

Entwicklung einer neuartigen Austrageinrichtung zur Steuerung der Verweilzeitverteilung in Schüttgutapparaten

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. (FH) Georg Franke

geb. am 26.05.1988 in Potsdam

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Evangelos Tsotsas (Vorsitz)
 Prof. Dr. Berend van Wachem (Gutachter)
 Dr.-Ing. Jochen Mellmann (Gutachter)
 Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Lothar Mörl (Gutachter)

eingereicht am: 23.03.2022

Promotionskolloquium am: 14.07.2022

Kurzfassung

Austrageinrichtungen sind das Kernstück der Behälterentleerung. Mit deren Hilfe lässt sich die Produktverweilzeit in Apparaten beispielsweise für die thermische Schüttgutbehandlung steuern. In der vorliegenden Arbeit wurde eine neuartige, ganzflächig wirkende Austrageinrichtung entwickelt und im halbertechnischen Maßstab praktisch erprobt. Der innovative Kern liegt im Arbeitsprinzip des Lösungsansatzes, nach dem sich mehrere, parallel liegende Öffnungsschlitze unabhängig voneinander freigeben lassen. Auf diese Weise kann der Austragsmassenstrom über dem Querschnitt der Austrageinrichtung örtlich und zeitlich variiert werden, wodurch die Verweilzeitverteilung im Schüttgutapparat beeinflusst wird. Im laufenden Schüttgutprozess kann damit künftig auf schwankende Prozessbedingungen reagiert und der Prozessverlauf optimiert werden. Mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode (DEM) wurde das Wirkprinzip der neuartigen Austrageinrichtung mathematisch modelliert. Dazu wurde ein 2D-DEM Modell entwickelt, mit dem die Partikelbewegung im Schüttgutapparat und die resultierenden Verweilzeitverteilungen in Abhängigkeit von Betriebsparametern analysiert wurden. Zur praktischen Untersuchung der Partikelbewegung und der Verweilzeitverteilung wurde eine Versuchsanlage im halbertechnischen Maßstab aufgebaut. Für die experimentelle Verweilzeitanalyse wurde eine Tracermethode basierend auf dem Prinzip der Farbpartikelanalyse entwickelt. Um die gemessenen und mit Hilfe des DEM-Modells simulierten Verweilverteilungen zu analysieren und vergleichen zu können, kam das Dispersionsmodell zur Anwendung. Mit Hilfe des Modellparameters der Bodensteinzahl wurde die Arbeitsweise der neuartigen Austrageinrichtung quantitativ bewertet. Zur Vorausberechnung des kontinuierlichen Austragsmassenstroms aus dem Schüttgutbehälter mittels der neuartigen Austrageinrichtung wurde eine empirische Gleichung hergeleitet. Hierzu wurde der bekannte Ansatz des British Materials Handling Board designspezifisch erweitert. Die entwickelten Methoden und die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bilden eine solide Grundlage für die Entwicklung des Designs und der Arbeitsweise ganzflächig wirkender Austrageinrichtungen. Mit Hilfe dieser neuartigen technischen Lösung können die Prozess- und Produktqualität von Schüttgutprozessen gesteigert werden.

Abstract

Discharge devices belong to the core components in many bulk solids processes. They significantly affect process and product quality by influencing the bulk solids flow directed to the outlet and particularly the residence time distribution (RTD). In the present work, a novel discharge device was designed and was practically tested at a semi-technical scale. This device comprises a locking mechanism that can individually release separate flows over the width of any rectangular bin cross-section. Thus, the discharge mass flow rate can be varied locally and temporally over the entire cross-section of the discharge device to control the residence time distribution in the apparatus. During the bulk solids process, this may lead to a real-time control of fluctuating process conditions to optimize the process flow. With the help of the Discrete Element Method (DEM), the operating principle of the new discharge device was mathematically modelled. For this purpose, a 2D-DEM model was developed and used to analyse the particle motion in the apparatus and the resulting residence time distributions as a function of operating parameters. For practical investigation of the particle motion and the RTD, a test facility was set up on a semi-technical scale. For the experimental RTD analysis, a tracer method was developed based on the principle of colour particle analysis. In order to analyse and compare the measured residence time distributions with the DEM simulated distributions, the dispersion model was used. With the help of the model parameter *Bodenstein number*, the operation of the novel discharge device was quantitatively evaluated. An empirical equation was derived to predict the continuous discharge rate from the novel discharge device. For this purpose, the known approach of the *British Materials Handling Board* was extended in a design-specific manner. The methods developed and the results of the present work take up a solid basis for the development of the design and operation mode of discharge devices that work over the entire cross-section. With the help of this novel technical solution, the process and product quality of bulk material processes can be increased.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	1
ABSTRACT	2
1 EINLEITUNG	5
1.1 PROBLEMSTELLUNG	5
1.2 ZIELSTELLUNG UND ARBEITSHYPOTHESEN	7
1.3 LÖSUNGSWEG	7
2 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER ERKENNTNISSTAND	10
2.1 AUSTRAGEINRICHTUNGEN IN SCHÜTTGUTPROZESSEN	10
2.2 BEANSPRUCHUNG VON SCHÜTTGUTBEHÄLTERN	13
2.2.1 SPANNUNGEN IM SILO-SCHAFT	13
2.2.2 SPANNUNGEN IM SILO-TRICHTER	14
2.3 BERECHNUNG DES AUSLAUFMASSENSTROMS	18
2.4 VERWEILZEITVERHALTEN IN SCHÜTTGUTBEHÄLTERN	20
2.4.1 EXPERIMENTELLE BESTIMMUNG	20
2.4.2 ANALYTISCHE AUSWERTUNG	21
2.5 MODELLIERUNG DER SCHÜTTGUTBEWEGUNG	23
2.5.1 GRUNDLAGEN DER DISKRETE ELEMENTE METHODE (DEM)	23
2.5.2 KONTAKTMODELLE	24
2.5.3 ANWENDUNG VON DISKRETE PARTIKELSIMULATIONEN	26
3 PROZESS- UND REGELUNGSTECHNISCHE ANFORDERUNGEN	28
4 MODELLIERUNG DES AUSTRAGSVERHALTENS	29
4.1 DEM-SIMULATION	29
4.2 VERWEILZEITMODELLIERUNG	32
5 EXPERIMENTE UND METHODEN ZUR UNTERSUCHUNG DER SCHÜTTGUTBEWEGUNG	34
5.1 BESTIMMUNG SCHÜTTGUTMECHANISCHER EIGENSCHAFTEN	34
5.1.1 VERSUCHSMATERIALIEN	34
5.1.2 PARTIKELGRÖßENVERTEILUNG	36
5.1.3 PARTIKELFORM	40
5.1.4 SCHÜTTDICHTEN	41
5.1.5 FLIEßEIGENSCHAFTEN	42
5.2 AUFBAU DER VERSUCHSANLAGEN	44
5.3 ERMITTLUNG DER AUSTRAGSCHARAKTERISTIK	48

5.4	EXPERIMENTELLE VERWEILZEITANALYSE	49
5.4.1	AUSWAHL DER MARKIERUNGSMETHODE	49
5.4.2	ERMITTLUNG DER VERWEILZEITVERTEILUNG	50
5.5	ERMITTLUNG DER SPANNUNGSVERLÄUFE	53
6	ENTWICKLUNG DER NEUARTIGEN AUSTRAGEINRICHTUNG	56
6.1	FLIEBTECHNISCHE GESTALTUNG	56
6.1.1	NEIGUNGSWINKEL DER EINBAUTEN	56
6.1.2	DIMENSIONIERUNG DER AUSLAUFÖFFNUNG	57
6.2	AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE	62
6.3	PARAMETRIERUNG DES VERSCHLIEßMECHANISMUS	64
6.3.1	EINSTELLUNG DER EFFEKTIVEN ÖFFNUNGSWEITE	64
6.3.2	BERECHNUNG DER AUSTRAGSZEIT UND EINSTELLUNG DER MOTOR-DREHZAHL	65
6.4	STEUERUNG DES SCHÜTTGUTMASSENSTROMS UND DER VERWEILZEITVERTEILUNG	68
6.4.1	INTERMITTIERENDE BETRIEBSWEISE	68
6.4.2	KONTINUIERLICHE ABSPEISUNG	71
7	NUMERISCHE UNTERSUCHUNG DER NEUARTIGEN AUSTRAGEINRICHTUNG	73
7.1	BERECHNUNG DER QUALITATIVEN SPANNUNGSVERLÄUFE IM SCHÜTTGUT	73
7.2	DISKRETE SIMULATION DER VERWEILZEITVERTEILUNG	76
8	EXPERIMENTELLE ERPROBUNG DER NEUARTIGEN AUSTRAGEINRICHTUNG	83
8.1	GLEICHMÄßIGKEIT UND DOSIERGENAUIGKEIT DER AUSTRAGUNG	83
8.1.1	GLEICHMÄßIGKEIT	83
8.1.2	DOSIERGENAUIGKEIT	86
8.2	AUSTRAGSCHARAKTERISTIK UND AUSTRAGSMASSENSTROM	88
8.3	BEEINFLUSSUNG DER VERWEILZEITVERTEILUNG	93
8.3.1	INTERMITTIERENDE BETRIEBSWEISE (KONVENTIONELLER BETRIEB)	93
8.3.2	REPRODUZIERBARKEIT DER VERWEILZEITVERTEILUNG	95
8.3.3	INTERMITTIERENDE BETRIEBSWEISE (ASYMMETRISCHE ANSTEUERUNG)	97
8.3.4	EINFLUSS DER STRÖMUNGSWEGLÄNGE UND DER AUSTRAGSZEIT	101
8.3.5	EINSATZ EINES ANDEREN VERSUCHSMATERIALS	105
8.3.6	VERGLEICH MIT KONVENTIONELLEN AUSTRAGSYSTEMEN	107
8.3.7	UNTERSUCHUNGEN AN EINEM TROCKNERSCHACHT IM LABORMAßSTAB	111
9	ZUSAMMENFASSUNG	120
10	SYMBOLVERZEICHNIS	122
11	LITERATURVERZEICHNIS	125
12	VERZEICHNIS DER BILDER UND TABELLEN	131
13	ANLAGEN	137

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Schüttgüter werden in zahlreichen Prozessketten der Grundstoffindustrie, der chemischen Industrie und der Baustoffindustrie aufbereitet, behandelt und gelagert. In Nachernte-prozessen der Landwirtschaft fallen diese als Massengüter wie Getreide, Ölfrüchte, Leguminosen oder Holzhackschnitzel an. Schüttgutprozesse können sowohl mechanische, thermische als auch biologische Verfahrensstufen beinhalten und werden oft in komplexen Apparaten¹ durchgeführt. In nahezu allen Schüttgutprozessen sind Austrageinrichtungen das Kernstück zur Behälterentleerung. Austrageinrichtungen haben jedoch nicht nur die Aufgabe einen Apparat kontinuierlich, diskontinuierlich oder dosiert zu entleeren. Bei vielen Verfahren wird durch Einbindung der Austrageinrichtung in die Prozesssteuerung der Schüttgut-massenstrom eingestellt und der Prozessablauf geregelt [1], [2]. Die Schüttgutbewegung wird dabei sowohl von der Art des Abspeisevorgangs als auch durch die vom Schüttgut auf Wände und Einbauten übertragenen Spannungen bestimmt [3]. Werden Neigungswinkel zu flach ausgelegt und Öffnungsquerschnitte zu klein dimensioniert, können:

- Kernfluss mit Schachtbildung oder
- die Entstehung kurzfristiger oder dauerhafter Brücken

über dem Öffnungsquerschnitt die Folge sein [4]. In der Vergangenheit und bis heute war und ist man daher gezwungen, das komplexe Zusammenspiel zwischen Schüttgutbewegung, Behälterauslegung und dem Austragen zu verstehen, um Fließprobleme zu vermeiden. Bei der Entleerung von Lagerbehältern (z. B. Silos oder Bunker) kommt es oft darauf an, den gesamten Behälterinhalt in Bewegung zu versetzen bzw. „Massenfluss“ zu erzeugen. Es ist allgemein bekannt, dass durch einseitige Bewegung des Öffnungs- und Verschließ-mechanismus der Austrageinrichtung bevorzugte Fließzonen entstehen können. Dies kann bei hygroskopischen Pulvern und Granulaten, die zur Zeitverfestigung [5] neigen, zur Bildung sog. „toter Zonen“ [6] oder von Bereichen signifikant langsamerer Fließgeschwindigkeit führen. Die Folgen sind:

- eine ungünstige Verteilung der Schüttgutspannungen, die zur Beeinträchtigung der Behälterstatik führen kann [7],
- eine inhomogene Produktverweilzeit, die sowohl bei der Lagerung als auch bei weiterverarbeitenden Verfahren zu einer ungleichmäßigen Produktqualität und einem ineffizienten Prozessablauf führt.

