinkgeschwindigkeit bestimmbar, Bild 54 c). Bei Luftunterstützung ( $v_L = 1$  m/s) sind höhere mittlere Sinkgeschwindigkeiten  $\bar{v}_{Sink}$  zu beobachten.

Die über alle Versuche gemittelte Sinkgeschwindigkeit ist im Wandbereich um  $\bar{v}_{\text{Sink}} = 1,6 \text{ mm/s}$  höher. Die Annahme des gleichen Bewegungsverhaltens der wandnahen und wandentfernten Bestandteile bedeutet eine in diesen Grenzen bessere Einschätzung der Entmischung.

Die Anzahl der Körner, die im Wandbereich sichtbar sind, ist abhängig von der im Haufwerk vorhandenen Körneranzahl. Bei einem Durchsatz von  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,6 \text{ kg/sm}$ , einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 0 \text{ m/s}$  und einer Froudezahl von  $Fr = 1,31$  ist die Entmischung gering, weshalb die sichtbare Körneranzahl relativ konstant bleibt, Bild 54 d). Die Veränderung der sichtbaren Körneranzahl kann zum einen durch die Abscheidung erfolgen. Zum anderen migrieren die Körner stochastisch in das Haufwerk und aus diesem in den Wandbereich. Dies reduziert die Genauigkeit der Auswertung und erklärt die Schwankungen im Verlauf des Abstandes Kornschicht - Sieb und der Sinkgeschwindigkeit.

#### 4.5.5 Einfluss der horizontalen Gutbewegung

Die Bewertung der Entmischung erfolgt mit der  $t_{80}$ -Zeit, die mit der Durchdringungszeitkurve ermittelt wird, **Bild 55 a)**. Bei der begrenzten Sieblänge  $l_s = 1,6 \text{ m}$  resultiert aus einer zu großen Fördergeschwindigkeit eine nicht ausreichende Zeit zur Entmischung und Abscheidung. Die maximal abgeschiedene Kornmasse kann zur Bestimmung der  $t_{80}$ -Zeit zu gering sein. Die Annahme eines stationären Prozesses bei kontinuierlicher Beschickung erlaubt die lineare Extrapolation der Kornkurve im Bereich der konstanten Abscheidengeschwindigkeit, Bild 55 b). Anhand dieser ist die  $t_{80}$ -Zeit bestimmbar.

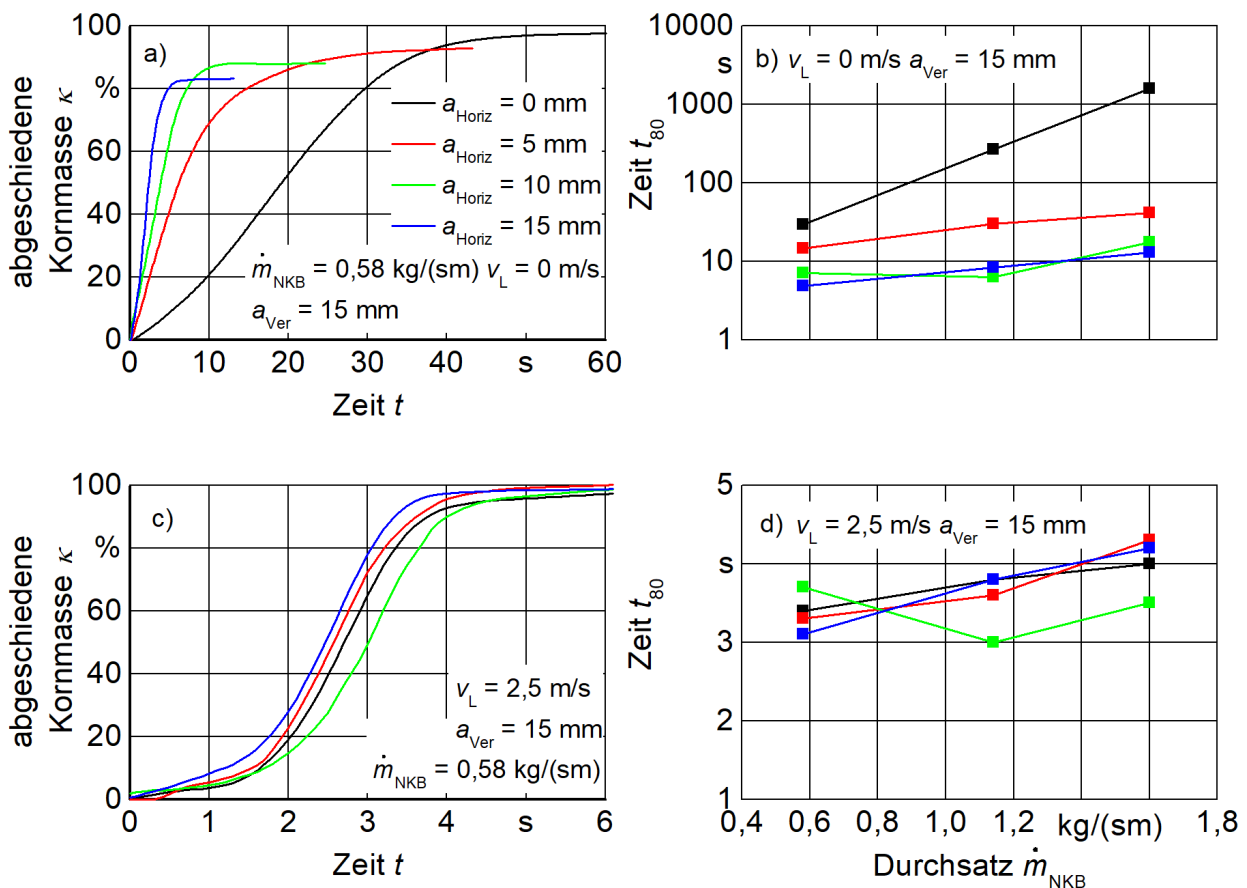


**Bild 55:** Bestimmung der  $t_{80}$ -Zeit anhand der Durchdringungszeitkurve

Die Verläufe der Durchdringungszeitkurven für verschiedene horizontale Amplituden ( $a_{\text{Horiz}} = 0; 5; 10; 15 \text{ mm}$ ) bei einem Durchsatz von  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 0,58 \text{ kg/sm}$  und einer vertikalen Amplitude von  $a_{\text{Ver}} = 15 \text{ mm}$  zeigen ohne Luftunterstützung ein schnelleres Entmischungsverhalten bei

höheren horizontalen Amplituden, **Bild 56 a**). Die zusätzliche horizontale Anregung bewirkt Verschiebungen im Haufwerk [79]. Die entstehenden Hohlräume beschleunigen die Entmischung. Der Einfluss der horizontalen Amplitude ist auch bei höheren Durchsätzen vorhanden. Dies ist anhand der  $t_{80}$ -Zeiten sichtbar, die über dem NKB-Durchsatz aufgetragen sind, Bild 56 b).

Bedingt durch die Fluidisierung bei Luftunterstützung ( $v_L = 2,5 \text{ m/s}$ ) verringert sich der Einfluss zusätzlicher Haufwerksverschiebungen aufgrund der horizontalen Amplitude, Bild 56 c). Die fluidisierte Gutschicht bietet für die Entmischung optimale Bedingungen. Deshalb weisen weitere Horizontalbeschleunigungen, die in das Haufwerk eingebracht werden, kaum positive Effekte auf. Die Korrelation zwischen der  $t_{80}$ -Zeit und dem Durchsatz ist bei Luftunterstützung geringer, Bild 56 d). Dies zeigt das Vorliegen einer fluidisierten Gutschicht.

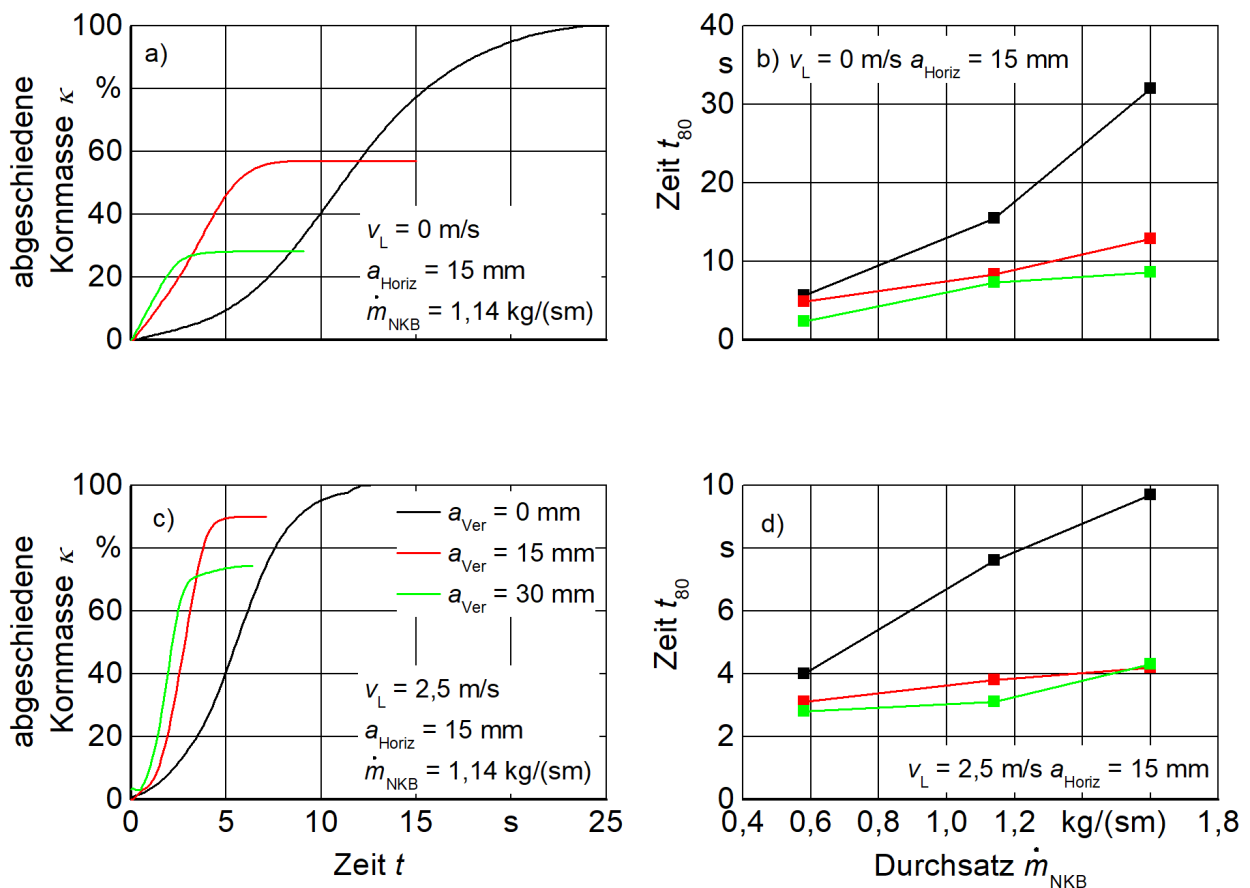


**Bild 56:** Einfluss der horizontalen Amplitude auf die Entmischung

Der Einfluss der vertikalen Amplitude ( $a_{\text{Ver}} = 0; 15; 30 \text{ mm}$ ) bei konstanter horizontaler Amplitude  $a_{\text{Horiz}} = 15 \text{ mm}$  und einem Durchsatz von  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,14 \text{ kg/sm}$  zeigt unabhängig vom Luftdurchsatz eine schnellere Entmischung und Abscheidung bei größeren Werten. Dies bestätigt die Aussage von Damm [53] bezüglich der großen Bedeutung der vertikalen Beschleunigungen für den Entmischungsprozess, **Bild 57 a), c)**. Weiterhin sinkt die maximal abgeschiedene Korn-

menge mit höherer Amplitude, da die zur Entmischung notwendige Zeit aufgrund der höheren Fördergeschwindigkeit nicht ausreicht.

Die fluidisierte Gutschicht ermöglicht unabhängig von der mechanischen Anregung eine deutliche Steigerung der Entmischung. Dies ist anhand des schnelleren Korndurchgangs und der größeren Werte für die maximal abgeschiedene Kornmenge sichtbar, Bild 57 a), c). Die Luftunterstützung bewirkt längere Flugphasen und damit größere Wurfweiten [15]. Dadurch steigt die Fördergeschwindigkeit. Deshalb ist die maximal abgeschiedene Kornmenge bei Luftunterstützung früher erreicht. Die  $t_{80}$ -Zeit weist eine positive Korrelation zum Durchsatz auf, Bild 57 b), d). Die Abhängigkeit ist bei Luftunterstützung und hohen vertikalen Amplituden geringer ausgeprägt.

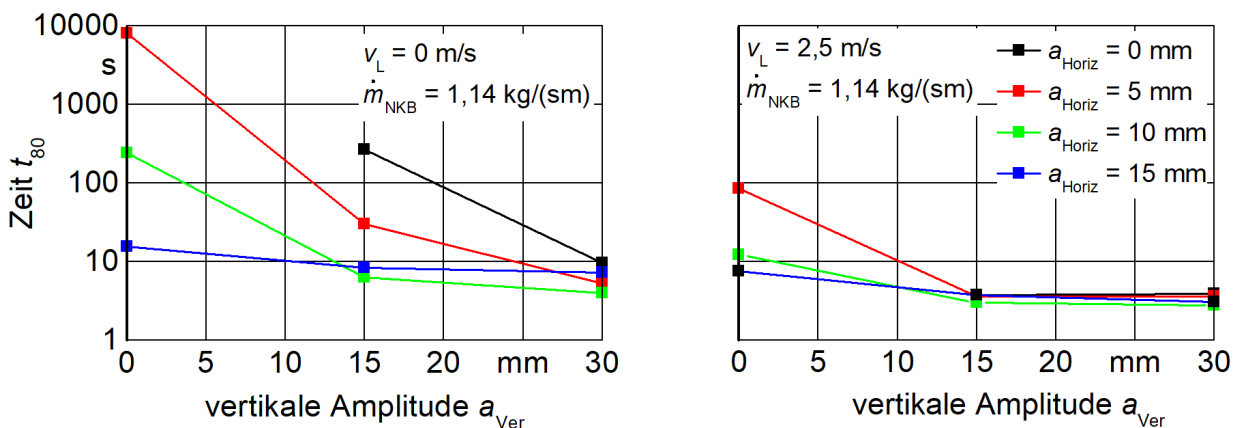


**Bild 57:** Einfluss der vertikalen Amplitude auf die Entmischung

Vertikale Beschleunigungen verbessern die Entmischung und reduzieren den Einfluss der horizontalen Anregung, **Bild 58 a)**. Der positive Effekt der Gutauflockerung in der Flugphase überwiegt den negativen der Kompression beim Auftreffen auf das Sieb, **Kapitel 4.5.2**. Verschiebungen im Haufwerk aufgrund von Horizontalbeschleunigungen verbessern die Entmischung bei ausreichender Gutauflockerung unwesentlich. Die Entmischung kann durch vertikale und

horizontale Beschleunigungen verbessert werden, wobei Anregungen in vertikaler Richtung größeren Einfluss aufweisen.

Bei einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 2,5 \text{ m/s}$  ist die optimale Abscheidung bei einer vertikalen Amplitude von  $a_{\text{Ver}} = 15 \text{ mm}$  ersichtlich, Bild 58 b). Eine weitere Steigerung hat keinen Einfluss auf die Abscheidung. Der Einfluss der horizontalen Amplitude ist lediglich bei einer reinen Horizontalschwingung ( $a_{\text{Ver}} = 0 \text{ mm}$ ) vorhanden. Die Aussage von Damm [53] bezüglich des vernachlässigbaren Einflusses der horizontalen Anregung auf die Entmischung ist nur bei entsprechend hoher vertikaler und pneumatischer Anregung richtig.



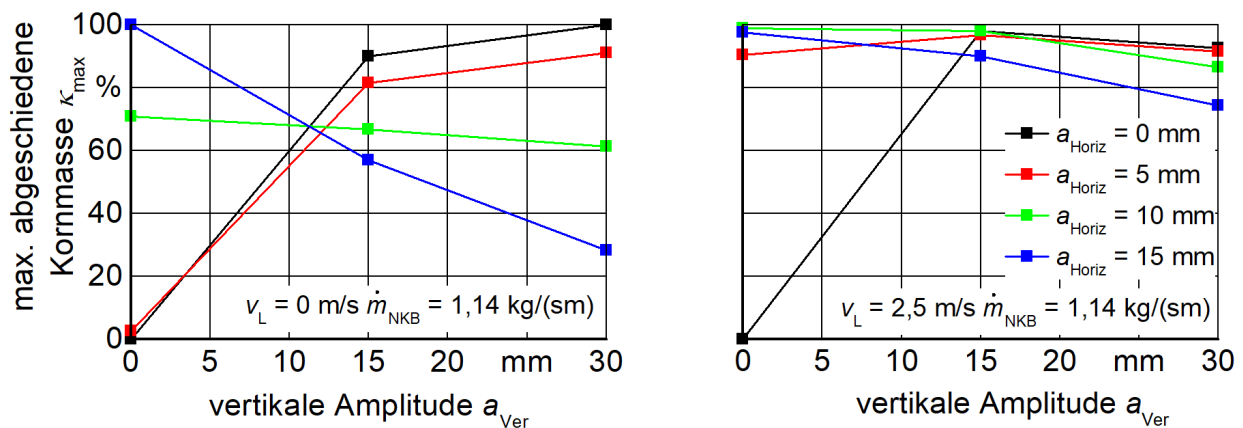
**Bild 58:** Einfluss der Anregungsparameter auf die Entmischung

Die Bestimmung der Abscheidezeit  $t_{80}$  mittels linearer Interpolation impliziert die Bewertung des Korndurchgangs auf einem unendlich langen Sieb. Die Abscheidung über der Sieblänge, die maßgeblich durch die Fördergeschwindigkeit definiert wird, ist hier vernachlässigt. Bei großen Anregungen und hohen Fördergeschwindigkeiten reicht die zur Entmischung benötigte Verweilzeit auf dem Sieb nicht aus. Dies ist durch die geringe maximal abgeschiedene Kornmenge beim Korndurchgang sichtbar, Bild 56–57.

Ein Vergleich der maximal abgeschiedenen Kornmenge  $\kappa_{\text{max}}$  zeigt den Zusammenhang zwischen vertikaler und horizontaler Amplitude, **Bild 59**. Bei einer horizontalen Siebbewegung ( $a_{\text{Ver}} = 0 \text{ mm}$ ) ohne Luftunterstützung ( $v_L = 0 \text{ m/s}$ ) bewirken größere horizontale Amplituden die Einleitung größerer Kräfte in das Haufwerk. Dies verbessert die Abscheidung. Erst bei einer horizontalen Amplitude von  $a_{\text{Horiz}} = 15 \text{ mm}$  sind die eingeleiteten Beschleunigungen zur Herauslösung der gesamten Kornmenge groß genug. Bei einer vertikalen Amplitude zwischen  $a_{\text{Ver}} = 11 - 12 \text{ mm}$  ist unabhängig von der horizontalen Amplitude die maximal abgeschiedene Kornmenge im Bereich von  $\kappa_{\text{max}} \approx 65 \%$ . Steigende Kurvenverläufe ( $a_{\text{Horiz}} = 0 \text{ mm}$ ,  $a_{\text{Horiz}} = 5 \text{ mm}$ )

bedeuten eine bessere Entmischung, sinkende Verläufe ( $a_{\text{Horiz}} = 10 \text{ mm}$ ,  $a_{\text{Horiz}} = 15 \text{ mm}$ ) eine zu große mechanische Anregung und somit zu große Fördergeschwindigkeiten. Bei größeren vertikalen Amplituden reduziert sich die maximal abgeschiedene Kornmenge mit größeren horizontalen Amplituden. Bei einer vertikalen Amplitude von  $a_{\text{Ver}} = 30 \text{ mm}$  werden lediglich bei einer rein vertikalen Siebschwingung ( $a_{\text{Horiz}} = 0 \text{ mm}$ ) alle Körner abgeschieden. Durch die vertikale Siebbewegung stellt sich kein Förderprozess ein. Bei höheren horizontalen Amplituden ist aufgrund der zu großen Gesamtanregung keine vollständige Abscheidung gegeben.

Das tendenziell gleiche Verhalten für niedrigere Werte der mechanischen Anregung zeigt sich bei einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 2,5 \text{ m/s}$ , Bild 59. Die Fluidisierung bewirkt allgemein schnellere Abscheidungen. Durch die Luftunterstützung liegt die maximal abgeschiedene Kornmasse bei  $a_{\text{Ver}} = 15 \text{ mm}$ .



**Bild 59:** Einfluss der Anregungsparameter auf die maximal abgeschiedene Kornmasse

## 4.6 DEM-CFD-Simulation

### 4.6.1 Modellierung

Zur Abbildung der unterschiedlichen Geometrie und Masse der NKB-Partikel werden diese in fünf Längen- und zwei Gewichtsklassen eingeteilt. Die Häufigkeitsverteilung ist dabei an die Längenklassierung des Versuchsgutes angelehnt, Bild 30. Die jeweiligen Partikel sind als starre Kugelketten idealisiert und lassen keine Biegung oder Knickung zu. Die geringere Größenänderung des Korn erlaubt die Modellierung mittels einer Größenfraktion. [5]

Die Parametrierung der Stoffeigenschaften basiert auf der Einteilung nach Beck [11]. Einfache und komplexe Stoffeigenschaften werden für die Parametrierung, technologische Stoffeigenschaften für die Validierung verwendet. Ausgehend von Werten aus der Literatur [140] werden Dichten, Poissonzahlen, Haft- und Rollreibungskoeffizienten, Stoßzahlen und Schubmodule für

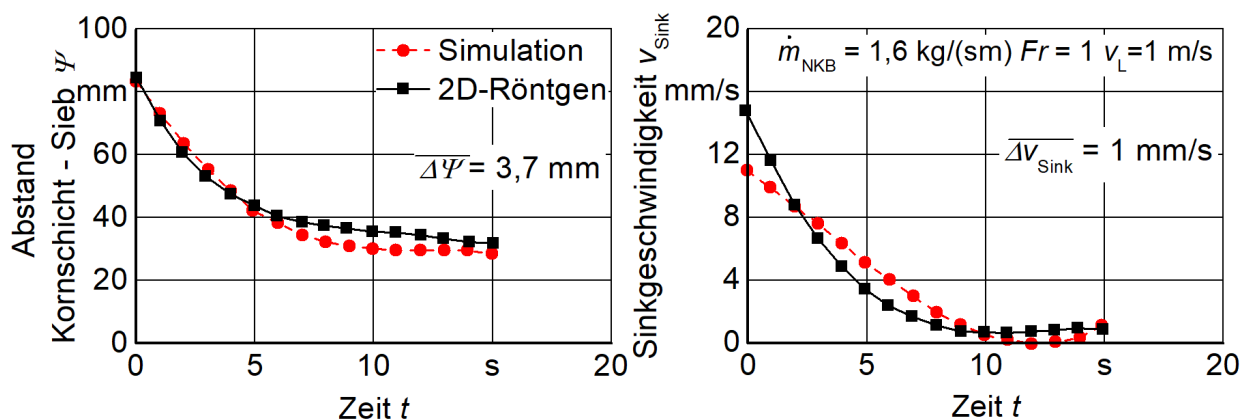
die Bestandteile des Reinigungsgemisches bestimmt. Der Strömungswiderstand der Partikel wird in Abhängigkeit der Form, der Lage und der Anströmgeschwindigkeit über den  $c_W$ -Wert angepasst. Das genaue Vorgehen bei der Parametrierung ist in [5] beschrieben. [3–5]

Für alle Prüfstände wird die Geometrie für die CFD- und die DEM-Simulation anhand der CAD-Daten realisiert. Die Berücksichtigung turbulenter Strömungsstrukturen erfolgt in der Strömungssimulation mittels  $k$ - $\epsilon$ - oder SST-Turbulenzmodell. Es wird die 1-Wege-Kopplung angewendet, wobei jeweils ein Strömungsfeld für den Miniaturprüfstand (**Kapitel 4.2.1**) und den Grundlagen-Reinigungsprüfstand (**Kapitel 4.2.2**) berechnet wird. Das Sieb befindet sich dabei in der Mittelstellung. Für die Kontaktmodellierung der Partikel in der DEM-Simulation wird auf das Hertz-Mindlin Kontaktmodell [161] zurückgegriffen.

Die Strömungssimulation wird mit der Software Ansys CFX [162], die Diskrete-Elemente-Simulation mit der Software EDEM [163] durchgeführt. Dabei werden die gesamten Prüfstandsweiten ohne Symmetriebedingungen simuliert. Das Strömungsfeld des Grundlagen-Reinigungsprüfstands basiert auf 7.416.135 Tetraeder-Elementen. Die Plausibilität des Strömungsverhaltens wird in einer Gitterstudie geprüft.

#### 4.6.2 Verifizierung

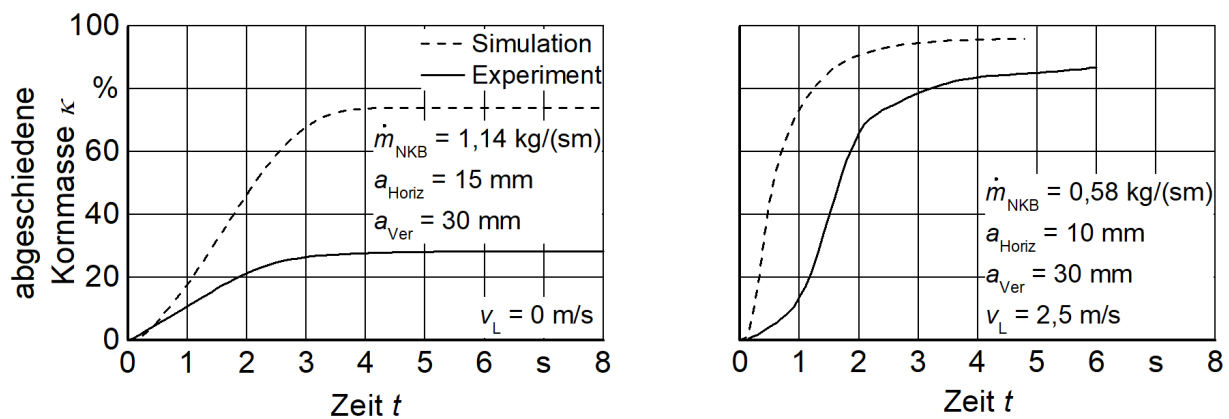
Pförtner [2] nutzt die mittels Röntgen- und Computertomografie gewonnenen experimentellen Ergebnisse zur Verifizierung der Material- und Interaktionseigenschaften, **Kapitel 4.5**. Um Unterschiede aufgrund verschiedener Auswertemethoden zu vermeiden, ist die Auswertung gleich der Auswertung der 2D-Röntgenbilder, **Kapitel 4.4**. Zur Verifizierung der Schütthöhe wird der Abstand der Kornschicht zum Sieb zu Versuchsbeginn genutzt, **Bild 60**.



**Bild 60:** Verifizierung von Material- und Interaktionseigenschaften mittels Röntgen- und Computertomografie nach [2]

Der zeitliche Verlauf des Abstandes Kornschicht - Sieb sowie der Sinkgeschwindigkeit für einen Durchsatz von  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,6 \text{ kg/sm}$ , einer Froudezahl von  $Fr = 1$  und einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 1 \text{ m/s}$  weist eine mittlere Abweichung von  $\overline{\Delta \Psi} = 3,7 \text{ mm}$  bzw.  $\overline{\Delta v_{\text{Sink}}} = 1 \text{ mm/s}$  auf. Diese Grenzen geben die Modellgenauigkeit wieder [3]. Es bestätigt sich die Eignung der Röntgen- und Computertomografie zur Verifizierung.

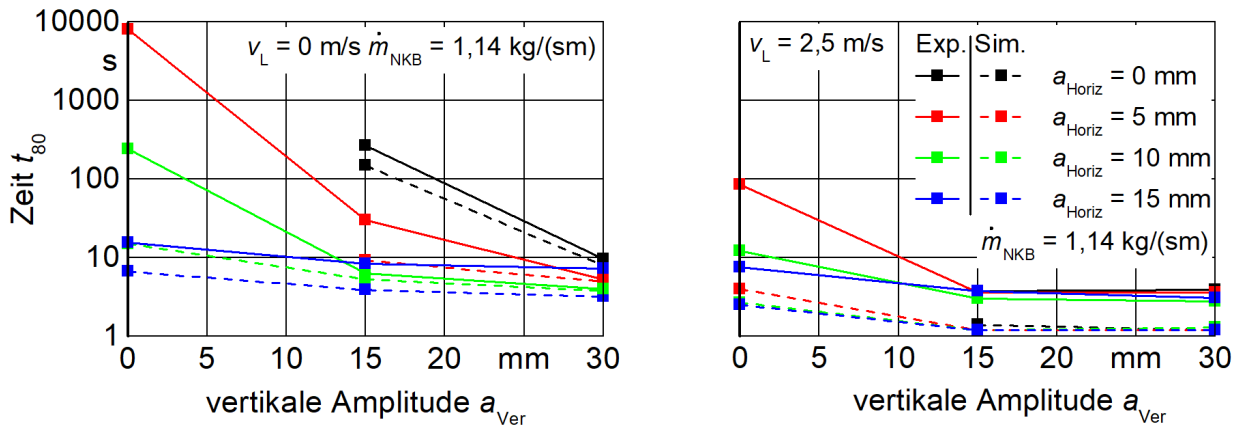
Ein Vergleich der Kornabscheidung von Simulation und Experiment am Grundlagen-Reinigungsprüfstand mit unterschiedlichen Siebanregungen in horizontaler Richtung sowie unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten zeigt ein besseres Entmischungs- und Abscheideverhalten der Simulation, **Bild 61**. Die früher einsetzende Abscheidung bedingt ein schnelleres Migrieren der Körner durch die Gutschicht.



**Bild 61:** Vergleich der Durchdringungszeitkurve für Simulation und Experiment

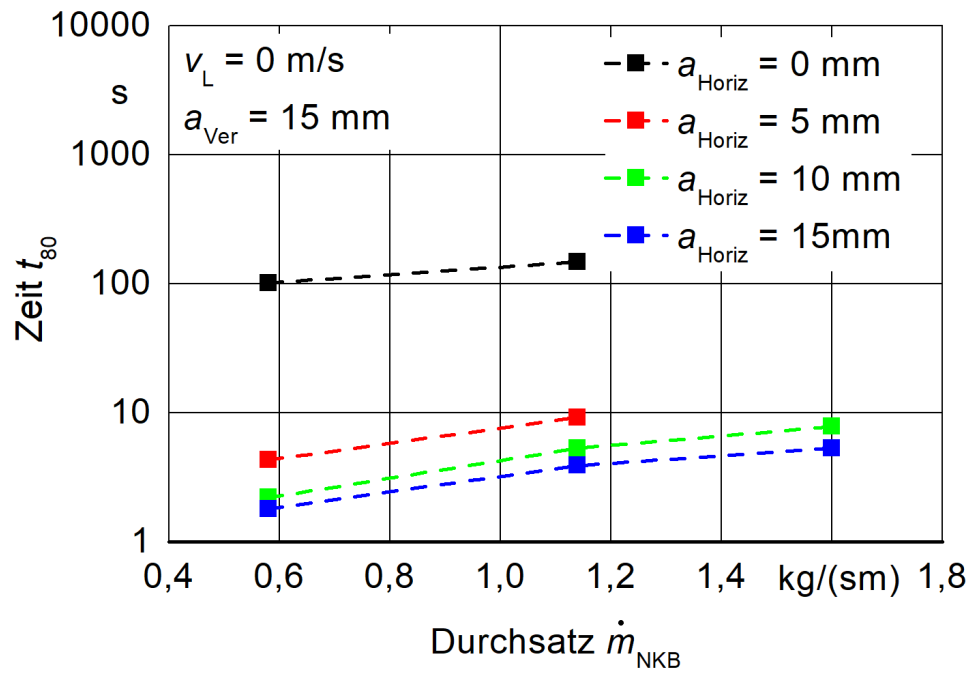
Im Vergleich zu den Ergebnissen der Verifizierung mittels Röntgen- und Computertomografie (Bild 60) weist dieses Verhalten eine deutlich höhere Abweichung auf. Dies kann in der fehlenden Fähigkeit des Knickens und Biegens der NKB-Partikel begründet sein. Die gegenseitige Verschiebung der NKB-Bestandteile aufgrund der zusätzlichen Horizontalbewegung bewirkt eine Verformung der Bestandteile, welche in der DEM-Simulation nicht abgebildet wird. Korn [75] zeigt die starke Abhängigkeit der Abscheidung von dem Anteil geknickter NKB-Partikel in der DEM-Simulation. Bedingt durch die 1-Wege-Kopplung mit einem Strömungsfeld wird die Änderung des Strömungsprofils aufgrund der Siebbewegung und der Gutbeladung nicht berücksichtigt. Die zusätzliche horizontale Oszillation des Siebs beeinflusst die durchströmende Luft stärker als die rein vertikale Siebbewegung. Höhere Genauigkeiten werden mit der Verwendung mehrerer Strömungsfelder erwartet, welche den Einfluss der Siebstellung abbilden. Pförtner [5] quantifiziert die prozentuale Verringerung des Fehlers bei der Verwendung von 4 Strömungsfeldern von  $k = 100 \%$  auf  $k = 5 \%$ .

Das Verhalten der schnelleren Entmischung und Abscheidung in der Simulation ist auch für unterschiedliche Werte der vertikalen Amplitude ersichtlich, **Bild 62**. Es zeigt sich keine Abhängigkeit zwischen den Abweichungen und den vertikalen und horizontalen Anregungsbeschleunigungen. Das Modell kann mit den in Bild 62 dargestellten Genauigkeiten zur Simulation in der Reinigungsanlage eingesetzt werden.



**Bild 62:** Vergleich der Durchdringungszeitkurve für Simulation und Experiment für unterschiedliche Anregungsparameter

Simulative Untersuchungen des Reinigungsprozesses mit Verwendung des Vorbereitungsbodens und einer doppelten Fallstufe am Grundlagen-Reinigungsprüfstand zeigen höhere Übereinstimmungen zwischen Simulation und Experiment [136, 137]. Dies lässt darauf schließen, dass die Entmischung hauptsächlich in der Fallstufe erfolgt. Dieser Prozess ist mit dem Simulationsmodell besser abbildbar. Die Einflüsse der Anregungen sind qualitativ auch anhand der Simulation sichtbar. Ohne Luftunterstützung ( $v_L = 0 \text{ m/s}$ ) steigert eine höhere horizontale Amplitude durchsatzunabhängig die Entmischung, **Bild 63**. Bei höheren pneumatischen Anregungen und größeren vertikalen Amplituden verringert sich der Einfluss der horizontalen Amplitude, Bild 62.

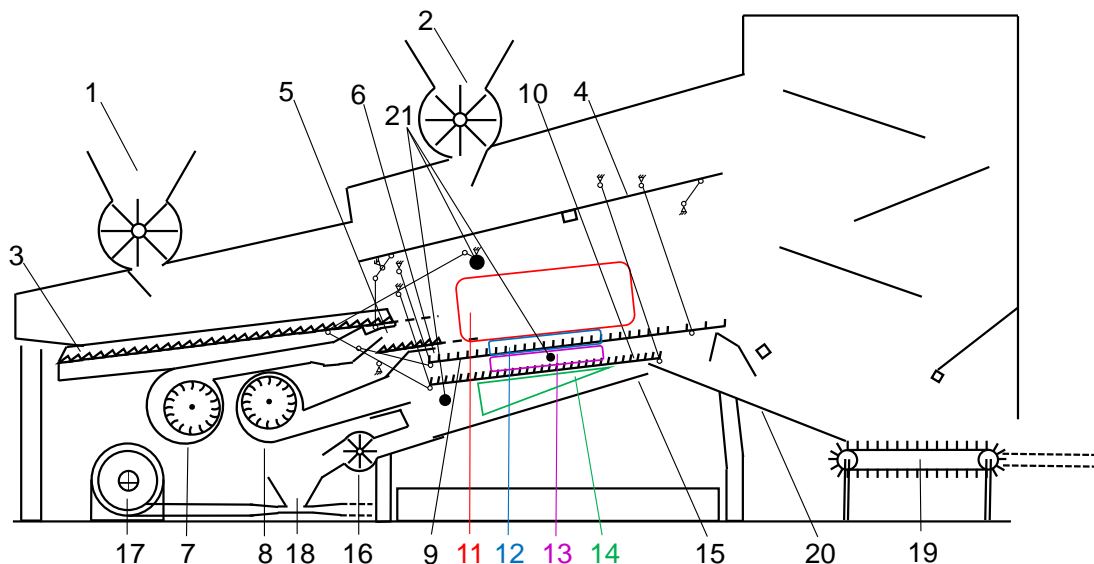


**Bild 63:** DEM-CFD-Simulation: Einfluss des Durchsatzes und der horizontalen Amplitude auf die Durchdringungszeit

## 5 EINFLUSSGRÖSSEN AUF DAS BEWEGUNGSVERHALTEN VON KORN UND NKB

### 5.1 Reinigungsprüfstand

Zur Untersuchung der Einflussgrößen auf das Bewegungsverhalten von Korn und NKB in der Mähdrescherreinigungsanlage wird der von Schwarz [13, 164, 165] entwickelte Reinigungsprüfstand verwendet, **Bild 64**. Dieser bildet im Längsschnitt eine CLAAS Jet-Stream-Reinigung [38] im Maßstab 1:1 ab. Die Breite beträgt  $b_p = 500$  mm. Zur Realisierung verschiedener Luftverteilungen ist die Luftzuführung zur ersten Fallstufe von der Luftzuführung zum Ober- und Untersieb mit der zweiten Fallstufe getrennt. Die separate Gutbeschickung für Vorbereitungs- und Rücklaufboden und die stochastische Vermischung von Korn und NKB ermöglichen einen Versuchsablauf, der sehr gut an den realen Prozess im Mähdrescher angepasst ist. [13, 164, 165]



- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1 VB Beschickung                     | 12 Sichtbereich: Obersieb                                    |
| 2 RLB Beschickung                    | 13 Sichtbereich: Zwischen Ober- und Untersieb                |
| 3 Vorbereitungsboden (VB)            | 14 Sichtbereich: Unter Untersieb                             |
| 4 Rücklaufboden (RLB)                | 15 Körnerrücklaufboden                                       |
| 5 1. Fallstufe (1. FS)               | 16 Zellenradschleuse   |
| 6 2. Fallstufe (2. FS)               | 17 Körnergebläse   |
| 7 Gebläse 1. FS                      | 18 Injektorschleuse  |
| 8 Gebläse Ober- und Untersieb, 2. FS | 19 Förderband; ersetzbar durch NKB Speicher                  |
| 9 Obersieb                           | 20 Überkehrrücklaufboden; ausbaubar für Kornverlustmessungen |
| 10 Untersieb                         | 21 Wellen, Querprofile zur Versteifung                       |
| 11 Sichtbereich: Über Obersieb       |  |

**Bild 64:** Reinigungsprüfstand nach [13, 164, 165] mit erweiterter optischer Zugänglichkeit und einer längeren Versuchszeit

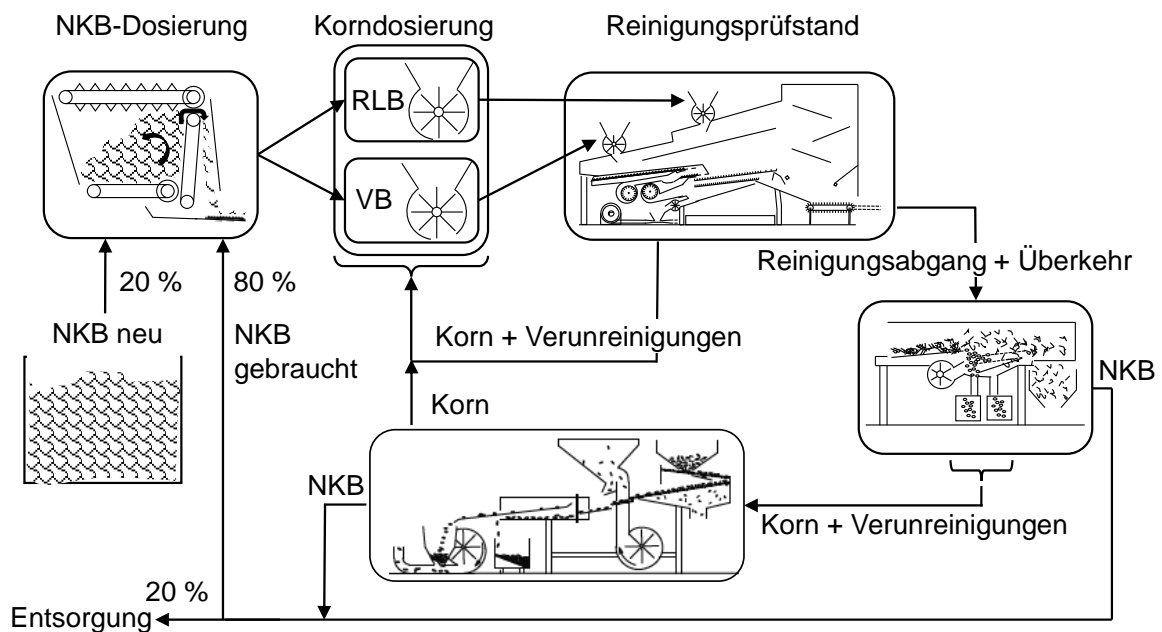
Die Untersuchung der Luftströmung mittels Laser-Doppler-Anemometrie sowie die Detektion der Gutpartikel mittels Hochgeschwindigkeitskamera fordern Bereiche optischer Zugänglich-

keit, Bild 64. Die geometrische Anordnung der Sichtbereiche ist unter Berücksichtigung der vorhandenen Antriebe gewählt, **Tabelle 7**.

**Tabelle 7:** Bereiche optischer Zugänglichkeit am Reinigungsprüfstand

Sichtbereich Nr.	Bereich optischer Zugänglichkeit	
	Sieblänge	Lamellen
12: Über Obersieb	$l_{OS} = 348\text{--}1450\text{ mm}$	$n_{OS} = 12\text{--}50$
13: Obersieb	$l_{OS} = 610\text{--}1020\text{ mm}$	$n_{OS} = 21\text{--}35$
14: Zwischen Ober- und Untersieb	$l_{OS} = 610\text{--}1020\text{ mm}$	$n_{OS} = 21\text{--}35$
15: Unter Untersieb	$l_{US} = 465\text{--}1102\text{ mm}$	$n_{US} = 16\text{--}38$

Die notwendigen langen Versuchszeiten verlangen die Erweiterung der NKB- und Kornzuführeinrichtungen zur Realisierung eines geschlossenen Förderkreises. Damit wird eine theoretisch unendliche Versuchszeit  $t_{\text{Mess,theor.}} = \infty$  erreicht, **Bild 65**. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Hermann [166].



**Bild 65:** Materialführung im geschlossenen Förderkreis zur Erhöhung der Versuchszeit

Aus diesem Grund wird auf die Speicherung des Siebdurchgangs und des Reinigungsabgangs verzichtet, Bild 64. Eine Auswertung der Abscheidekennlinie und der Bestandteile in der Überkehr ist nicht möglich. Die Förderung des Reinigungsabgangs und der Überkehranteile wird mittels Überkehrrücklaufboden 20 und Förderband 19 erreicht, Bild 64. Die Speicherung in Kisten für die Ein- und Auslaufphase sowie für die stationäre Messphase entfällt, wodurch eine Bestimmung der Kornverluste nicht möglich ist. Der Siebdurchgang wird über den Körnerrücklaufboden 15 und über die Zellenradschleuse 16 aus dem Prüfstand gefördert.

Für Referenzversuche können der Überkehrrücklaufboden 20 und das Förderband 19 durch die Auffangkisten ersetzt und entsprechend dem Versuchsablauf von Schwarz [13] die Kornverluste bestimmt werden. Hier wird eine Messzeit von  $t_{\text{Mess}} = 10 \text{ s}$  festgelegt. Der Reinigungsabgang der stationären Messphase wird von den Reinigungsabgängen der instationären Einlauf-  $t_{\text{Einlauf}} = 17 \text{ s}$  und Auslaufphase  $t_{\text{Auslauf}} = 3 \text{ s}$  getrennt aufgefangen.

Der Siebdurchgang wird pneumatisch zur Korndosierung gefördert, Bild 64. Hohe Kornreinheiten von  $R_{\text{Korn}} = 99,7 \%$  [13] erlauben eine Vernachlässigung der Nachreinigung, Bild 65. Mithilfe einer nachgeschalteten Mähdrescherreinigungsanlage wird der Reinigungsabgang und der Überkehranteil gereinigt. Der NKB-Massenstrom wird zu 80 % der NKB-Dosierung zugeführt. Ein Anteil des NKB-Massenstroms von 20 % wird durch unbenutztes Versuchsgut ersetzt. Geringe Unterschiede in den Schwebekennlinien zeigen die vernachlässigbaren Änderungen der Stoffeigenschaften und erlauben die hohe Wiederverwendungsrate, Bild 31. Nach einer erneuten Nachreinigung der Körner, die im Reinigungsabgang enthalten sind, werden diese der Korndosierung zugeführt. Der maximale spezifische NKB-Durchsatz der Kreisförderung beträgt  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,6 \text{ kg/sm}$ . Größere Durchsätze werden mit einer Unterbrechung der Förderung realisiert.

## 5.2 Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung

Das primäre Ziel der Untersuchung der Einflussgrößen auf das Bewegungsverhalten der Gutbestandteile ist die Steigerung des Gesamtprozessverständnisses der verfahrenstechnischen Vorgänge entsprechend dem White-Box-Modell, Bild 19. Die Berücksichtigung aller Einflussfaktoren und Wechselwirkungen bedingt eine Vielzahl an Versuchsdurchführungen [167], wobei die zur Versuchsdurchführung benötigte Zeit abhängig von der eingesetzten Messtechnik ist. Entsprechend ist eine Priorisierung der Einflussfaktoren nach der Signifikanz wichtig. Die lange Messzeit der Laser-Doppler-Anemometrie bedingt die Materialführung im geschlossenen Kreis und beschränkt die Untersuchung auf den Einfluss des Gutdurchsatzes.

Untersuchungen der Luftströmung mit der Heißfilm-Anemometrie und der Bewegung der Gutbestandteile mithilfe der Hochgeschwindigkeitskamera erlauben aufgrund kurzer Aufnahmezeiten die Begrenzung der Messzeit auf  $t_{\text{Mess}} = 10 \text{ s}$  und somit die in [13] dargestellte Versuchsdurchführung. Dadurch ist die Ermittlung der Kornverluste und das Einbeziehen weiterer Einflussfaktoren gegeben, weshalb auf Methoden der statistischen Versuchsplanung zurückgegriffen wird. Die Vorteile und Anwendungen werden in [167–169] näher beschrieben. Aufgrund ihrer

flexiblen Anpassung, sowie der Möglichkeit der individuellen Gestaltung, werden D-optimale Pläne angewendet [168]. Die Erstellung und Bewertung der Modelle erfolgt mithilfe der Software Cornerstone<sup>®</sup> [170], SAS<sup>™</sup> [171] und CycDesigN<sup>™</sup> [172].

Als Versuchsgut werden Weizenkörner der Sorte Pамиr aus der Ernte 2015 und Weizenstrohhäcksel der Sorte Hermann aus der Ernte 2015 verwendet. Die Stoffeigenschaften sind **Kapitel 4.1** entnehmbar. Die Grundeinstellungen des Reinigungsprüfstands, die bei der Versuchsdurchführung gewählt wurden, befinden sich in **Tabelle 15** in **Anhang 8.8**.

## 5.3 Messtechnik

### 5.3.1 Hochgeschwindigkeitskamera

Die Bestimmung der Entmischung und Abscheidung erfolgt durch Bewertung des Bewegungsverhaltens der Gutbestandteile mithilfe von Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen. Dabei wird das Bewegungsverhalten wandnaher Bestandteile aufgenommen und ausgewertet. Die mittels Computertomografie bestimmte Ungenauigkeit des Abstandes Kornschicht - Sieb und der Sinkgeschwindigkeit beträgt  $\psi = 6,3 \text{ mm}$  bzw.  $v_{\text{Sink}} = 1,6 \text{ mm/s}$ , **Kapitel 4.5.4**. Der geringe Unterschied von ca. einer Weizenkornlänge erlaubt die Hochgeschwindigkeitskamera als Methode zur Auswertung. Die Hochgeschwindigkeitskamera IDT NX 7-S2 (Bild 34) wird auf den in Bild 64 dargestellten Sichtbereichen installiert. Die Fokussierung erfolgt mithilfe des Siemenssterns [173]. Die Aufnahmefrequenz beträgt  $f_{\text{HS}} = 500 \text{ Hz}$ . Neben den in Kapitel 4.4.3 vorgestellten Bewertungsgrößen werden die Schichthöhen und die Bewegungs- und Geschwindigkeitstrajektorien der einzelnen Bestandteile ausgewertet. Diese geben ebenfalls Aufschluss über die angreifenden Kräfte, die aus den mechanischen und pneumatischen Anregungen resultieren. Des Weiteren eignen sich die Werte zur Verifizierung von DEM-CFD-Simulationen.

Die Korndetektion basiert auf der Blob-Erkennung [149] aus der openCV-Sammlung [150], **Kapitel 4.4.2**. Im Rahmen der Bestimmung der Bewegungstrajektoren ist die eindeutige Zuordnung der Körner in den fortlaufenden Bildern wichtig. Dies wird mittels Kalman-Filter [174] zur multiplen Objektverfolgung erreicht. Die Zuordnung der Partikel basiert dabei auf dem Kuhn-Munkres-Algorithmus [175, 176]. Die Inklusion des C++-Programmcodes zur Korndetektion und die Implementierung der Objektverfolgung erfolgt in Matlab<sup>®</sup> mit der Image Acquisition Toolbox<sup>™</sup>, der Image Processing Toolbox<sup>™</sup>, der Computer Vision System Toolbox<sup>™</sup> und dem Matlab Coder<sup>™</sup>.

### 5.3.2 Laser-Doppler-Anemometrie

Die Untersuchungen werden mit dem 2D-LDA-System der Firma Artium Technologies Inc. durchgeführt, **Tabelle 8** [177, 178]. Aufgrund der unterschiedlichen Größen und Formen der Gutbestandteile wird das LDA-Verfahren ausschließlich zur Messung der Luftgeschwindigkeit verwendet. Dazu wird Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) als stabiles Aerosol in die Luftströmung an den Gebläsen eingebracht. Das Aerosol bewegt sich entsprechend des Strömungsprofils mit Luftgeschwindigkeit [179]. Der Bereich des Durchmessers der Aerosolpartikel beträgt  $d_{\text{DEHS}} = 60\text{--}1000\text{ nm}$ , **Bild 101** in **Anhang 8.10**. Damit ist das Aerosol deutlich kleiner als die Bestandteile des Reinigungsgutes. Des Weiteren haben alle Aerosolpartikel annähernd die gleiche kugelförmige Form, weshalb eine Trennung zum Reinigungsgut möglich ist und die Luftgeschwindigkeit allein auf Basis des DEHS bestimmt wird [112].

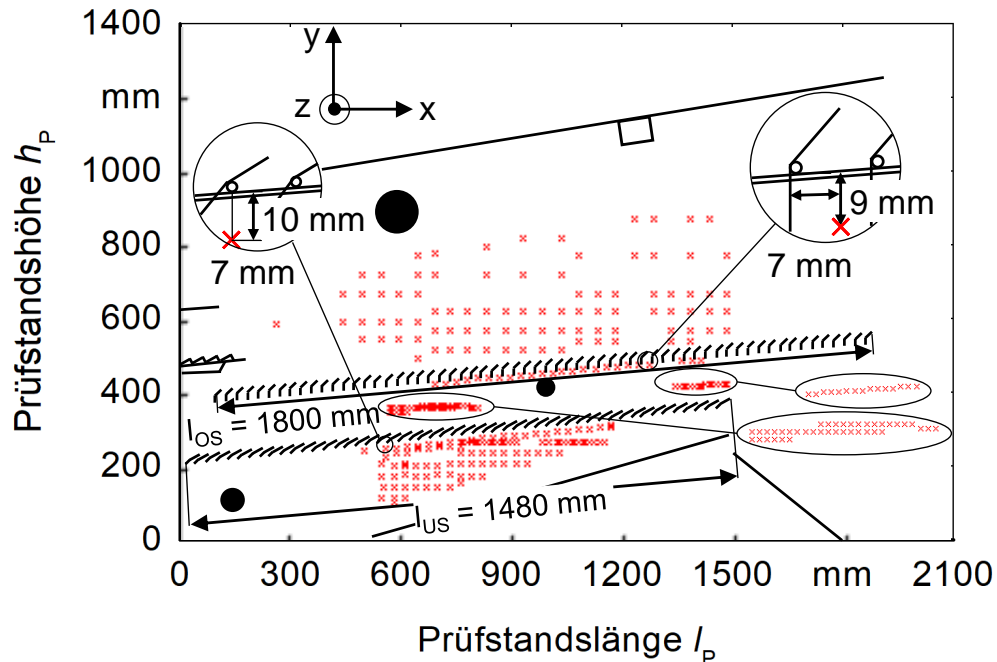
Das Messvolumen, welches durch die Kreuzung der Laserstrahlen entsteht, ist abhängig von der Linsenbrennweite und setzt sich aus dem fokussierten Strahlendurchmesser  $d_w$  und der Messvolumenlänge  $l_{\text{LDA}}$  zusammen, Tabelle 8. Anhand dieser geringen Abmessungen wird deutlich, dass die Laser-Doppler-Anemometrie ein Punktmessverfahren ist. Das stationäre Strömungsprofil ermöglicht die zeitlich nacheinander liegende Messung der Luftgeschwindigkeit an verschiedenen Referenzstellen. Dabei wird das Messvolumen über Isel-Linearmodule mit einer Genauigkeit von  $k_{\text{Isel}} = 0,02\text{ mm}$  positioniert [180].

**Tabelle 8:** Spezifikation des 2D-LDA-Systems [177, 178]

Messsystem	2D-LDA (Komponente K 1, Komponente K 2)			
Streuungsmessung	Rückwärtsstreuung			
Linsen-Strahlabstand	K 1, K 2: 80 mm			
Linsen-Strahldurchmesser	K 1, K 2: 1, 4 mm			
Wellenlänge Laserstrahlen $\lambda_{\text{LDA}}$	K 1: 532 nm, K 2: 561 nm			
Shift-Frequenz $f_{\text{Shift}}$	K 1: 40 MHz, K 2: 45 MHz			
Eingebrachte Partikel	DEHS, Partikelgrößenverteilung in Anhang 8.10			
Partikelerzeugung	Technische Spezifikation in Anhang 8.10			
Linsenbrennweite $l_{\text{BW}}$	350 mm	500 mm	758 mm	1000 mm
Streifenabstand $d_{\text{LDA}}$	2,3 $\mu\text{m}$	3,3 $\mu\text{m}$	5,0 $\mu\text{m}$	6,7 $\mu\text{m}$
Fokussierter Strahlendurchmesser $d_w$	34 $\mu\text{m}$	48 $\mu\text{m}$	73 $\mu\text{m}$	97 $\mu\text{m}$
Länge LDA-Messvolumen $l_{\text{LDA}}$	0, 3 mm	0, 6 mm	1, 5 mm	2, 6 mm
Halber Schnittwinkel der Laserstrahlen $\phi_{\text{LDA}}/2$	0, 114 rad	0, 080 rad	0, 053 rad	0, 040 rad

Die Lage der Referenzmessstellen ist von der optischen Zugänglichkeit abhängig, **Bild 66**. Dabei wird die x- und y-Komponente der Luftgeschwindigkeit gemessen und die Resultierende berech-

net. Die Bestimmung der Querströmung ist nicht möglich. Das 2D-Strömungsprofil ist für zwei unterschiedliche z-Ebenen untersucht worden. Messebene 2 liegt bei  $1/4$  der Prüfstandsbreite ( $z_{M2} = b_p/4 = 125 \text{ mm}$ ). Die Position der Messebene 1 ist mit  $z_{M1} = z_{M2} - 21 \text{ mm} = 104 \text{ mm}$  gewählt.



**Bild 66:** Referenzmessstellen zur Messung der Luftgeschwindigkeit mit dem LDA-Verfahren

Die Aufnahme­frequenz ist abhängig von der Anzahl der dopplerverschobenen Lichtwellen, die vom Photodetektor erfasst und vom Prozessor ausgewertet werden. Diese ist abhängig von der Anzahl der DEHS-Partikel in der Luftströmung, der Einstellung der Blenden zur Fokussierung der Laserstrahlen in einem Punkt und der Durchstrahlung der Glasscheiben und liegt in einem Messbereich von  $f_{LDA} = 10 \text{ Hz} - 2 \text{ kHz}$ .

Durch Mittelung der im Messpunkt aufgezeichneten Geschwindigkeitswerte  $v_{L,LDA,i}$  wird die resultierende Geschwindigkeit  $v_L$  berechnet, **Gl 21**. Dabei ist je nach Aufnahme­frequenz  $f_{LDA}$  die Messdauer unterschiedlich. Die Anzahl an Messungen in einem Punkt wird auf  $N = 500 - 12000$  festgelegt, sodass der statistische Fehler des Mittelwertes im Bereich  $\check{k}_{LDA} = 0, 1 \text{ m/s}$  liegt.

$$v_L = \frac{\sum_{i=1}^N v_{L,LDA,i}}{N} \quad (21)$$

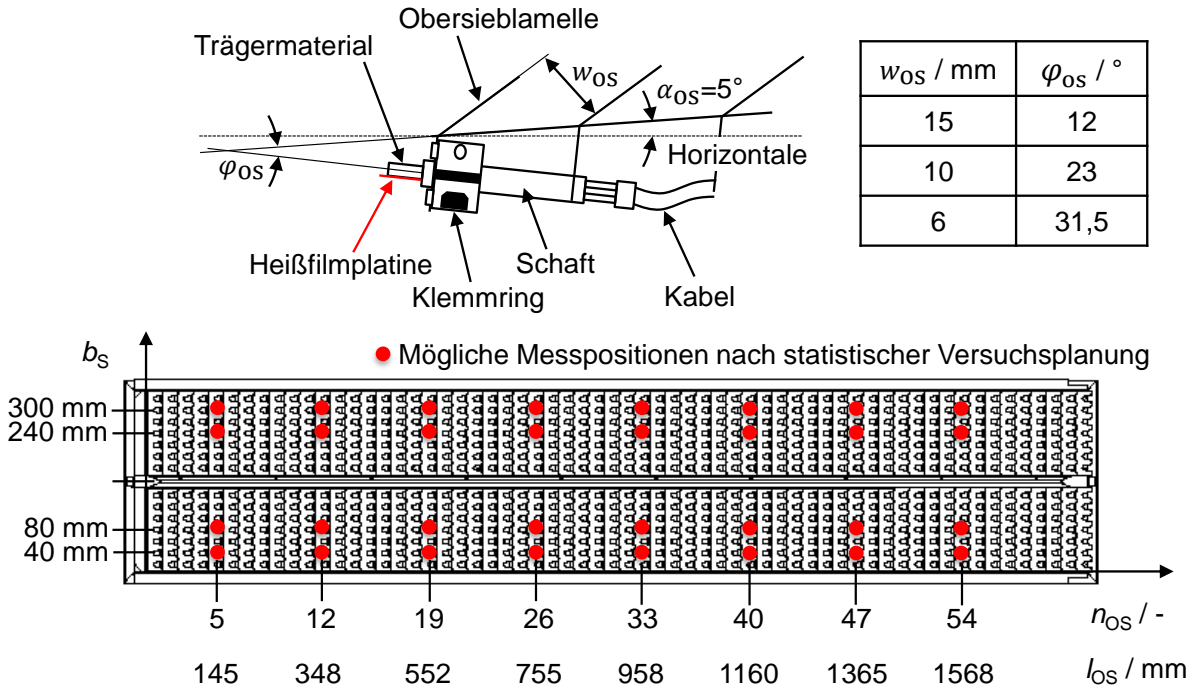
Die gleichzeitige Bestimmung der Siebposition über einen Hall-Sensor, der am Vorbereitungsbo­den installiert wird, erlaubt die Zuordnung der aufgenommenen Geschwindigkeitswerte  $v_{L,LDA,i}$  zu der jeweiligen Siebstellung.

### 5.3.3 Heißfilm-Anemometrie

Die verwendete Heißfilmpatrine besteht aus Platin mit den Abmessungen  $7 \times 2,4 \times 0,15 \text{ mm}$  ( $l \times b \times h$ ) [181] und folgenden Eigenschaften:

- Ansprechempfindlichkeit:  $\delta_{HF} = 0,01 \text{ m/s}$
- Aufnahmefrequenz:  $f_{HF} = 20 \text{ Hz}$
- Geschwindigkeitsbereich:  $v_L = 0-100 \text{ m/s}$ , mit Messbrücke kalibriert:  $v_L = 0-20 \text{ m/s}$
- Temperaturbereich:  $T = -20-150 \text{ °C}$
- Genauigkeit:  $\checkmark_{HF} < 3\%$
- Einfluss des Anströmwinkels auf die gemessene Luftgeschwindigkeit: **Bild 100** in **Anhang 8.9**

Zur Erhöhung der ertragbaren mechanischen Belastung wird die Heißfilmpatrine mit einem Holzkörper als Trägermaterial verlötet, der außerdem als thermischer Isolator gegenüber dem  $l = 4 \text{ cm}$  langen Metallschaft fungiert, **Bild 67**. Über den Schaft wird der Sensor mittels Klemmring in den Obersieblamellen fixiert. Die Öffnungsweite der Sieblamellen beeinflusst somit direkt die Position des Heißfilms zur Strömungsrichtung. Acht Sensoren werden auf dem Obersieb angeordnet. Die Positionierung erfolgt nach der statistischen Versuchsplanung, **Kapitel 5.2**.



**Bild 67:** Aufbau und Anordnung der Heißfilmsensoren im Obersieb

Die Messbrücke [182] besteht aus der Sensorelektronik und dem Messverstärker für die Regelung nach dem Konstant-Temperatur-Verfahren und wird an die Heißfilmpatrine angepasst. Die Regeltemperatur beträgt  $T = 150 \text{ °C}$ . Die Temperaturkompensation erfolgt mithilfe eines

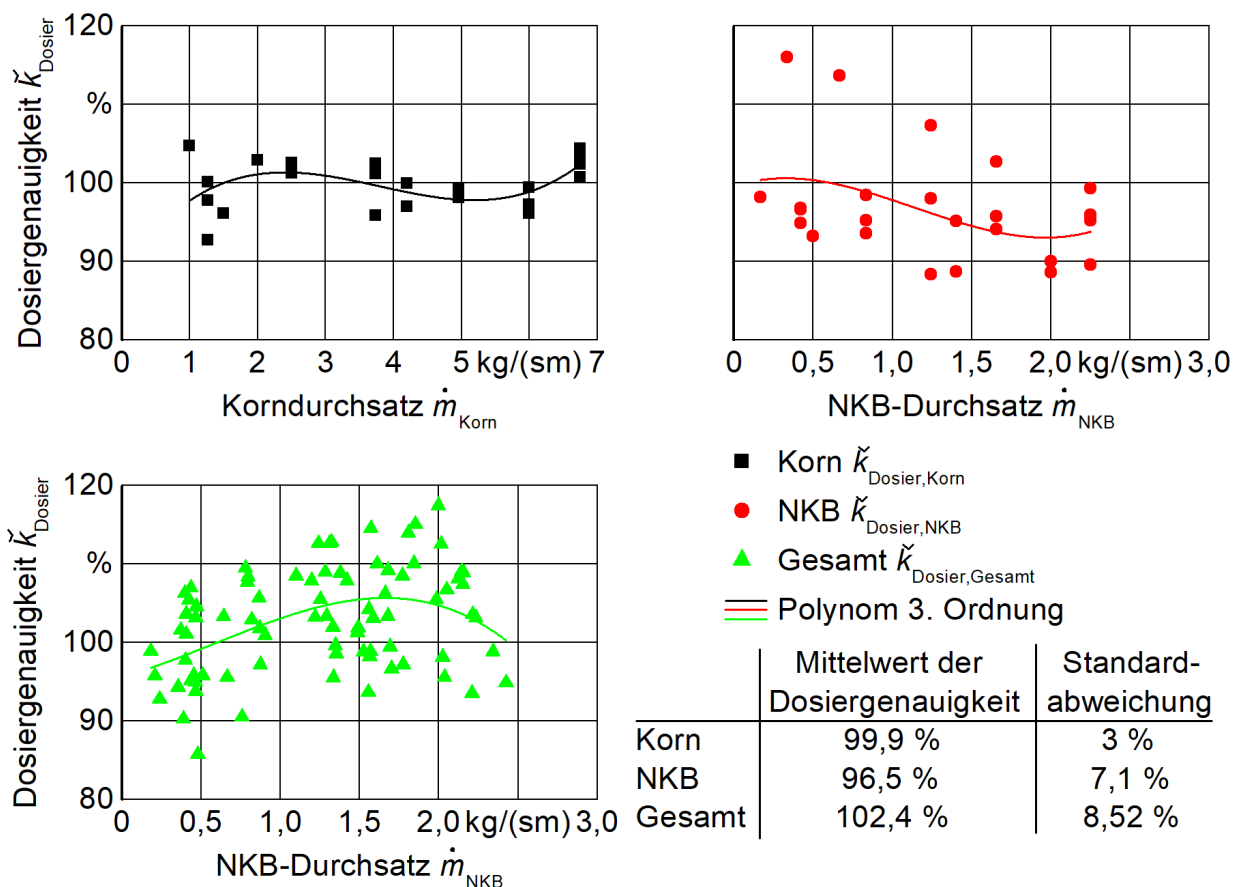
Temperatursensors. Ein CAN-Modul (Entwicklung auf Basis [183]) erlaubt Übertragungen mittels CAN-Bus, was die Aufnahme der Daten über einen CAN-Adapter [184] sowie die direkte Integration in vorhandene CAN-Bus-Systeme ermöglicht.