Bei thermischen Behandlungsverfahren und Aufbereitungsprozessen ist Massenfluss daher oft eine Grundvoraussetzung, um einen störungsfreien Prozessablauf aufrecht zu erhalten. Im Gegensatz zur Entleerung über einen großen Auslauftrichter (Bild 1-1, links) werden hier aus diesem Grund meist ganzflächig arbeitende Systeme mit mehreren Trichtern und Entleerungsvorrichtungen über dem Apparateboden eingesetzt (Bild 1-1, rechts). Mit dem Ziel, eine gleichmäßige und energieeffiziente Behandlung des Produktes zu erreichen, soll die simultane Freigabe aller Verschließmechanismen zu einer kolbenstrom-artigen Schüttgutbewegung im Apparat beitragen. Diese ist vor allem bei *Getreideschachttrocknern* in der Landwirtschaft [8], *Gegenstromkühlern* in Mischfutterwerken [9]–[11] oder *Schüttgutreaktoren* [12] von großer Bedeutung. Wie experimentelle Untersuchungen jedoch

¹ z. B. Produktvorwärmer, Kühler, Mischer, Reaktoren

belegen, sind z. B. in Getreideschachttrocknern (Bild 1-1, rechts) stark ausgeprägte Fließprofile und damit eine breite Verweilzeitverteilung zu beobachten [13], [14]. Diese führen zu einer Übertrocknung des Schüttgutes im Randbereich und einer Untertrocknung in der Kernzone des Apparates. Infolge der daran angepassten Prozessfahrweise der Betreiber werden Inhaltsstoffe von Produkten geschädigt, der Wirkungsgrad der Anlage gesenkt und der Energiebedarf auf diese Weise erhöht [15]. Hersteller solcher Anlagen versuchen dem entgegenzuwirken, indem sie u. a. die Gestaltung des Trocknerschachtes und das Design der Luftkanäle modifizieren.

Wie Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit zeigen, ist unterhalb des Trockner-schachtes, auf Höhe der Austrageinrichtung, eine ausgeprägte Geschwindigkeitsverteilung des Schüttgutes zu beobachten, die sich nach oben hin fortsetzt. Diese tritt auch ohne Einbauten im Apparateschacht auf und kann zu breiten Verweilzeitverteilungen führen. Bei einem Produkt- oder Chargenwechsel kann es dabei unter Umständen zur unkontrollierten Vermischung und Kreuzkontamination kommen. Gemäß der EU Richtlinie 178/2002 ist jedoch die Rückverfolgbarkeit von Lebens- und Futtermitteln „in allen Produktions-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen sicherzustellen“ [16], um im Krisenfall die „Quelle einer Verunreinigung“ [17] ausfindig zu machen. Aus den genannten Problemen der Praxis und den rechtlichen Anforderungen ergibt sich der Bedarf für die Verbesserung und Weiterentwicklung ganzflächiger Austrageinrichtungen.

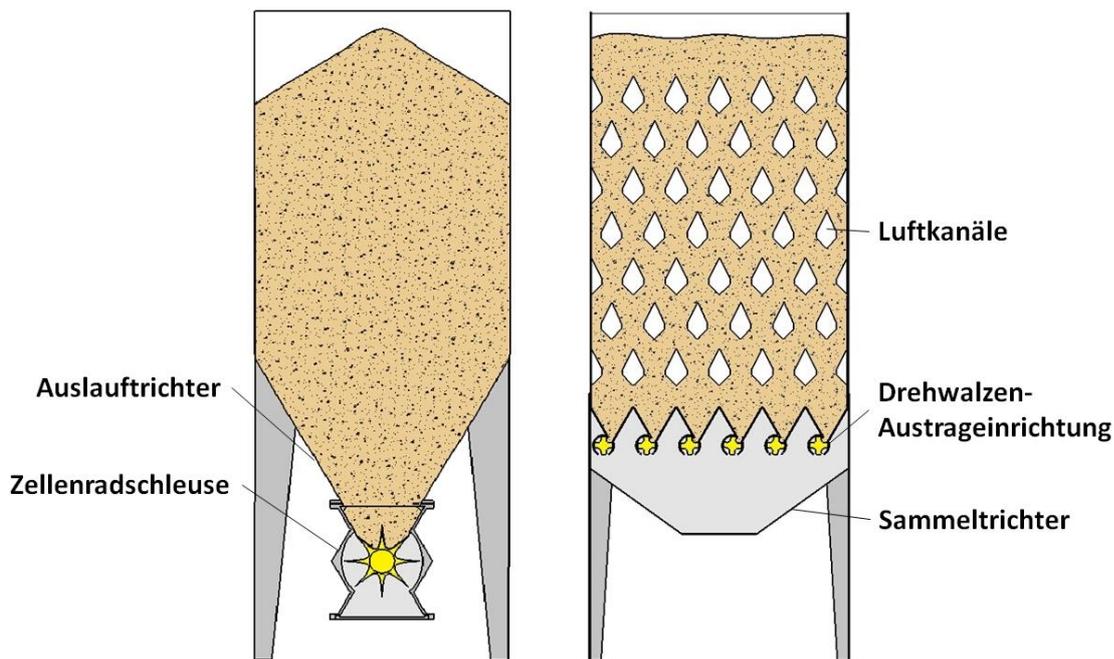


Bild 1-1: Schematische Darstellung eines Silos mit Auslauftrichter und nachgeschalteter Zellenradschleuse (links) und eines Durchlauftrockners mit einer über dem gesamten Apparatequerschnitt abziehenden Drehwalzen-Austrageinrichtung (rechts)

1.2 Zielstellung und Arbeitshypothesen

Wie in der Problemstellung gezeigt wurde, kann die Schüttgutbewegung in Schachtapparaten (trotz einer gleichmäßigen Austragung über dem gesamten Apparatequerschnitt) zu Störungen im Prozessablauf führen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht daher in der experimentellen Entwicklung einer neuartigen, ganzflächigen Austrageinrichtung speziell für rechteckige Apparatequerschnitte. Parallel zur konstruktiven Entwicklung sollen die nachfolgend aufgestellten Arbeitshypothesen überprüft werden:

1. Die in der Praxis bereits etablierten Schritte zur Auslegung eines Silotrichters und der Dimensionierung der Öffnungsweite lassen sich auf die konstruktive Gestaltung der neuartigen Austrageinrichtung und ihr innovatives Funktionsprinzip anwenden.
2. Der Austragsmassenstrom lässt sich uneingeschränkt mit Hilfe der neuartigen Austrageinrichtung steuern und über empirische Gleichungen vorausberechnen, um in Zukunft eine volumetrische Dosierung zu ermöglichen.
3. Die neuartige Austrageinrichtung ermöglicht eine gezielte örtliche Variation des Austragsmassenstroms. Auf diese Weise ist es möglich, die Verweilzeitverteilung in einem Schachtapparat zu steuern, um eine gleichmäßigere und auf den Prozess angepasste Schüttgutbewegung zu erzielen.
4. Durch Verlängerung der Austragszeit bestimmter Verschleißmechanismen kann das Verweilzeitverhalten optimiert werden und das Schüttgutfließverhalten dem eines idealen Strömungsrohrs angenähert werden. Die Modellierung und Bewertung der Verweilzeitverteilung gelingt durch Anpassung der Bodensteinzahl.
5. Mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode und durch Implementierung eines bereits validierten Schüttgutmodells ist es möglich, die Wirkungsweise der neuartigen Austrageinrichtung zu überprüfen.
6. Es gibt für unterschiedliche Produkte und Apparategestaltungen ein Optimum für den örtlich einzustellenden Austragsmassenstrom.

Mit der neuen technischen Lösung werden Verfahren der Schüttgutbehandlung und -aufbereitung in ihrer Prozessführung verbessert mit dem Ziel

- einer homogenen Konzentration an Inhaltsstoffen durch Schaffung einheitlicher Prozessbedingungen,
- einer gleichmäßigen Produktfeuchteverteilung über dem Auslassquerschnitt in Trocknungsprozessen,
- einer homogenen Temperaturverteilung, z. B. in Produktkühlern oder Schüttgutvorwärmern.

Die Prozesse werden dadurch energieeffizienter und wirtschaftlicher, die Produktqualität wird gesteigert.

1.3 Lösungsweg

Mit Hilfe etablierter Auslegungsschritte, wie sie bei der Gestaltung von Silos und Bunkern angewendet werden, wird in der vorliegenden Arbeit eine neuartige, autonome Austrageinrichtung entworfen und konstruiert. Diese soll an unterschiedlichen Schüttgutapparaten mit rechteckigem Querschnitt einsetzbar sein. Der hierbei verfolgte, technische Lösungsansatz

beinhaltet mehrere feststehende Leitbleche (im Bild 1-2 rot dargestellt), zwischen denen sich parallel liegende Auslauföffnungen über dem Apparatequerschnitt ergeben. Diese werden von einer innovativen Absperrvorrichtung verschlossen und beim Entleerungsprozess freigegeben. Die neuartige Austrageinrichtung grenzt sich durch die Bezeichnung „*ganzflächige Austrageinrichtung*“ [18] eindeutig von konventionell eingesetzten Austragsystemen unterhalb großer Auslaufrichter ab (vgl. Bild 1-1 links).

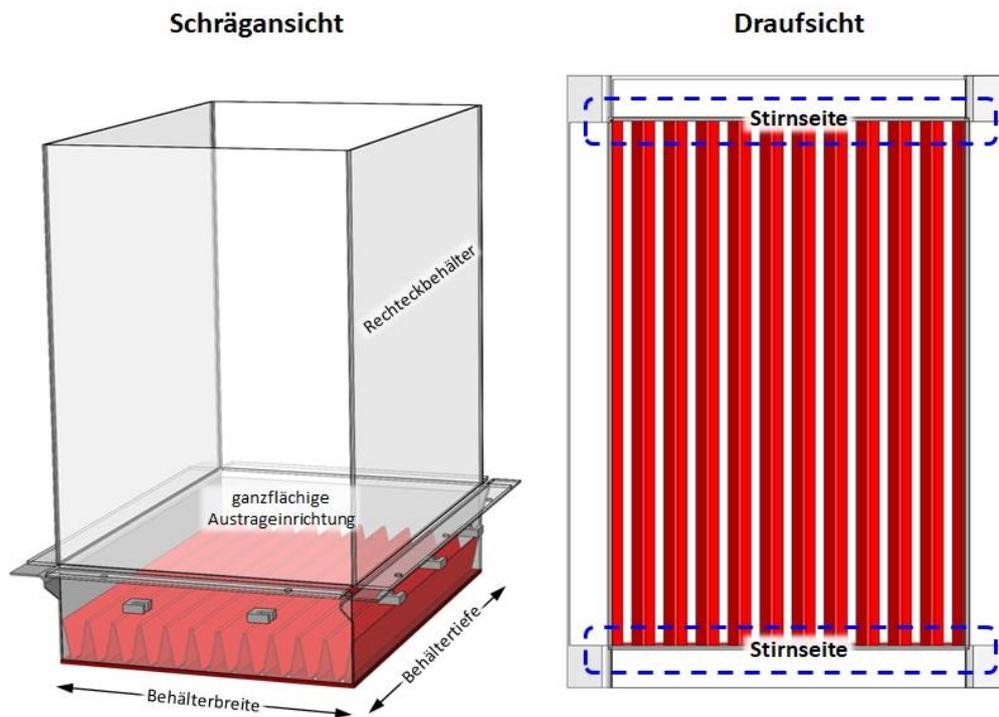


Bild 1-2: Ganzflächige Austrageinrichtung mit mehreren feststehenden Leitblechen (rot dargestellt)

Im Gegensatz zu bereits etablierten Absperrvorrichtungen unterhalb ganzflächiger Austrageinrichtungen (siehe Beispiele im Bild 2-3, Seite 12) wird der neuentwickelte Verschließmechanismus erstmals einen erweiterten Funktionsumfang besitzen: Durch die Möglichkeit, einzelne Verschließmechanismen (Bild 1-3) über der Breite des Schüttgutbehälters zeitlich und örtlich unabhängig anzusteuern, sollen die lokalen Massenströme durch die Auslauföffnungen an das Schüttgut und den Prozessablauf angepasst werden.

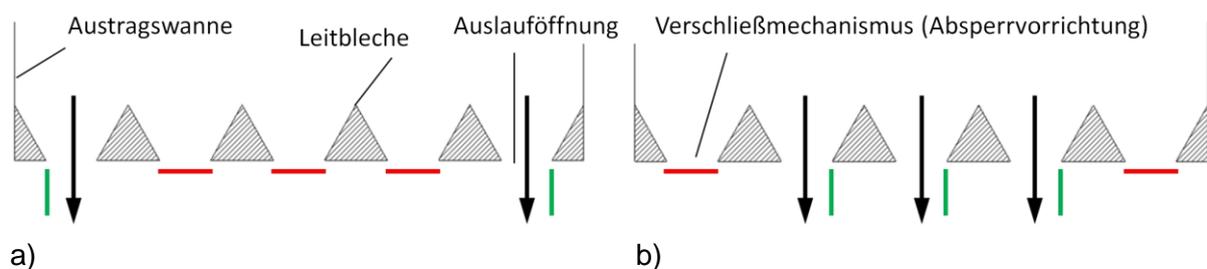


Bild 1-3: Beispielhafte Darstellung für die Ansteuerung der neuartigen Austrageinrichtung mit unabhängiger Freigabe (grün) der Verschließmechanismen in a) den Randbereichen und b) der Mitte

Auf diese Weise wird die Verweilzeitverteilung im Behälter oberhalb der Austrageinrichtung beeinflusst. Ist davon auszugehen, dass sich im inneren eines rechteckigen Schüttgutbehälters ein dreidimensionales, trichterförmiges Fließprofil mit entsprechender Verweilzeitverteilung vorfindet, so müsste die gezielte Einflussnahme mittels neuartiger Austrageinrichtung sowohl über der Breite, als auch über der Tiefe des Behälters erfolgen (vgl. Bild 1-2). Aufgrund der Komplexität der technischen Umsetzung wurde die Möglichkeit der örtlichen Ansteuerung auf die Einflussnahme über der Behälterbreite beschränkt. Dieser Ansatz ermöglicht bereits eine erhebliche Vergleichmäßigung der Schüttgutbewegung, von der indirekt auch ein Anteil in der Tiefe des Behälters beeinflusst wird.

Bei der Bewertung des technischen Lösungsansatzes kommen die experimentelle Verweilzeitanalyse und die Modellierung der Verweilzeitverteilung mit Hilfe der Bodensteinzahl zur Anwendung. Hierbei werden neben der neuartigen Austrageinrichtung auch konventionelle Systeme untersucht und die Ergebnisse in einem direkten Vergleich gegenübergestellt. Die experimentelle Erprobung der neuartigen Austrageinrichtung erfolgt an einem Rechtecksilo und einem Durchlauftrockner (mit Wiederbefüllung) im Technikumsmaßstab (1:5).

Die Schüttgutbewegung im Apparat einschließlich der Austrageinrichtung wird mit Hilfe der *Diskreten Elemente Methode* (DEM) modelliert. Das entwickelte 2D-DEM Modell wird verwendet, um das Funktionsprinzip der Austrageinrichtung zu simulieren und dessen Einfluss auf das Verweilzeitverhalten der Partikel zu analysieren. Diese Untersuchungen zielen auf die

- Schaffung einer Modellgeometrie der neuartigen Austrageinrichtung mit der Möglichkeit einer lokalen Abspeisung
- Simulation von einzeln und/oder paarweise bewegten Verschleißmechanismen über dem Apparatequerschnitt
- Analyse des Systemverhaltens (Austragsystem + Schüttgutbehälter) anhand von Verweilzeitverteilungen
- Bewertung von simulierten qualitativen Spannungsverläufen oberhalb der Austrageinrichtung im aktiven und passiven Spannungszustand.

Die entwickelten Modelle und experimentellen Methoden sind auf andere industrielle Schüttgüter und Anwendungen übertragbar.

2 Wissenschaftlich-technischer Erkenntnisstand

2.1 Austrageinrichtungen in Schüttgutprozessen

Für die Entleerung von Lager- und Aufbereitungsbehältern gibt es eine Vielzahl von Austrag- und Dosiervorrichtungen. Im *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik* [19] wird treffend formuliert, dass es nicht einfach möglich ist, eine Übersicht über alle verfügbaren Geräte zu geben. Die voranschreitende Entwicklung bringt immer mehr neue Systeme auf den Markt, die für verschiedene Schüttgüter und Anforderungen ausgelegt sein können. Eine Zusammenfassung der am häufigsten eingesetzten Systeme für Silos und Bunker nimmt Schulze in [6] vor. Einen wesentlich breiteren Überblick geben Stahl und Stadler [20], die zahlreiche Systeme nach ihren Prozessanforderungen einteilen. Im Bild 2-1 werden einige der in [6], [20], [21] beschriebenen Austrageinrichtungen nach der geometrischen Form des zu entleerenden Behälterquerschnitts eingeordnet.



Bild 2-1: Einteilung gängiger Austrageinrichtungen nach der Behältergestaltung

An freistehenden Rund- oder Rechtecksilos, aber auch in großen Silozellen finden sich häufig große Auslauftrichter, die den Behälterquerschnitt in Richtung der Austrageinrichtung verjüngen [22]. Dadurch kann der Verschleißmechanismus gegenüber einem Großteil vertikal wirkender Schüttgutspannungen entlastet werden.

Ferner sorgt u. a. die Anpassung des Trichterneigungswinkels an die Fließigenschaften des Schüttgutes dafür, dass sich bei Freigabe der Auslauföffnung der gesamte Behälterinhalt in Bewegung setzt bzw. Massenfluss erreicht wird. Die Fließigenschaften von Schüttgütern können eine immense Herausforderung an die Entleerung eines Behälters stellen. Bei zylindrischen Behältern übernehmen heute z. B. kegelförmige Schwingtrichter nicht nur die Rolle der dosierenden Austrageinrichtung. Mit Hilfe von Vibrationen arbeiten derartige Austrageinrichtungen gleichzeitig auch als Austragshilfe [23]. Was bei einigen Pulvern und Schüttgütern zum Fließen anregt, kann wiederum bei anderen Materialien zur Verdichtung

führen. Aus diesem Grund ist die Eignung eines jeden Austragsystems individuell für jedes Schüttgut zu bewerten.

Die Schüttgutbewegung und seine Geschwindigkeitsverteilung im Apparat werden durch die Gestaltung des Behälterschafts, des Trichters, der Einbauten und das Austragsgerät festgelegt. Bunker und Behälter mit großem Durchmesser ($D \gg H$) besitzen hingegen meist keinen Auslauf- oder Sammeltrichter. Hier versucht man das Schüttgut über dem gesamten Behälterquerschnitt abzuziehen [6, S. 382]. Entsprechend der geometrischen Grundform des Behälters kommen z. B. um die Behälterachse rotierende oder translatorisch bewegte Schneckenwellen oder Räumvorrichtungen zum Einsatz (Bild 2-2). In der Praxis sollten diese Austragsgeräte so betrieben werden, dass an jedem Ort des Behälterbodens möglichst die gleiche Menge Schüttgut abgezogen wird. Hierfür werden u. a. Schneckenwellen mit variabler Schneckensteigung eingesetzt, um einseitige Fließzonen zu vermeiden.

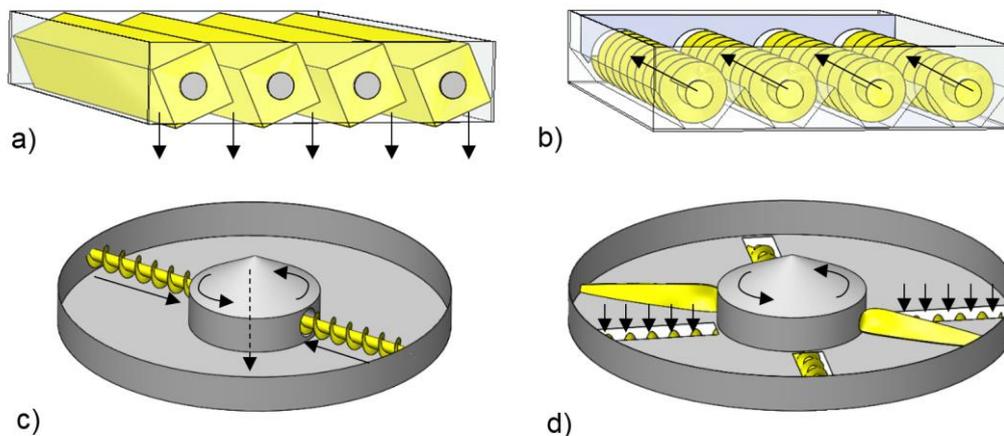


Bild 2-2: Prinzip-Skizze ganzflächig arbeitender Austrageinrichtungen mit a) Kippbalkenboden, b) Schneckenboden, c) rotierenden Schneckenwellen und d) rotierender Räumvorrichtung

Gegenstand dieser Arbeit sind Austrageinrichtungen, die die Vorzüge der ganzflächigen Entleerung (gleichmäßiger Schüttgutabzug) durch den Einsatz mehrerer, parallel liegender Auslauföffnungen und keilförmiger Trichter verfolgen (Bild 2-3). Erste Hinweise, einen Apparat über mehrere keilförmige Ausläufe bzw. Leitvorrichtungen zu entleeren, gehen auf das Jahr 1910 [24] zurück. Bis Mitte des 20. Jh. haben sich diese Systeme vor allem an Durchlauf- bzw. Schachttrocknern in der Landwirtschaft und in Gegenstromkühlern verbreitet und wurden weiterentwickelt [25]–[27]. Der konstruktive Aufbau mitsamt dem bewegten Verschließmechanismus (Bild 2-3, gelb) ist gegenüber herkömmlichen Siloaustragsystemen relativ komplex. Aus diesem Grund werden solche Systeme überall dort eingesetzt, wo sensible Schüttgüter (z. B. in der Lebens- und Futtermittelindustrie) behandelt oder einheitliche Produkteigenschaften erhalten bzw. erzielt werden sollen. In der Praxis unterscheiden sich derartige Austrageinrichtungen nach der Anzahl und den Dimensionen ihrer Öffnungsschlitzes, dem Trichterneigungswinkel, sowie den Verschließmöglichkeiten. Einen Überblick dazu gibt *Mühlbauer* in [28].

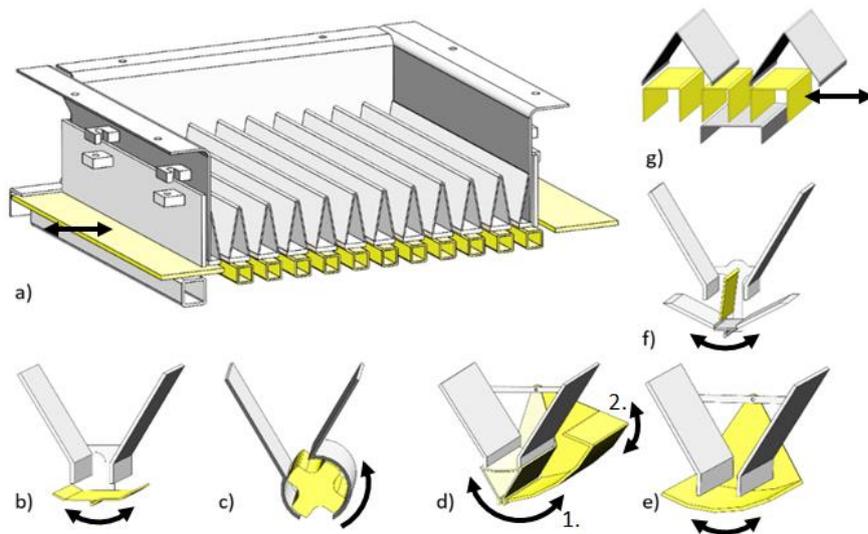


Bild 2-3: Beispiele für Verschlussmöglichkeiten von ganzflächigen Austrageinrichtungen mit einer Vielzahl keilförmiger Auslaufrichter a) Schieber bzw. Schlitzboden, b) Drehflügel, c) Drehwalze, d) Pendelschieber, e) Muschelschieber, f) Pendel, g) Dosierkammerschieber

Bei horizontal bewegten Schlitzböden (Bild 2-3a) bestimmt die Austragszeit den Massenstrom, der sich über den Auslauföffnungen im Behälter einstellt. Drehflügel-, Muschelschieber-, Pendel- oder Klappensysteme übernehmen diese Aufgabe durch periodische Bewegungen. Bei rotierenden Walzen und horizontal bewegten Dosierkammern bestimmen das Füllvolumen der Kammern und die Anzahl ausgeführter Umdrehungen bzw. Hubvorgänge die Austragsmenge. Die Ansteuerung erfolgt üblicherweise durch pneumatisch bewegte Zylinder oder mechanische Antriebe. Diese können sowohl translatorische Bewegungen als auch Rotationen über exzentrische Baugruppen [29] ausführen. Ganz gleich, mit welchem Verschlussmechanismus derartige Austrageinrichtungen ausgestattet sind, werden alle Auslauföffnungen immer zeitgleich freigegeben, um auf diesem Weg eine gleichmäßige Entleerung über dem Apparatequerschnitt umzusetzen.