## 5.4 Kalibrierung der Versuchseinrichtung und der Messtechnik

### 5.4.1 Dosiergenauigkeit

Da Durchsatzschwankungen großen Einfluss auf das Arbeitsverhalten der Reinigungsanlage haben, fordert die Verlängerung der Messzeit über die Gutförderung im Kreis eine hohe Genauigkeit der Korn- und NKB-Dosierung. Für die resultierende Dosiergenauigkeit ergibt sich ein Mittelwert von  $\check{k}_{\text{Dosier,Gesamt}} = 102,4\%$  bei einer Standardabweichung von  $\sigma_{\text{Dosier,Gesamt}} = 8,52\%$ ,

**Bild 68.** Durchsatzschwankungen sind in diesem Bereich zu erwarten.



**Bild 68:** Genauigkeit der Korn- und NKB-Dosierung am Reinigungsprüfstand

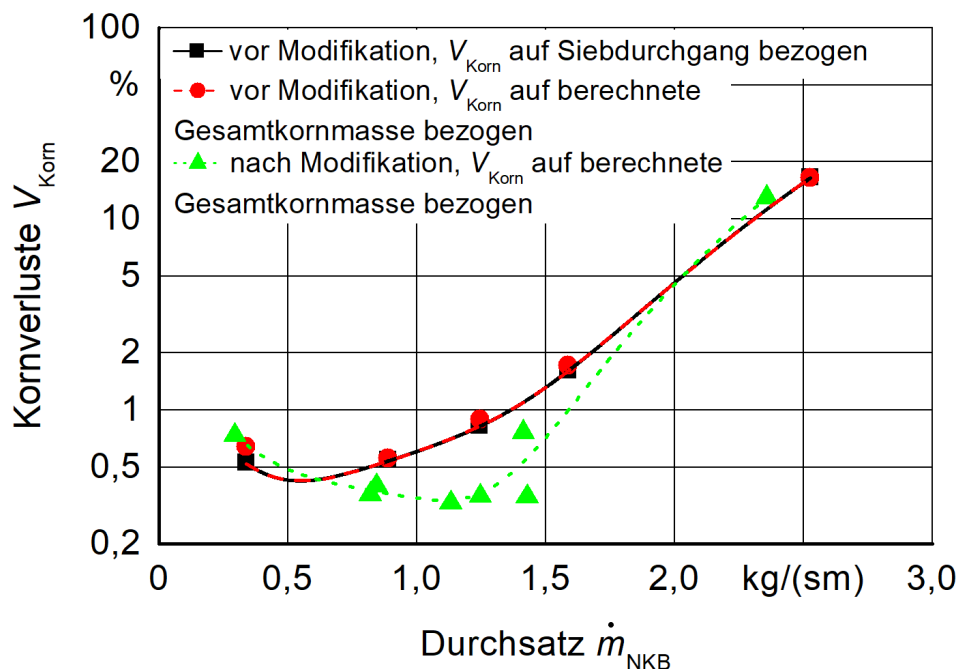
### 5.4.2 Durchsatz-Verlust-Verhalten

Bei den Versuchen mit der Heißfilm-Anemometrie und den Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen wird zeitgleich die Verlustkornmasse  $m_{\text{Korn},v}$  ermittelt. Die fehlende Speicherung des Siebdurchgangs macht die Bestimmung der Gesamtkornmasse  $m_{\text{Korn,ges}}$  und somit der Kornver-

luste  $V_{\text{Korn}}$  nach Gl. 7 unmöglich. Aus diesem Grund wird die aufgegebene Gesamtkornmasse mithilfe des spezifischen NKB-Durchsatzes  $\dot{m}_{\text{NKB}}$ , dem Korn-NKB-Massenverhältnis  $\check{s}$ , der Prüfstandsweite  $b_P$  und der Messzeit  $t_{\text{Mess}}$  berechnet, **Gl. 22**.

$$m_{\text{Korn,ges,br}} = \dot{m}_{\text{NKB}} \cdot b_P \cdot \check{s} \cdot t_{\text{Mess}} \quad (22)$$

Die hohe Genauigkeit der Korndosierung erlaubt dieses Vorgehen. Auswertungen von Versuchen, die vor der Installation der Sichtbereiche in den Reinigungsprüfstand (**Bild 5.1**) durchgeführt wurden, zeigen identisches Verhalten, **Bild 69**. Die Auswertung der Kornverluste nach Realisierung der optischen Zugänglichkeit und Installation des Körnerrücklaufbodens zeigt Abweichungen, die auf die Verwendung unterschiedlicher Versuchsgüter aus verschiedenen Erntejahren zurückzuführen sind. Das Arbeitsverhalten des Prüfstands ist unverändert.

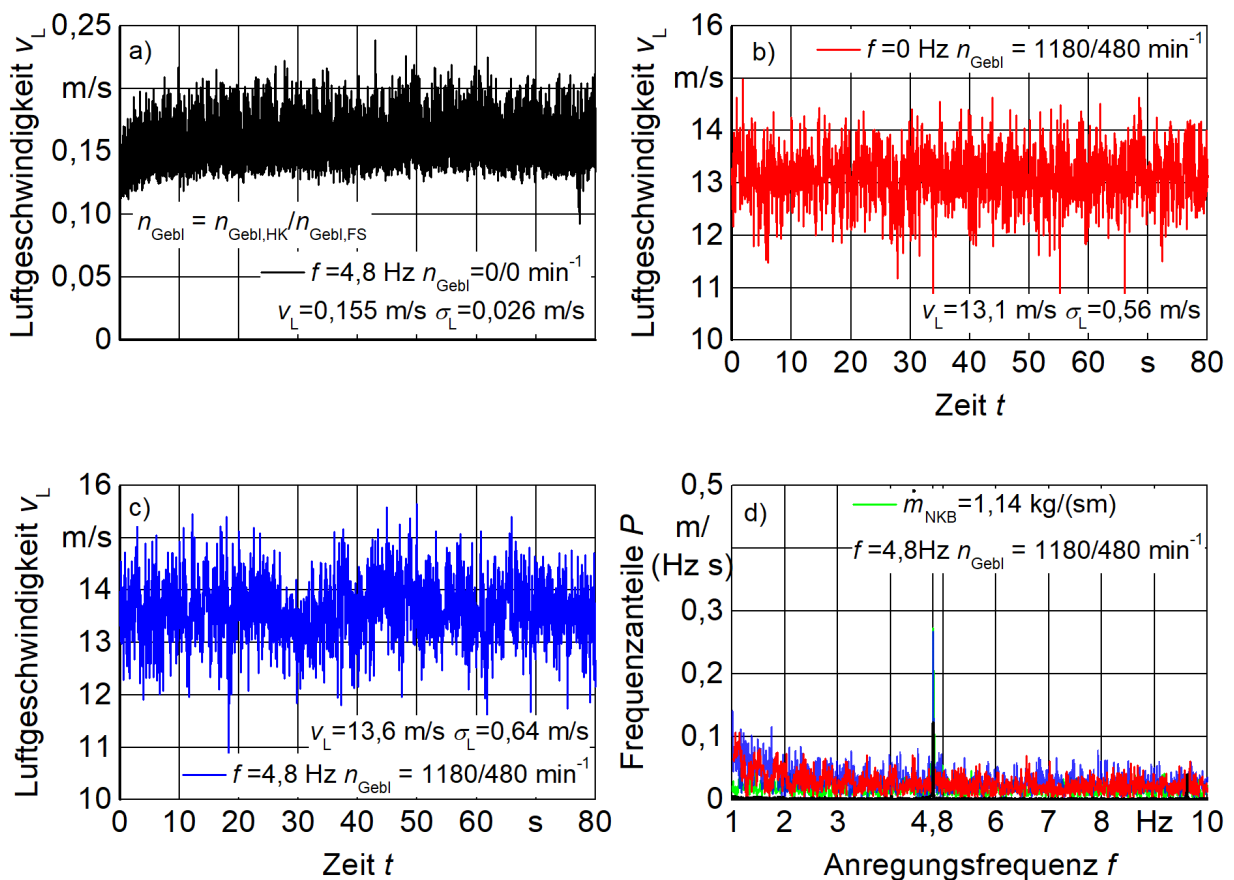


**Bild 69:** Auswirkung der Modifikationen auf das Arbeitsverhalten des Reinigungsprüfstands

#### 5.4.3 Abgleich der Siebbewegung über die Heißfilmsensoren

Durch die Installation der Heißfilmsensoren in das Obersieb führen diese die Siebbewegung aus. **Bild 70 a)** zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der gemessenen Luftgeschwindigkeit bei einer Siebfrequenz von  $f = 4,8 \text{ Hz}$  ohne Luftströmung,  $n_{\text{GebI,HK}} = n_{\text{GebI,FS}} = 0 \text{ min}^{-1}$ . Die mittlere Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 0,155 \text{ m/s}$  resultiert aus der Siebbewegung. Bei der Gebläsedrehzahl von  $n_{\text{GebI,HK}} = 1180 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{\text{GebI,FS}} = 480 \text{ min}^{-1}$  stellen sich unabhängig von der Siebbewegung höhere Standardabweichungen ein, **Bild 70 b)-c)**. Durch die Siebbewegung wird die räumliche Messposition kontinuierlich verschoben. Im Bereich der Sieblamellen entsteht

ein turbulentes Strömungsprofil mit hohen Geschwindigkeitsänderungen. Dies begründet den Unterschied in der mittleren Luftgeschwindigkeit  $v_L$  zwischen der Siebfrequenz  $f = 0$  und 4,8 Hz. Die Untersuchung der Frequenzanteile zeigt auch bei Beladung mit einem Durchsatz von  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 1,14 \text{ kg/sm}$  höhere Werte bei der Siebfrequenz  $f = 4,8 \text{ Hz}$ , Bild 70 d). Bei stehendem Sieb ( $f = 0 \text{ Hz}$ ) sind keine höheren Anteile über der Anregungsfrequenz ersichtlich. Die Filterung der Messwerte mittels Bandstopppfilter in diesem Frequenzbereich hat keinen Einfluss auf die mittlere Luftgeschwindigkeit und auf die Standardabweichung, weshalb die Sensorbewegung vernachlässigbar ist.



**Bild 70:** Auswirkung der Obersiebbewegung auf das Messergebnis der Heißfilmsensoren

## 5.5 DEM-CFD-Simulation

Die durchgeführten DEM-CFD-Simulationen nutzen den von Pförtner [2–5, 137] entwickelten Stoffparametersatz. Die Modellierungsparameter sind in **Tabelle 9** ersichtlich. Die Ergebnisse werden mit Simulationen von Pförtner [5] verglichen.

**Tabelle 9:** Modellierungsparameter der DEM-CFD-Simulation

Modellierung	
Prüfstandsgeometrie	vgl. Bild 64, Symmetriebedingung, halbe Prüfstandsbreite
Öffnungsweite $w_{OS}$ / $w_{US}$	15 / 6 mm
Weitere Prüfstandseinstellungen	Nach Tabelle 15 in Anhang 8.8
Bewegung der Baugruppen	Nach kinematischem Schema, Bild 10
Kopplungsart	1-Wege-Kopplung
Turbulenzmodell	k- $\epsilon$
Netzeinstellung	Tetraeder-Elemente
Anzahl Knoten	4.500.000
Geschwindigkeits-Einlass in FS und HK	Mit LDA bestimmtes Strömungsprofil
Stoffparametersatz DEM	Pförtner [5], <b>Kapitel 4.6</b>
Kontaktmodell DEM	Hertz-Mindlin [161]
Stömungsfelder für verschiedene Siebstellungen	4

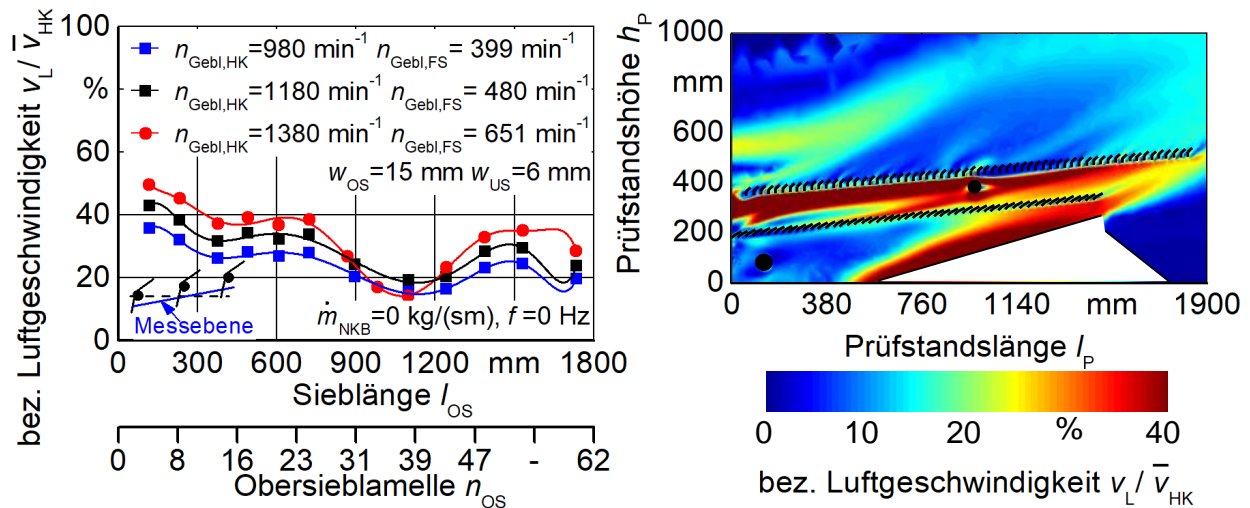
Pförtner [5] modelliert die Prüfstandsgeometrie ohne Körnerrücklaufboden, Bild 64. Des Weiteren wird die Untersieböffnung mit  $w_{US} = 10$  mm simuliert. Als Netzelemente verwendet Pförtner [5] Hexaeder. Statt der Abbildung der transienten Luftstromerzeugung über die Gebläseläufer werden Geschwindigkeitsprofile in den Kanälen für die Fallstufe und den Hauptkanal definiert. Pförtner [5] hat hier konstante Strömungsprofile vorausgesetzt. Zur Berücksichtigung der Siebbewegung auf das Strömungsprofil werden für eine Schwingungsperiode vier Siebstellungen modelliert und zeitabhängig in der DEM-Simulation verwendet.

## 5.6 Ergebnisse

### 5.6.1 DEM-CFD-Simulation

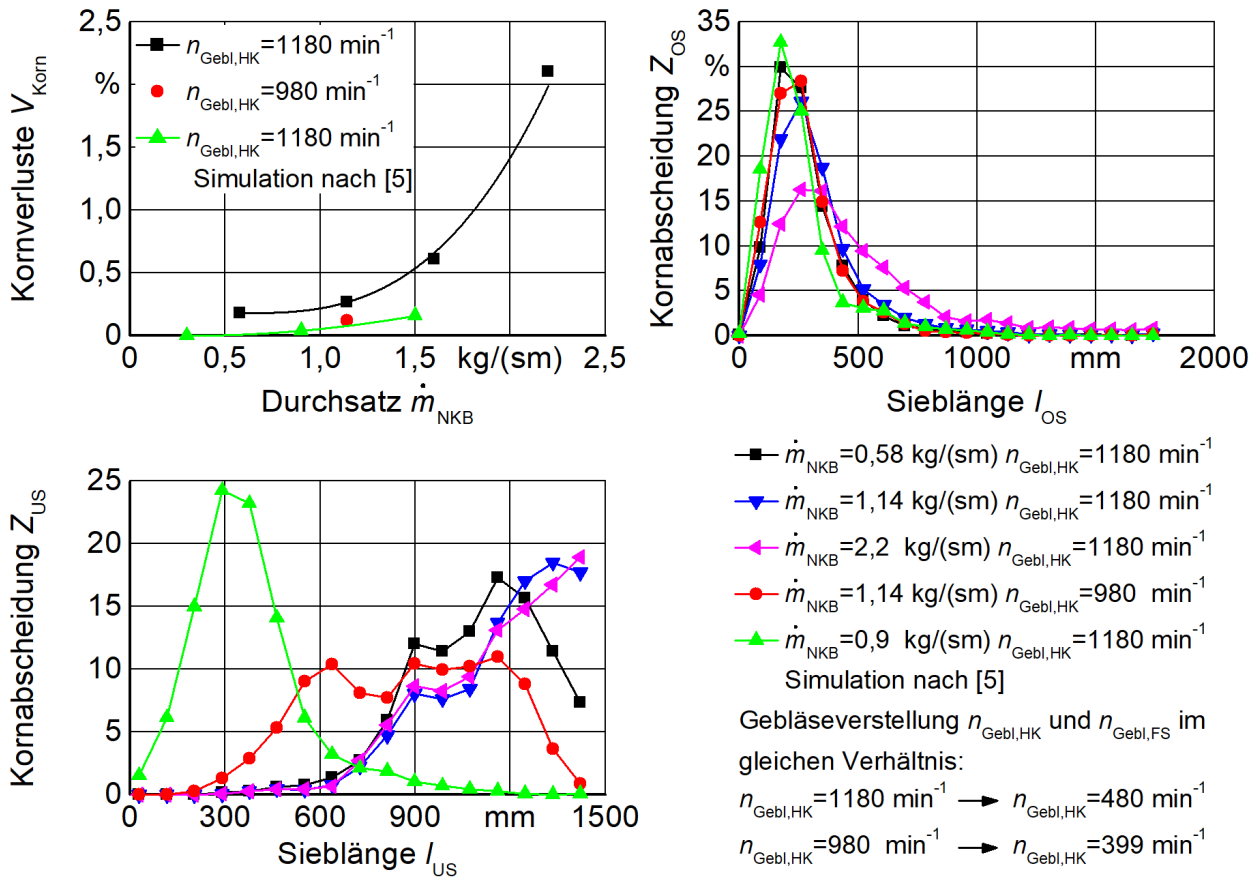
Die simulierte Luftgeschwindigkeit besteht aus den Komponenten in x-, y- und z-Richtung und wird auf die messtechnisch bestimmte, mittlere Luftgeschwindigkeit im Hauptkanal  $\bar{v}_{HK}$  bezogen. Das Strömungsprofil in den Obersieblamellen ist über die Siebbreite gemittelt und zeigt im vorderen Siebbereich einen abfallenden Verlauf, **Bild 71**. Bedingt durch das Querprofil, das bei einer Sieblänge von  $l_{OS} = 958$  mm installiert ist, fällt die Luftgeschwindigkeit in diesem Bereich ab.

Dies ist auch an dem 2D-Strömungsprofil bei einer Siebbreite von  $b_S = 125 \text{ mm}$  erkennbar, Bild 71. Auffällig sind die hohen Luftgeschwindigkeiten zwischen den Sieben und auf dem Körnerrücklaufboden.



**Bild 71:** CFD-Simulation der unbeladenen Mähdrescherreinigungsanlage; Obersiebposition: oberer Totpunkt

Die Kornverluste zeigen über den Durchsatz einen steigenden Verlauf, **Bild 72**. Bei einem Durchsatz von  $\dot{m}_{NKB} = 1,14 \text{ kg/sm}$  und reduzierten Gebläsedrehzahlen ( $n_{Gebel, HK} = 980 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{Gebel, FS} = 399 \text{ min}^{-1}$ ) verringern sich die Kornverluste um  $V_{Korn} = 0,15 \%$ . Die Kornabscheidung  $Z_{OS}$  am Obersieb verschiebt sich mit höheren Durchsätzen zu größeren Sieblängen, Bild 72. Des Weiteren ist der maximal auftretende Wert mit größeren Durchsätzen geringer ausgeprägt. Bedingt durch die hohen Luftgeschwindigkeiten zwischen den Sieben stellt sich ein pneumatischer Förderprozess auf dem Untersieb ein. Dadurch ist die Kornabscheidung  $Z_{US}$  am Untersieb zu größeren Sieblängen verschoben. Bei einem Durchsatz von  $\dot{m}_{NKB} = 1,14 \text{ kg/sm}$  bewirkt die Reduzierung der Gebläsedrehzahlen auf  $n_{Gebel, HK} = 980 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{Gebel, FS} = 399 \text{ min}^{-1}$  eine Verringerung der Luftgeschwindigkeit, Bild 71. Somit ist der Förderprozess kleiner ausgeprägt und die Abscheidung tritt früher ein, Bild 72. Die Simulation mit den Gebläsedrehzahlen von  $n_{Gebel, HK} = 980 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{Gebel, FS} = 399 \text{ min}^{-1}$  sind in den Kornverlusten und der Obersiebabscheidung mit den Simulationen von Pfortner [5] vergleichbar. Die Kornabscheidung am Untersieb tritt bei den Simulationen von Pfortner [5] früher ein. Dies lässt auf Unterschiede in den Strömungssimulationen schließen.

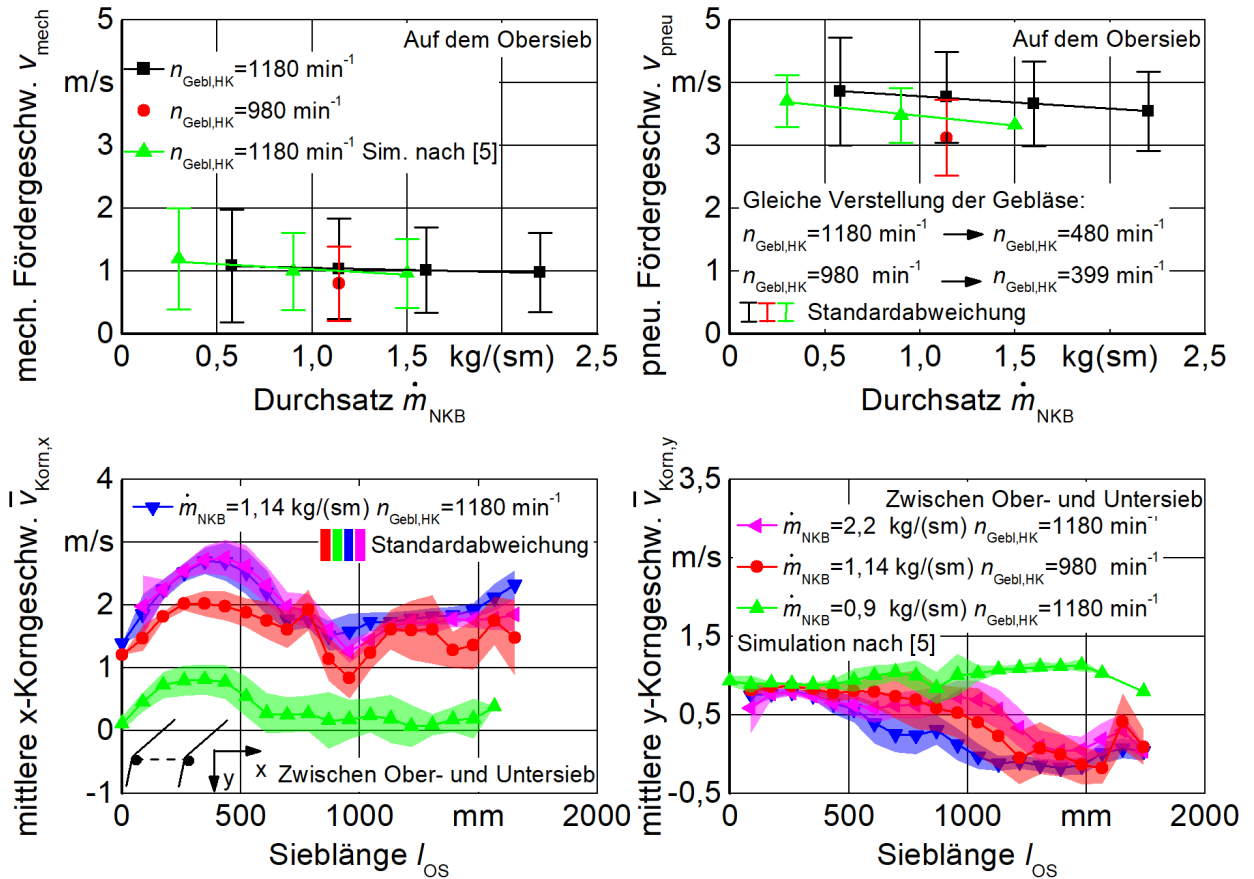


**Bild 72:** DEM-CFD-Simulation des Abscheideverhaltens am Unter- und Obersieb

Der Einfluss der Luftströmung auf die Gutbewegung am Ober- und Untersieb ist anhand der Partikelgeschwindigkeiten in der Simulation ersichtlich. Die Bestandteile, die durch die oszillierende Bewegung der Siebe mechanisch gefördert werden, zeigen keine Abhängigkeit zur Luftgeschwindigkeit, **Bild 73**. Die mechanische Fördergeschwindigkeit  $v_{\text{mech}}$  sinkt mit steigendem Durchsatz. Die Abhängigkeit ist linear. Ein Anteil des Reinigungsgemisches wird pneumatisch über das Obersieb gefördert. Höhere Luftgeschwindigkeiten bewirken höhere pneumatische Fördergeschwindigkeiten  $v_{\text{pneu}}$ . Die pneumatische Fördergeschwindigkeit zeigt eine antiproportionale Abhängigkeit zum Durchsatz. Diese ist deutlicher ausgeprägt als bei der mechanischen Wurf Förderung.

Anhand der mittleren x- und y-Komponente der Korngeschwindigkeit wird der pneumatische Förderprozess auf dem Untersieb bestätigt. Die mittlere x-Korngeschwindigkeit  $\bar{v}_{\text{Korn,x}}$  ist in Förderrichtung positiv definiert. Höhere Gebläsedrehzahlen bewirken höhere Werte über der Sieblänge, Bild 73. Der Abfall bei der Sieblänge  $l_{\text{OS}} = 958 \text{ mm}$  ist mit dem Querprofil unter dem Obersieb begründet. Die mittlere x-Korngeschwindigkeit der Simulation von Pfortner [5] ist über die gesamte Sieblänge am geringsten. Dadurch tritt die Abscheidung auf dem Untersieb früher

ein, Bild 72. Eine positive y-Korngeschwindigkeit bedeutet eine Kornbewegung in Entmischungsrichtung. Bedingt durch die Strömungsumlagerung am Querprofil ist die y-Korngeschwindigkeit  $\bar{v}_{\text{Korn},y}$  im hinteren Siebbereich negativ. Die Körner werden an der Abscheidung gehindert und pneumatisch ausgetragen.



**Bild 73:** DEM-CFD-Simulation der Partikelbewegung auf dem Obersieb und zwischen dem Ober- und Untersieb

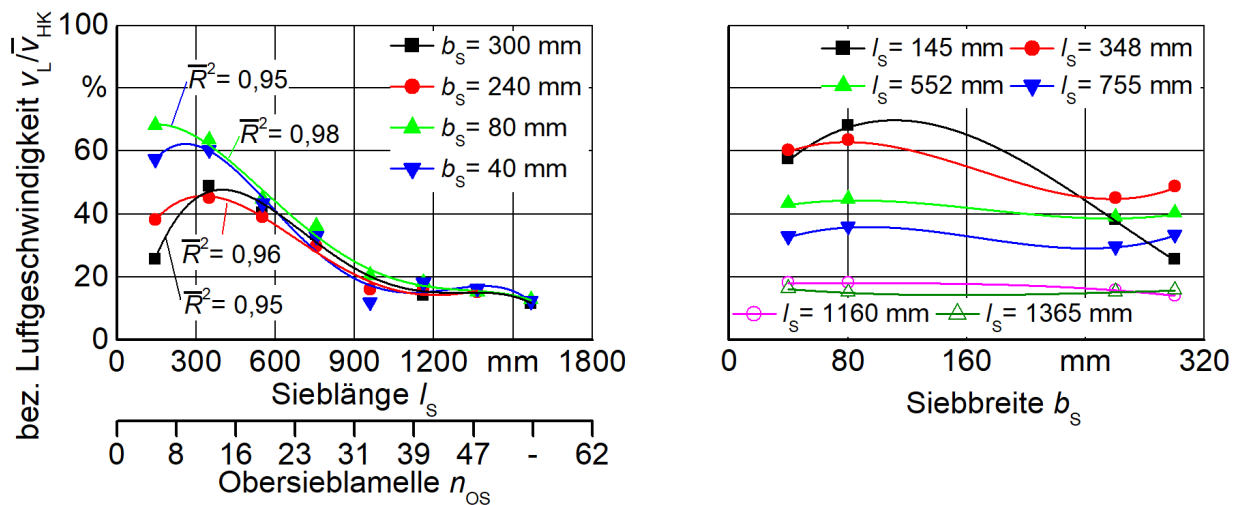
## 5.6.2 Strömungsprofil

### 5.6.2.1 Stationäres Strömungsprofil ohne Siebbewegung

Zur Bewertung der Einflüsse auf das Strömungsprofil der Mähdrescherreinigungsanlage bedarf es einer Untersuchung des stationären Strömungsprofils ohne Siebbewegung ( $f = 0 \text{ Hz}$ ) und ohne Gutbeladung ( $\dot{m}_{\text{NKB}} = 0 \text{ kg/sm}$ ). Der Verlauf der Luftgeschwindigkeit über der Sieblänge ist auf die mittlere Luftgeschwindigkeit im Hauptkanal  $\bar{v}_{\text{HK}}$  bezogen und mit einem Polynom vierten Grades angenähert. Es bestätigt sich der abfallende Verlauf bei einer unbeladenen Reinigungsanlage, der von Freye [15] beschrieben wird, **Bild 74**. Die Varianz in der Breitenverteilung bis zu einer Sieblänge von  $l_{\text{S}} = 348 \text{ mm}$  ist durch die turbulenten Eigenschaften der Luftströmung bedingt, die von den Gebläsen kommt. Die Interpolation über die Siebbreite erfolgt mit einem

Polynom dritten Grades, Bild 74. Im weiteren Siebverlauf ist eine Angleichung zu beobachten. Dies bestätigt die Einschätzung der turbulenten Strömung durch die Gebläseläufer von Persson [74]. Die Siebbreite ist trotz des turbulenten Charakters der Strömung im vorderen Siebbereich entsprechend der statistischen Auswertung nicht signifikant, weshalb im weiteren Verlauf das Strömungsprofil entlang der Sieblänge bei der Siebbreite  $b_s = 80$  mm diskutiert wird.

Ein Vergleich der mit dem LDA-Verfahren aufgenommenen 2D-Strömungsprofile für die z-Ebenen  $z_{M1} = 104$  mm und  $z_{M2} = 125$  mm zeigt auch bei Siebbewegung und Beladung keine Differenzen, was die Auswertung in Abhängigkeit der Sieblänge bekräftigt.

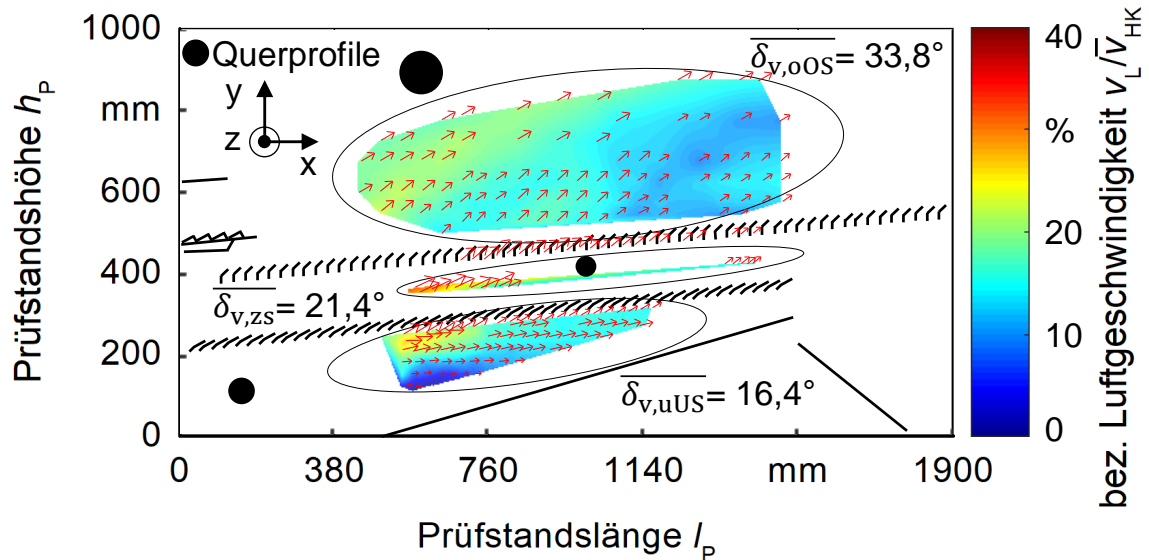


**Bild 74:** Einfluss der Breiten- und Längenverteilung auf das stationäre Strömungsprofil;  $f = 0$  Hz,  $\dot{m}_{NKB} = 0$  kg/sm,  $n_{Gebel, HK} = 1180$  min $^{-1}$ ,  $n_{Gebel, FS} = 480$  min $^{-1}$

Das mit dem LDA-Verfahren ermittelte 2D-Strömungsprofil bestätigt die abfallende Luftgeschwindigkeit über der Sieblänge, **Bild 75**. Für die Bereiche unter Untersieb, zwischen Ober- und Untersieb und über Obersieb separat durchgeführten Sibson-Interpolationen [185] zeigen höhere Luftgeschwindigkeiten im vorderen Siebbereich. Der Unterschied liegt in der Größenordnung von  $v_L/v_{HK} = 10$  %.

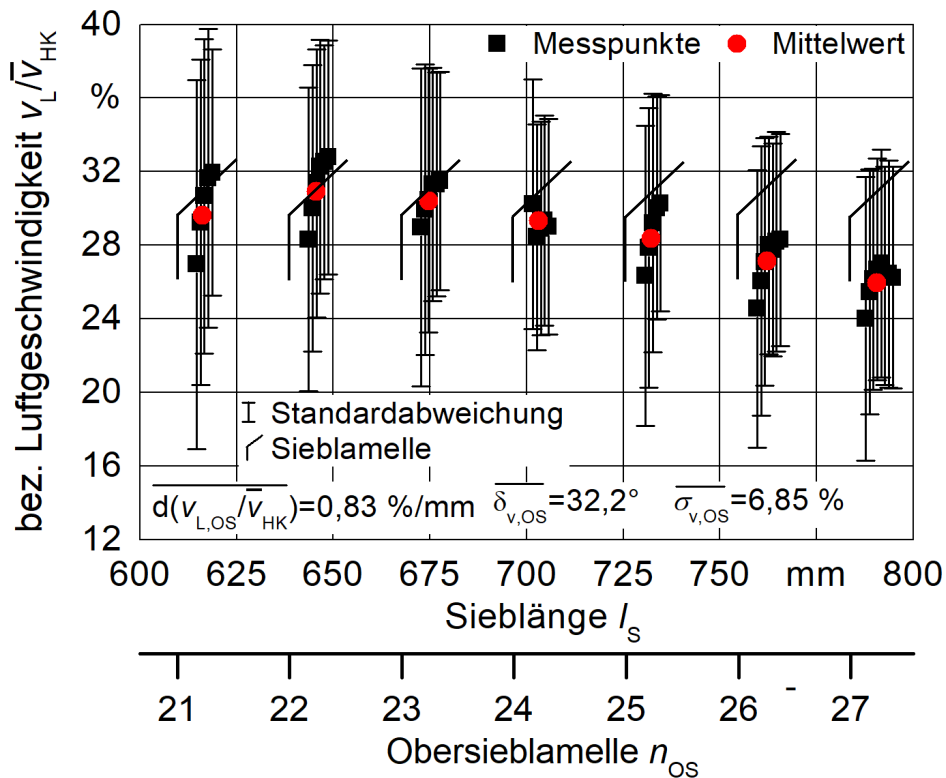
Der Strömungsrichtungswinkel  $\bar{\delta}_v$  ist über die Prüfstandslänge gemittelt und auf die x-Achse bezogen. Die Anströmungen sind mit größerer Prüfstandshöhe  $h_p$  steiler, Bild 75. Der Winkelbereich von  $16,4^\circ \leq \bar{\delta}_v \leq 33,8^\circ$  bedeutet eine um den Faktor 1,5 bis 3,4 größere x-Komponente ( $v_{L,x}/v_{HK} = 1,5 \dots 3,4 \cdot v_{L,y}/v_{HK}$ ).

Durch das Querprofil unter dem Obersieb entsteht ein Windschatten. Dieser zeichnet sich durch eine um  $v_L/v_{HK} = 4$  % geringere Luftgeschwindigkeit aus und ist mit dem LDA abbildbar, Bild 75.



**Bild 75:** 2D-Strömungsprofil der Mährescherreinigung;  $f = 0 \text{ Hz}$ ,  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 0 \text{ kg/sm}$ ,  $n_{\text{GebL,HK}} = 1180 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{\text{GebL,FS}} = 480 \text{ min}^{-1}$

Die Luftgeschwindigkeit und die Strömungsrichtung in den Obersieblamellen zeigen örtlich stark unterschiedliche Werte, was in der turbulenten Strömung begründet ist. LDA-Messungen mehrerer Positionen zwischen benachbarten Sieblamellen zeigen mittlere Geschwindigkeitsänderungen von  $d(v_{L,OS}/\bar{v}_{HK}) = 0,83 \text{ \%/mm}$ , **Bild 76**.



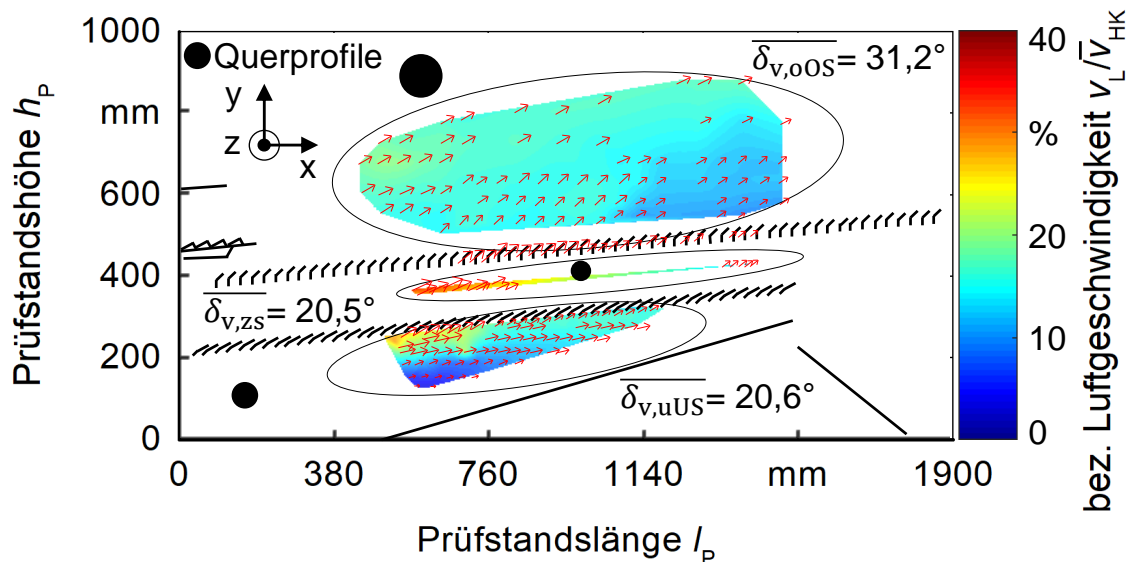
**Bild 76:** Geschwindigkeitsmessung in den Obersieblamellen;  $f = 0 \text{ Hz}$ ,  $\dot{m}_{\text{NKB}} = 0 \text{ kg/sm}$ ,  $n_{\text{GebL,HK}} = 1180 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{\text{GebL,FS}} = 480 \text{ min}^{-1}$

Auch anhand der hohen Werte für die Standardabweichung  $\overline{\sigma_{v,OS}} = 6,85\%$  ist turbulentes Verhalten im Bereich der Sieblamellen ableitbar. Der Abfall der Luftgeschwindigkeit über der Sieblänge ist geringer ausgebildet als bei den Messungen mit den Heißfilmsensoren, Bild 74. Dies liegt zum einen an der begrenzten Anzahl an Heißfilmsensoren entlang des Obersiebs und der damit verbundenen Interpolation zwischen den Messpunkten. Zum anderen sind die Messstellen in der Lamelle zwischen Heißfilmsensor und LDA minimal verschieden. Der Strömungsrichtungswinkel ist über den Siebbereich von  $l_S = 600\text{--}800\text{ mm}$  gemittelt und beträgt  $\overline{\delta_{v,OS}} = 32,2^\circ$ , Bild 76.

### 5.6.2.2 Einfluss der Siebbewegung und -frequenz

Die Bewegung der Siebe mit der Siebfrequenz von  $f = 4,8\text{ Hz}$  hat keinen Einfluss auf die Längen- und Breitenverteilung im Obersieb, **Bild 102** in **Anhang 8.11**. Die Werte und Verläufe sind mit den Messungen ohne Siebbewegung vergleichbar.

Für die Luftgeschwindigkeitsverteilung über dem Obersieb zeigt sich eine Vergleichmäßigung über der Prüfstandslänge, **Bild 77**. Die Ausbildung des Windschattens ist weiterhin ersichtlich. Die Luftgeschwindigkeitsverteilungen zwischen dem Unter- und Obersieb sowie unter dem Untersieb sind unverändert.

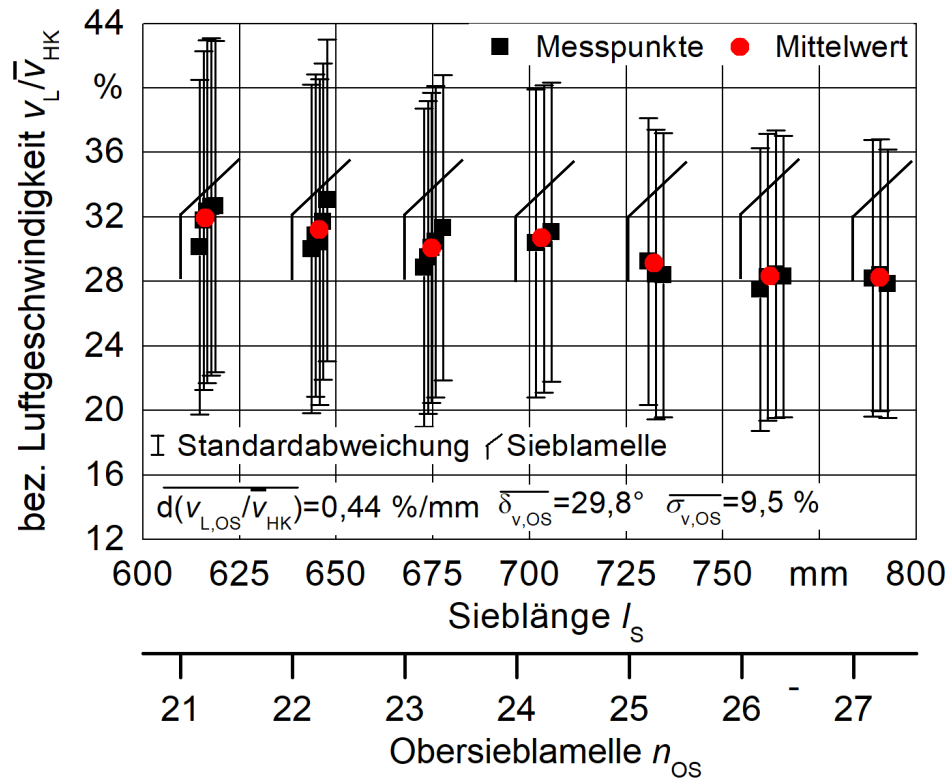


**Bild 77:** Einfluss der Siebbewegung auf das 2D-Strömungsprofil;  $f = 4,8\text{ Hz}$ ,  $\dot{m}_{NKB} = 0\text{ kg/sm}$ ,  $n_{Gekl, HK} = 1180\text{ min}^{-1}$ ,  $n_{Gekl, FS} = 480\text{ min}^{-1}$

Eine periodische Änderung der örtlichen Luftgeschwindigkeit oder der Strömungsrichtung aufgrund der oszillierenden Siebbewegung ist nicht erkennbar. Dies ist in der turbulenten Strömung und den hohen Luftgeschwindigkeiten begründet.

Eine größere Standardabweichung von  $\overline{\sigma_{v,OS}} = 9,5\%$  bestätigt den höheren Turbulenzgrad

zwischen den Sieblamellen bei bewegtem Sieb, **Bild 78**. Die lokale Geschwindigkeitsänderung beträgt  $d(v_{L,OS}/\bar{v}_{HK}) = 0,44 \%/mm$ . Die Unterschiede der bezogenen Luftgeschwindigkeit und des Strömungsrichtungswinkels zu den Werten ohne Siebbewegung liegen im Bereich der stochastischen Ungenauigkeit.



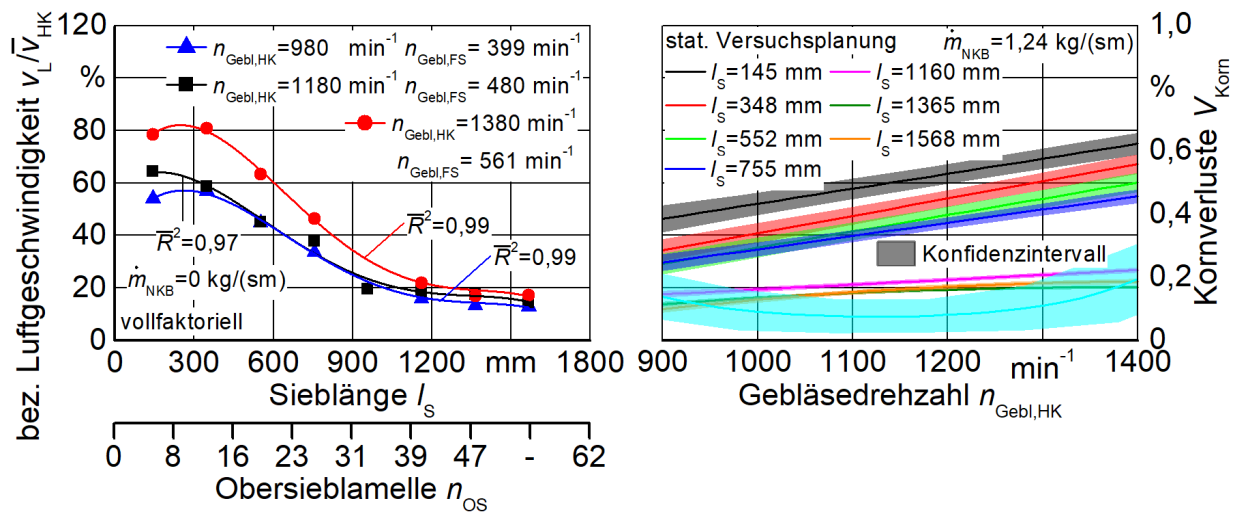
**Bild 78:** Geschwindigkeitsmessung in den Obersieblamellen;  $f = 4,8 \text{ Hz}$ ,  $\dot{m}_{NKB} = 0 \text{ kg/sm}$ ,  
 $n_{Gebel, HK} = 1180 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{Gebel, FS} = 480 \text{ min}^{-1}$

Heißfilmaufnahmen bei veränderten Siebfrequenzen im Bereich von  $f = 4,1\text{--}5,4 \text{ Hz}$  zeigen keinen Einfluss auf die mittlere Luftgeschwindigkeit im Obersieb. Dies stützt die Ergebnisse der LDA-Messungen.

### 5.6.2.3 Einfluss des Luftdurchsatzes

Eine Veränderung der Gebläsedrehzahlen der 1. Fallstufe  $n_{Gebel, FS}$  und des Hauptkanals mit der 2. Fallstufe  $n_{Gebel, HK}$  erfolgt in Anlehnung an die serienmäßige Reinigungsanlage mit einem Gebläseläufer im gleichen Verhältnis. Eine Steigerung des Luftdurchsatzes wird mit der Heißfilm-Anemometrie untersucht und bewirkt eine Erhöhung der bezogenen Luftgeschwindigkeit  $v_L/\bar{v}_{HK}$  zwischen den Obersieblamellen, **Bild 79**. Bei Steigerung der Gebläsedrehzahlen von  $n_{Gebel, HK} = 1180 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{Gebel, FS} = 480 \text{ min}^{-1}$  auf  $n_{Gebel, HK} = 1380 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{Gebel, FS} = 561 \text{ min}^{-1}$  beträgt die Erhöhung der bez. Luftgeschwindigkeit im vorderen Siebbereich bis  $l_S = 755 \text{ mm}$  im Mittel  $v_L/\bar{v}_{HK} = 15,85 \%$ . Im hinteren Siebbereich findet eine asymptotische Annäherung statt.

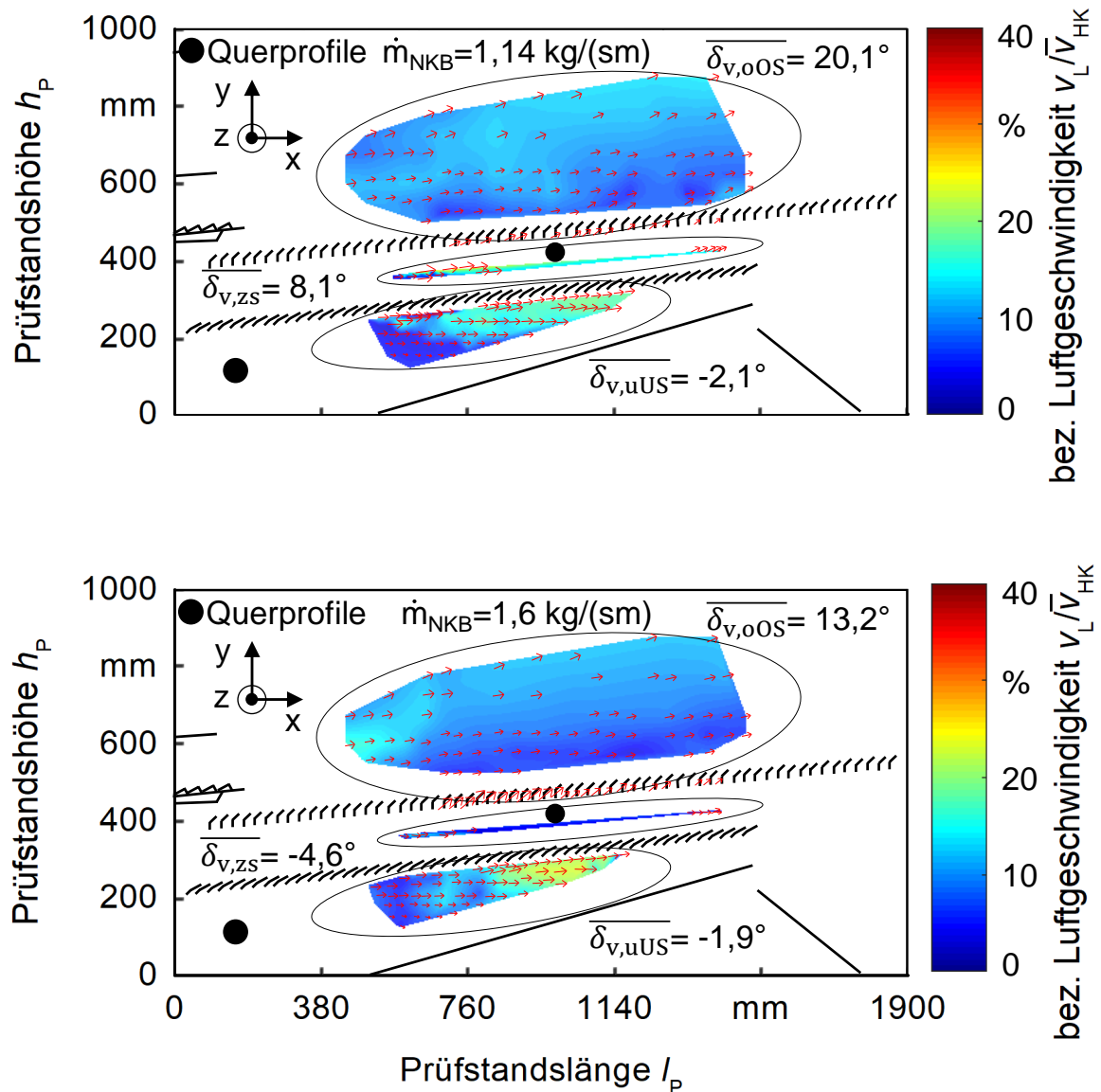
Dieses Verhalten ist ebenfalls bei dem Verlauf der Luftgeschwindigkeiten über der Gebläsedrehzahl ersichtlich, Bild 79. Der spezifische NKB-Durchsatz beträgt  $\dot{m}_{NKB} = 1,24 \text{ kg/sm}$ . Es zeigt sich eine annähernd lineare Steigerung mit der Gebläsedrehzahl, wobei die Abhängigkeit im Siebbereich bis  $l_s = 755 \text{ mm}$  ausgeprägter ist. Der Windschatten, der durch das unter dem Obersieb angeordnete Querprofil entsteht, verhindert einen Anstieg der Luftgeschwindigkeit wie im vorderen Siebbereich. Die Abhängigkeit der Kornverluste zeigt den von Freye [15] beschriebenen, typischen Verlauf mit einem Minimum bei mittleren Luftdurchsätzen.



**Bild 79:** Einfluss des Luftdurchsatzes auf das Strömungsprofil im Obersieb

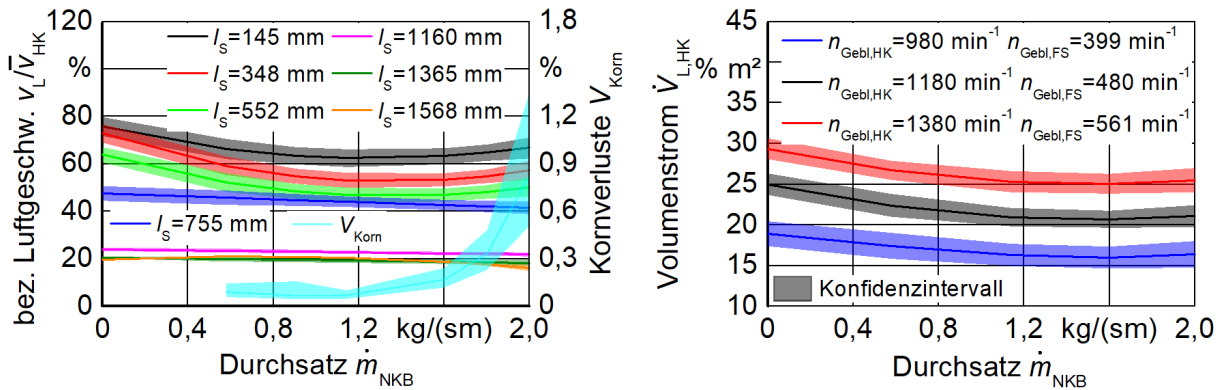
**5.6.2.4 Einfluss des Gutdurchsatzes**

Ein Vergleich der 2D-Strömungsprofile für spezifische NKB-Durchsätze von  $\dot{m}_{NKB} = 1,14 \text{ kg/sm}$  und  $\dot{m}_{NKB} = 1,6 \text{ kg/sm}$  zeigt für alle interpolierten Bereiche geringere Luftgeschwindigkeiten bei höherem Durchsatz, **Bild 80**. Bei einem Durchsatz von  $\dot{m}_{NKB} = 1,6 \text{ kg/sm}$  ist die Luftgeschwindigkeitsverteilung über dem Obersieb ab einer Prüfstandslänge von  $l_p = 740 \text{ mm}$  konstant. Außerdem entstehen turbulente Strömungsstrukturen, die negative Strömungsrichtungswinkel zwischen den Sieben verursachen. Der Abfall der Luftgeschwindigkeit ist im Vergleich zur Luftströmung über dem Obersieb deutlicher ausgeprägt. Die Luftverteilung entlang der Sieblänge ist vergleichmäßigt. Negative Strömungsrichtungswinkel sind unter dem Untersieb bereits bei einem Durchsatz von  $\dot{m}_{NKB} = 1,14 \text{ kg/sm}$  sichtbar. Die Beladung wirkt als zusätzlicher Strömungswiderstand auf dem Ober- und Untersieb und verursacht eine Strömungsumlenkung zu kleineren mittleren Strömungsrichtungswinkeln. Dies bedeutet eine geringere Gutdurchströmung. Dadurch verschieben sich die maximalen Werte der Luftgeschwindigkeit bei höheren Durchsätzen zu größeren Prüfstandslängen.



**Bild 80:** Einfluss des Gutdurchsatzes auf das bezogene 2D-Strömungsprofil;  $f = 4,8 \text{ Hz}$ ,  
 $n_{\text{Geb},HK} = 1180 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{\text{Geb},FS} = 480 \text{ min}^{-1}$

Der Verlauf der Luftgeschwindigkeit in den Lamellen zeigt über den Durchsatz einen abfallenden Verlauf für Durchsätze bis  $\dot{m}_{NKB} = 1,2 \text{ kg/sm}$ , **Bild 81**. Im vorderen Siebbereich bis  $l_S = 552 \text{ mm}$  ist für höhere Durchsätze ab  $\dot{m}_{NKB} = 1,2 \text{ kg/sm}$  ein Anstieg der Luftgeschwindigkeit beobachtbar. Aufgrund der höheren Luftgeschwindigkeiten im vorderen Siebbereich ist hier die Siebbedeckung geringer, **Kapitel 5.6.3.1**. Der geringere Strömungswiderstand bewirkt eine Umlenkung zu den weniger belasteten Bereichen. Die Luftgeschwindigkeit im hinteren Siebbereich zeigt über den gesamten Durchsatzbereich eine Abnahme bei steigendem Durchsatz. Der Einfluss sinkt zunehmender Entfernung vom Gebläse.



**Bild 81:** Durchsatzabhängigkeit der Luftgeschwindigkeit in den Obersieblamellen; stat. Versuchsplanung;  $f = 4,8 \text{ Hz}$ ,  $n_{\text{Gebl,HK}} = 1180 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{\text{Gebl,FS}} = 480 \text{ min}^{-1}$

Die lineare Integration der bezogenen Luftgeschwindigkeit  $v_L/\bar{v}_{\text{HK}}$  über der Sieblänge nach der Trapezregel [186] und die Multiplikation mit der Siebbreite ergibt den Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{L,HK}}$ , der durch das Obersieb strömt, **Gl. 23**. Dieser sinkt analog zur abfallenden Luftgeschwindigkeit mit steigender Gutbeladung, Bild 81. Der Anstieg des Volumenstroms bei großen Durchsätzen lässt sich mit der Steigerung der Luftgeschwindigkeit am Siebanfang begründen. Höhere Gebläsedrehzahlen bewirken größere Volumenströme.

$$\dot{V}_{\text{L,HK}} = \frac{v_L}{\bar{v}_{\text{HK}}} \cdot \int_0^{l_{\text{S,Ende}}} dl_S \cdot b_S \quad (23)$$

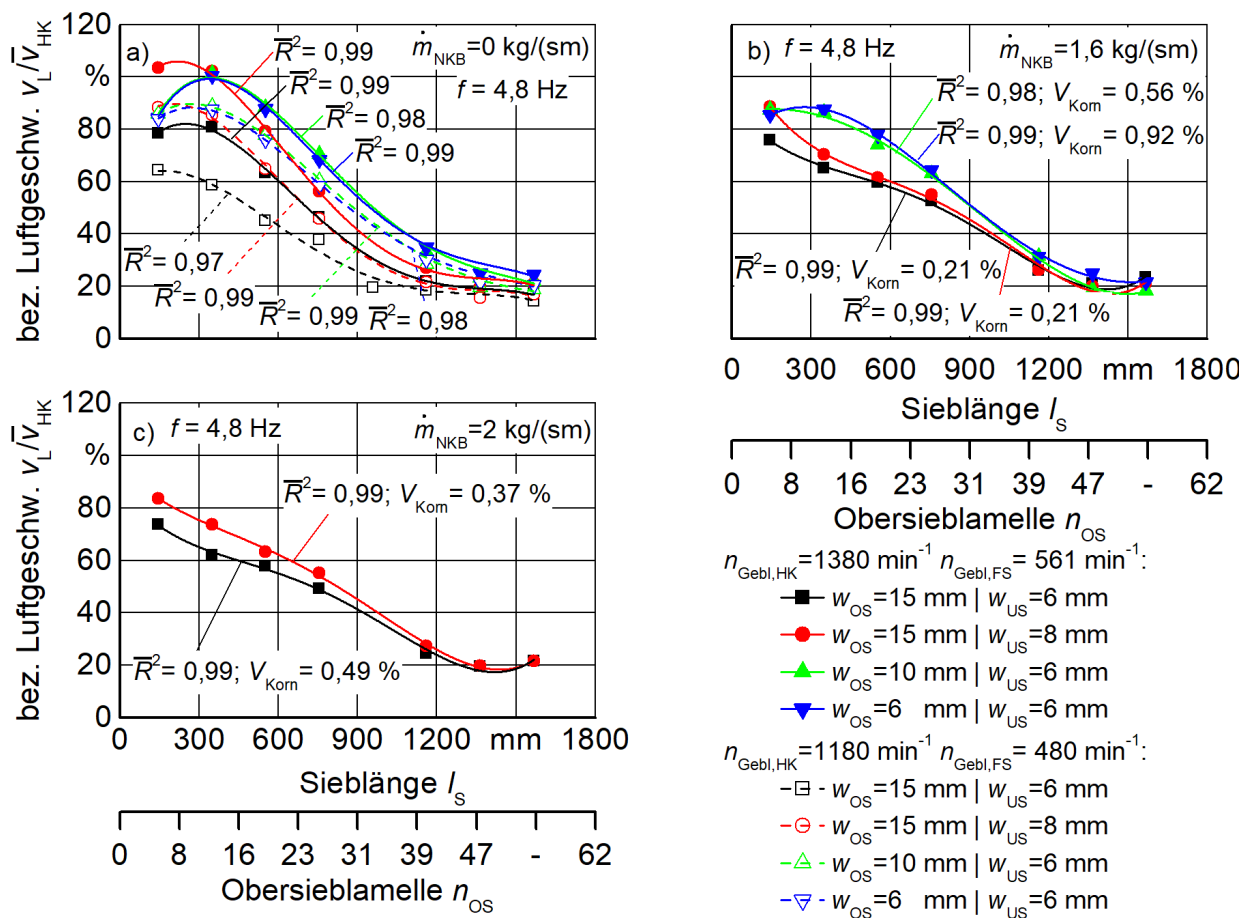
Die Verringerung der Luftgeschwindigkeit, die Strömungsumlagerung zu unbelasteten Siebbereichen und die flacher verlaufende Strömung mit geringeren Strömungsrichtungswinkeln zeigt die von Freye [15, 88] und Streicher [89] aufgezeigte starke Abhängigkeit zur Gutbeladung. Eine Steigerung der Luftgeschwindigkeit im hinteren Bereich des Obersiebs wird dabei nicht beobachtet. Durch den flacheren Strömungsverlauf ist der Luftdurchsatz am Ende des Obersiebs gering.

### 5.6.2.5 Einfluss der Sieböffnung

Bei Verstellung der Obersieböffnungen  $w_{\text{OS}}$  wird ebenfalls der Anströmwinkel der Heißfilmsensoren  $\varphi_{\text{OS}}$  verstellt, Bild 67. Dadurch ist die Beeinflussung des Strömungsprofils in Abhängigkeit der Lamellenöffnung im Obersieb nicht eindeutig auswertbar. Der Verlauf der Luftgeschwindigkeit ist für eine Obersieböffnung von  $w_{\text{OS}} = 6 \text{ mm}$  und  $w_{\text{OS}} = 10 \text{ mm}$  annähernd gleich und besonders im vorderen Siebbereich auf einem höheren Niveau als bei einer Öffnung von  $w_{\text{OS}} = 15 \text{ mm}$ , **Bild 82 a)-b)**. Die Verkleinerung der strömungswirksamen Querschnittsfläche bewirkt gemäß der Kontinuitätsgleichung [81] eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit in den Lamellen. Dieser Effekt ist im Gegensatz zur Strömungsumlenkung aufgrund des höheren Strömungswiderstandes

deutlicher. Des Weiteren ist eine Unabhängigkeit vom Luftdurchsatz und der Gutbeladung zu beobachten. Die Steigerung der Kornverluste bei kleineren Obersieböffnungen ist einerseits mit der geringeren Wahrscheinlichkeit des Siebdurchgangs und andererseits mit dem höheren pneumatischen Widerstand zu begründen. Die höheren Luftgeschwindigkeiten bei kleineren Sieböffnungen behindern die Abscheidung.

Aufgrund größerer Untersieböffnungen steigt die Luftgeschwindigkeit im vorderen Siebbereich des Obersiebs, was mit dem geringeren Strömungswiderstand begründet ist. Ohne Beladung beträgt die maximale Differenz bei einer Sieblänge von  $l_s = 145 \text{ mm}$   $v_L/\bar{v}_{HK} \approx 25 \%$ . Es ist eine Unabhängigkeit vom Luftdurchsatz zu beobachten, Bild 82 a). Der zusätzliche Strömungswiderstand auf den Sieben bei Beladung bewirkt eine geringere Abhängigkeit und eine Angleichung auf  $v_L/\bar{v}_{HK} \approx 10 \%$  im vorderen Siebbereich, Bild 82 a)-c). Bei einem Durchsatz von  $\dot{m}_{NKB} = 2 \text{ kg/sm}$  beträgt die Differenz der Kornverluste  $v_{Korn} = 0,12 \%$ . Kleinere Sieböffnungen weisen dabei höhere Kornverluste auf.



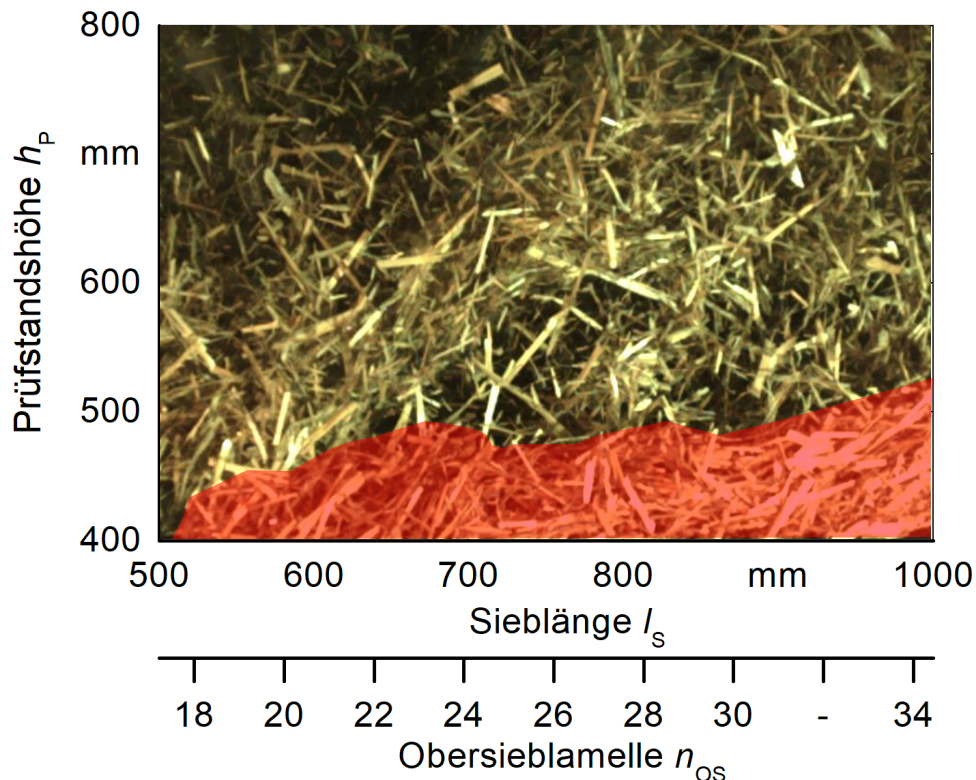
**Bild 82:** Einfluss der Sieböffnung auf das Strömungsprofil im Obersieb

### 5.6.3 Partikelbewegung

Das Strömungsprofil beeinflusst das Bewegungsverhalten von Korn und Stroh in der Reinigungsanlage, **Kapitel 5.6.2**. Dies wird durch die wechselseitige Abhängigkeit zwischen der Ausbildung der Luftströmung und den Bewertungsgrößen wie den Kornverlusten deutlich.