Iroba und *Mellmann* [30], [31] führten experimentelle Untersuchungen an einem halbtechnischen Getreideschachttrockner mit ganzflächiger Austrageinrichtung durch. Mit Hilfe der experimentellen Verweilzeitanalyse unter Verwendung von Farbpartikeln und der diskreten Modellierung (DEM) der Schüttgutbewegung wurden Partikelgeschwindigkeitsprofile über der Trocknerbreite und Verweilzeitverteilungen ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass die Reibung an der Behälterwand und das konstruktive Design der Luftkanäle die Schüttgutbewegung in den wandnahen Bereichen abbremst, was in der Praxis zu einer ungleichmäßigen Trocknung führen kann. Auf diesen Ergebnissen aufbauend, folgten Untersuchungen mit Tracerpartikeln an unterschiedlichen Apparategestaltungen [32]–[34]. Bei allen Experimenten kamen Austrageinrichtungen, wie in Bild 2-3a und g) dargestellt, zum Einsatz. Die Arbeits- und Gestaltungsweise dieser ganzflächigen Austrageinrichtungen wurde dabei jedoch noch nicht in die Betrachtung der Ursachen und in den Optimierungsprozess mit einbezogen. Erste Untersuchungen, die Schüttgutbewegung in einem rechteckigen Apparatequerschnitt gezielt über mehrere Auslauföffnungen zu vergleichmäßigen gehen auf *Wehry* und *Pahl* [35] zurück, die das Fließen von Koks in einem Kühlschacht experimentell

untersuchten. In dem Verfahren der Koks-Trockenkühlung wird das Schüttgut über mehrere fest installierte Schurren und keilförmige Einbauten den Abwurfrippen zugeführt (ähnlich: „Muschelschieber“, Bild 2-3e). Mit Hilfe von eingefärbten Koks-Tracern verfolgten *Wehry* und *Pahl* die Partikelbewegung hinter einer Glasscheibe. Nach jedem Schüttgutaustrag wurde ein Foto vom Behälter aufgenommen und die Positionsveränderung der eingesetzten Tracer schrittweise mit einer Markierung an der Frontwand gekennzeichnet. Nach Zusammensetzung aller Einzelbilder zu einem Video konnten aus den Abständen der Markierungen und der Zeitinformation, „Geschwindigkeitsvektoren für die Schüttungsbewegung“ berechnet werden. Im Vergleich zur gleichzeitigen Freigabe aller Austragsöffnungen führte die Festlegung eines Abzugsprofils – mit unterschiedlichen Entleerungsmengen über der Behälterbreite – zu einer Vergleichmäßigung der Fließbewegung.

2.2 Beanspruchung von Schüttgutbehältern

2.2.1 Spannungen im Silo-Schaft

Für die Apparategestaltung ist es unumgänglich sich mit der Beanspruchung durch das Schüttgut auseinander zu setzen. Zum Thema dieses Kapitels liegen bereits tiefgreifende Untersuchungen und eine umfassende Literatur (u. a. zusammengefasst in [22]) vor. Nicht zuletzt ist die Bestimmung von Schüttgutspannungen, die auf Bau- und Tragwerke einwirken, in der *DIN EN 1991-4:2010-12 Teil 4: „Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter“* [36] standardisiert. Allgemein bekannt ist, dass Schüttgüter in der Lage sind Spannungen durch Reibung an Wände zu übertragen. Dadurch wirkt nur ein Teil des gesamten Behälterinhalts in Form einer Spannung σ_v in vertikaler Richtung auf den Behälterboden bzw. auf die Austrageinrichtung. Diese Spannung nimmt mit der Füllhöhe bis zu einem Grenzwert nach unten hin zu. Der andere Teil wird in Form einer horizontal wirkenden Normalspannung σ_h und einer Schubspannung τ_w von den Wänden getragen [6]. Erste wissenschaftliche Erkenntnisse zur Beschreibung der Schüttgutspannung gehen auf *Janssen* und *Koenen* [37] (Ende 19. Jhd.) zurück. Basierend auf seinen Erkenntnissen stellte *Janssen* in „Versuche über Getreidedruck in Silozellen“ [38] das Kräftegleichgewicht an einem Scheibenelement der inkrementellen Höhe dz auf (Bild 2-4) und formulierte daraus seine noch bis heute eingesetzte Gleichung zur Berechnung des *aktiven Spannungszustands* im senkrechten Behälterschaft (ohne Trichter). Dieser Zustand stellt sich nach der Befüllung des Behälters mit Schüttgut ein.

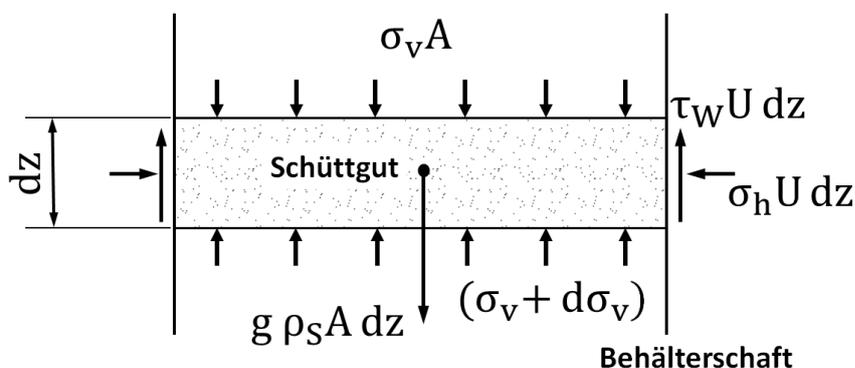


Bild 2-4: Kräftegleichgewicht am Scheibenelement im Behälterschaft (basierend auf *Schulze* in [6, S. 278])

Unter Annahme konstanter Schüttdichte ρ_s und konstanter, vertikaler Druckverteilung über der Querschnittsfläche A mit dem Umfang U ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht die allgemeine Form der *Janssen-Gleichung* zu

$$\sum F = 0 = -A(\sigma_v + d\sigma_v) + A\sigma_v - \tau_w U dz + g\rho_s A dz \quad . \quad (2.1)$$

Wobei hier τ_w die Wandschubspannung und g die Fallbeschleunigung sind.

Die schrittweise Umformung und Integration von Gleichung 2.1, siehe in [39, S. 192], liefert die für die Praxis anwendbare Formel zur Berechnung der Vertikalspannung σ_v , die auf den Behälterboden einwirkt

$$\sigma_v = \frac{g\rho_s A}{\lambda \tan \varphi_x U} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\lambda \tan \varphi_x U z}{A}} \right] \quad . \quad (2.2)$$

Für den Fall einer Druckspannung in Form einer definierten Auflast $\sigma_{v,0}$ von oben auf den Behälterinhalt ergibt sich nach [3, S. 17] folgender Ansatz

$$\sigma_v = \frac{g\rho_s A}{\lambda \tan \varphi_x U} + \left[\sigma_{v,0} - \frac{g\rho_s A}{\lambda \tan \varphi_x U} \right] \cdot e^{-\frac{\lambda \tan \varphi_x U z}{A}} \quad . \quad (2.3)$$

Der Parameter z beschreibt die Füllhöhe im Behälterschaft, φ_x den Wandreibungswinkel und λ das Horizontallastverhältnis. Letzterer Wert muss für die Berechnung z. B. wie in [40] experimentell bestimmt oder über die in [6, S. 288–289] erläuterten Zusammenhänge berechnet werden. Für hinreichend genaue Abschätzungen lässt sich das Horizontallast-Verhältnis auch aus Literaturwerten für das jeweilige Schüttgut beziehen. Sind das Horizontallastverhältnis und die Vertikalspannung σ_v bekannt, lässt sich die Horizontalspannung σ_h im Behälterschaft durch einfaches Umstellen des Horizontallast-verhältnisses wie folgt berechnen

$$\sigma_h = \lambda \cdot \sigma_v \quad . \quad (2.4)$$

2.2.2 Spannungen im Silo-Trichter

Bevor auf die Spannungen im Trichter näher eingegangen wird, sollen zunächst die Spannungsverläufe im gesamten Behälter betrachtet werden. Die *aktiven* (Befüllzustand) und *passiven* (Entleerungszustand) *Spannungszustände* in Massen- und Kernflusssilos werden in [22], [41] anhand angenommener Spannungsverläufe dargestellt und ermöglichen qualitative Rückschlüsse auf die Lastverteilung im Behälter. Bild 2-5a verdeutlicht, dass in einem Silo mit angenommener Trichterspitze der größte Teil der Schüttgutlast nach der Befüllung in vertikaler Richtung wirkt. Die mittlere Vertikalspannung σ_v erreicht ihr Maximum in der Behälterachse am Übergang zum Trichter. Dem Spannungsverlauf zu Folge nehmen senkrechte und geneigte Wände einen erheblichen Anteil der Last in Form der Wandnormalspannung σ_w auf. Letztere erreicht am Trichterübergang ihr Maximum und nimmt zur Trichterspitze hin ab. Durch den theoretischen Schüttgutabzug (Bild 2-5b) wird der Behälterinhalt in vertikaler Richtung entlastet.

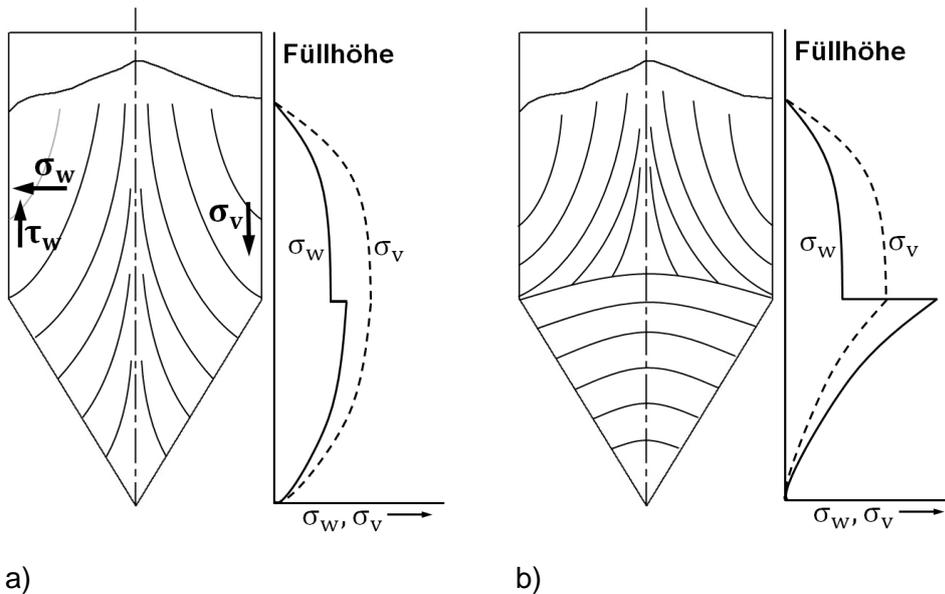


Bild 2-5: Spannungsverläufe in einem Massenflusssilo a) im aktiven Spannungszustand und b) im passiven Spannungszustand (basierend auf [22], [41])

Am Übergang zum Trichter wird das Schüttgut hingegen „zusammengedrückt“ [42]. Trägt man die Spannungen über der Füllhöhe des Behälters in einem Diagramm auf, so kommt es an der Schnittstelle zwischen Behälterschaft und Auslauftrichter zu einem lokalen Anstieg von σ_w . Dieser auftretende Sprung im Spannungsverlauf wird in der Literatur auch als „Switch“ [43] bezeichnet. Im Auslauftrichter nehmen „beide Spannungen zur gedachten Trichterspitze auf Null ab [...]“ [6]. Für Spannungsverläufe in Behältern mit mehreren Auslauftrichtern oder ganzflächige Austrageinrichtungen, wie sie in dieser Arbeit untersucht werden, gibt es bisher noch wenige Erkenntnisse. Unter anderem *Hager* [44] stellte bei der exzentrischen Befüllung eines Bunkers mit mehreren Auslässen fest, dass die Art der Befüllung einen Einfluss auf die Vertikalspannung nehmen kann. Darüber hinaus untersuchte *Strusch* [45] die Spannungen in einem Silo mit keilförmigem Einbau oberhalb der Austrageinrichtung. Es stellte sich heraus, dass derartige Einbauten zu einer Entlastung des bewegten Verschleißmechanismus führen können. Vergleichbare Zusammenhänge werden auch vom Einsatz mehrerer keilförmiger Auslauftrichter oberhalb des Verschleißmechanismus in ganzflächigen Austrageinrichtungen (Bild 2-3, S.12) erwartet. Eine qualitative Betrachtung erfolgt im Kapitel 5.5. Zur Berechnung der Spannungen im Befüllzustand eines Auslauftrichters gibt es unterschiedliche Herangehensweisen. Eine detaillierte Darstellung verschiedener Berechnungsansätze liefert *Motzkus* in [7]. Aufgrund der umfangreichen Herleitungen wird an dieser Stelle jedoch nur auf die von *Schulze* in [3], [6] zusammengefassten Ansätze der Scheibenelementmethode eingegangen. Das Kräftegleichgewicht um ein Scheibenelement im Trichter wird durch folgenden Ansatz beschrieben

$$d(A \sigma_v) + g \rho_s A dz = \sin(\theta) \sigma_w dA_M + \cos(\theta) \tau_w dA_M \quad (2.5)$$

Hierbei ist dA_M die Mantelfläche des Scheibenelementes und z deren axiale Position im Trichter (ausgehend von der gedachten Trichterspitze), an der die wirkende Spannung berechnet werden soll.