#### 5.6.3.1 Ausbildung der Gutschicht auf dem Obersieb

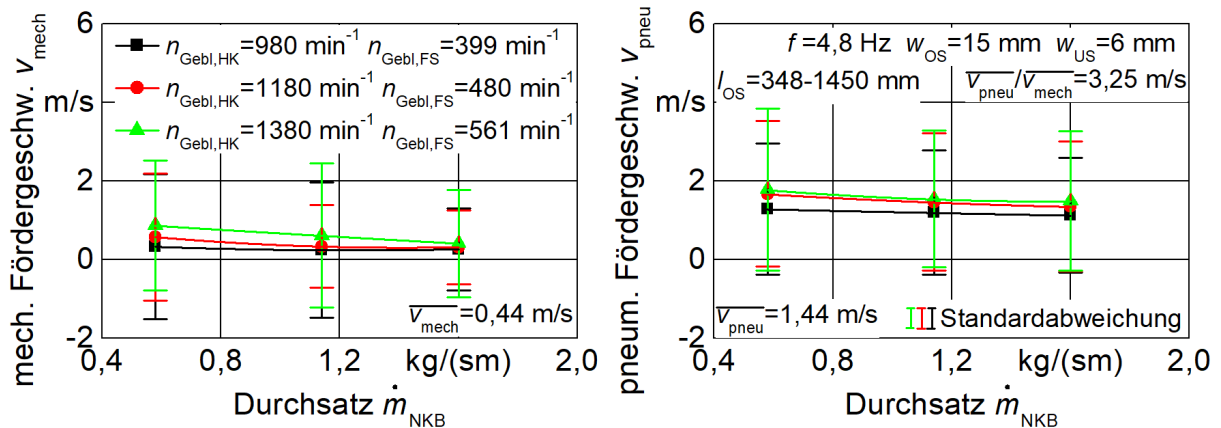
Ein Anteil des Reinigungsgutes auf dem Obersieb wird pneumatisch, ein Anteil mechanisch durch die oszillierende Bewegung der Siebe wurfweise gefördert. Dabei tritt ein stochastischer Austausch zwischen den Förderarten über der Sieblänge auf. Der mechanisch geförderte Anteil ist für einen beispielhaften Versuch in **Bild 83** rot hinterlegt. Dieser definiert die Schichthöhe auf dem Sieb und ist durch das Bewegungsverhalten klar von den Bestandteilen unterscheidbar, die eine pneumatische Förderung erfahren. Der Anteil der pneumatisch geförderten Bestandteile resultiert aus den hohen Luftgeschwindigkeiten, Bild 81. Des Weiteren ist die pneumatische Förderung im vorderen Siebbereich stark durch die hohen Luftgeschwindigkeiten in den Fallstufen beeinflusst.



**Bild 83:** Förderverhalten auf dem Obersieb; rot: Wurf Förderung;  $f = 4,8 \text{ Hz}$ ,  $\dot{m}_{NKB} = 1,14 \text{ kg/sm}$ ,  $n_{Gekl,HK} = 1180 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{Gekl,FS} = 480 \text{ min}^{-1}$ ,  $w_{OS} = 15 \text{ mm}$ ,  $w_{US} = 6 \text{ mm}$

Die pneumatische Fördergeschwindigkeit ist im Mittel um  $v_{pneu}/v_{mech} = 3,25$  höher als die mechanische Wurf Förderung, **Bild 84**. Dabei treten bei der mechanischen und bei der pneumatischen

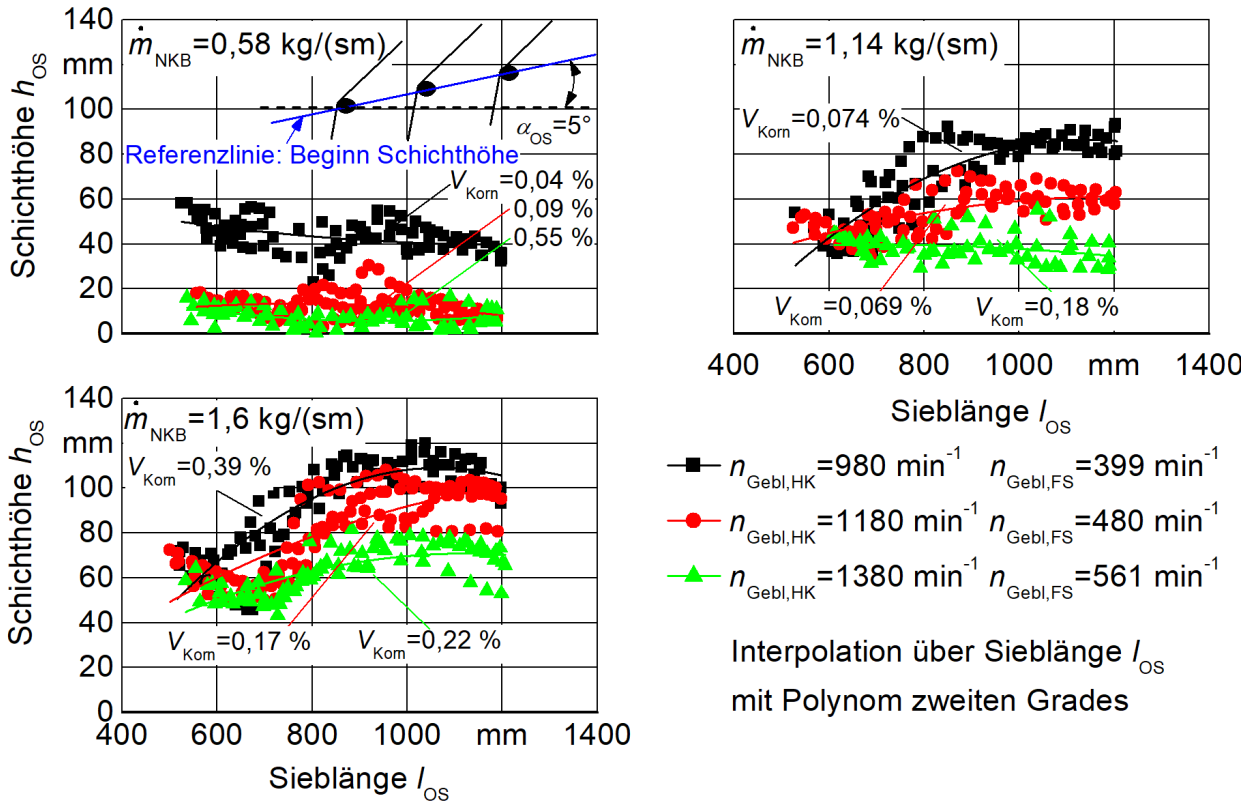
Förderung größere Fördergeschwindigkeiten bei kleineren NKB- und größeren Luftdurchsätzen auf. Bei der mechanischen Förderung lässt der Einfluss auf größere Anteile der Flugphase schließen. Der große Bereich der Standardabweichung resultiert aus Partikelkollisionen. Diese verursachen ein starkes Abbremsen und Umlenken der Partikel mit hohen Geschwindigkeitsgradienten.



**Bild 84:** Fördergeschwindigkeit des Reinigungsgutes auf dem Obersieb

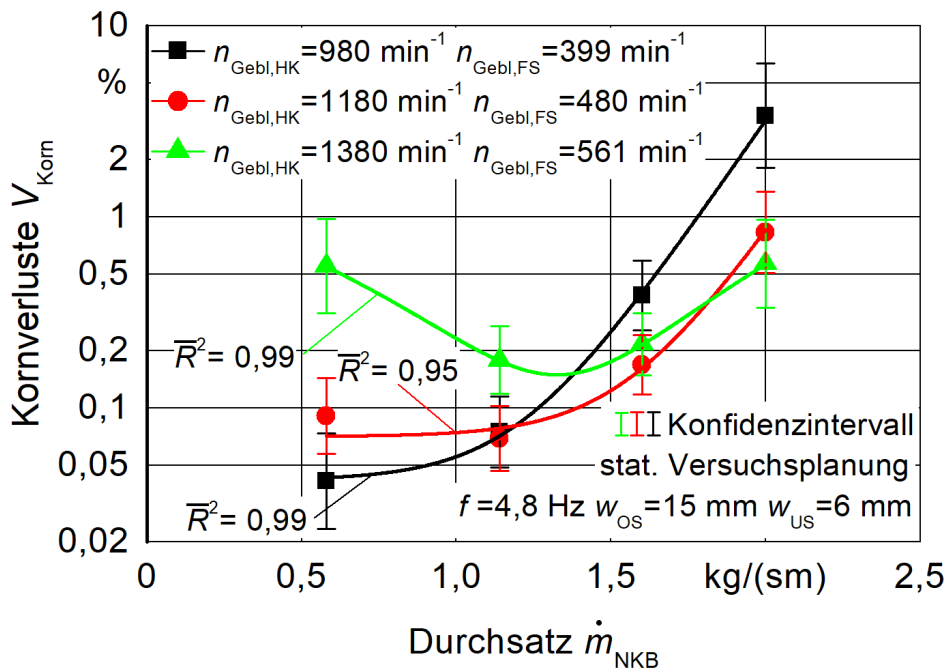
Aufgrund hoher Luftgeschwindigkeiten in den Fallstufen und im vorderen Siebbereich ist die Siebbedeckung bis zu einer Sieblänge von  $l_s \approx 600 \text{ mm}$  gering. Der pneumatische Transport erfolgt durch den abfallenden Verlauf der Luftgeschwindigkeit über der Sieblänge nicht vollständig bis zum Siebende. Schwerere Bestandteile gelangen so auf das Obersieb und werden durch die mechanische Wurf Förderung zum Siebende gefördert. Deshalb steigt bei Durchsätzen von  $\dot{m}_{NKB} = 1,14$  und  $1,6 \text{ kg/sm}$  im Siebbereich  $l_s \approx 600-1100 \text{ mm}$  die Schichthöhe an, **Bild 85**. Bei einem Durchsatz von  $\dot{m}_{NKB} = 0,58 \text{ kg/sm}$  ist lediglich bei Gebläsedrehzahlen von  $n_{\text{GebI, HK}} = 980 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{\text{GebI, FS}} = 399 \text{ min}^{-1}$  eine vollständige Gutschicht auf dem Sieb ausgebildet. Aufgrund der geringen Beladung ist kein deutlicher Anstieg der Schichthöhe ersichtlich. Bei höheren Luftdurchsätzen ist eine Wurf Förderung mit einer nicht zusammenhängenden Gutschicht zu beobachten. Die Schichthöhe ist im Großteil des Siebbereichs  $h_{\text{OS}} \leq 20 \text{ mm}$ .

Höhere Drehzahlen bewirken einen größeren pneumatisch geförderten Anteil und somit geringere Schichthöhen. Die geringere Siebbedeckung im vorderen Siebbereich bewirkt bei größeren Durchsätzen eine Umlenkung der Luft in diesen weniger belasteten Bereich, **Kapitel 5.6.2.4**.



**Bild 85:** Ausbildung der Gutschicht auf dem Obersieb in Abhängigkeit der Gutbeladung und des Luftdurchsatzes;  $f = 4,8 \text{ Hz}$ ,  $w_{OS} = 15 \text{ mm}$ ,  $w_{US} = 6 \text{ mm}$

Die Kornverluste bestätigen die bereits von Freye [15] beschriebene Abhängigkeit zwischen NKB-Durchsatz und Luftgeschwindigkeit, **Bild 86**.



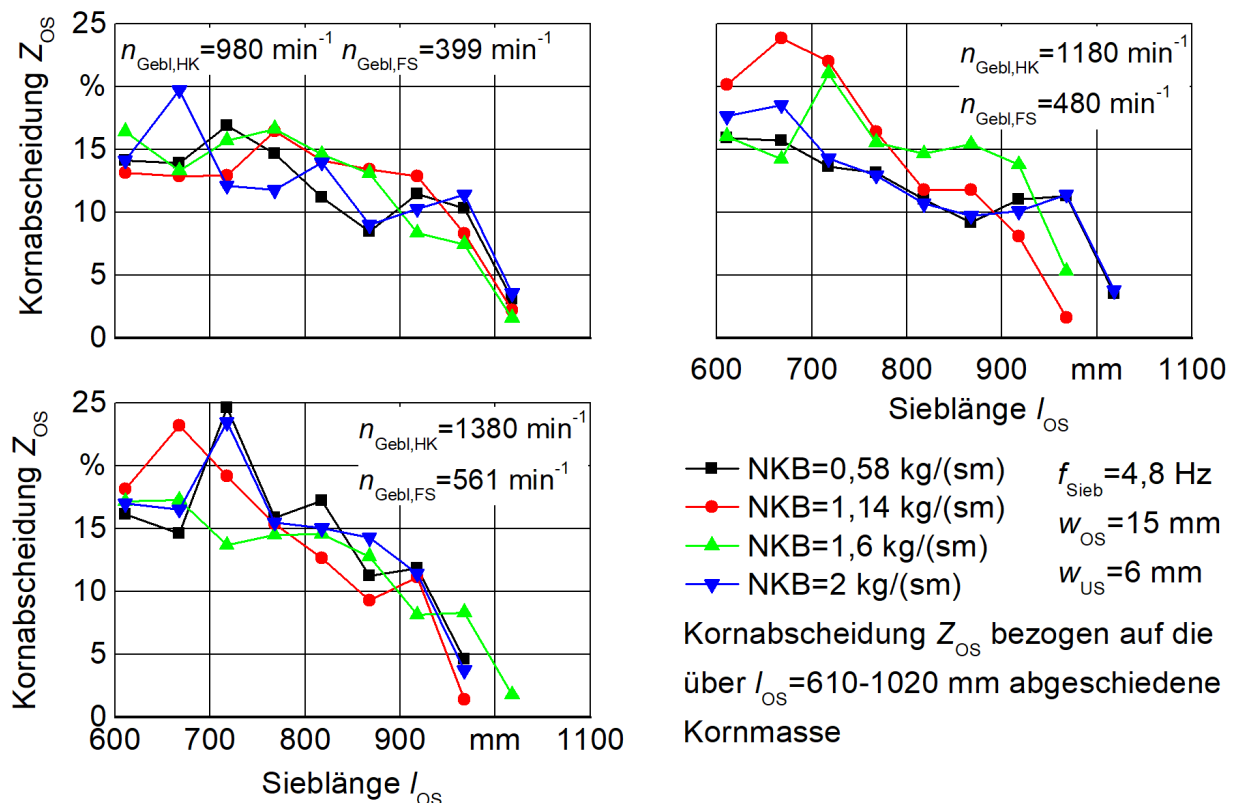
**Bild 86:** Durchsatz-Verlust-Kennlinie in Abhängigkeit vom Luftdurchsatz

Bei konstantem NKB-Durchsatz kann die Schichthöhe durch den Luftdurchsatz beeinflusst werden, Bild 85. Nach Bild 85–86 beträgt die Höhe der ausgebildeten Schicht mit geringen Kornverlusten  $h_{OS} = 40\text{--}100\text{ mm}$ . Bei kleineren Schichthöhen muss die Luftgeschwindigkeit reduziert, bei größeren Schichthöhen erhöht werden.

### 5.6.3.2 Kornabscheidung und -bewegung am Obersieb

In der NKB-Schicht auf dem Obersieb sind über der Sieblänge  $l_{OS} = 610\text{--}1450\text{ mm}$  keine Körner im wandnahen Bereich sichtbar. Deshalb ist die Körneranzahl in der Gutschicht ebenfalls gering, Kapitel 4.5.4. Im Siebbereich  $l_{OS} = 348\text{--}610\text{ mm}$  ist ein Kornmassenstrom ersichtlich, der aus der Fallstufe kommt. Dieses Korn trifft auf das wenig belastete Sieb, Kapitel 5.6.3.1. Dies bestätigt die hohe Trennung in der doppelten Fallstufe und stützt die Aussage der Erhöhung der Reinigungsleistung durch die Fallstufe von Zhao [47]. Eine Quantifizierung ist aufgrund der begrenzten Tiefenauflösung der Hochgeschwindigkeitskamera nicht möglich.

Die Kornabscheidung  $Z_{OS}$  vom Obersieb über der Sieblänge  $l_{OS} = 610\text{--}1020\text{ mm}$  wird auf die Körner bezogen, die über diese Länge abgeschieden werden, **Bild 87**. Der Verlauf zeigt die erwartete Abnahme bei größeren Sieblängen. Dies ist unabhängig von der Gebläsedrehzahl.

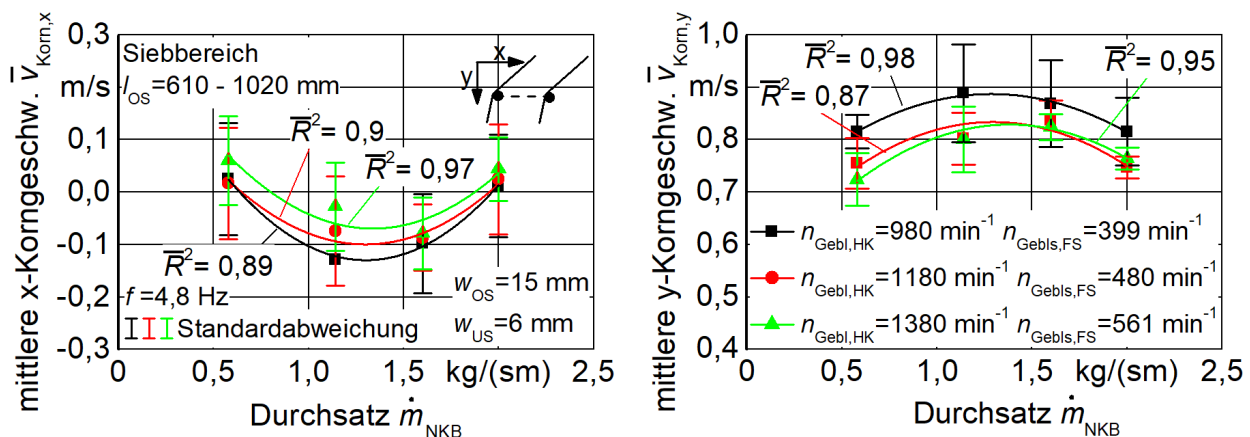


**Bild 87:** Kornabscheidung am Obersieb

Die Abscheidung der Körner erfolgt, wenn die Körner Kontakt zum Sieb haben und ein Größenvergleich mit den Sieböffnungen möglich ist. Bei einer Siebanregung in einem Bereich der Froudezahl von  $1 \leq Fr \leq 3,3$  führt das Reinigungsgut Einfachwürfe aus [59], Kapitel 2.3.2. In diesem Fall erfolgt die Abscheidung, wenn sich das Sieb vom unteren in den oberen Totpunkt bewegt. Bei der Siebbewegung vom oberen zum unteren Totpunkt befindet sich das Reinigungsgut in der Flugphase. Es besteht kein Kontakt zum Sieb, weshalb keine Abscheidung erfolgt. Die Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen bestätigen dieses Verhalten.

Die Bestimmung der Bewegungstrajektorien der Körner beim Durchgang durch das Obersieb erfolgt demnach, wenn sich das Sieb vom unteren in den oberen Totpunkt bewegt. Anhand der Bewegungstrajektorien ist die Bestimmung der mittleren horizontalen x-Korngeschwindigkeit  $\bar{v}_{\text{Korn},x}$  und der vertikalen y-Korngeschwindigkeit  $\bar{v}_{\text{Korn},y}$  möglich. Die Berechnung erfolgt auf Basis von  $N = 1000\text{--}4500$  Körnern, die über 10 Oszillationszyklen aufgenommen wurden. Eine Transformation in das mitbewegte Sieb-Koordinatensystem ermöglicht eine Auswertung relativ zur Siebbewegung.

Bedingt durch die Geometrie der Sieblamellen ist die horizontale x-Korngeschwindigkeit  $\bar{v}_{\text{Korn},x}$  bei Siebdurchgang in einem großen Bereich negativ, **Bild 88**. Die angreifende Strömungskraft wirkt in x-Richtung. Größere Luftdurchsätze bewirken so größere x-Korngeschwindigkeiten der Partikel. Der Einfluss des Durchsatzes ist auf Partikelkollisionen und auf die Änderung des Strömungsprofils in Abhängigkeit der Beladung zurückzuführen.



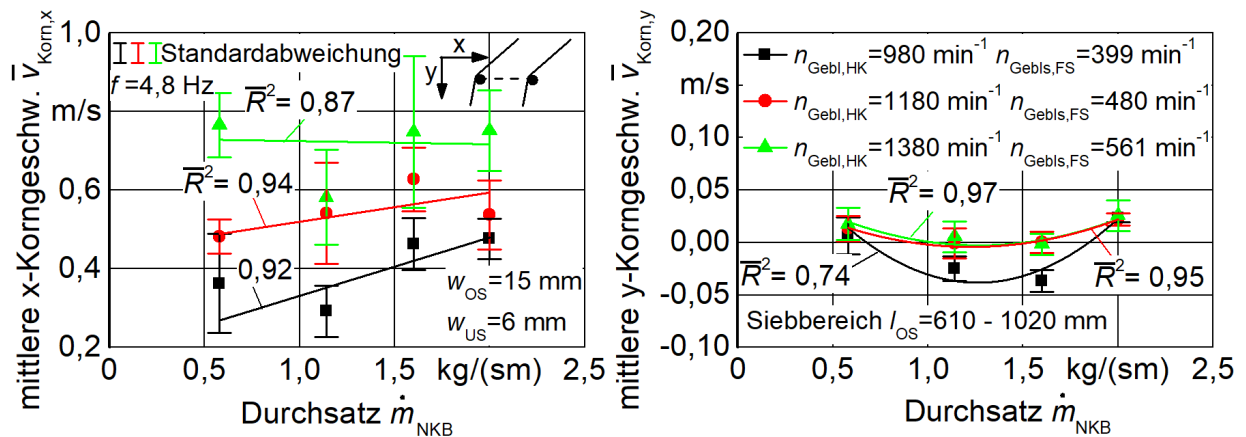
**Bild 88:** Korngeschwindigkeit am Obersieb

Die Abhängigkeit der vertikalen y-Korngeschwindigkeit  $\bar{v}_{\text{Korn},y}$  vom Luftdurchsatz bestätigt die Vermutung, dass der Siebdurchgang durch die Luftströmung behindert wird. Auch bei hohen Luftgeschwindigkeiten ist die Bewegungsrichtung der Körner positiv und somit in Abscheiderichtung

gerichtet. Es zeigt sich eine geringere Abscheidegeschwindigkeit bei kleineren und größeren Durchsätzen, was mit dem typischen Verlauf einer Kornverlust-Durchsatz-Kurve übereinstimmt, Bild 17.

### 5.6.3.3 Kornbewegung zwischen Ober- und Untersieb

Durch die Luftgeschwindigkeit zwischen den Sieben (Bild 77, 80) werden die Körner nach der Obersiebabscheidung horizontal beschleunigt. Durch die größeren Strömungskräfte steigt die x-Korngeschwindigkeit der Partikel mit höherem Luftdurchsatz, **Bild 89**. Aufgrund von Partikelkollisionen ist der Einfluss bei größeren Durchsätzen geringer. Die geringe vertikale y-Korngeschwindigkeit verdeutlicht die große horizontale Komponente der Kornbewegung.



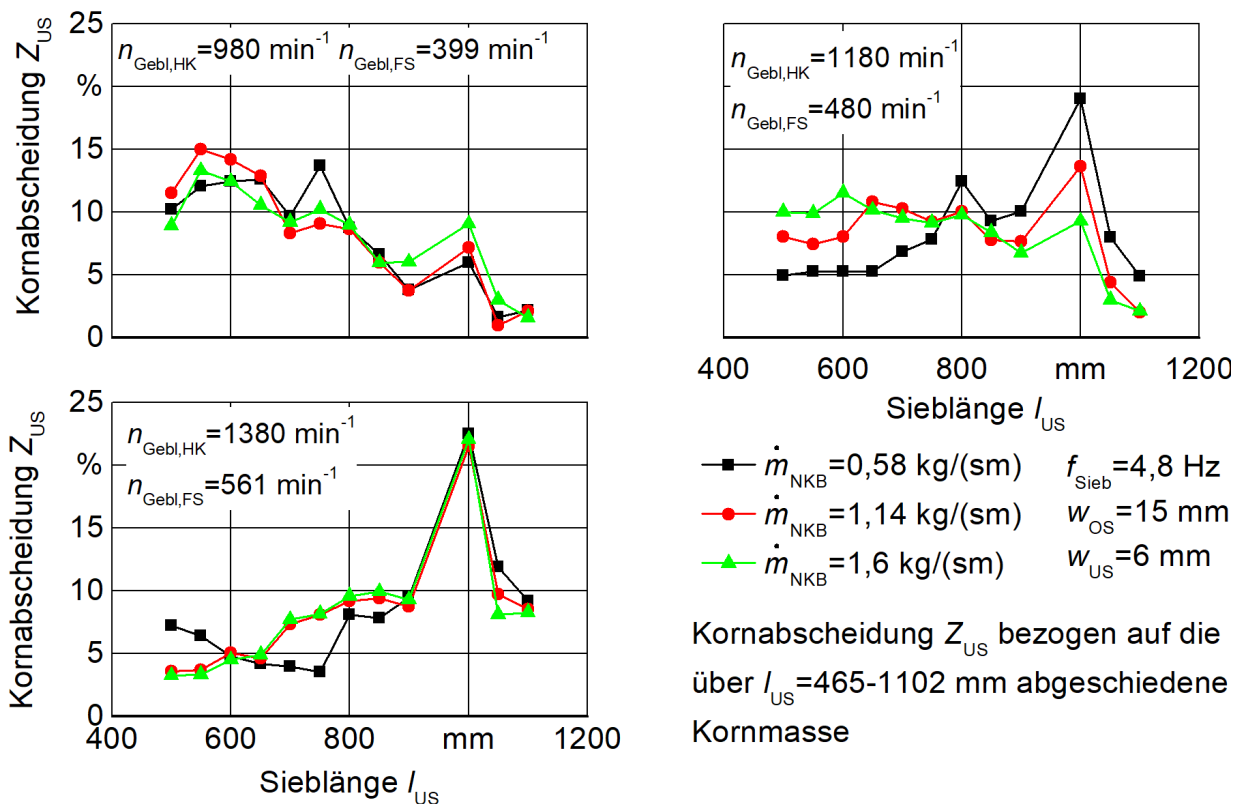
**Bild 89:** Korngeschwindigkeit zwischen Ober- und Untersieb

In Bild 89 sind die Korngeschwindigkeiten über die gesamte Schwingungsperiode der Siebe gemittelt. Die Partikelgeschwindigkeiten sind jedoch abhängig von der Siebbewegung. Die gegensinnige Bewegung von Ober- und Untersieb (Bild 10) vergrößert den Raum zwischen den Sieben, wenn sich das Obersieb vom unteren in den oberen Totpunkt bewegt. Dadurch ist eine ungehinderte Bewegung der Partikel mit x-Korngeschwindigkeiten von  $\bar{v}_{\text{Korn},x} = 0,75\text{--}1,21 \text{ m/s}$  in einem Siebbereich von  $l_{\text{OS}} = 610\text{--}1020 \text{ mm}$  möglich. Diese sind abhängig vom NKB- und Luftdurchsatz, wobei die Abhängigkeiten qualitativ mit denen aus Bild 89 vergleichbar sind. Werte der y-Korngeschwindigkeit liegen im Bereich  $\bar{v}_{\text{Korn},y} = -0,2\text{--}0,1 \text{ m/s}$ .

Bewegen sich die Siebe zueinander, wird die Partikelbewegung durch Kollisionen mit dem Sieb und durch untereinander auftretende Kollisionen behindert. Dadurch sinken die x-Korngeschwindigkeiten auf einen Bereich von  $\bar{v}_{\text{Korn},x} = 0\text{--}0,4 \text{ m/s}$ . Aufgrund der vertikalen Richtung der Partikel, die mit dem Sieb kollidieren, sind die y-Korngeschwindigkeiten nach unten gerichtet und weisen positive Werte von  $\bar{v}_{\text{Korn},y} = 0,25\text{--}0,45 \text{ m/s}$  auf, weshalb eine Entmischung gewährleistet ist.

### 5.6.3.4 Kornabscheidung und -bewegung am Untersieb

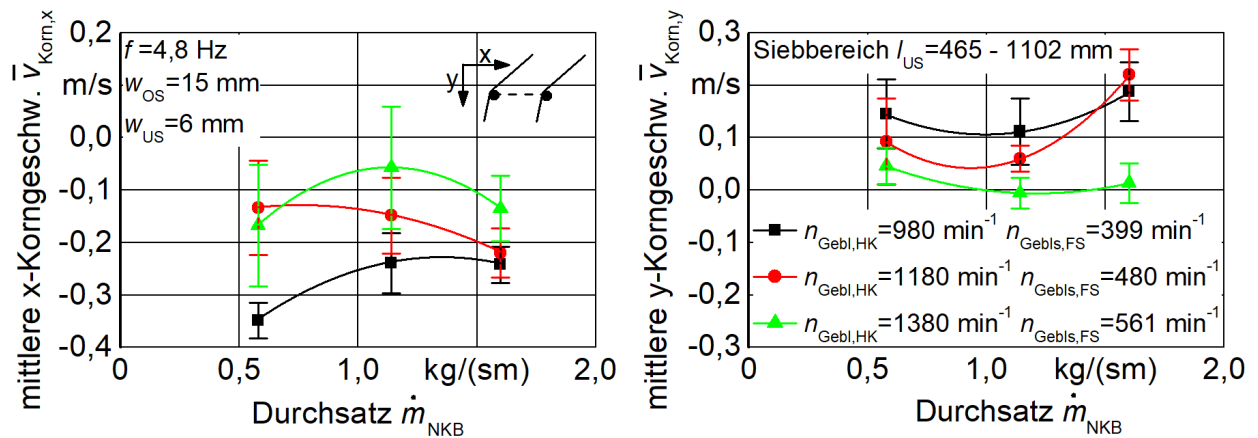
Die Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen zeigen eine Abscheidung, wenn das Untersieb eine Bewegung vom unteren in den oberen Totpunkt ausführt. Diese erfolgt durch die horizontale Bewegung der Partikel zwischen den Sieben bei größeren Sieblängen, **Bild 90**. Es ist ein deutlicher Einfluss des Luftdurchsatzes sichtbar. Eine Erhöhung verschiebt die Abscheidung unabhängig vom NKB-Durchsatz zu größeren Sieblängen. Hohe Luftdurchsätze bewirken große x-Korngeschwindigkeiten zwischen Ober- und Untersieb, Bild 89. Dies steigert die Partikelförderung auf dem Untersieb. Aufgrund der begrenzten Tiefenauflösung der Hochgeschwindigkeitskamera ist es nicht möglich, die Gesamtzahl der abgeschiedenen Körner in dem Untersiebbereich  $l_{US} = 465\text{--}1102\text{ mm}$  zu bestimmen, weshalb die Kornabscheidung  $Z_{US}$  auf die über diese Sieblänge detektierten Körner bezogen wird. Diese Auswertung ist der Auswertung am Obersieb gleich, **Kapitel 5.6.3.2**.



**Bild 90:** Kornabscheidung am Untersieb

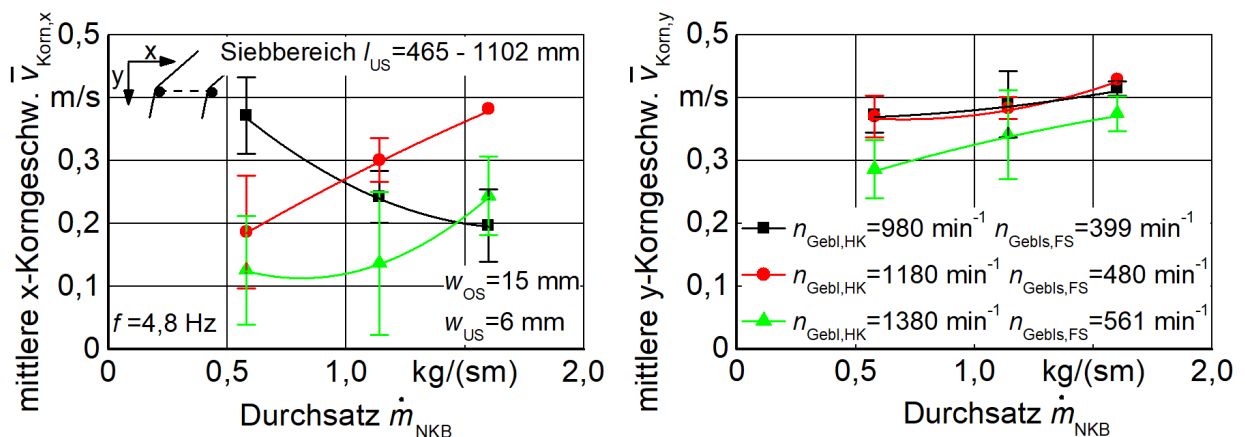
Die mittleren x-Korngeschwindigkeiten  $\bar{v}_{\text{Korn, x}}$  bei der Abscheidung durch das Untersieb sind bedingt durch die Geometrie der Untersieblamellen negativ, **Bild 91**. Die Untersieblamellen haben kleinere Öffnungsweiten als die Obersieblamellen. Dadurch entstehen kleinere x-Korngeschwindigkeiten. Höhere Luftdurchsätze bewirken höhere Strömungskräfte in x-Richtung und somit größere x-Korngeschwindigkeiten und geringere y-Korngeschwindigkeiten. Auch die

kleineren Sieböffnungen erschweren den Siebdurchgang. Aus diesem Grund sind die y-Korngeschwindigkeiten im Vergleich zum Obersieb kleiner.



**Bild 91:** Korngeschwindigkeit am Untersieb

Die vorhandene Luftströmung unter dem Untersieb hat eine Hauptkomponente in x-Richtung und beschleunigt somit die Körner horizontal, Bild 80. Dadurch ist die x-Korngeschwindigkeit positiv, Bild 92. Die unterschiedlichen Verläufe in Abhängigkeit vom Durchsatz sind mit der durchsatzabhängigen Verschiebung der maximalen Luftgeschwindigkeiten zu größeren Sieblängen begründet, Bild 80. Die angreifenden Strömungskräfte verschieben sich entsprechend. Die y-Korngeschwindigkeiten steigen mit größeren NKB- und kleineren Luftdurchsätzen.



**Bild 92:** Korngeschwindigkeit unter dem Untersieb

Bei Bestimmung des Abscheideverlaufes über Kisten, die unter dem Untersieb angeordnet werden, bewirkt die Strömungskraft eine Verschiebung zu größeren Sieblängen.

### 5.6.4 Verifizierung der Partikelbewegung und der Luftströmung

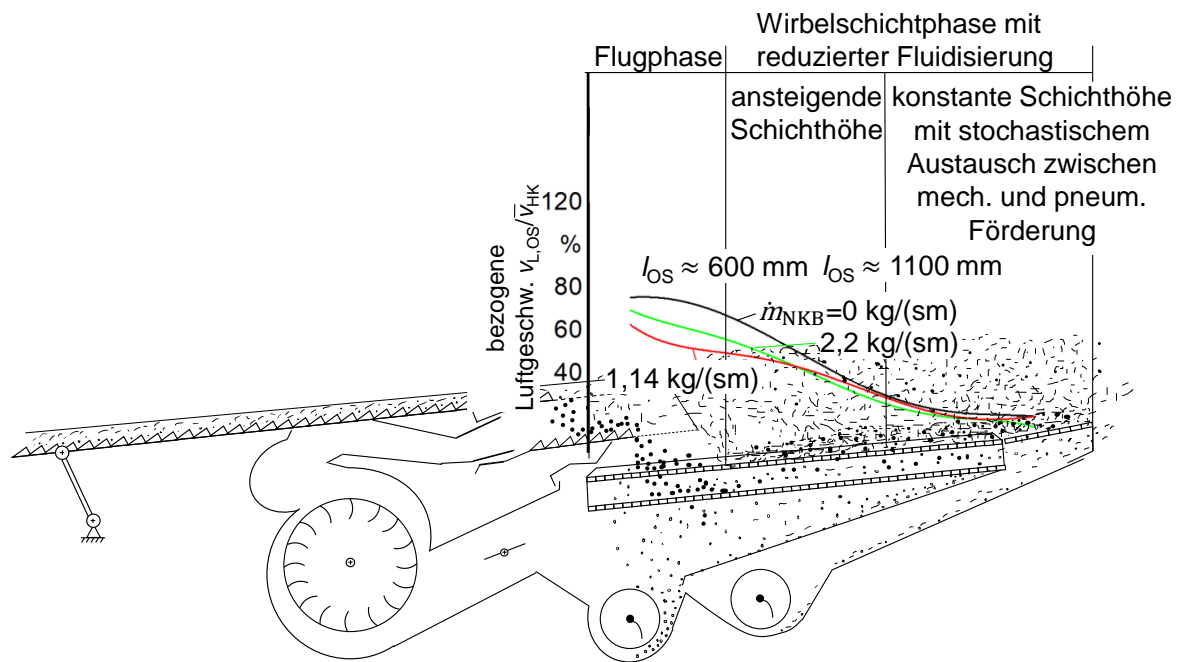
Hohe Luftgeschwindigkeiten bewirken eine geringe Siebeladung im vorderen Bereich des Obersiebs. Zudem stellt sich eine rein pneumatische Förderung von NKB-Bestandteilen mit

einer 3,25-fach höheren Fördergeschwindigkeit ein. Dieses Verhalten bewirkt die von Dahany [16] prognostizierte Flugphase im vorderen Siebbereich. Die Größe dieses Bereiches ist abhängig vom NKB- und Luftdurchsatz und kann bis  $l_{OS} \approx 600$  mm ausgeprägt sein. Ab dieser Sieblänge ist eine ausgebildete NKB-Schicht sichtbar.

Von der Fallstufe werden NKB-Partikel pneumatisch auf das Obersieb gefördert. Dies resultiert in einer Vergrößerung der Schichthöhe bei einer Sieblänge von  $l_{OS} \approx 600$  mm–1100 mm. Aufgrund der hohen Abscheidung in der doppelten Fallstufe ist die Anzahl an Körnern in der Gutschicht auf dem Obersieb gering. Aus diesem Grund ist keine Verringerung der Schichthöhe durch die Abscheidung der Körner ersichtlich. Mögliche Verringerungen ab einer Sieblänge von  $l_{OS} = 1100$  mm sind auf pneumatische Austragungen zurückzuführen. Die Luftgeschwindigkeiten liegen über der Schwebegeschwindigkeit der leichten NKB-Partikel, weshalb diese in einen pneumatischen Förderzustand übergehen können, Bild 31. Das Auftreten und die Dauer dieses Zustandes ist auch von der turbulenten Struktur abhängig und hat deshalb stochastischen Charakter.

Die Luftgeschwindigkeit über der gesamten Obersieblänge liegt auch für hohe Durchsätze über der von mehreren Arbeiten [11, 13, 16] messtechnisch ermittelten Fluidisierungsgeschwindigkeit von  $v_{FI,NKB} = 0,47$ – $1$  m/s, Bild 81. Die Untersuchung der Entmischung mittels Computertomografie für  $v_L = 0$  m/s und  $v_L = 1$  m/s zeigt die Steigerung der Porosität bei steigendem Luftdurchsatz und bestätigt die Fluidisierungsgeschwindigkeit in diesem Wertebereich, Bild 49. Somit kann auch bei großen Schichthöhen von einer Fluidisierung ausgegangen werden. Verhakte NKB-Partikel und die Kanalbildungen in der Gutschicht, die aufgrund der hohen äußeren Reibung entsteht, verhindern jedoch eine vollständige Fluidisierung [16]. Somit verschiebt sich das von Dahany [16] (Bild 18) prognostizierte Auftreten der von Freye [15] beschriebenen Phasen, **Bild 93**.

Die Gutbeladung bewirkt eine Verringerung der vertikalen Komponente der Luftgeschwindigkeit, die Strömung ist flacher. Bei höheren Durchsätzen ist eine Umlenkung zu den weniger belasteten Bereichen am Siebanfang des Obersiebs zu beobachten. Ein Anstieg der Luftgeschwindigkeit im hinteren Siebbereich, wie ihn Freye [15] beschreibt, konnte nicht nachgewiesen werden. Dies liegt an dem Querprofil, welches unter dem Obersieb bei einer Sieblänge von  $l_S = 958$  mm installiert ist. Der Windschatten verhindert eine deutlichere Geschwindigkeitsänderung. Unter dem Untersieb ist durchsatzabhängig eine Verschiebung der Luftgeschwindigkeit zu größeren Sieblängen sichtbar.



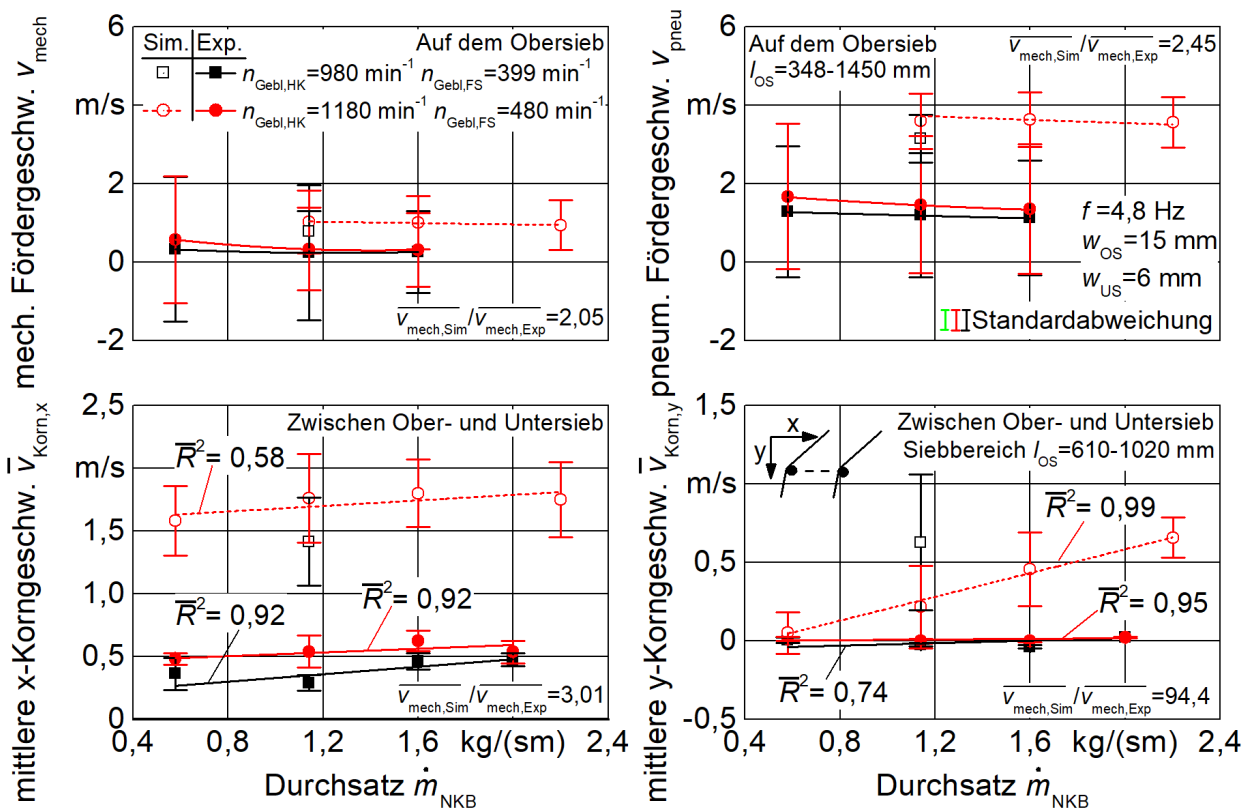
**Bild 93:** Bereiche der Flug- und Wirbelschichtphase auf dem Obersieb

Hohe Luftgeschwindigkeiten zwischen Ober- und Untersieb verursachen zum einen eine Förderung der Gutbestandteile auf dem Untersieb. Aus diesem Grund ist die Abscheidung durch das Untersieb zu größeren Sieblängen verschoben. Zum anderen behindert die Luftgeschwindigkeit die Körner beim Siebdurchtritt. Die Tatsache, dass die horizontale Förderung der Körner im starken Maße von der Luftgeschwindigkeit abhängig ist, begrenzt den maximalen Luftdurchsatz. Die in Kapitel 5.6.2 ermittelten Geschwindigkeiten liegen über dem optimalen Geschwindigkeitsprofil, welches von Zhao [47] bestimmt wurde. Eine weitere Steigerung würde eine Förderung über das Untersieb hinweg bewirken. Eine verbesserte Abscheidung auf dem Obersieb ist durch die bereits vollständig fluidisierte Gutschicht nicht zu erwarten. Die Körneranzahl in der NKB-Schicht auf dem Obersieb ist aufgrund der hohen Trennung in den Fallstufen gering.

Die Reinigungsleistung kann somit durch eine weitere Steigerung des Luftdurchsatzes nicht erhöht werden. Hohe Luftgeschwindigkeiten in den Fallstufen sind zur optimalen Abscheidung notwendig. Die Luftgeschwindigkeit und die Strömungsrichtung müssen der Gutbeladung über der Sieblänge angepasst werden. Dies gewährleistet die größtmögliche Ausnutzung der gesamten Siebfläche. Die Luftgeschwindigkeit zwischen den Sieben ist entsprechend kleiner Fördergeschwindigkeiten zu wählen. Dies bewirkt eine frühere Abscheidung durch das Untersieb und reduziert die Belastung der Überkehr.

### 5.6.5 Verifizierung der DEM-CFD-Simulationen

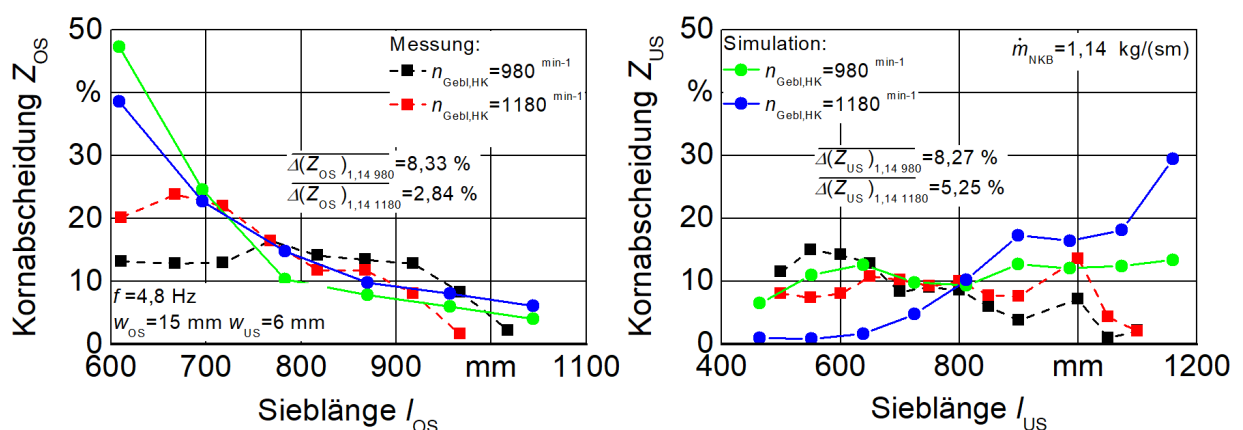
Die Verifizierung der DEM-CFD-Simulation erfolgt auf Basis des Bewegungsverhaltens der Bestandteile auf dem Obersieb und zwischen den Sieben. Die Einflüsse des NKB- und Luftdurchsatzes auf die mechanische  $v_{\text{mech}}$  bzw. pneumatische  $v_{\text{pneu}}$  Fördergeschwindigkeit der Partikel auf dem Obersieb werden in der Simulation richtig abgebildet, **Bild 94**. Jedoch zeigen die Fördergeschwindigkeiten in der Simulation sowohl für die mechanische als auch für die pneumatische Förderung größere Werte. Über den NKB- und Luftdurchsatz gemittelt, liegen diese im Bereich von  $v_{\text{Sim}}/v_{\text{Exp}} = 2,05\text{--}2,45$ . Die Abweichungen sind hauptsächlich auf Unterschiede in der Luftströmung zurückzuführen. Auch bei der mechanischen Förderung hat die Luftgeschwindigkeit Einfluss auf die Fördergeschwindigkeit der Partikel, Kapitel 5.6.3.1. Aufgrund der 1-Wege-Kopplung werden die Verringerung der Luftgeschwindigkeit und die Veränderung des Strömungsprofils (Kapitel 5.6.2.4) in der Simulation nicht abgebildet, Kapitel 2.6.4. Dies führt zu höheren pneumatischen Kräften. Diese sind hauptsächlich in Förderrichtung gerichtet und bewirken höhere Fördergeschwindigkeiten aller Partikel auf dem Obersieb. Da bei der mechanischen Wurfförderung die Luftgeschwindigkeit einen unterstützenden Charakter hat und nicht hauptsächlich für die Förderung verantwortlich ist, ist der Einfluss bei der mechanischen Förderung geringer.



**Bild 94:** Vergleich der Partikelbewegung von Simulation und Experiment

Zwischen dem Ober- und Untersieb ist der Wert der über alle NKB- und Luftdurchsätze gemittelten x-Korngeschwindigkeit  $\bar{v}_{\text{Korn},x}$  in der Simulation größer. Die Einflüsse der Gutbeladung und des Luftdurchsatzes werden qualitativ abgebildet. Die y-Korngeschwindigkeit  $\bar{v}_{\text{Korn},y}$  zeigt in der Simulation eine starke Durchsatzabhängigkeit. Diese ist messtechnisch nicht nachgewiesen. Tendenziell sind die y-Korngeschwindigkeiten der Simulation größer. Die Abweichungen in den Partikelgeschwindigkeiten zwischen dem Ober- und Untersieb sind mit den hohen Luftgeschwindigkeiten zwischen den Sieben in der Simulation begründbar, Bild 71. Die bezogene messtechnisch bestimmte Luftgeschwindigkeit ist  $v_L/\bar{v}_{\text{HK}} = 20\%$  geringer. Die relative Abweichung beträgt  $k \approx 100\%$ .

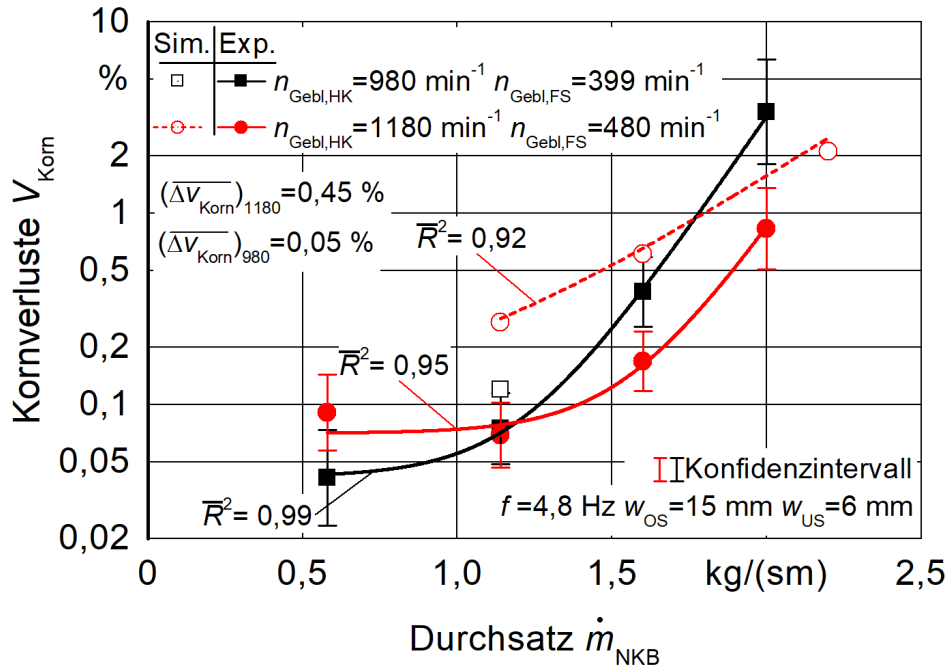
Hohe x-Korngeschwindigkeiten zwischen den Sieben verschieben die Untersiebabscheidung zu größeren Sieblängen. Aus diesem Grund ist die Kornabscheidung  $Z_{\text{US}}$  in der Simulation entsprechend verschoben, **Bild 95**. Teilweise werden die Körner über das Untersieb in die Überkehr gefördert. Bei  $n_{\text{Geb},\text{HK}} = 1180 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{\text{Geb},\text{FS}} = 480 \text{ min}^{-1}$  beträgt die mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung  $\overline{\Delta(Z_{\text{US}})}_{1180} = 5,25\%$ , bei  $n_{\text{Geb},\text{HK}} = 980 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{\text{Geb},\text{FS}} = 399 \text{ min}^{-1}$   $\overline{\Delta(Z_{\text{US}})}_{980} = 8,27\%$ . Die Obersiebabscheidung  $Z_{\text{OS}}$  setzt in der Simulation früher ein. Die maximale Abweichung liegt bei  $\overline{\Delta(Z_{\text{OS}})}_{980} = 8,33\%$ . Die fehlende Fähigkeit des Knickens und Biegens der NKB-Partikel erleichtert die Entmischung und beschleunigt so die Abscheidung, **Kapitel 4.6.2**.



**Bild 95:** Vergleich des Abscheideverhaltens von Simulation und Experiment

Die Unterschiede zwischen Simulation und Messung sind ebenfalls anhand der Kornverluste bewertbar, **Bild 96**. Bei  $n_{\text{Geb},\text{HK}} = 1180 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{\text{Geb},\text{FS}} = 480 \text{ min}^{-1}$  beträgt die mittlere Abweichung  $\overline{\Delta(v_{\text{Korn}})}_{1180} = 0,45\%$ . Bei der reduzierten Gebläsedrehzahl von  $n_{\text{Geb},\text{HK}} = 980 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{\text{Geb},\text{FS}} = 399 \text{ min}^{-1}$  ist eine mittlere Abweichung von  $\overline{\Delta(v_{\text{Korn}})}_{980} = 0,05\%$  zu beobachten. Die höheren Kornverluste in der Simulation resultieren aus den hohen Fördergeschwindigkeiten auf

dem Obersieb sowie zwischen den Sieben und den damit verbundenen Verschiebungen der Abschneidekennlinien. Die Zeit zur Entmischung ist zu gering. Dieser Effekt ist stärker als der Effekt der schnelleren Entmischung, welcher durch die fehlende Fähigkeit des Knickens- und Biegens der NKB-Partikel hervorgerufen wird.



**Bild 96:** Vergleich der Kornverluste von Simulation und Experiment

Die Verifizierung der DEM-CFD-Simulation anhand der Partikelgeschwindigkeiten erhöht das Prozessverständnis. Es können Optimierungen gezielter ermittelt werden. Eine zwingende Notwendigkeit ist die Optimierung der CFD-Simulation besonders zwischen den Sieblamellen. Die Luftströmung weist hier einen turbulenten Charakter auf. Die Verbesserung der Simulation kann zum einen durch eine höhere Netzqualität und zum anderen durch angepasste Turbulenzmodelle erreicht werden. Die Beladung beeinflusst die Luftströmung. Die Implementierung der Kraftwirkung der Partikel auf die Strömung in der Simulation ist aus messtechnischer Sicht sinnvoll, Kapitel 5.6.2.4. Für geringe Rechenzeiten ist die 1,5-Wege-Kopplung anzustreben. Dabei muss geprüft werden, in welchem Zeitabstand eine Neuberechnung des Strömungsfeldes notwendig ist. Die Abscheidung der Körner in der Simulation tritt im Vergleich zur Messung verfrüht ein, Kapitel 4.6.2. Aus diesem Grund ist eine Überarbeitung des Stoffparametersatzes sinnvoll. Eine Modellierung von geknickten Strohpartikeln erschwert die Entmischung und steigert die Qualität der Simulation. Des Weiteren sollten zusätzliche Einflussparameter, wie die Gutfeuchte in den Stoffparametersatz integriert werden.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Identifikation von Entwicklungspotential zur Verbesserung der Entmischung und Abscheidung in der Mährescherreinigungsanlage bedarf das detaillierte Verständnis über die ablaufenden Teilprozesse und deren Zusammenwirken zum Gesamtprozess. Ziel dieser Arbeit ist, dieses Verständnis herauszustellen. Dazu erfolgt eine messtechnische Untersuchung nach dem White-Box-Modell. Dies ermöglicht die direkte Analyse der beteiligten Teilprozesse und nicht die Beschreibung der Einflussgrößen anhand von festgelegten Bewertungsgrößen. Neben der Erhöhung des Prozessverständnisses ist so eine Validierung und Verifizierung von DEM-CFD-Simulationen möglich.

Das Bewegungsverhalten von Korn und NKB ist als charakteristische Größe zur Analyse und Bewertung der Entmischung und Abscheidung am besten geeignet. Dieses wird während einer vertikalen Oszillation auf einem luftdurchströmten Sieb durch die Auswertung von hochfrequenten 2D-Röntgenbildern und statischen 3D-Rekonstruktionen untersucht. Die dritte Dimension wird bei der Auswertung der 2D-Röntgenbilder über die Abschwächung der Röntgenstrahlen berücksichtigt. Parallel aufgenommene Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen erlauben einen Vergleich.

Im Rahmen der untersuchten Anregungsgrenzen steigt die Sinkgeschwindigkeit der Körner durch die NKB-Schicht mit größeren mechanischen und pneumatischen Anregungen, was eine Verbesserung der Entmischung bedeutet. Es ist eine Korrelation zur Durchdringungszeit beobachtbar. Die verbesserte Entmischung basiert auf der Gutbewegung, die durch die Anregung beeinflusst wird. Durch die Luftunterstützung sind die maximalen Werte des Auflockerungsverhältnisses größer und der Anteil der Flugphase länger. Der Effekt der verstärkten Kompression der Gutschicht, welche durch höhere Aufprallgeschwindigkeiten entsteht, ist gering.

Die Entmischungsgeschwindigkeit ist in den oberen Haufwerksschichten größer. Aufgrund von Verdichtungen durch das Eigengewicht ist das Hohlraumvolumen im unteren Schichtbereich geringer. Dies erschwert die Bewegung der Körner.

Durch das geringfügig größere Hohlraumvolumen im wandnahen Bereich erfahren die Partikel hier eine höhere Sinkgeschwindigkeit. Die schnellere Entmischung im wandnahen Bereich und die Ausprägung des Bereiches, in dem die schnellere Entmischung feststellbar ist, ist unabhängig von der pneumatischen Anregung.

Der Einfluss des überlagerten Förderprozesses auf die Entmischung und Abscheidung wurde an einem Grundlagen-Reinigungsprüfstand untersucht. Die horizontale und vertikale Komponente der Siebbewegung ist über den Antrieb separat einstellbar. Durch die Förderung treten Relativbewegungen und Verschiebungen im Haufwerk auf. Dadurch entstehen zusätzliche Hohlräume, die zur Entmischung genutzt werden. Der Einfluss ist bei höheren pneumatischen und mechanischen Anregungen in vertikaler Richtung geringer, da die Auflockerung und Fluidisierung der Gutschicht bereits vollständig ausgebildet ist.

Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung von Luftströmung und Durchsatz erfolgt die Untersuchung der Einflussgrößen auf das Bewegungsverhalten der Bestandteile in der Reinigungsanlage anhand eines Reinigungsprüfstands. Dieser ist dem Aufbau der Reinigungsanlage im Mährescher gleich. Das Strömungsprofil wurde mit der Laser-Doppler-Anemometrie und Heißfilmsensoren, das Bewegungsverhalten der Gutbestandteile mit Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen untersucht.

In der unbeladenen Reinigungsanlage ist ein abfallender Verlauf der Luftströmung über der Sieblänge beobachtbar. Höhere Luftdurchsätze bewirken eine Steigerung der Luftgeschwindigkeit durch das Obersieb. Diese ist bis zu einem Siebbereich von  $l_s = 958$  mm stärker ausgeprägt. Das bei dieser Sieblänge installierte Querprofil verhindert durch den entstehenden Windschatten einen deutlicheren Anstieg der Luftgeschwindigkeit.

Die höhere Siebbeladung bewirkt eine flachere Strömung bei steigendem Durchsatz. Dadurch verschieben sich die maximal auftretenden Luftgeschwindigkeiten unter dem Untersieb zu größeren Prüfstandslängen. Durch die geringere Siebdurchströmung ist die Geschwindigkeitsverteilung über dem Obersieb bei höheren Durchsätzen konstanter. Der vordere Bereich des Obersiebs ist durch die hohe Luftgeschwindigkeit geringer belastet. Das Ausweichen der Luft zu diesen geringer belasteten Bereichen bedeutet eine steigende Geschwindigkeit im vorderen Siebbereich. Geringere Geschwindigkeiten bei größeren Sieblängen resultieren aus dem flacheren Strömungsverlauf.

Hohe Luftgeschwindigkeiten verursachen eine rein pneumatische Förderung bestimmter NKB-Partikel über das Obersieb hinweg. Des Weiteren ist diese auch zur Fluidisierung der NKB-Schicht im hinteren Siebbereich ausreichend. Der geringe Anteil der Körner in der Gutschicht auf dem Obersieb bestätigt die hohe Trennung in den Fallstufen. Ein Großteil der Körner wird deshalb im vorderen Siebbereich abgeschieden. Aufgrund der horizontalen Komponente

der Luftgeschwindigkeit zwischen den Sieben erfolgt eine Kornbewegung mit horizontalen Korngeschwindigkeiten von bis zu  $\bar{v}_{\text{Korn},x} = 1,21 \text{ m/s}$ . Dadurch werden die Körner zu größeren Untersieblängen gefördert. Bei hohen Luftdurchsätzen bedeutet dies eine Verschiebung der Kornabscheidung durch das Untersieb zu größeren Sieblängen. Der Luftdurchsatz muss in den Grenzen zwischen einer ausreichenden Gutauflockerung auf dem Obersieb und einer geringen Partikelförderung zwischen den Sieben gewählt werden.

Die Verifizierung der DEM-CFD-Simulationen zeigt Abweichungen im Bewegungsverhalten. Die Analyse der Einflussfaktoren ist qualitativ auch anhand der Simulationen durchführbar. Dennoch sollte eine Verbesserung der Simulationen angestrebt werden. Dazu eignen sich folgende Ansätze:

- Optimierung der CFD-Simulation
- Abbildung des Einflusses der Beladung auf das Strömungsfeld
- Erweiterung der Knickung und Biegung von NKB-Partikeln im Parametersatz

Besonders die Berücksichtigung der Strömungsumlagerung ist aus messtechnischer Sicht sinnvoll. Da die 2-Wege-Kopplung durch die Neuberechnung der Strömungsfelder in jedem Zeitschritt sehr rechenintensiv ist, ist bei ausreichender Genauigkeit die 1,5-Wege-Kopplung anzustreben.

Die Erhöhung der Reinigungsleistung kann nicht durch eine Erhöhung des Luftdurchsatzes, sondern durch die durchsatzabhängige Optimierung des Strömungsprofils erreicht werden. Die Realisierung kann mithilfe von einstellbaren Leitblechen oder durch unterschiedliche Sieböffnungen, die den Luftwiderstand beeinflussen, erfolgen. Die höhere Komplexität verlangt eine automatisierte Einstellung an die Erntebedingungen. Neben Regressionsmodellen eignen sich hier Modelle zur Mustererkennung auf Basis künstlicher Intelligenz.

Anders als im Siebkasten sind die hohen Luftdurchsätze in den Fallstufen zur optimalen Abscheidung essentiell, weshalb ein weiterer Optimierungspunkt die Anpassung des Luftdurchsatzes in den Fallstufen unabhängig vom Siebkasten ist.

## 7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Böttinger, S.: Mähdrescher. In: Jahrbuch Agrartechnik - Yearbook Agricultural Engineering, Bd. 27. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN) 2015, S. 1–13.
- [2] Pförtner, J.; Böttinger, S.; Schwarz, M.; Schürmann, L.: Simulation des Entmischungsprozesses von Korn und Kurzstroh. VDI-MEG-Tagung Landtechnik, 22.–23. 11. 2016 Köln. In: Land.Technik 2016. Düsseldorf: VDI Verlag 2016, S. 361–367.
- [3] Pförtner, J.; Böttinger, S.: Validierungsstrategie für DEM-Modelle von Mähdrescherbaugruppen. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik „Mähdrescher“, 12.–13. 09. 2013 Hohenheim. In: Mähdrescher Heft 40, S. 27–32.
- [4] Pförtner, J.; Böttinger, S.; Schwarz, M.; Bölling, R.: Methode zur Modellierung und Verifizierung strömungstechnischer Eigenschaften von Korn- und Strohpartikeln. VDI-MEG-Tagung Landtechnik, 19.–20. 11. 2014 Berlin. In: Land.Technik 2014. Düsseldorf: VDI Verlag 2014, S. 325–331.
- [5] Pförtner, J.: Simulation der Förder-, Entmischungs- und Trennprozesse in der Mähdrescherreinigungsanlage. Dissertation, Universität Stuttgart, in Bearbeitung.
- [6] Grobler, W. H.: Untersuchungen zur Korn-Stroh-Trennung mit überlagerten Beschleunigungen im Planetentrommelsortierer. Dissertation, Universität Stuttgart, 1987. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 140.
- [7] Kutzbach, H. D.; Grobler, W. H.: Einrichtungen zur Kornabscheidung im Mähdrescher. Grundlagen der Landtechnik 31 (1981) H. 6, S. 223–228.
- [8] 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. Aachen: Shaker 2015.
- [9] Baumgarten, J.: Theoretisch experimentelle Untersuchungen zur Optimierung des Trennprozesses in einer Kaskadenreinigungseinrichtung des Mähdreschers. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1988, unveröffentlicht.

- [10] Beck, F.: Simulation der Trennprozesse im Mähdrescher. Dissertation, Universität Stuttgart, 1999. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebensmitteltechnik Nr. 92. Düsseldorf: VDI Verlag 1999.
- [11] Beck, T.: Meßverfahren zur Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher. Dissertation, Universität Stuttgart, 1991. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebensmitteltechnik Nr. 54. Düsseldorf: VDI Verlag 1992.
- [12] Böttinger, S.: Die Abscheidfunktion von Hordenschüttler und Reinigungsanlage im Mähdrescher. Dissertation, Universität Stuttgart, 1992. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebensmitteltechnik Nr. 66. Düsseldorf: VDI Verlag 1993.
- [13] Schwarz, M.: Grundlagenuntersuchungen am Mähdrescher-Vorbereitungsboden mit pneumatischer Unterstützung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2017. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 587. Aachen: Shaker 2017.
- [14] Büermann, M.: Untersuchungen zum Einfluß der geometrischen Zuordnung der Förder- und Trennelemente auf das Abscheideverhalten von Tangentialdreschwerken. Dissertation, Universität Stuttgart, 1996. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebensmitteltechnik Nr. 78. Düsseldorf: VDI Verlag 1996.
- [15] Freye, T.: Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähdreschers. Dissertation, Universität Hohenheim, 1980. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 47.
- [16] Dahany, A.: Verbesserung der Leistungsfähigkeit luftdurchströmter Schwingsiebe bei der Korn-Spreu-Trennung im Mähdrescher durch Optimierung der Luftverteilung. Dissertation, Universität Hohenheim, 1994. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 245.
- [17] Williams, J. C.: The segregation of particulate materials. *Powder Technology* 15 (1976) H. 2, S. 245–251.
- [18] Schröter, M.; Ulrich, S.; Kreft, J.; Swift, J. B.; Swinney, H. L.: Mechanisms in size segregation of binary granular mixtures. *Physical Review E* 74 (2006) H. 1, S. 1–14.