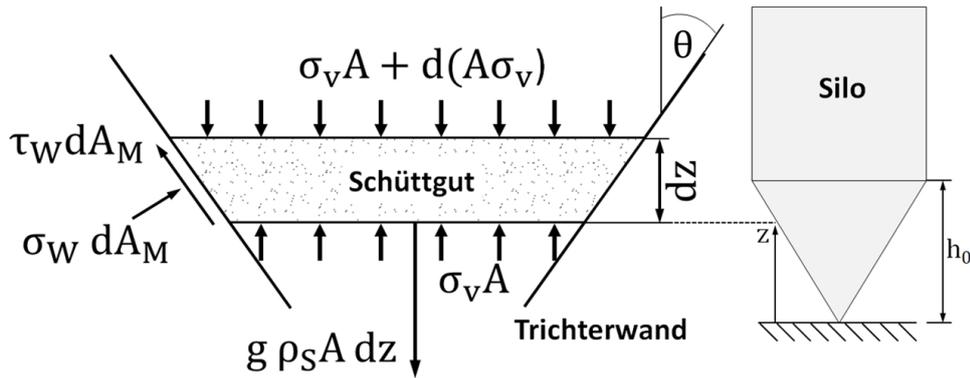


Bild 2-6: Kräftegleichgewicht am Scheibenelement im Trichter und schematische Darstellung der anzunehmenden Höhen des Trichters (basierend auf Schulze in [6, S. 291])

Nach den in [6, S. 292] beschriebenen Umformungen und Annahmen folgt aus Gl. 2.5

$$\frac{d\sigma_v}{dz} - \frac{\sigma_v}{z} \cdot n = -g\rho_s \quad . \quad (2.6)$$

Wobei der Parameter n neben den Fließeigenschaften des Schüttgutes auch die Gestaltung des Trichters berücksichtigt und sich über folgende Gleichung berechnet

$$n = (m + 1) \cdot \left[K \cdot \left(1 + \frac{\tau_w/\sigma_w}{\tan\theta} \right) - 1 \right] \quad . \quad (2.7)$$

Für keilförmige Trichter wird der Formfaktor $m = 0$ und für konische Trichter $m = 1$ gewählt. Das Verhältnis τ_w/σ_w kann an dieser Stelle auch über den Tangens des Wandreibungswinkels φ_x angegeben werden ($\tan\varphi_x = \tau_w/\sigma_w$). Der Parameter K beschreibt das Verhältnis der mittleren Wandnormalspannung σ_w zur Vertikalspannung σ_v . Nach Motzkus wird zur Bestimmung von K geprüft, ob durch die Trichterneigung θ „Gleitbruch an der Wand oder Materialbruch vorliegt“ [7, S. 166]. Dazu wird der Grenzwinkel θ_F wie folgt berechnet

$$\theta_F = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{\sin\varphi_x}{\sin\varphi_e}\right) \quad . \quad (2.8)$$

Für Gleitbruch ($\theta \leq \theta_F$) ergibt sich

$$K = \frac{1+\lambda_F}{2} - \frac{1-\lambda_F}{2} \cos(2\theta) + \mu_F \lambda_F \sin(2\theta) \quad . \quad (2.9)$$

Für Materialbruch ($\theta > \theta_F$) gilt

$$K = \frac{1+\lambda_{iF}}{2} - \frac{1-\lambda_{iF}}{2} \cos(2\theta) + \mu_{iF} \lambda_{iF} \sin(2\theta) \quad . \quad (2.10)$$

Die dimensionslosen Spannungsverhältnisse $\mu_F, \lambda_F, \mu_{iF}, \lambda_{iF}$ berechnen sich nach [3, S. 30] wie folgt

$$\mu_{iF} = \tan\varphi_x \quad (2.11)$$

$$\lambda_{iF} = \frac{1 - \sin^2\varphi_x - \sqrt{(1 - \sin^2\varphi_x)(\sin^2\varphi_e - \sin^2\varphi_x)}}{1 + \sin^2\varphi_x + \sqrt{(1 - \sin^2\varphi_x)(\sin^2\varphi_e - \sin^2\varphi_x)}} \quad (2.12)$$

$$\lambda_F = \frac{\{\tan(90^\circ - \theta) - \mu_{iF}\} - \mu_{iF} \lambda_{iF} \{1 + \mu_{iF}^2 - [\tan(90^\circ - \theta) - \mu_{iF}]^2\}}{\tan(90^\circ - \theta)(1 + \tan(90^\circ - \theta) \cdot \mu_{iF})} \quad (2.13)$$

$$\mu_F = \mu_{iF} \frac{\lambda_{iF}}{\lambda_F} \quad (2.14)$$

Damit kann K entsprechend Gleichung 2.9 bzw. 2.10 berechnet und in 2.7 eingesetzt werden. Zur Berechnung von σ_v an einer beliebigen Stelle z des Trichters werden im nächsten Schritt der Parameter n und die oberhalb der Trichterhöhe h_0 wirkende Auflast σ_{v0} in die allgemeine Lösung von 2.6 eingesetzt

$$\sigma_v = \frac{g \rho_s z}{n-1} + \left[\sigma_{v0} - \frac{g \rho_s h_0}{n-1} \right] \cdot \left[\frac{z}{h_0} \right]^n \quad \text{für } n \neq 1 \quad (2.15)$$

und

$$\sigma_v = \sigma_{v0} \cdot \frac{z}{h_0} + g \rho_s z \ln \left[\frac{h_0}{z} \right] \quad \text{für } n = 1. \quad (2.16)$$

Berechnungsmodelle für den passiven Spannungszustand liefern u. a. *Enstad* [46], *Benink* [47] und *Jenike* [48], [49]. Auf die Ausführung der entsprechenden Berechnungen wird an dieser Stelle verzichtet. Einen Überblick und umfangreiche Untersuchungen hierzu liefert *Schulze* in [3]. Es gibt eine Vielzahl von Produkteigenschaften (z. B. Partikelform, -Größe, -Feuchte) [50], die das Fließverhalten von Schüttgütern und damit die Spannungsverteilung in einem Behälter beeinflussen können. *Schulze* [6, S. 35] formuliert treffend, dass der Aufwand für eine allgemeingültige Zusammenfassung aller Schüttgüter mit ihren Eigenschaften daher nahezu unmöglich ist. Aus diesem Grund sind experimentelle Untersuchungen zur Schüttgutspannung in Silos und Bunkern noch immer Gegenstand aktueller Forschungen [51]. Um den experimentellen Aufwand zu verringern, finden darüber hinaus auch kontinuumsmechanische Modelle wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die darin implementierten Stoffmodelle ihre Anwendung [52].

2.3 Berechnung des Auslaufmassenstroms

Es gab in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl von Forschungsarbeiten [53]–[59], die sich mit der Bestimmung einer allgemein gültigen (Vorhersage-) Gleichung zur Berechnung des Auslaufmassenstroms für Schüttgüter auseinander gesetzt haben. Ein bis heute etablierter Ansatz ergibt sich aus den Gesetzen, die für Flüssigkeiten hergeleitet worden sind, auch wenn beide Medien in ihrem mechanischen Verhalten unterschiedlicher nicht sein könnten, siehe [6, S. 13]. Der Massenstrom \dot{M} einer Flüssigkeit ergibt sich aus der Querschnittsfläche A der Auslauföffnung, der Dichte ρ_F des Fluides und seiner Strömungsgeschwindigkeit v zu

$$\dot{M} = A \cdot \rho_F \cdot v \quad . \quad (2.17)$$

Aus der Bernoulli-Gleichung leitete *Torricelli* eine Gleichung zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit einer reibungsfreien Flüssigkeit her (siehe in [60]). Da der vertikale Druck proportional mit der Füllhöhe steigt, ist die Fließgeschwindigkeit am Austritt proportional zur Füllhöhe des Behälters. Im Gegensatz dazu ist bei Schüttgütern die Ausfließgeschwindigkeit ab einer gewissen Höhe unabhängig vom Druck, da dieser in Form von Spannungen an Wände übertragen wird. Eine Proportionalität der Ausfließgeschwindigkeit besteht hier zum Durchmesser D des kreisförmigen Öffnungsquerschnittes

$$v \propto \sqrt{gD} \quad . \quad (2.18)$$

Einsetzen von Gl. 2.18 in Gl. 2.17 ergibt

$$\dot{M} = A \cdot \rho \cdot \sqrt{gD} \quad . \quad (2.19)$$

Die vom Schüttgut durchlaufende Querschnittsfläche A der Auslauföffnung in Gl. 2.19 wird üblicherweise durch das Quadrat des Öffnungsdurchmessers D^2 angenähert. Daraus ergibt sich folgende Gleichung

$$\dot{M} = \rho_S \cdot g^{0,5} \cdot D^{2,5} \quad . \quad (2.20)$$

Der Auslaufmassenstrom von Schüttgütern ist praktisch gesehen nur solange unabhängig von der Füllhöhe, bis sich diese auf ein kritisches Minimum oberhalb der Austrageinrichtung verringert hat. Zudem nimmt während der Entleerung die Schüttdichte im verbleibenden Schüttgutsegment deutlich ab. Nach *Myers* und *Sellers* [53] ist dieses kritische Minimum erreicht, wenn die Füllhöhe der Öffnungsweite W_0 des Auslaufs entspricht. In anderen Quellen [54] wird die kritische Füllhöhe hingegen an dem Punkt der Trichterweite W angegeben, an dem gilt

$$W = 2,5W_0 \quad . \quad (2.21)$$

Wilms [22] empfiehlt ein Silo daher nie ganz zu entleeren, um einen konstanten Massenstrom beizubehalten. Nach *Schulze* [6] geht die Annahme auf *Hagen* (1852) zurück, nach der die vom Schüttgut durchlaufene, effektive Querschnittsfläche kleiner ist als die Auslauföffnung selbst (vgl. Bild 2-7). Aus diesem Grund wird der Auslaufdurchmesser (Öffnungsweite) in

Gleichung (2.20) noch um einen Term reduziert, der sich aus dem Partikeldurchmesser δ beim Passieren der Auslauföffnung und dem Partikelformfaktor $k = 1,6$ für runde und $k = 2,4$ für nicht runde Partikel berechnet [61].

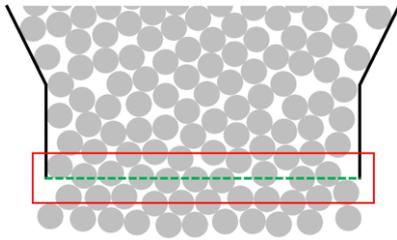


Bild 2-7: „Effektive Öffnungsweite“ beim Passieren der Partikel (basierend auf *Janda* in [55])

Beverloo [58] führte Auslaufversuche mit kohäsionslosen Schüttgütern (u. a. Weizen, Raps, Sojabohnen, Zucker) durch. Als Ergebnis seiner Untersuchungen zeigte sich, dass Gleichung (2.20) neben dem Partikelformfaktor k noch um eine empirische Konstante C ergänzt werden muss, die die Form des Öffnungsquerschnittes berücksichtigt

$$\dot{M} = C \cdot \rho_s \cdot g^{0,5} \cdot (D - k \cdot \delta)^{2,5} \quad . \quad (2.22)$$

Für Trichter mit rundem Öffnungsquerschnitt wird folgender Ansatz gewählt

$$\dot{M} = C \cdot \rho_s \cdot \sqrt{g} \cdot (D - k \cdot \delta)^{2,5} \cdot F \quad \text{mit } C = 0,58 \quad . \quad (2.23)$$

Für keilförmige Trichter mit rechteckigem Öffnungsquerschnitt findet man im *British Materials Handling Board* [62] basierend auf [53] folgenden Ansatz

$$\dot{M} = C \cdot \rho_s \cdot \sqrt{g} \cdot (L - k \cdot \delta)(B - k \cdot \delta)^{1,5} \cdot F \quad . \quad (2.24)$$

Wobei L die Länge und B die Breite der Auslauföffnung beschreiben und die Form des rechteckigen Öffnungsquerschnitts empirisch mit $C = 1,03$ beschrieben wird. Der Parameter F berücksichtigt nach *Rose* und *Tanaka* [56] noch den Neigungswinkel θ bzw. den halben Öffnungswinkel des Trichters, welcher wie folgt bestimmt wird

$$F = (\tan \theta)^{-0,35} \quad (2.25)$$

und für Neigungswinkel $\theta \geq 45^\circ$ zu $F = 1$ gesetzt werden kann.

Für ganzflächig wirkende Austragsysteme mit mehreren, parallel angeordneten keilförmigen Auslauftrichtern ($C = 1,03$) erweiterten *Mellmann* und *Teodorov* [61] Gleichung 2.24 um die Anzahl N der Auslauföffnungen. Mit Gleichung 2.25 und dem Parameter N ergibt sich aus Gl. 2.24 folgender Ansatz

$$\dot{M} = C \cdot \rho_s \cdot \sqrt{g} \cdot N \cdot (L - k \cdot \delta)(B - k \cdot \delta)^{1,5} \cdot (\tan \theta)^{-0,35} \quad . \quad (2.26)$$

Die Gültigkeit von Gl. 2.26 konnte experimentell im Rahmen von Versuchen an einem Trocknerschacht mit Weizen nachgewiesen werden [60]. Berechnungsgrundlagen zur Beschreibung des Auslaufverhaltens kohäsiver Schüttgüter gibt *Johanson* in [59].

2.4 Verweilzeitverhalten in Schüttgutbehältern

2.4.1 Experimentelle Bestimmung

Für kontinuierlich ablaufende Prozesse ist die Bestimmung der Aufenthaltszeit eines Stoffstroms² von großer Bedeutung, um bei gleichbleibendem Durchsatz und konstanten Prozessbedingungen einheitliche Produkteigenschaften zu erzielen. Die Aufenthaltszeit wird üblicherweise als Verweilzeit bezeichnet. Aus deren mathematischen Beschreibung ergeben sich Verweilzeitmodelle, die insbesondere in der Misch- und Reaktionstechnik Anwendung finden [63]. Beim Entleerungsprozess von Schüttgutbehältern lassen sich aufgrund der Behältergestaltung, Einbauten und der Austrageinrichtung ausgeprägte Geschwindigkeitsprofile feststellen, die ebenso durch eine Verweilzeitverteilung gekennzeichnet sind. Zur experimentellen Bestimmung der Verweilzeitverteilung wird eine Markierungssubstanz (Tracer) mit Hilfe von Farbstoffen, Elektrolyten oder radioaktiven Substanzen am Prozesseingang aufgegeben [64], [65]. Am Prozessausgang wird deren Konzentration (ähnlich einem Antwortsignal in der Regelungstechnik) als zeitlicher Verlauf gemessen. Wie in Bild 2-8 dargestellt, kann die Traceraufgabe in Form eines Impulses (Dirac-Stoß) oder als Sprungfunktion [65] erfolgen.

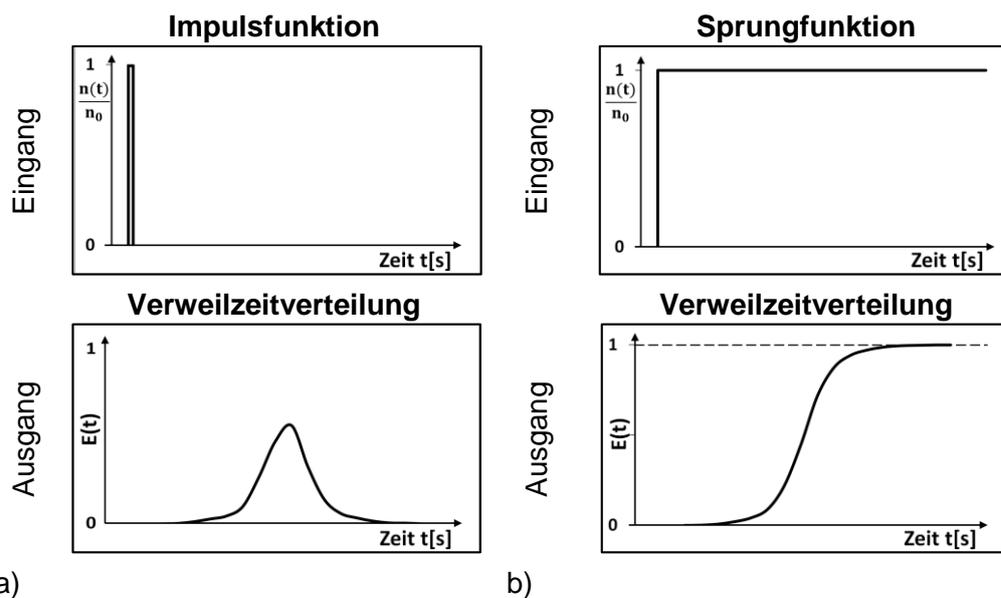


Bild 2-8: Eingangssignale (oben) und Antwortsignale als Verweilzeitverteilungen (unten)

Die Antwortfunktion $E(t)$ auf einen Tracer-Impuls am Eingang verdeutlicht (Bild 2-8a), dass sich in der Realität einige Tracerteilchen schneller durch den Apparat hindurchbewegen als andere. Bei Aufgabe einer Sprungfunktion ergibt sich erwartungsgemäß eine Antwortfunktion, die der in b) dargestellten Verweilzeitverteilung entspricht. Die Erfassung des Antwortsignals kann gegenüber der Aufgabe am Eingang eine große Herausforderung darstellen. In vielen Fällen ist es kaum möglich, das Tracermaterial am Ausgang vom restlichen Schüttgut zu trennen - das manuelle Auszählen unzumutbar. *Eichler* und *Dau* [66] untersuchten das Verweilzeitverhalten von Kunststoffgranulaten in einem Schwerkraftmischer. Am Eingang

² z. B. Stoffströme der chemischen-, der Kunststoff-, der Pharma- oder der Lebensmittelindustrie [147]

wurden schwarze Farbpartikel, die sich vom restlichen weißen Material absetzen, eingebracht. Hinter dem Mischer befand sich eine Vibrationsrinne mit Kamerasystem, mit dem Momentaufnahmen der vereinzelt Partikeln gemacht wurden. Mit Hilfe einer Grauwertbestimmung wurden die digitalisierten Bilder ausgewertet und anhand einer Kalibrierfunktion der Konzentration von Tracerpartikeln zugeordnet (Bild 2-9).

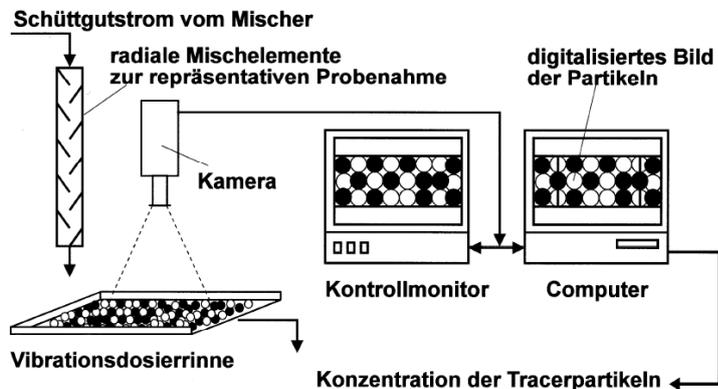


Bild 2-9: Messung der Konzentration schwarzer Kunststofftracer (Quelle: *Dau* [67])

Tucker und *Withers* [68] verwendeten Hall-Sensoren, um die Verweilzeit von Karottenwürfeln am Ausgang eines Sterilisations-Prozesses zu bestimmen. In einigen der Würfel wurden temperaturbeständige Keramik-Magnete eingebracht. Die „Konzentration“ dieses Tracermaterials wurde in Form einer induzierten Spannung eines Magnetfeldes erfasst. *Mellmann* et. al. [31] ermittelten die Verweilzeitverteilung an einem Getreideschachttrockner an Weizen und verglichen die experimentellen Ergebnisse mit denen aus DEM-Simulationen. Als Tracermaterial wurden rot eingefärbte Weizenkörner verwendet. Der Tracer wurde in Form einer horizontalen, dünnen Schicht am Trocknereinlauf eingebracht, um eine Impulsfunktion nachzubilden. Die unterhalb des Trockneraustrags gemessene Verweilzeitverteilung war gekennzeichnet durch einen schlagartigen Anstieg der Funktion und einem langen „Nachlauf“. Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde eine schnellere Partikelbewegung in der Mitte des Apparates festgestellt, hervorgerufen durch Einbauten und die Schüttguttreibung an den Seitenwänden.

2.4.2 Analytische Auswertung

MacMullin und *Weber* [69] sowie *Danckwerts* [70] lieferten die Grundlagen der Verweilzeitanalyse, die im Folgenden beschrieben wird. Die als *differenzielle Verweilzeitverteilung* bezeichnete Dichtefunktion berechnet sich nach Gleichung 2.27 und beschreibt das Verhältnis der am Ausgang gemessenen Tracermenge $n(t)$ zu der zum Zeitpunkt $t = 0$ in den Apparat eingebrachten Gesamtmenge n_0 des Tracermaterials [64] mit

$$E(t) = \frac{n(t)}{n_0} = \frac{\dot{V} \cdot c(t)}{n_0} \quad (2.27)$$

Bei der Messung der Verweilzeitverteilung von Gasen und Flüssigkeiten lässt sich die Dichtefunktion auch über den eingestellten Volumenstrom \dot{V} und die am Prozessausgang detektierte Konzentration $c(t)$ bestimmen. Die am Eingang aufgegebenen Stoffmenge n_0 sollte nach einer

hinreichend langen Zeit am Ausgang angekommen sein, somit ist

$$n_0 = \int_0^{\infty} \dot{V} \cdot c(t) dt \quad . \quad (2.28)$$

Unter Annahme eines konstanten Volumen- oder Massenstroms lassen sich 2.27 und 2.28 auch zu folgender Gleichung zusammenfassen

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad \text{bzw.} \quad E(t) = \frac{n(t)}{\int_0^{\infty} n(t) dt} \quad . \quad (2.29)$$

Durch Integration der Dichteverteilung erhält man die Summenverteilung zu

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad . \quad (2.30)$$

In einem Schüttgutapparat befindet sich unter stationären Betriebsbedingungen eine konstante Schüttgutmenge M_S , die als „Hold-up“ bezeichnet wird. Über den an der Austrageinrichtung eingestellten Massenstrom \dot{M} lässt sich die hydrodynamische Verweilzeit τ berechnen zu

$$\tau = \frac{M_S}{\dot{M}} \quad . \quad (2.31)$$

In der Praxis schwankt die Austrittszeit um einen Mittelwert, der als *Mittlere Verweilzeit* \bar{t} bezeichnet wird. Unter Einbeziehung der allgemeinen Form der statistischen Momente der Verteilung mit

$$M_k = \int_0^{\infty} t^k \cdot E(t) dt \quad (2.32)$$

ergibt sich die *Mittlere Verweilzeit* aus dem 1. Moment zu

$$M_1 = \bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt \quad . \quad (2.33)$$

Unter Annahme eines idealen Prozessverhaltens, d. h. wenn keine Dispersion infolge Rückvermischung auftritt, entspricht die mittlere Verweilzeit \bar{t} der hydrodynamischen Verweilzeit τ [71].