- [19] Kudrolli, A.: Seize separation in vibrated granular matter. *Reports on Progress in Physics* 67 (2004) H. 3, S. 209–247.
- [20] Rosato, A.: Why the Brazil Nuts Are on Top: Size Segregation of Particle Matter by Shaking. *Physical Review Letters* 58 (1987) H. 10, S. 1038–1040.
- [21] Durant, J.: Arching Effect Model for Particle Size Segregation. *Physical Review Letters* 70 (1993) H. 16, S. 2431–2434.
- [22] Möbius, M. E.; Lauderdale, B. E.; Nagel, S. R.; Jaeger, H. M.: Brazil-nut effect: Size separation of granular particles. *Nature* 414 (2001) H. 6861, S. 270.
- [23] Shinbrot, T.; Muzzio, F. J.: Reverse Buoyancy in Shaken Granular Beds. *Physical Review Letters* 81 (1998) H. 20, S. 4365–4368.
- [24] Knight, J. B.; Jaeger, H. M.; Nagel, S. R.: Vibration-Induced Size Separation in Granular Media: The Convection Connection. *Physical Review Letters* 70 (1993) H. 24, S. 3728–3731.
- [25] Pöschel, T.; Herrmann, H. J.: Size Segregation and Convection. *Europhysics Letters* 29 (1995) H. 2, S. 123–128.
- [26] Cooke, W.; Warr, S.; Huntley, J. M.; Ball, R. C.: Particle size segregation in a two-dimensional bed undergoing vertical vibration. *Physical Review E* 53 (1996) H. 3, S. 2812–2822.
- [27] Knight, J. B.; Ehrichs, E. E.; Kuperman, V. Y.; Flint, J. K.; Jaeger, H. M.; Nagel, S. R.: Experimental study of granular convection. *Physical Review E* 54 (1996) H. 5, S. 5726–5738.
- [28] Vanel, L.; Rosato, A. D.; Dave, R. N.: Rise-Time Regimes of a Large Sphere in Vibrated Bulk Solids. *Physical Review Letters* 78 (1997) H. 7, S. 1255–1258.
- [29] Brone, D.; Muzzio, F. J.: Size segregation in vibrated granular systems: A reversible process. *Physical Review E* 56 (1997) H. 1, S. 1059–1063.
- [30] Nahmad-Molinari, Y.; Canul-Chay, G.; Ruiz-Suárez, J. C.: Inertia in the Brazil nut problem. *Physical Review E* 68 (2003) H. 4, S. 041301.
- [31] Hsiau, S. S.; Hunt, M. L.: Granular thermal diffusion in flows of binary-sized mixtures. *Acta Mechanica* 114 (1996) H. 1–4, S. 121–137.

- [32] Hong, D. C.; Quinn, P. V.; Luding, S.: Reverse Brazil nut problem: Competition between Percolation and Condensation. *Physical Review Letters* 86 (2001) H. 15, S. 3423–3426.
- [33] Both, J. A.; Hong, D. C.: Variational approach to hard sphere segregation under gravity. *Physical Review Letters* 88 (2002) H. 12, S. 1–4.
- [34] Clément, E.; Duran, J.; Rajchenbach, J.: Experimental study of heaping in a two-dimensional sand pile. *Physical Review Letters* 69 (1992) H. 8, S. 1189–1192.
- [35] Trujillo, M. A.; Alam, M.; Herrmann, H. J.: Segregation in a fluidized binary granular mixture: Competition between buoyancy and geometric forces. *Europhysics Letters* 64 (2003) H. 2, S. 190–196.
- [36] Brilliantov, N.; Pöschel, T.: *Kinetic theory of granular gases*. Oxford/ New York: Oxford University Press 2004.
- [37] Hübner, R.: Entwicklung eines Modells zur Auslegung einer rotierenden Reinigungseinrichtung im Mähdrescher. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1999. *Dresdner Forschungen: Maschinenwesen Bd. 2*. Dresden: w.e.b. Universitätsverlag 2000.
- [38] N.N: Mähdrescher - Lexion 780 770 760 750 740, Firmenschrift HRC / 103011010717 KK ME 0717 / 00 0248 804 5. CLAAS Vertriebsgesellschaft mbH. Harsewinkel 2017.
- [39] Spittel, A.: Einfluß der Schichtung des Reinigungsgemisches auf die Leistungsfähigkeit der Reinigungseinrichtung eines Mähdreschers. *Agrartechnik* 28 (1978) H. 9, S. 399–401.
- [40] Spittel, A.: Neue Erkenntnisse zum Einfluß der Schichtung des Reinigungsgemisches eines Mähdreschers durch geänderte Auswertemethodik. *Agrartechnik* 29 (1979) H. 8, S. 353–355.
- [41] Segler, G.; Freye, T.: Vibro-pneumatische Trennung von Stroh, Korn und Spreu im Mähdrescher. *Grundlagen der Landtechnik* 27 (1977) H. 4, S. 101–108.
- [42] Timofeev, A.: Förderung und Entmischung auf dem Vorbereitungsboden des Mähdreschers. Dissertation, Universität Hohenheim, 2013. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 527. Aachen: Shaker 2013.

- [43] Timofeev, A.; Böttinger, S.: Die Entmischung und Förderung auf dem Vorbereitungsboden des Mähdreschers. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik „Mähdrescher“, 22.–23. 03. 2007 Dresden. In: Mähdrescher Heft 39, S. 37–44.
- [44] Timofeev, A.: Untersuchungen am Vorbereitungsboden von Mähdreschern. Landtechnik 62 (2007) H. 2, S. 90–91.
- [45] Timofeev, A.; Böttinger, S.: Fördervorgang und Vorentmischung auf dem Vorbereitungsboden von Mähdreschern. Landtechnik 65 (2010) H. 5, S. 380–382.
- [46] Manig, G.: Beitrag zur Untersuchung der Auflösung eines aus einem Weizenkorn-Stroh-Spreu-Gemisch bestehenden Strahles im Wirkungsbereich einer horizontalen Luftströmung. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1974.
- [47] Zhao, Y.: Einfluss mechanischer und pneumatischer Parameter auf die Leistungsfähigkeit von Reinigungsanlagen im Mähdrescher. Dissertation, Universität Hohenheim, 2002. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 387.
- [48] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie. 3., vollst. neu bearb. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer 2009.
- [49] Wessel, J.: Grundlagen des Siebens und Sichtens: Das Siebklassieren, Teil II. Aufbereitungs-Technik 8 (1967) H. 4, S. 167–180.
- [50] Wessel, J.: Grundlagen des Siebens und Sichtens: Theoretische Darstellung und Behandlung des Klassierens, Teil I. Aufbereitungs-Technik 8 (1967) H. 2, S. 53–62.
- [51] Baader, W.: Das Verhalten eines Schüttgutes auf schwingenden Siebrosten. Grundlagen der Landtechnik (1961) H. 13, S. 13–20.
- [52] Braess, H.-H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 7., aktual. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer 2013.
- [53] Damm, J.: Der Sortiervorgang beim luftdurchströmten Schwingsieb. Dissertation, Technische Hochschule Stuttgart, 1971. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 3: Verfahrenstechnik Nr. 37. Düsseldorf: VDI Verlag 1972.
- [54] Reumschüssel, G.: Untersuchungen am Obersieb der ebenen Mähdrescher-Reinigungs-einrichtung. Deutsche Agrartechnik 22 (1972) H. 6, S. 264–267.

- [55] Kluge, W.: Neuzeitliche Siebmaschinen für die Aufbereitung. Erdöl und Kohle 4 (1951) H. 11, S. 705–711.
- [56] Bachmann, D.: Beitrag zur Klärung des Schwingmahlvorganges. Dissertation, Technische Hochschule Karlsruhe, 1939. VDI-Beiheft 1940 Nr. 2-3. Berlin: VDI Verlag 1940.
- [57] 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, Technische Universität Dresden, 1972.
- [58] Böttcher, S.: Beitrag zur Klärung der Gutbewegung auf Schwingrinnen. Dissertation, Technische Hochschule Hannover, 1957.
- [59] Baader, W.; Sonnenberg, H.; Peters, H.: Die Entmischung eines Korngut-Fasergut-Haufwerkes auf einer vertikal schwingenden, horizontalen Unterlage. Grundlagen der Landtechnik 19 (1969) H. 5, S. 149–180.
- [60] Rochell, P.: Untersuchungen über den Fördervorgang auf dem Schwingförderer unter besonderer Berücksichtigung der Reinigungsanlage im Mähdrescher. Dissertation, Universität Hohenheim, 1975. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 4.
- [61] Wessel, J.: Grundlagen des Siebens und Sichtens, Das Sichten, Teil III. Aufbereitungstechnik 8 (1967) H. 8, S. 417–428.
- [62] Borho, K.; Polke, R.; Wintermantel, K.; Schubert, H.; Sommer, K.: Produkteigenschaften und Verfahrenstechnik. Chemie Ingenieur Technik 63 (1991) H. 8, S. 792–808.
- [63] Polke, M.: Erfolgreiche Informationsstrukturen für die Qualitätssicherung. Chemie Ingenieur Technik 65 (1993) H. 7, S. 791-796.
- [64] Krekel, J.; Polke, R.: Qualitätssicherung bei der Verfahrensentwicklung. Chemie Ingenieur Technik 64 (1992) H. 6, S. 528–535.
- [65] Böttinger, S.: Regelkonzepte für die Mähdrescher-Reinigungsanlage. VDI/MEG Kolloquium Landtechnik „Mähdrescher“, 25.–26. 04. 1988 Hohenheim. In: Mähdrescher Heft 6, S. 157–169.

- [66] Böttinger, S.; Kutzbach, H. D.: Mathematische Modellierung der Trennprozesse. VDI-MEG Kolloquium Landtechnik, 22.–23. 03. 2007 Dresden. In: Mähdrescher Heft 39, S. 19–25.
- [67] Persson, S.: Eigenschaften des Reinigungsgutes in Mähdreschern. Landtechnische Forschung 5 (1957) H. 2, S. 41–45.
- [68] Beck, T.: Beurteilung der Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher mit Hilfe gemessener Stoffeigenschaften. Grundlagen der Landtechnik 40 (1990) H. 2, S. 41–68.
- [69] Huisman, W.: Moisture content, coefficient of friction and modulus of elasticity of straw in relation to walker losses in a combine harvester. ASAE/CIGR International Grain and Forage Harvesting Conference, 25.–29. 09. 1977 Ames, Iowa. In: ASAE Meeting Presentation Nr. 1-78, S. 25–29.
- [70] Spittel, A.: Zum Einfluß ausgewählter Stoffparameter auf das Arbeitsergebnis der Reinigungseinrichtung eines Mähdreschers. Agrartechnik 29 (1979) H. 4, S. 154–156.
- [71] Haase, A.: Zur Steigerung der Leistungsfähigkeit einer Mähdrescherreinigungseinrichtung. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 26 (1977) H. 6.
- [72] Beckmann, K.; Schwarz, M.; Böttinger, S.; Bölling, R.; Frerichs, L.; Eberhorn, M.: Experimentelle Bestimmung des Entmischungsverlaufes unter Anwendung von Computertomografieverfahren. Landtechnik 71 (2016) H. 4, S. 131–138.
- [73] Schwarz, M.; Pfortner, J.; Mümken, P.; Böttinger, S.: Gutbewegungsvorgänge auf dem Vorbereitungsboden, Erfahrungen mit der DEM-Software PASIMODO. VDI-MEG-Tagung Landtechnik, 06.–07. 11. 2012 Karlsruhe. In: Land.Technik 2012. Düsseldorf: VDI Verlag 2012, S. 363–369.
- [74] Persson, S.: Die Windströmung in der Reinigung des Mähdreschers. Landtechnische Forschung 7 (1957) H. 4, S. 113–116.
- [75] Korn, C.; Herlitzius, T.: Gekoppelte CFD-DEM-Simulation des Trennprozesses in Mähdrescherreinigungsanlagen. Landtechnik 72 (2017) H. 5, S. 247–262.
- [76] Beckmann, K.; Böttinger, S.; Schwarz, M.; Bölling, R.: New method to detect grain in grain-MOG-mixtures. VDI-MEG-Tagung Landtechnik, 06.–07. 11. 2015 Hannover. In: Land.Technik AgEng 2015. Düsseldorf: VDI Verlag 2015, S. 175–181.

- [77] Korn, C.; Herlitzius, T.: Strömungssimulation als Entwicklungswerkzeug in der Mähdruschtechnik – Potenzial, numerische Verfahren und Validierung. VDI-MEG-Tagung Landtechnik, 19.–20. 11. 2014 Berlin. In: Land.Technik 2014. Düsseldorf: VDI Verlag 2014, S. 65–73.
- [78] Weis, M.; Schwarz, M.; Böttinger, S.: Analyse der Gutentmischung auf dem Vorbereitungsboden im Mähdrescher mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, 2. Workshop unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft, 06.–07. 05. 2013 Berlin. In: Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 81, S. 170–178.
- [79] Bernhardt, J.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Optimierung der Korn-Stroh-Trennung am Hordenschüttler unter Verwendung alternativer Bahnkurven. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2015. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebensmitteltechnik Nr. 144. Düsseldorf: VDI Verlag 2015.
- [80] Tabatabaifar, A.; Persson, S. P. E.: Layer Breakup and Particle Movement on a Caffer Sieve. Transactions of the ASAE 37 (1995) H. 5, S. 1305–1313.
- [81] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. 22., neu bearb. und erw. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer 2007.
- [82] Weis, M.; Rumpf, T.; Gerhards, R.; Plümer, L.: Comparison of different classification algorithms of weed detection from images based on shape parameters. Image Analysis for Agricultural Products and Processes, 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, 27.–28. 08. 2009 Potsdam. In: Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 69, S. 53–64.
- [83] Steinmeier, U.; Neudecker, M.; Witt, A.; von Hörsten, D.; Schröter, M.: Segregation of Simulated RFID Markers during Handling and Transport of Wheat. Transactions of the ASABE 57 (2014) H. 2, S. 555–563.
- [84] Ergun, S.; Orning, A. A.: Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. Industrial and Engineering Chemistry 41 (1949) H. 6, S. 1179–1184.
- [85] Segler, G.; Freye, T.: Entwicklung einer Meß- und Kontrolleinrichtung für den Gutdurchsatz der Reinigungsanlage im Mähdrescher. Grundlagen der Landtechnik 28 (1978) H. 4, S. 148–151.

- [86] Böttiger, S.: Durchsatzbestimmung für eine Regelung der Mähdrescher-Reinigungsanlage. 11. Congress on Agricultural Engineering, 04.–08. 09. 1989 Dublin. In: Proceedings Volume 3 Agricultural mechanisation. Rotterdam/ Brookfield: A.A. Balkema 1989, S. 1857–1862.
- [87] Berner, D.; Grobler, W. H.: Gesteuerte adaptive Regelung einer Mähdrescherreinigungsanlage. *Grundlagen der Landtechnik* 36 (1986) H. 3, S. 73–78.
- [88] Burghardt, K.; Freye, T.: Die Messung kleiner Strömungsgeschwindigkeiten mit Hilfe von Heißleiterwiderständen. *Grundlagen der Landtechnik* 28 (1978) H. 6, S. 223–225.
- [89] Streicher, E. A.; Strohine, R. L.; Krutz, G. W.; Hinkle, C. N.: Cleaning Shoe Air Velocities in Combine Harvesting of Wheat. *Transactions of the ASAE* 29 (1986) H. 4, S. 923–928.
- [90] Reumschüssel, G.; Zehme, C.: Untersuchungen am Obersieb einer ebenen Reinigungseinrichtung. *Agrartechnik* 23 (1973) H. 6, S. 280–283.
- [91] Lee, J. H. A.; Winfield, R. G.: Influence of Oscillating Frequency on Separation of Wheat on a Sieve in an Airstream. *Transactions of the ASABE* 12 (1969) H. 6, S. 886–888.
- [92] Farran, I. G.; Macmillan, R. H.: Grain-Chaff separation in a vertical air stream. *Journal of Agricultural Engineering Research* 24 (1979) H. 2, S. 115–129.
- [93] Jiang, S.; Bilanski, W. K.; Lee, J. H. A.: Parameters for an Aerodynamic Combine Precleaner. *Transactions of the ASAE* 27 (1984) H. 1, S. 36–44.
- [94] Doucet, J.; Bertrand, F.; Chaouki, J.: An extended radioactive particle tracking method for systems with irregular moving boundaries. *Powder Technology* 181 (2008) H. 2, S. 195–204.
- [95] Rasouli, M.; Bertrand, F.; Chaouki, J.: A multiple radioactive particle tracking technique to investigate particulate flows. *AIChE Journal* 61 (2015) H. 2, S. 384–394.
- [96] Kruth, J. P.; Bartscher, M.; Carmignato, S.; Schmitt, R.; de Chiffre, L.; Weckenmann, A.: Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Annals* 60 (2011) H. 2, S. 821–842.
- [97] de Chiffre, L.; Carmignato, S.; Kruth, J. P.; Schmitt, R.; Weckenmann, A.: Industrial applications of computed tomography. *CIRP Annals* 63 (2014) H. 2, S. 655–677.

- [98] Beplate-Haarstrich, L.: Entwicklung eines Korndummies zur direkten Markierung von Getreide mittels Radiofrequenzidentifikation (RFID) als technische Möglichkeit zur Rückverfolgung. Dissertation, Universität Göttingen, 2009.
- [99] Schulz, M.; Schillinger, B.: ANTARES: Cold neutron radiography and tomography facility. *Journal of large-scale research facilities JLSRF* 1 (2015) H. A17, S. 1–4.
- [100] v. Hassel, G.; Waschowski, W. (Hrsg.): Neue Forschungs-Neutronenquelle Garching. 2. Auflage. Garching: Technische Universität München Projektgruppe FRM-II, Öffentlichkeitsarbeit 1998.
- [101] Schillinger, B.: Neue Entwicklungen zu Radiographie und Tomographie mit thermischen Neutronen und zu deren routinemäßigem Einsatz. Dissertation, Technische Universität München, 1999. Berlin: Mensch und Buch 1999.
- [102] Kutzbach, H. D.; Wacker, P.: Die Bestimmung der Gutbewegung in Axialdreschwerken. *Grundlagen der Landtechnik* 30 (1980) H. 4, S. 101–104.
- [103] Kak, A. C.; Slaney, M.: *Principles of Computerized Tomographic Imaging. Classics in Applied Mathematics* Nr. 33. Philadelphia: Society for Industrial und Applied Mathematics 2001.
- [104] Sato, Y.; Nakajima, S.; Atsumi, H.; Koller, T.; Gerig, G.; Yoshida, S.; Kikinis, R.: 3D multi-scale line filter for segmentation and visualization of curvilinear structures in medical images. In: *Lecture Notes in Computer Science*, Bd. 1205. Berlin Heidelberg: Springer 1997, S. 213–222.
- [105] McInerney, T.; Terzopoulos, D.: Medical image segmentation using topologically adaptable surfaces. In: *Lecture Notes in Computer Science*, Bd. 1205. Berlin Heidelberg: Springer 1997, S. 23–32.
- [106] Kirbas, C.; Quek, F.: A review of vessel extraction techniques and algorithms. *ACM Computing Surveys* 36 (2004) H. 2, S. 81–121.
- [107] Christoph, R.; Neumann, H. J.: *Röntgentomografie in der industriellen Messtechnik: Präzise, wirtschaftlich und universell. Die Bibliothek der Technik. Band 331. München: Moderne Industrie* 2011.
- [108] Si, Y.; Sankaran, S.: Computed tomography imaging-based bitter pit evaluation in apples. *Biosystems Engineering* 151 (2016), S. 9–16.

- [109] Ambert-Sanchez, M.; Mickelson, S. K.; Ahmed, S. I.; Gray, J. N.; Webber, D.: Evaluating Soil Tillage Practices Using X-Ray Computed Tomography and Conventional Laboratory Methods. *Transactions of the ASABE* 59 (2016) H. 2, S. 455–463.
- [110] Tsuji, Y.; Morikawa, Y.: LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a horizontal pipe. *Journal of Fluid Mechanics* 120 (1982), S. 385–409.
- [111] Tsuji, Y.; Morikawa, Y.; Shiomi, H.: LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe. *Journal of Fluid Mechanics* 139 (1984), S. 417–434.
- [112] Bordás, R.; Hagemeyer, T.; Thévenin, D.; Wunderlich, B.: LDV-Signale beinhalten mehr Informationen als nur die Geschwindigkeit. 14. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 05.–07. 09. 2006 Braunschweig. In: *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, S. 1–7.
- [113] Kutzbach, H. D.: Approaches for mathematical modelling of grain separation. International Conference on Crop Harvesting and Processing, 09.–11. 02. 2003 Louisville, Kentucky. In: *ASAE Publication Nr. 701P1103e*, S. 1–19.
- [114] Miu, P.: *Combine Harvesters - Theory, Modeling and Design*. 1. Auflage. Boca Raton: CRC Press 2016.
- [115] Gregory, J. M.; Fedler, C. B.: Mathematical relationship predicting grain separation in combines. *Transactions of the ASABE* 30 (1987) H. 6, S. 1600–1604.
- [116] Dehling, H. G.; Gottschalk, T.; Hoffmann, A. C.: *Stochastic Modelling in Process Technology*. Amsterdam: Elsevier Science 2007.
- [117] Kim, S. H.; Gregory, J. M.: Grain Separation Equations for Combine Chaffers and Sieves. International Winter Meeting, 17.–20. 12. 1991 Chicago. In: *ASAE Meeting Presentation Nr. 911603*, S. 1–16.
- [118] Huynh, V. M.; Powell, T. E.: Cleaning Shoe Performance Prediction. International Winter Meeting, 18.–20. 12. 1978 Chicago. In: *ASAE Meeting Presentation Nr. 781565*, S. 1–20.
- [119] Chrolikow, W.: Der technologische Vorgang bei der Trennung von Gemischen auf Schwingsieben. *Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden* 23 (1974) H. 2, S. 431–433.
- [120] Schreiber, M.; Kutzbach, H. D.: Modellierung des Abscheideverhaltens von Mähdrescher-Reinigungsanlagen. *Landtechnik* 58 (2003) H. 4, S. 236–237.

- [121] Meinel, A.; Schubert, H.: Über einige Zusammenhänge zwischen der Einzelkorndynamik und der stochastischen Siebtheorie bei der Klassierung auf Stößelschwingsiebmaschinen. *Aufbereitungs-Technik* 13 (1972) H. 7, S. 408–416.
- [122] Meinel, A.: Klassierung auf Stößelschwingsiebmaschinen. Dissertation, Bergakademie Freiberg, 1974. *Freiberger Forschungshefte A 537 Verfahrenstechnik*. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1974.
- [123] Meinel, A.; Schubert, H.: Zu den Grundlagen der Feinsiebung. *Aufbereitungs-Technik* 12 (1971) H. 3, S. 128–133.
- [124] Beck, F.; Kutzbach, H. D.: Theoretische Untersuchungen zur Trennung von Korn/Stroh- und Korn/Spreu-Gemischen im Mähdescher. *Agrartechnische Forschung* 1 (1995) H. 2, S. 120–128.
- [125] Beck, F.; Kutzbach, H. D.: Computer simulation of grain/chaff separation on grain pan and cleaning shoe of the combine harvester. *ASAE Annual International Meeting*, 16.07.1996 Phoenix, Arizona. In: *ASAE Meeting Presentation Nr. 961051*, S. 1–18.
- [126] Beck, F.; Zhao, Y.; Kutzbach, H. D.: Mähdeschersimulation. *Landtechnik* 52 (1997) H. 4, S. 180–181.
- [127] Götz, S.: Gekoppelte CFD/DEM-Simulation blasenbildender Wirbelschichten. Dissertation, Universität Dortmund, 2006. *Berichte aus der Strömungstechnik*. Aachen: Shaker 2006.
- [128] Cundall, P. A.; Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique* 29 (1979) H. 1, S. 47-65.
- [129] Kemper, S.; Lang, T.; Frerichs, L.: Investigations of an overlaying cutting method in a rotary mower. *VDI-MEG-Tagung Landtechnik*, 08.–09. 11. 2013 Hannover. In: *Land.Technik AgEng 2013*. Düsseldorf: VDI Verlag 2013, S. 393–398.
- [130] Sümening, F.; Frerichs, L.; Bönig, I.; Kübbeler, M.; Kajtar, P.: Abbildung von Zerkleinerungsprozessen mit der DEM. *VDI-MEG-Tagung Landtechnik*, 22.–23. 11. 2016 Köln. In: *Land.Technik 2016*. Düsseldorf: VDI Verlag 2016, S. 41–348.
- [131] Kajtár, P.: Analyse von inneren Arbeitsprozessen von Feldhäckslern. Dissertation, Szent István Universität, 2010.

- [132] Kajtar, P.; Loebe, S.: Diskrete Element Simulation von Halmgut. VDI-MEG-Tagung Landtechnik, 19.–20. 11. 2014 Berlin. In: Land.Technik 2014. Düsseldorf: VDI Verlag 2014, S. 59–64.
- [133] Kattenstroth, R.; Harms, H.-H.; Lang, T.: Ausrichtung von Strohhalmen zur Optimierung des Schnittprozesses in einem Mährescherhäcksler. Landtechnik 66 (2011) H. 5, S. 354–357.
- [134] Frerichs, L.; Jünemann, D.; Kattenstroth, R.: Prozesssimulation von Halmgütern mittels der Diskreten Elemente Methode (DEM). VDI-MEG-Tagung Landtechnik, 06.–07. 11. 2012 Karlsruhe. In: Land.Technik 2012. Düsseldorf: VDI Verlag 2012, S. 371–377.
- [135] Jünemann, D.; Kemper, S.; Frerichs, L.: Prozesssimulation von Halmgut - Einsatzmöglichkeiten der Diskrete-Elemente-Methode. Landtechnik 68 (2013) H. 3, S. 164–167.
- [136] Beckmann, K.; Pförtner, J.; Böttinger, S.: Untersuchung mechanischer Siebanregungen auf die Korn-Stroh-Trennung in der Mährescherreinigung. VDI-MEG-Tagung Landtechnik, 22.–23. 11. 2016 Köln. In: Land.Technik 2016. Düsseldorf: VDI Verlag 2016, S. 429–436.
- [137] Beckmann, K.; Pförtner, J.; Böttinger, S.: Einfluss elliptischer Siebbewegungen auf die Arbeitsweise der Mährescherreinigungsanlage. Landtechnik 72 (2017) H. 6, S. 266–279.
- [138] Segler, G.; Scherer, R.: Systematische Untersuchungen über einige physikalische Kenngrößen des Getreidekorns in Abhängigkeit vom Feuchtegrad am Beispiel der Maissorte Inra 258. Grundlagen der Landtechnik 26 (1976) H. 4, S. 121–128.
- [139] Scherer, R.; Kutzbach, H. D.: Mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten. Grundlagen der Landtechnik 28 (1978) H. 1, S. 6–12.
- [140] Kutzbach, H. D.; Kustermann, M.; Scherer, R.: Elastizitätsmodul, Kompressibilität und weitere mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten. Grundlagen der Landtechnik 35 (1985) H. 6, S. 189–195.
- [141] Korn, C.; Herlitzius, T.: Coupled CFD-DEM simulation of separation process in combine harvester cleaning devices. VDI-MEG-Tagung Landtechnik, 10.–11. 11. 2017 Hannover. In: Land.Technik AgEng 2017. Düsseldorf: VDI Verlag 2017, S. 199–209.

- [142] Korn, C.; Hübner, R.; Herlitzius, T.; Rüdiger, F.; Fröhlich, J.: Numerische Untersuchung der Luftströmung in der Reinigungseinrichtung des Mähdreschers. VDI-MEG-Tagung Landtechnik, 06.–07. 11. 2012 Karlsruhe. In: Land.Technik 2012. Düsseldorf: VDI Verlag 2012, S. 379–386.
- [143] Li, H.; Li, Y.; Gao, F.; Zhao, Z.; Xu, L.: CFD-DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device. *Computers and Electronics in Agriculture* 88 (2012), S. 111–119.
- [144] N.N: Produktdatenblatt DC-Axialventilator - D2214 F/2TDHHO. ebm-papst St. Georgen GmbH. St. Georgen 2016.
- [145] N.N: TMCM-1180 PD86-1180 HARDWARE MANUAL. TRINAMIC Motion Control GmbH. Hamburg 2013.
- [146] Jähne, B.: Digitale Bildverarbeitung. Berlin Heidelberg: Springer 2012.
- [147] Worthoff, W. A.; Krojanski, H. G.; Suter, D.: Medizinphysik in Übungen und Beispielen. Berlin Boston: De Gruyter 2012.
- [148] Blessing, N.: Segmentierung von industriellen 3D-CT-Voxelmodellen durch dynamische Schwellwertberechnung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2008. IPA-IAO Forschung und Praxis Berichte aus dem Fraunhofer-Institut Nr. 475. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag 2008.
- [149] Mallick, S.: Blob Detection Using OpenCV ( Python, C++ ). 17. Feb. 2015. URL: <https://www.learnopencv.com/blob-detection-using-opencv-python-c/>. Zugriff am: 22. 08. 2018.
- [150] Bradski, G.: The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools* (2000).
- [151] Meyer, F.: Topographic distance and watershed lines. *Signal Processing* 38 (1994) H. 1, S. 113–125.
- [152] Gonzalez, R. C.; Woods, R. E.: Digital image processing. Fourth edition. New York: Pearson 2018.
- [153] Hodneland, R.; Tai, X.-C.; Weickert, J.; Bukoreshtliev, N. V.; Lundervold, A.; Gerdes, H.-H.: Level Set Methods for Watershed Image Segmentation. In: *Lecture Notes in Computer Science*, Bd. 4485. Berlin Heidelberg: Springer 2007, S. 178–190.

- [154] Shahedi, M.: imshow3Dfull (3D imshow in 3 views). Version 2.5.0.0. 22. Sep. 2016. URL: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47463-imshow3dfull-3d-imshow-in-3-views>. Zugriff am: 22. 08. 2018.
- [155] Tan, J.: 3D image viewer and slicer. Version 1.4.0.0. 16. Juni 2015. URL: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47594-3d-image-viewer-and-slicer>. Zugriff am: 22. 08. 2018.
- [156] Zhang, Y.: 2D/3D image segmentation toolbox. Version 1.8.0.0. 28. Jan. 2013. URL: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24998-2d-3d-image-segmentation-toolbox>. Zugriff am: 22. 08. 2018.
- [157] Legland, D.: Geometric measures in 2D/3D images. Version 1.5.0.0. 27. Okt. 2016. URL: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33690-geometric-measures-in-2d-3d-images>. Zugriff am: 22. 08. 2018.
- [158] Yeh, J.: regionprops3. Version 1.3.0.0. 4. Okt. 2016. URL: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47578-regionprops3>. Zugriff am: 22. 08. 2018.
- [159] N.N: VolumePlayerPlus 6.4.2 Bedienungsanleitung. Fraunhofer EZRT. Fürth 2011.
- [160] N.N: VGSTUDIO MAX. Die High-End-Software für industrielle CT. Volume Graphics. Heidelberg 2018.
- [161] Mindlin, R. D.; Deresiewicz, H.: Elastic spheres in contact under varying oblique forces. Transactions of the ASME, J. Appl. Mech. 20 (1953), S. 327–344.
- [162] N.N: CFX 15: User's Manual. ANSYS. Canonsburg 2013.
- [163] N.N: EDEM 2017: User Guide. DEM Solutions Ltd. Edinburgh 2016.
- [164] Schwarz, M.; Schulz, W.; Baumgarten, J.; Böttinger, S.: Gutzuführungskonzept für Laboruntersuchungen von Mähdrescherreinigungsanlagen. Landtechnik 65 (2010) H. 5, S. 376–379.
- [165] Schwarz, M.; Böttinger, S.; Schulz, W.: 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: Land.Technik AgEng 2011. Düsseldorf: VDI Verlag 2011, S. 55–62.

- [166] Hermann, D.; Scholer, F.; Bilde, M.L.; Andersen, N.A.; Ravn, O.: Design of Laboratory Environment for Development of Cleaning System Automation. VDI-MEG-Tagung Landtechnik, 10.–11. 11. 2017 Hannover. In: Land.Technik AgEng 2017. Düsseldorf: VDI Verlag 2017, S. 485–490.
- [167] Schulz, W.; Wember, T.; Schwarz, M.: 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: Land.Technik AgEng 2011. Düsseldorf: VDI Verlag 2011, S. 129–136.
- [168] Wember, T.: Technische Statistik und statistische Versuchsplanung: Einführung in statistische Methoden mit Anwendungsschwerpunkt in der Analyse technischer Daten. Datteln, 2012.
- [169] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung. Berlin Heidelberg: Springer 2010.
- [170] N.N: Cornerstone: Software for Engineering Analytics. Version 7.2. camLine GmbH. Petershausen 2019.
- [171] N.N: SAS. Version 9.4. SAS Institute Inc. Cary 2018.
- [172] N.N: CycDesigN. Version v6. VSN International Ltd. Hemel Hempstead 2019.
- [173] Ebner, M.: Live-Videotechnik: Projektion, Streaming, Aufzeichnungen. Berlin: Beuth 2013.
- [174] Kalman, R. E.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering 82 (1960) H. 1, S. 35–45.
- [175] Munkres, J.: Algorithms for the Assignment and Transportation Problems. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics 5 (1957) H. 1, S. 32–38.
- [176] Miller, M. L.; Stone, H. S.; Cox, I. J.: Optimizing Murty's ranked assignment method. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 33 (1997) H. 3, S. 851–862.
- [177] N.N: 2D LDV Transceiver User Manual - Operation of the Laser Doppler Velocimeter (LDV) For Flow Velocity Measurements. Artium Technologies Inc. Sunnyvale.
- [178] N.N: LDV-200TRX - Laser Doppler Velocimeter (LDV): Particle Velocity and Turbulence Measurements. Artium Technologies Inc. Sunnyvale.

- [179] Schober, P.: Berührungsfreie Erfassung beschleunigter schubspannungsgetriebener Kraftstoffwandfilme unter Druckeinfluss. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2009. Forschungsbericht aus dem Institut für Thermische Strömungsmaschinen Band 42. Berlin: Logos 2009.
- [180] N.N: Translation Stages - traversing for cameras, light sheets or other imaging accessories. LaVision GmbH. Göttingen 2013.
- [181] N.N: FS5 Thermal Mass Flow Sensor - Optimal for various gas flow applications. IST Innovative Sensor Technology. Ebnat-Kappel 2017.
- [182] N.N: aCTA hotwire bridge. SVMtec GmbH. Stuttgart 2014.
- [183] N.N: Datenblatt PSC-Serie - PSC4-CAN, PSC5-CAN Mehrkanaldruckscanner. SVMtec. Stuttgart 2017.
- [184] N.N: CAN HS/FD Interface NI-XNET USB-8502: Specifications. National Instruments. Austin 2017.
- [185] Sibson, R.: A brief description of natural neighbor interpolation. Interpreting multivariate data, 24.–27. 03. 1980 Sheffield. In: Wiley series in probability and mathematical statistics. Chichester: Wiley 1981, S. 21–36.
- [186] Hanke-Bourgeois, M.: Grundlagen der numerischen Mathematik und des wissenschaftlichen Rechnens. 3., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009.
- [187] N.N: DIN EN ISO 5167-2. Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt - Teil 2: Blenden (ISO 5167-2:2003) 2004.
- [188] Nitsche, W.; Brunn, A.: Strömungsmesstechnik. 2., aktualisierte und bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer 2006.
- [189] Lomas, C. G.: Fundamentals of hot wire anemometry. Cambridge: Cambridge Univ. Press 1986.
- [190] Surek, D.; Stempin, S.: Angewandte Strömungsmechanik für Praxis und Studium: Mit 398 Abbildungen, 53 Tabellen und 30 Beispielen. Wiesbaden: B.G.Teubner/ GWV Fachverlage 2007.
- [191] N.N: Aerosol Generator - For tracer particle generation. LaVision GmbH. Göttingen 2014.

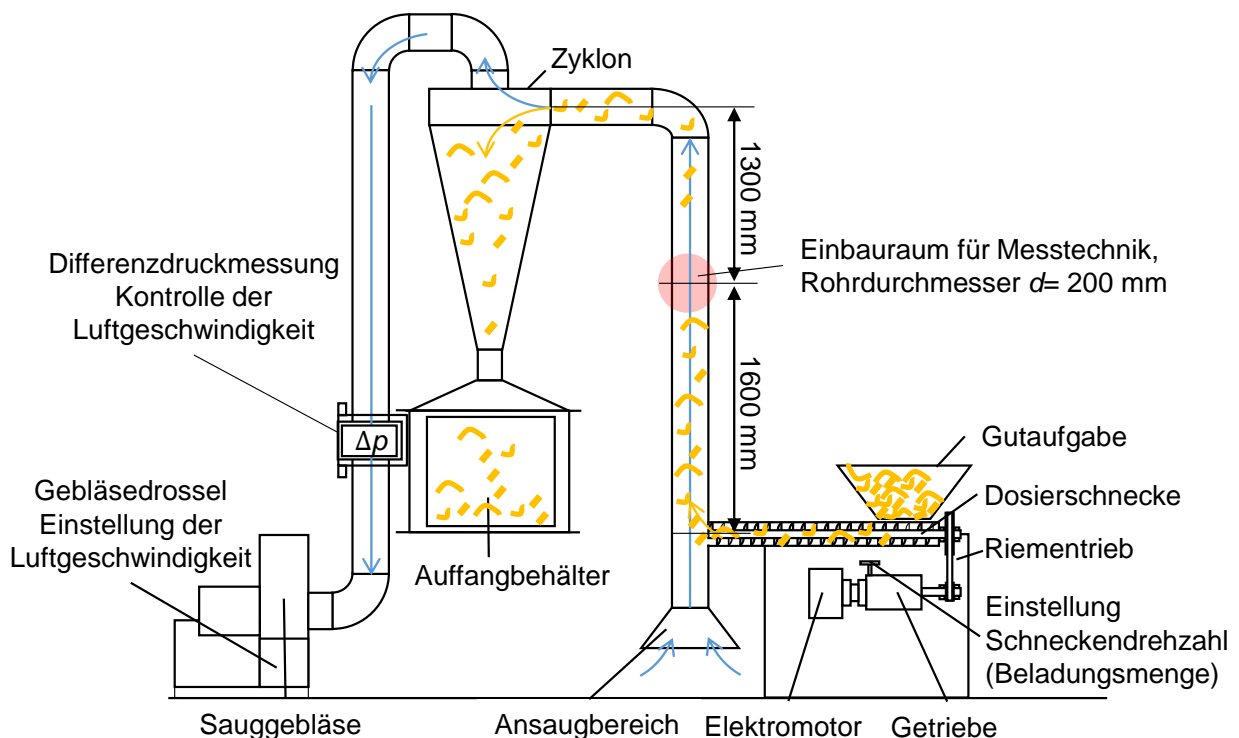
## 8 ANHANG

### 8.1 Bewertungsgrößen des Trennprozesses

$$\ddot{U}_{\text{Korn}} = \frac{m_{\text{Korn,Überkehr}}}{m_{\text{Korn,ges}}} \cdot 100 \% = \frac{m_{\text{Korn,Überkehr}}}{m_{\text{Korn,SK}} + m_{\text{Korn,Überkehr}}} \cdot 100 \% \quad (24)$$

$$\ddot{U}_{\text{NKB}} = \frac{m_{\text{NKB,Überkehr}}}{m_{\text{NKB,ges}}} \cdot 100 \% = \frac{m_{\text{NKB,Überkehr}}}{m_{\text{NKB,Abgang}} + m_{\text{NKB,SK}}} \cdot 100 \% \quad (25)$$

### 8.2 Messung der Geschwindigkeit einer beladenen Luftströmung



**Bild 97:** Prüfstand zur Messung der Geschwindigkeit einer beladenen Luftströmung

Die Beladungsmenge und Luftgeschwindigkeit ist über die Drehzahl der Dosierschnecke bzw. die Drosselung des Sauggebläses in Stufen einstellbar. Vor dem Sauggebläse ist eine Messblende installiert. Die Differenzdruckmessung erlaubt die Kontrolle der Luftgeschwindigkeit. Die Messverfahren werden direkt in das vertikale Rohr mit einem Innendurchmesser von  $d_{\text{Innen}} = 200 \text{ mm}$  installiert. Nach DIN EN ISO 5167-2 [187] erfüllt die Einlauf- bzw. Auslaufstrecke die zur Untersuchung einer Blende mit geringem Durchmessererhältnis erforderlichen Mindestabmessungen. Diese werden auch für die Untersuchung der Messverfahren als geeignet angesehen. Durch die Beladung und die installierte Schnecke wird ein turbulenter Charakter der Luftströmung im Einbauraum erwartet. Der gleiche Versuchsablauf ermöglicht dennoch einen Vergleich der

Messverfahren untereinander.

**Tabelle 10:** Eingestellte Luftgeschwindigkeiten und Beladungsmengen

Luftgeschwindigkeit / m/s	Massenstrom der Beladung / kg/s						
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6	Stufe 7
1	0,05	0,1	0,34	0,99	1,28	1,92	3,03
2	0,03	0,05	0,17	0,49	0,64	0,96	1,51
3	0,02	0,03	0,11	0,33	0,43	0,64	1,01
4	0,01	0,03	0,09	0,25	0,32	0,48	0,76
5	0,01	0,02	0,07	0,20	0,26	0,38	0,61
5,5	0,01	0,02	0,06	0,18	0,23	0,35	0,55
6	0,01	0,02	0,06	0,16	0,21	0,32	0,50

### 8.3 Heißfilm-Anemometrie

Bei der Messung der Luftströmung mit Hitzdraht- und Heißfilmanemometern wird die Luftgeschwindigkeit in Anströmrichtung gemessen. Eine räumliche Strömungsuntersuchung ist durch Drehung des Sensors in der Strömung möglich [91]. Das Messprinzip besteht in der Messung der Abkühlung des Sensors. Diese ist von der Luftgeschwindigkeit abhängig. Vorteile sind die hohe Empfindlichkeit bei kleinen Luftgeschwindigkeiten und aufgrund des kleinen Bauraums die mögliche Integration zwischen den Sieblamellen. Durch die geringe Wärmekapazität werden schnelle Ansprechzeiten erreicht, was dynamische Messungen ermöglicht. Spezielle Techniken erlauben zudem die Messung von gasförmigen Zweiphasenströmungen. Der Nachteil der Hitzdrahtanemometer ist die geringe mechanische Belastbarkeit. [88, 188, 189]

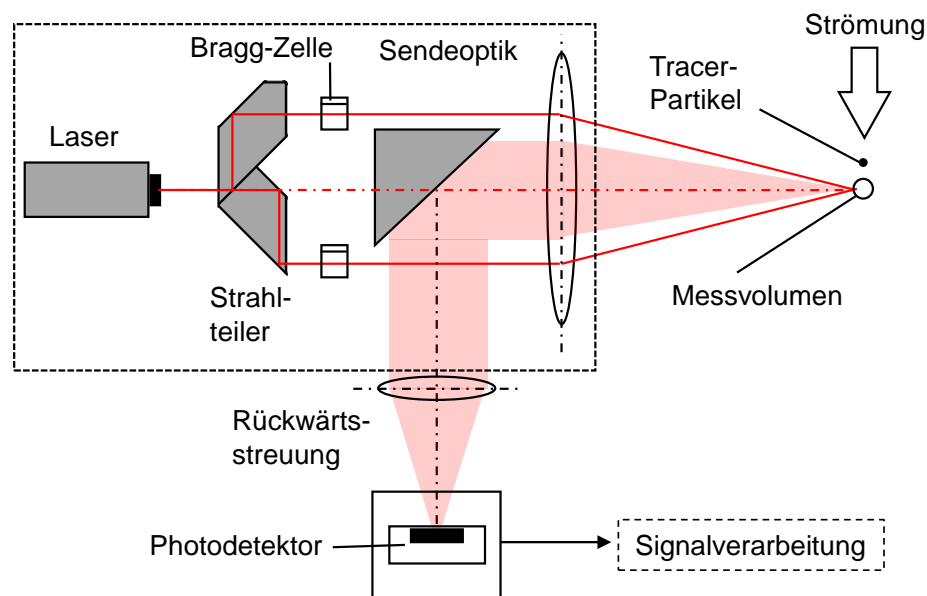
Als Messschaltungen werden das Konstantstrom- oder das Konstanttemperaturverfahren eingesetzt. Weitere Erläuterungen zum elektrischen Aufbau sowie Vor- und Nachteile befinden sich in [88, 188, 189].

### 8.4 Laser-Doppler-Anemometrie

Die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) als berührungsloses Messverfahren zur Messung der Luftgeschwindigkeit hat den Vorteil gegenüber den berührenden Messverfahren, dass die Strömung nicht durch das Einbringen von Sensoren verfälscht wird. Die Lasertechnik erlaubt Messungen bei geringem Bauraum. Deshalb kann es an Messstellen eingesetzt werden, wo berührende Messverfahren nicht installiert werden können. Das Messprinzip ist die Messung der Lichtstreuung an Partikeln, die sich schlupffrei mit der Luftströmung bewegen. Diese steht direkt in Zusammenhang mit der Partikelgeschwindigkeit. [188, 190]

Um die Schlupffreiheit sicherzustellen, haben die Partikel, die in die Strömung eingebracht werden, annähernd die gleiche Dichte wie das Strömungsmedium. Der Durchmesser liegt im Bereich  $d_{\text{Partikel}} = 0,1\text{--}10\ \mu\text{m}$ . Aufgrund der guten Eignung zur Erzeugung von stabilen Aerosolen bestehen diese häufig aus Flüssigkeiten wie Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) oder Pflanzenöl [191]. [188, 190]

Der prinzipielle Aufbau des LDA-Systems besteht aus zwei über einen Strahlteiler aufgeteilte Laserstrahlen, die sich im Messpunkt überlagern, **Bild 98** [188, 190]. Die aus den unterschiedlichen Richtungsvektoren des einfallenden Lichtes resultierenden dopplerverschobenen Lichtwellen werden als Rückwärtsstreuung vom Photodetektor erfasst. Die Überlagerung ergibt eine niederfrequente Doppler-Frequenz  $f_{\text{LDA}}$ . Diese enthält die Geschwindigkeitsinformation. [112, 177, 188, 190]



**Bild 98:** Prinzipieller Aufbau der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) nach [188]

Im Messvolumen bilden sich nach dem Interferenzstreifenmodell scharf abgegrenzte abwechselnde Bereiche hoher und schwächerer Lichtintensität mit definiertem Streifenabstand aus. Die Breite  $d_{\text{LDA}}$  ist von der Wellenlänge der Laserstrahlen  $\lambda_{\text{LDA}}$  und des Kreuzungswinkels  $\phi_{\text{LDA}}$  abhängig, **Gl. 26**. [112, 177, 188, 190]

$$d_{\text{LDA}} = \frac{\lambda_{\text{LDA}}}{2 \sin\left(\frac{\phi_{\text{LDA}}}{2}\right)} \quad (26)$$

Die Doppler-Frequenz  $f_{\text{LDA}}$  der Lichtstreuung eines Partikels, das sich mit der Geschwindigkeit  $v_{\perp}$  orthogonal durch das Interferenzstreifenmuster bewegt, ist anhand der Geometrie nach

**Gl. 27** definiert. [112, 177, 188]

$$f_{\text{LDA}} = \frac{v_{\perp}}{d_{\text{LDA}}} \quad (27)$$

Aus Gl. 26–27 ergibt sich die Partikelgeschwindigkeit, **Gl. 28**. Diese ermittelt sich ausschließlich anhand der Bestimmung der Doppler-Frequenz  $f_{\text{LDA}}$ , weshalb die Laser-Doppler-Anemometrie ein kalibrationsfreies Messverfahren ist. Die Wellenlänge  $\lambda_{\text{LDA}}$  des Lichts und der Kreuzungswinkel  $\phi_{\text{LDA}}$  sind bekannt. Die Bestimmung der Doppler-Frequenz erfolgt mittels Frequenzanalyse (z.B. Fast-Fourier-Transformation, FFT) des Messsignals. [112, 177, 188]

$$v_{\perp} = \frac{f_{\text{LDA}} \cdot \lambda_{\text{LDA}}}{2 \sin\left(\frac{\phi_{\text{LDA}}}{2}\right)} \quad (28)$$

Die Verwendung von Bragg-Zellen im Strahlengang der Laserstrahlen ermöglicht über eine feste Shift-Frequenz  $f_{\text{Shift}}$  eine Nullpunktverschiebung der Geschwindigkeitsskala und damit eine Bestimmung der Strömungsrichtung, **Gl. 29**. Zur gleichzeitigen Aufnahme weiterer Strömungskomponenten werden für jede Komponente separate LDA-Systeme benötigt, die entsprechend angeordnet werden. [177, 188]

$$v_{\perp} = \lambda_{\text{LDA}} \cdot \frac{f_{\text{LDA}} - f_{\text{Shift}}}{2 \sin\left(\frac{\phi_{\text{LDA}}}{2}\right)} \quad (29)$$

Das Messvolumen des LDA-Systems beschreibt räumlich einen Ellipsoiden. Die Abmessungen sind stark von der Brennweite (Entfernung Linse zu Messvolumen) und dem Linsenabstand der Strahlen abhängig. Dies hat ebenfalls Auswirkungen auf die Ausbildung der Interferenzstreifen.

## 8.5 Prüfstandseinstellungen zur Bestimmung der Stoffeigenschaften

- Drehzahl Hauptkanalgebläse:  $n_{\text{Gebel,HK}} = 1180 \text{ 1/min}$
- Drehzahl Fallstufengebläse:  $n_{\text{Gebel,FS}} = 480 \text{ 1/min}$
- Öffnungsweite Obersieb:  $w_{\text{OS}} = 15 \text{ mm}$
- Öffnungsweite Untersieb:  $w_{\text{US}} = 6 \text{ mm}$
- Siebfrequenz:  $f = 4,8 \text{ Hz}$
- Korn-NKB-Massenverhältnis:  $\check{s} = 75 : 25 \%$
- Aufgabepunkt VB:  $\check{l}_{\text{VB}} = 780 \text{ mm}$
- Aufgabepunkt RLB:  $\check{l}_{\text{RLB}} = 1520 \text{ mm}$
- Übergabepunkt VB-RLB:  $\check{l}_{\text{VB-RLB}} = 0 \text{ mm}$
- NKB-Anteil VB:  $\check{e}_{\text{NKB,VB}} = 50 \%$
- Kornanteil VB:  $\check{e}_{\text{Korn,VB}} = 70 \%$

## 8.6 Versuchsplan Miniaturprüfstand und Grundlagen-Reinigungsprüfstand

**Tabelle 11:** Versuchsplan 2D-Hochgeschwindigkeitsröntgen-Aufnahmen

Nr.	NKB-Durchsatz kg/(sm)	Luftgeschwindigkeit m/s	Froudezahl	Frequenz Hz
1	0,58	0	1,31	3,33
2	1,14	0	1,31	3,33
3	1,6	0	1,31	3,33
4	0,58	0,5	1,31	3,33
5	1,14	0,5	1,31	3,33
6	1,6	0,5	1,31	3,33
7	0,58	1	1,31	3,33
8	1,14	1	1,31	3,33
9	1,6	1	1,31	3,33
10	0,58	0,5	1	2,88
11	1,14	0,5	1	2,88
12	1,6	0,5	1	2,88
13	0,58	0	1	2,88
14	1,14	0	1	2,88
15	1,6	0	1	2,88
16	0,58	0	0,56	2,15
17	1,14	0	0,56	2,15
18	1,6	0	0,56	2,15

**Tabelle 12:** Versuchsplan 3D-Rekonstruktionen

Nr.	NKB-Durchsatz kg/(sm)	Luftgeschwindigkeit m/s	Froudezahl	Frequenz Hz
1	1,14	0	1,31	3,33
2	1,14	1	1,31	3,33

**Tabelle 13:** Zeitliche Reihenfolge zur Erstellung der 3D-Rekonstruktionen

Aufnahme vor Hub Zeit / s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0	0,3	0,61	0,91	1,21	1,52	1,82	2,12	2,42	2,73
Aufnahme vor Hub Zeit / s	11	12	13	14	15	20				
	3,03	3,33	3,64	3,94	4,24	5,76				

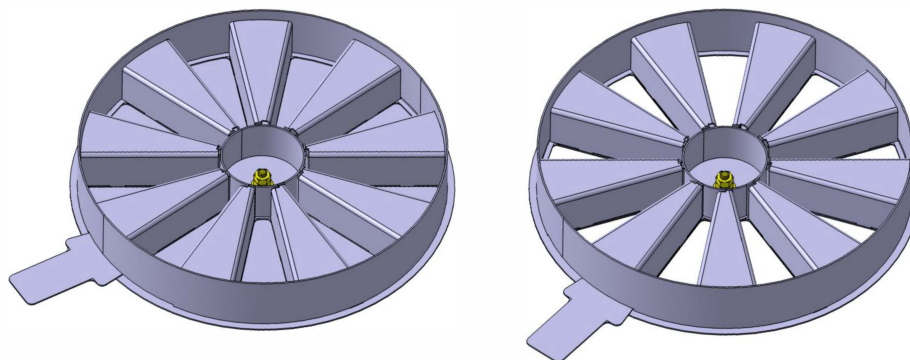
**Tabelle 14:** Versuchsplan Grundlagen Reinigungsprüfstand

Nr.	NKB-Durchsatz kg/(sm)	Amplitude		Luftgeschwindigkeit m/s	$t_{80}$ -Zeit s	max. Abscheidung %
		horizontal mm	vertikal mm			
1	0,58	10	30	0	2,4	91
2	1,14	10	15	0	6,3	67
3	0,58	10	15	0	7,2	88
4	1,6	10	15	0	17,6	52
5	0,58	10	0	0	35,8	85
6	1,14	10	0	0	240	71
7	1,6	10	0	0	547,8	54
8	0,58	5	0	0	1284	13
9	1,14	5	0	0	7956	2,59
10	1,6	5	0	0	7941	2
11	0,58	5	15	0	14,8	93
12	1,14	5	15	0	30,1	82
13	1,6	5	15	0	41,5	74
14	0,58	5	30	0	4,1	82
15	1,14	5	30	0	5,3	91
16	1,6	5	30	0	6,9	85
17	0,58	15	30	0	2,4	64
18	1,14	15	30	0	7,3	28
19	1,6	15	30	0	8,6	21
20	0,58	15	15	0	4,9	83
21	1,14	15	15	0	8,4	57
22	1,6	15	15	0	12,9	40
23	0,58	15	0	0	5,7	100
24	1,14	15	0	0	15,5	100
25	1,6	15	0	0	32	100
26	1,14	10	30	0	4	61
27	1,6	10	30	0	7,8	39
28	0,58	0	30	0	3,7	100
29	1,14	0	30	0	9,7	100
30	1,6	0	30	0	32,9	96
31	0,58	0	15	0	29,7	98
32	1,14	0	15	0	268,7	90
33	1,6	0	15	0	1575	22
34	0,58	0	15	1	10,1	99
35	1,14	0	15	1	48,1	98
36	1,6	0	15	1	193,7	73
37	0,58	0	30	1	3,8	100
39	1,14	0	30	1	6,9	100
40	1,6	0	30	1	11,4	100

Nr.	NKB-Durchsatz kg/(sm)	Amplitude		Luftgeschwindigkeit m/s	$t_{80}$ -Zeit s	max. Abscheidung %
		horizontal mm	vertikal mm			
41	0,58	5	30	1	3	100
42	1,14	5	30	1	3,9	100
43	1,6	5	30	1	5,7	100
44	0,58	5	15	1	7,2	100
45	1,14	5	15	1	11	100
46	1,6	5	15	1	13,9	100
47	0,58	10	0	1	9,5	100
48	1,14	10	0	1	43,6	100
49	1,6	10	0	1	91,3	86
50	0,58	10	15	1	5	100
51	1,14	10	15	1	7	93
52	1,6	10	15	1	9,5	78
53	0,58	10	30	1	2,9	94
54	1,14	10	30	1	5,3	58
55	1,6	10	30	1	4,9	61
56	0,58	15	30	1	1,9	88
57	1,14	15	30	1	3,6	49
58	1,6	15	30	1	7,3	32
59	0,58	15	15	1	2,7	100
60	1,14	15	15	1	7	72
61	1,6	15	15	1	7,1	55
62	0,58	15	0	1	3,4	100
63	1,14	15	0	1	12,8	100
64	1,6	15	0	1	15,9	100
65	0,58	0	30	1	2,6	100
66	1,14	0	30	1	5,4	100
67	1,6	0	30	1	6,9	100
68	0,58	0	15	1	8,1	100
69	1,14	0	15	1	28,2	100
70	1,6	0	15	1	48	93
71	0,58	15	0	2,5	4	99
72	1,14	15	0	2,5	7,6	97,6
73	1,6	15	0	2,5	9,7	100
74	0,58	15	15	2,5	3,1	100
75	1,14	15	15	2,5	3,8	90
76	1,6	15	15	2,5	4,2	75
77	0,58	15	30	2,5	2,8	84
78	1,14	15	30	2,5	3,1	74
79	1,6	15	30	2,5	4,3	66
80	0,58	10	30	2,5	2,2	87
81	1,14	10	30	2,5	2,8	87
82	1,6	10	30	2,5	3,3	82

Nr.	NKB-Durchsatz kg/(sm)	Amplitude		Luftgeschwindigkeit m/s	$t_{80}$ -Zeit s	max. Abscheidung %
		horizontal mm	vertikal mm			
83	0,58	10	15	2,5	3,7	100
84	1,14	10	15	2,5	3	97,9
85	1,6	10	15	2,5	3,5	100
86	0,58	10	0	2,5	5,5	100
87	1,14	10	0	2,5	12,3	98,9
88	1,6	10	0	2,5	24,9	100
89	0,58	5	0	2,5	18,9	84
90	1,14	5	0	2,5	85,3	90
91	1,6	5	0	2,5	134,1	79
92	0,58	5	15	2,5	3,3	100
93	1,14	5	15	2,5	3,6	96,71
94	1,6	5	15	2,5	4,3	97
95	0,58	5	30	2,5	3,2	100
96	1,14	5	30	2,5	3,6	92
97	1,6	5	30	2,5	4	87
98	0,58	0	30	2,5	3,7	94
99	1,14	0	30	2,5	3,9	93
100	1,6	0	30	2,5	4,5	94
101	0,58	0	15	2,5	3,4	98
102	1,14	0	15	2,5	3,8	97,93
103	1,6	0	15	2,5	4	98

### 8.7 Fächer-Dosierer



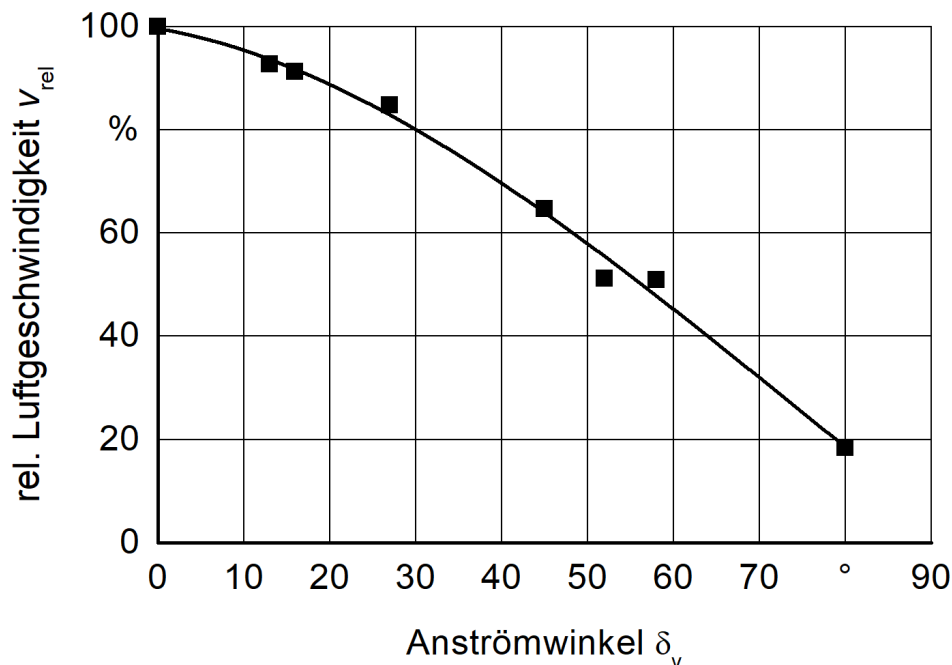
**Bild 99:** Fächer-Dosierer zur reproduzierbaren Aufgabe des Kornes in den Miniaturprüfstand

## 8.8 Grundeinstellungen des Reinigungsprüfstands bei der Versuchsdurchführung

**Tabelle 15:** Grundeinstellungen des Reinigungsprüfstands

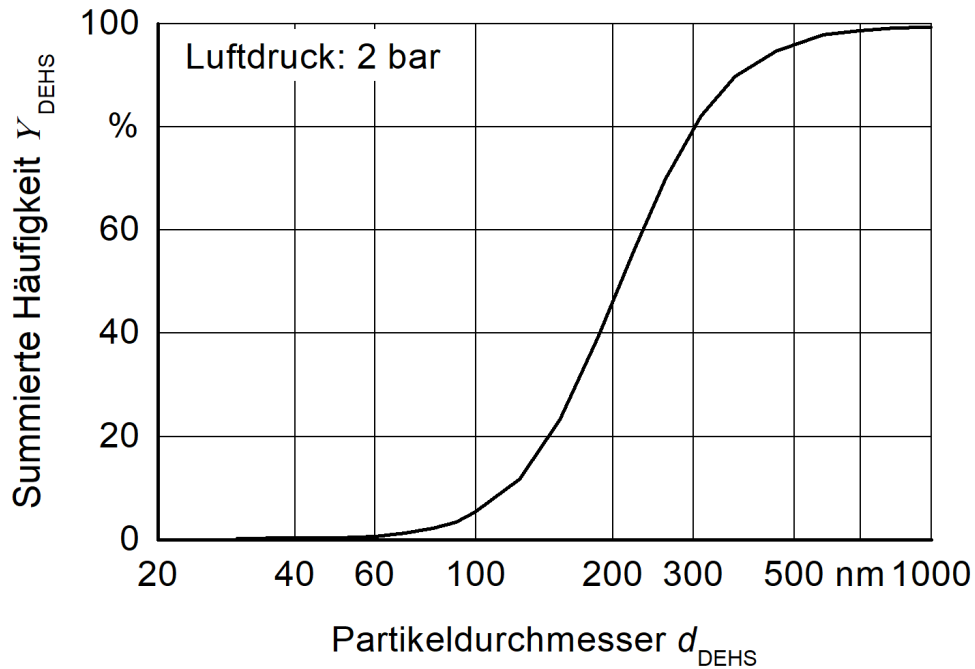
Parameter	Wert
Korn-NKB-Massenverhältnis $\check{s}$	75:25
NKB-Durchsatzverhältnis VB:RLB $\check{e}_{\text{NKB,VB}}:\check{e}_{\text{NKB,RLB}}$	50:50
Korn-Durchsatzverhältnis VB:RLB $\check{e}_{\text{Korn,VB}}:\check{e}_{\text{Korn,RLB}}$	70:30
spezifischer NKB-Durchsatz $\check{m}_{\text{NKB}}$	0,3–2,2 kg/sm
Gutaufgabepunkt VB $\check{l}_{\text{VB}}$	780 mm
Gutaufgabepunkt RLB $\check{l}_{\text{RLB}}$	1520 mm
Übergabepunkt VB-RLB $\check{l}_{\text{VB-RLB}}$	0 mm
Öffnungsweite Obersieb $w_{\text{OS}}$	15 mm
Öffnungsweite Untersieb $w_{\text{US}}$	6 mm
Neigung Vorbereitungsboden $\alpha_{\text{VB}}$	5°
Neigung Obersieb $\alpha_{\text{OS}}$	5°
Neigung Untersieb $\alpha_{\text{US}}$	6°
Gebäsedrehzahl 1.FS $n_{\text{Geb},\text{FS}}$	480 1/min $\equiv$ 0,29 m <sup>3</sup> /s
Gebäsedrehzahl HK $n_{\text{Geb},\text{HK}}$	1180 1/min $\equiv$ 0,63 m <sup>3</sup> /s
Anregungsfrequenz $f$	4,8 Hz

## 8.9 Spezifikation der Heißfilmsensoren



**Bild 100:** Einfluss des Anströmwinkels auf die gemessene Luftgeschwindigkeit

### 8.10 Mit dem LDA-Verfahren verwendete DEHS-Partikel

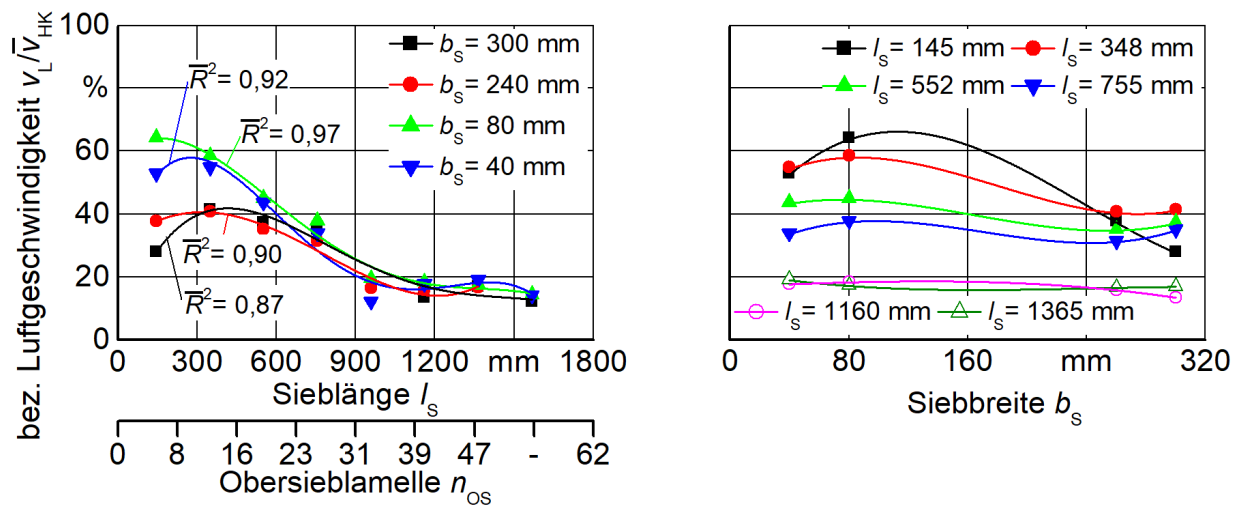


**Bild 101:** Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit vom Düsendruck

**Tabelle 16:** Technische Spezifikation des Partikelerzeugers

Einstellungsmerkmal	Wert
max. Arbeitsdruck	6 bar
verwendeter Arbeitsdruck	2 bar
Druckbereich der angeschlossenen Druckluft	2–6 bar
Abmessungen	260 x 310 x 220 mm <sup>3</sup>
Gewicht	4 kg
empfohlene Flüssigkeiten	DEHS, Pflanzenöle (Olive, Sonnenblume)
Anschluss Einlass	DN 7,2 männlich
Anschluss Auslass	19 mm
Produktionsrate	1,4—20 · 10 <sup>8</sup> 1/s
Anforderungen an verwendete Druckluft	ölfrei, Volumenstrom > 50 l/min

### 8.11 Einfluss der Siebanregung auf das Strömungsprofil



**Bild 102:** Einfluss der Breiten- und Längenverteilung auf das stationäre Strömungsprofil;  
 $f = 4, 8 \text{ Hz}$ ,  $\dot{m}_{NKB} = 0 \text{ kg/sm}$ ,  $n_{Gebel,HK} = 1180 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_{Gebel,FS} = 480 \text{ min}^{-1}$