Die zeitliche Verteilung der Messwerte um die Mittlere Verweilzeit herum kann durch Einführung des 2. Moments (der Varianz σ^2) beschrieben werden [72]

$$M_2 = \sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 E(t) dt \quad . \quad (2.34)$$

Um Schüttgutapparate trotz unterschiedlicher Gestaltung, Austrageinrichtung und schwankender Durchsätze hinsichtlich ihrer Verweilzeitverteilung vergleichen zu können, wird unter Berechnung der dimensionslosen Zeit $\theta = t/\bar{t}$ die Verweilzeitverteilung (bezogen auf die mittlere Verweilzeit) normiert dargestellt [73] zu

$$E(\theta) = \bar{t} \cdot E(t) \quad . \quad (2.35)$$

2.5 Modellierung der Schüttgutbewegung

2.5.1 Grundlagen der Diskreten Elemente Methode (DEM)

Pulver, Schüttgüter oder Agglomerate stellen eine lose oder feste Zusammensetzung einzelner Partikel dar. Deren Bewegungsverhalten lässt sich mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode (DEM) numerisch beschreiben. *Cundall* und *Strack* [74] veröffentlichten 1979 die Grundlagen dieses in vielen Bereichen der Forschung und Entwicklung eingesetzten Simulationsverfahrens. Im Gegensatz zur Finiten Elemente Methode, die ein Kontinuumsmechanisches Verhalten des Schüttgutes voraussetzt, ist es mit der DEM möglich die Partikelwechselwirkungen eines Schüttgutes in Mikro- und Makroprozessen realitätsnah zu beschreiben [75]. Ziel der Anwendung von DEM-Simulationen kann es sein, einen Schüttgutprozess zu analysieren, effizienter zu gestalten oder einen Schüttgutapparat auszulegen. Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis der mechanischen Partikeleigenschaften (Partikelform und -geometrie, Partikeldichte, Reibungskoeffizienten, E-Modul, u. a.). Mit Hilfe einfacher unabhängiger Schüttgutexperimente wird das entwickelte DEM-Modell kalibriert, wobei ausgewählte Modellparameter (z. B. in den hinterlegten Kontaktgesetzen) durch schrittweise Annäherung an die experimentellen Ergebnisse „justiert“ werden. Die Komplexität der diskreten Modellierung begründet, warum DEM-Simulationen von Schüttgutprozessen oftmals Gegenstand langjähriger, aufeinander aufbauender Forschungsprojekte sind.

Zur diskreten Partikelsimulation werden i. A. die folgenden grundlegenden Modellannahmen getroffen (vgl. [76], [77]):

- Partikel werden als nicht deformierbare, starre Körper betrachtet
- Partikel werden als runde Scheiben (2-D) oder Kugeln (3-D) vereinfacht
- Kontakte zwischen Partikeln können sich punktuell bilden und auflösen
- Überlappungen von Partikelkontakten werden durch das Kontaktgesetz definiert
- Agglomerate und komplexere Strukturen können durch Überlappung der Partikel in ihren Kontaktbereichen nachgebildet werden

Trotz dieser Vereinfachungen steht hinter dem diskreten Modell ein komplexer und rechenintensiver Ansatz, dessen Berechnungsaufwand vor allem von der Anzahl erzeugter Partikel abhängig ist. Zu Beginn werden für die Simulation Anfangs- und Randbedingungen gesetzt (z. B. Startgeschwindigkeit eines Partikels). In einem Rechenzyklus werden daraufhin alle zum Zeitpunkt t erzeugten Partikel nach möglichen Kontakten durchsucht. Bestehen zwischen Partikeln bzw. Wänden und Partikeln Kontakte, werden daraufhin die im Modell hinterlegten Kontaktgesetze (Feder-, Dämpfer-, Reibung), wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben, angewendet. Aus den wirkenden Kontaktkräften resultiert für jedes Partikel eine Kraft F_i , die in das 2. Newton'sche Bewegungsgesetz eingesetzt wird. Dieses ergibt sich aus dem Produkt der Partikelmasse m und der Summe seiner Beschleunigungen zu:

$$F_i = m \cdot (\ddot{x}_i + g_i) \quad . \quad (2.36)$$

Umstellen nach der Beschleunigung \ddot{x}_i ergibt

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} - g_i \quad . \quad (2.37)$$

Durch Integration über einen kurzen Zeitschritt werden daraufhin eine neue Partikelgeschwindigkeit

$$\dot{x}_i = \int \ddot{x}_i dt \quad (2.38)$$

sowie eine neue Partikelposition x_i berechnet

$$x_i = \int \dot{x}_i dt \quad (2.39)$$

Darüber hinaus wird die Partikelrotation durch das Drehmoment M beschrieben

$$M_i = J \cdot \omega_i \quad (2.40)$$

Unter Einbeziehung des Trägheitsmomentes einer Kugel mit $J = 2/5mR^2$ lässt sich mit Gl. 2.40 die Winkelgeschwindigkeit des Partikels wie folgt ausdrücken

$$\omega_i = \int \frac{5 \cdot M_i}{2mR^2} dt \quad (2.41)$$

2.5.2 Kontaktmodelle

Zur Bestimmung der vorab zusammengefassten Bewegungsinformation sind Kontaktmodelle erforderlich. Mit diesen werden auftretende Kräfte berechnet, die aus der *Partikel-Partikel* und der *Partikel-Wand* Wechselwirkung resultieren. Der elastische Kontakt zweier Partikel wird im einfachsten Fall durch zwei Federn mit einer Normalsteifigkeit k_n und einer Schersteifigkeit k_t beschrieben. Naturgemäß treten jedoch aufgrund von Reibung (z. B. mit Luft oder Wasser) auch „Verluste“ auf, die im Kontaktmodell durch ein parallel geschaltetes (viskoses) Dämpfungsglied λ_n bzw. λ_t beschrieben werden (Bild 2-10). Beim Schervorgang zweier Partikel wird zusätzlich noch von einem überlagernden Reibungsverlust ausgegangen, der durch den Reibungswiderstand μ berücksichtigt wird.

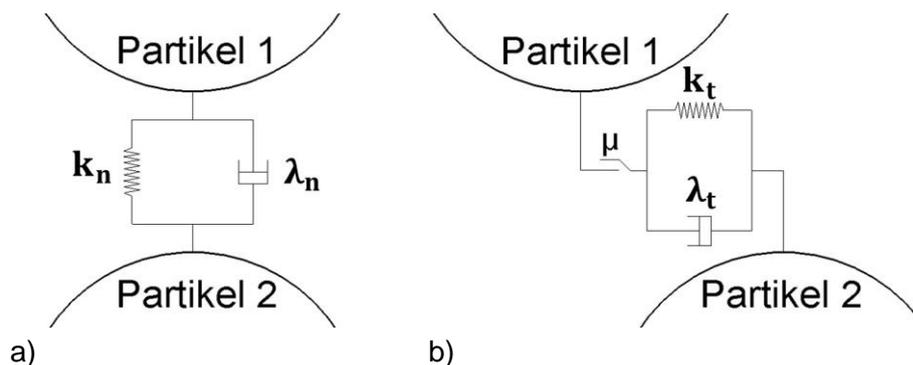


Bild 2-10: Schema des Kontaktmodells mit viskoser Dämpfung λ_n und Federdämpfung k_n in Normalrichtung (links) sowie in Scherrichtung (rechts) mit Reibwiderstand μ

In DEM-Tools (wie der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Software *PFC2D*® der Fa. *Itasca*) wird der Kontakt zweier Partikel aus deren Überlappung $\delta_{n,ij}$ ($\delta_{n,ij} \leq 0$) definiert, die mit Hilfe der Partikelradien R_1, R_2 und dem Abstand $D_{a,ij}$ der Partikelmittelpunkte über Gl. 2.42 [78] berechnet wird

$$\delta_{n,ij} = R_1 + R_2 - D_{a,ij} \quad (2.42)$$

Entsprechend Bild 2-11 lässt sich der Abstand $D_{a,ij} = |\vec{x}_2 - \vec{x}_1|$ aus den Ortsvektoren \vec{x}_1, \vec{x}_2 in Richtung der Partikelmittelpunkte berechnen. Der Ortsvektor \vec{x}_c im Kontaktpunkt wird unter Einbeziehung des Normaleinheitsvektors \vec{n} wie folgt hergeleitet [79]

$$\vec{x}_c = \vec{x}_1 + (R_1 - 0,5 \cdot \delta_{n,ij}) \cdot \vec{n} \quad . \quad (2.43)$$

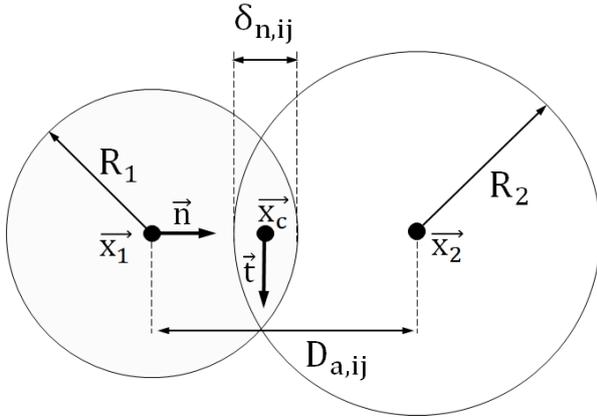


Bild 2-11: Partikelüberlappung bei Kontakt (basierend auf Jakob in [79])

Die aus einem Partikelkontakt resultierende Kraft \vec{F}_c setzt sich (entsprechend Gl. 2.44) aus einem Anteil F_n in Normalrichtung und einen tangentialen Anteil F_t in Scherrichtung zusammen

$$\vec{F}_c = F_n \cdot \vec{n} + F_t \cdot \vec{t} \quad . \quad (2.44)$$

Je nach Komplexität des Kontaktverhaltens (z. B. zweier Partikel) werden die Parameter unterschiedlicher Kontaktmodelle durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen am Versuchsmaterial berechnet oder iterativ angepasst. Die am häufigsten eingesetzten Modelle sind das *linear-elastische Kontaktmodell* und das *nichtlineare Hertz-Mindlin-Modell* [80].

Beim **linear-elastischen Kontaktmodell** ist der Kraftanteil $F_{n,ij}$ in Normalrichtung das Produkt einer konstanten Normalsteifigkeit k_n und der Überlappung $\delta_{n,ij}$ beider Partikel und errechnet sich direkt bei der Kontaktbildung. Zusätzlich wird die viskose Dämpfung λ_n mit einbezogen

$$F_{n,ij} = -k_n \cdot \delta_{n,ij} + \lambda_n \cdot \delta_{n,ij} \quad . \quad (2.45)$$

Der tangentialen Kraftanteil $F_{t,ij}$ in Gl. 2.44 berechnet sich erst nach Kontaktbildung und ändert sich dann mit jedem Zeitschritt

$$\Delta F_{t,ij} = \begin{cases} -k_t \Delta \delta_{t,ij} + \lambda_t \Delta \delta_{t,ij} & \text{für } |F_{t,ij}| \leq \mu |F_{n,ij}| \\ \mu F_{n,ij} & \text{für } |F_{t,ij}| > \mu |F_{n,ij}| \end{cases} \quad . \quad (2.46)$$

Im Gegensatz zum linearen Kontaktmodell, bei dem die Kontaktsteifigkeiten k_n und k_t zumeist empirisch eingestellt werden, steigen diese beim (nichtlinearen) **Hertz-Mindlin-Modell** mit der Wurzel der Überlappung $\delta_{n,ij}$ [81]

$$k_n = \frac{4}{3} Y^* \cdot \sqrt{R^* \cdot \delta_{n,ij}} \quad (2.47)$$

$$k_t = 8G^* \cdot \sqrt{R^* \cdot \delta_{t,ij}} \quad . \quad (2.48)$$

Hierbei sind R^* der effektive Radius ($R^* = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j}$), Y^* das effektive E-Modul und G^* das effektive Schubmodul des zu modellierenden Versuchsmaterials, dessen Eigenschaften experimentell bestimmt werden. Weiterhin lassen sich die Dämpfungskonstanten λ_n und λ_t wie folgt berechnen

$$\lambda_n = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \cdot \sqrt{S_n \cdot m^*} \quad (2.49)$$

$$\lambda_t = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \cdot \sqrt{S_t \cdot m^*} \quad , \quad (2.50)$$

wobei sich die Hilfsparameter S_n, S_t, β, m^* über die von *Rackl* in [82] zusammengetragenen Gleichungen bestimmen lassen.

Einen Überblick über die theoretischen Hintergründe und Berechnungsgleichungen einiger Modelle und deren experimentell bestimmte Modellparameter (insbesondere für landwirtschaftliche Produkte) liefern *Horabik* und *Moldena* in [83], *Boac* in [84] und *Campello* in [85]. Darüber hinaus gibt *Coetzee* [86] eine umfangreiche Zusammenfassung von Ansätzen und Verfahrensweisen, die in den letzten 25 Jahren zu einer Verbesserung der Modellkalibrierung beigetragen haben.

2.5.3 Anwendung von diskreten Partikelsimulationen

Die schüttgutmechanischen Eigenschaften eines Materials bestimmen dessen Bewegungsverhalten. Ein wichtiger Parameter ist die dabei Partikelstruktur (Partikelform, -größe, -oberfläche...). Mit Hilfe der DEM ist es möglich, einzelne Partikel zu generieren und deren Gestalt und Größe den realen Partikeln anzunähern, beispielsweise durch Überlappung mehrerer runder Scheiben (2D) bzw. Kugeln (3D) zu sog. „Clumps“. Wie im Bild 2-12 dargestellt, kann die elliptische Form eines Weizenkorns dadurch gut nachempfunden werden. Wie vielfältig die Formen von Clumps sein können, zeigt *Coetzee* in [86]. In der DEM können außerdem Eigenschaften realer Partikeln diesen Clumps aufgeprägt werden. Viele dieser Eigenschaften können jedoch nur durch Schüttgutexperimente bestimmt werden. Hierzu bedient man sich *unabhängiger* Versuche mit meist einfachem Aufbau. Ein Beispiel hierfür ist das Schüttkegel-Experiment, bei dem der Böschungswinkel gemessen wird [75]. Mit Hilfe der Modellpartikeln wird nun versucht, den Böschungswinkel durch das DEM-Modell zu berechnen. Etwaige Abweichungen von den Messwerten werden durch „Kalibrierung“ ausgewählter Parameter z. B. in den Kontaktmodellen minimiert. Das auf diese Weise kalibrierte Modell kann anschließend auf den zu untersuchenden Schüttgutprozess angewendet werden.

Kamath et al. [87] machten sich die örtliche Variation des Austragsmassenstroms mehrerer Öffnungen auf andere Weise zu Nutze, als es in der vorliegenden Arbeit beabsichtigt ist. Im Rahmen ihrer DEM-Simulationen wurde untersucht, inwieweit – durch eine gezielte Steuerung des lokalen Austragsmassenstroms – der Inhalt einer rechteckigen Behältergeometrie durchmischt werden kann. Oberhalb der jeweiligen Auslauföffnung wurden die Partikel zunächst einer Farbgruppe zugeordnet. Beim Entleerungsvorgang trat in Folge unterschiedlicher Partikelgeschwindigkeiten eine Quervermischung auf. Diese wurde

innerhalb mehrerer Messfelder, über die Anzahl der Partikel einer Farbgruppe, ausgewertet.

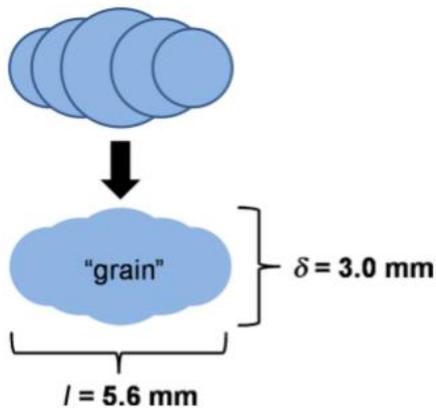


Bild 2-12: Beispiel für zusammengesetzte (runde) Partikel zu einem elliptischen „Clump“ in Form eines Weizenkorns (Quelle: *Weigler und Mellmann* [75])

Im Kapitel 2.1 wurden bereits experimentelle Untersuchungen von *Pahl* und *Wehry* [35] zur Beeinflussung von Fließprofilen durch örtliche Variation des Austragsmassenstroms in einem Koks-Trockenkühler diskutiert. Auch *Wehry* [88] nutzte für seine Forschung die DEM, um die Bewegung der simulierten Koks-Schüttung mit den Partikelbahnen an der realen Behälterwand seines Versuchsaufbaus qualitativ zu vergleichen. Entsprechende Methoden finden sich in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten [89]–[91] wieder, da sich die Schüttgutbewegung durch eine farbliche Markierung sowohl im Experiment, als auch in der Simulation relativ einfach analysieren und vergleichen lässt. *Weiler* et al. [92] nutzten z. B. den Partikel-Farbkontrast zum Vergleich experimenteller und simulierter Verweilzeitverteilungen eines Schwerkraftmischers und erzielten dabei gute Übereinstimmungen.

Um den Bedarf an Rechenzeit zu reduzieren, wird bei simulierten Austrageinrichtungen oft auf die Bewegung des Verschleißmechanismus verzichtet. So verzichtete z. B. auch *Wehry* [88] bei seinen Simulationen auf die Schwenkbewegung seiner Austragswippen und löschte nach einigen Zeitschritten einfach die Partikel, die sich oberhalb des Verschleißmechanismus befanden. Aus der Praxis ist i. A. bekannt, dass die Arbeitsweise des Verschleißmechanismus jedoch eine wichtige Rolle spielen kann. So führen einseitig bewegte Schieber oder einseitig rotierende Zellenradschleusen im Schüttgutapparat zur Entstehung bevorzugter Fließzonen. Es obliegt dem Anwender einzuschätzen, in wieweit derartige Vereinfachungen für eine Abbildung des realen Prozessverhaltens zulässig sind.

Eine breite Anwendung hat die diskrete Modellierung u. a. auch in der Vorausberechnung des Austragsmassenstroms aus Silotrichtern gefunden. Untersuchungen [93]–[98] zeigen, dass sich *Beverloo's* [58] Berechnungsgleichung zur Vorhersage des Auslaufmassenstroms sowohl auf den experimentellen Versuchsstand, als auch auf eine simulierte Geometrie mit Schüttgutmodell anwenden lässt, um dieses zu validieren. Derartige Simulationen beziehen sich jedoch bislang nur auf den Fall eines konstanten Austragsmassenstroms über dem Querschnitt einer einzelnen Öffnung. Weiterhin zeigen Forschungsarbeiten [99]–[104], dass mit Hilfe der DEM auch qualitative Informationen über die mechanischen Schüttgutspannungen in einem Behälter gewonnen werden können.

3 Prozess- und Regelungstechnische Anforderungen

Der wissenschaftlich-technische Erkenntnisstand zeigt, dass es ein breites Spektrum von Lösungsansätzen zur Behälterentleerung gibt. Der Schüttgutvielfalt entsprechend ist zu bezweifeln, dass es in Zukunft eine universelle Lösung für alle Anforderungen der Behälterentleerung geben wird. Aus den in der Literatur dargestellten Erkenntnissen zur Schüttgutspannung in Silos, der Vorausberechnung des Auslaufmassenstroms und den Untersuchungsmethoden zur Bestimmung des Verweilzeitverhaltens lassen sich prozess- und regelungstechnische Anforderungen für die Entwicklung der neuartigen Austrageinrichtung formulieren. Diese Anforderungen sind:

- die Gewährleistung einer nahezu störungsfreien Behälterentleerung bei vollständiger oder teilweiser Befüllung des Behälters oder Apparates oberhalb der Austrageinrichtung,
- die Ermöglichung eines kontinuierlichen oder intervallweisen Schüttgutabzugs
- die Integrierung von feststehenden Einbauten zur Entlastung der Verschleißmechanismen,
- eine Fließeigenschaften gerechte Auslegung aller festen und bewegten Teile der Austrageinrichtung zur Vermeidung von Brückenbildung und Verstopfung,
- eine gleichmäßige Öffnung der Verschleißmechanismen zur Vermeidung von bevorzugten Fließzonen durch einseitigen Schüttgutabzug,
- die Bereitstellung einer Berechnungsgrundlage zur Einstellung oder Regelung des Austragmassenstroms,
- eine nahezu gleichmäßige Austragung über dem gesamten Apparatequerschnitt bei synchroner Ansteuerung aller Verschleißmechanismen,
- die örtliche und unabhängige Freigabe der Verschleißmechanismen zu Steuerung der Verweilzeitverteilung (als Maß für die Ausprägung eines ungleichmäßigen Fließprofils oberhalb der Austrageinrichtung),
- die Sicherstellung einer restlosen Entleerung zur Vermeidung von Verschleppung (Rückvermischung) bei einem Produktwechsel.

Darüber hinaus soll es möglich sein, das grundlegende Entleerungsprinzip der neuartigen Austrageinrichtung auch mit Hilfe numerischer Simulationswerkzeuge nachzuvollziehen.

4 Modellierung des Austragsverhaltens

4.1 DEM-Simulation

Zur Simulation realer Partikelbewegungen sind i. d. R. sehr umfangreiche, experimentelle Untersuchungen am realen Versuchsmaterial notwendig, um (darauf aufbauend) ein mathematisch beschreibbares Schüttgutmodell zu generieren, dass sich auf unterschiedliche Apparatedesigns anwenden lässt. Aus den real gemessenen mechanischen Eigenschaften des Versuchsmaterials werden Parameter für ein Modellgut abgeleitet und stetig weiter angepasst (Modellkalibrierung). Solange, bis die Ergebnisse aus Experiment und Simulation schließlich für fest definierte Prozessbedingungen übereinstimmen (Validierung). Diese obligatorischen Schritte sind oftmals mit einem enormen zeitlichen Aufwand verbunden und können innerhalb von Forschungs- und Entwicklungsprojekten z. T. nur durch aufbauende Arbeiten gänzlich abgeschlossen werden. Am *Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e. V.* (ATB) wurde bereits in vorangehenden Forschungsprojekten ein solches Modell für das freifließende Ernteprodukt Weizen anhand von zahlreichen Experimenten [13], [75] kalibriert und validiert. Neben der elliptischen Partikelform (siehe Kapitel 2.5.3) umfasst dieses Modell die in Tabelle 4-1 zusammengefassten Parameter, die unter Anwendung des linearen Kontaktmodells in der kommerziellen Software *PFC2D®* der Fa. *Itasca* implementiert wurden.

Tabelle 4-1: Modellparameter für Weizen [75]

Simulationsparameter	Wert
Partikeldichte, ρ_p [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	1300
Partikel Reibungskoeffizient, μ_p	0,45
Wand Reibungskoeffizient, μ_w	0,35
Partikel Kontaktsteifigkeit in Normalrichtung, k_n [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]	$1,83 \times 10^5$
Partikel Kontaktsteifigkeit in Scherrichtung, k_t [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]	$1,83 \times 10^5$
Wand Kontaktsteifigkeit in Normalrichtung, k_n [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]	$6,8 \times 10^6$
Wand Kontaktsteifigkeit in Scherrichtung, k_t [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]	$5,96 \times 10^6$
Viskoser Dämpfungskoeffizient in Normalrichtung, λ_n	0,7
Viskoser Dämpfungskoeffizient in Scherrichtung, λ_t	0,7

Angelehnt an die vorangehenden Arbeiten des ATB und mittels der Software *PFC2D®* wurde in der vorliegenden Arbeit eine Machbarkeitsstudie (im Vorfeld des experimentellen Aufbaus von Versuchsanlagen) durchgeführt. Diese Studie beinhaltet die im Folgenden unter **1)** und **2)** zusammengefassten Simulationsbedingungen mit ihren Modellparametern und Vereinfachungen. Diese sind trotz überdurchschnittlich genutzter Rechenleistung³ notwendig, da sowohl die iterativen Schleifenaufrufe, als auch die relativ hohe Anzahl von Partikeln erheblich viel Simulationszeit [105] (Wochen) beansprucht. Darüber hinaus bleibt hier noch Raum für weiterführende Forschungsarbeiten.

³ Intel Core i7-4770 (8x3.40GHz), 4x4Gb DDR3 1600 Mhz, NVIDIA Quadro K2000 2 GB GDDR5

1) Simulation von qualitativen Spannungsverläufen in der Partikelschüttung oberhalb der Austrageinrichtung

- Die Grundlage bildet eine 2D-Simulation der bewegten Verschleißmechanismen und des Behälters mit Modellgut
- Die 2D-Austrageinrichtung (Bild 4-2) mit seinen feststehenden und bewegten Einbauten und Verschleißmechanismen entspricht den in Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2 zu entnehmenden (realen) Dimensionen der neuartigen Austrageinrichtung (600 mm breit), wobei die Höhe der Seitenwände zu einem Behälterschaft nach oben hin verlängert sind.
- Die Partikel des Modellgutes werden (wie in [75]) der elliptischen Form realer Weizenkörner mit Hilfe von Clumps angenähert (vgl. Bild 2-12, S.27).
- Alle Clumps besitzen die identische Form und Dichte, die jedoch in der Realität (u. a. durch den Wassergehalt [106]) naturgegebene Schwankungen aufweisen.
- Die Parameter (Kontaktsteifigkeiten, Reibung) werden aus dem bestehenden (linearen) Kontaktmodell für Weizen (Tabelle 4-1) entnommen.
- Eine reale Partikelgrößenverteilung und eine (reale) stochastische Ausrichtung der Körner innerhalb der Schüttung wird vernachlässigt.
- Die Darstellung der qualitativen Spannungsverläufe erfolgt durch Anzeige aller Partikel-Kontaktkräfte F_t in tangentialer Richtung (Bild 4-1) über die in *PFC2D* implementierte Funktion „Contact Forces“. Die Dicke der dabei angezeigten, schwarzen Linien ist proportional zur wirkenden Kraft am Kontakt und lässt sich skalieren. Die Gesamtheit aller Kontaktkräfte ergibt sich zu einer Kräftekette bzw. einem Kräfte Netzwerk (force network).

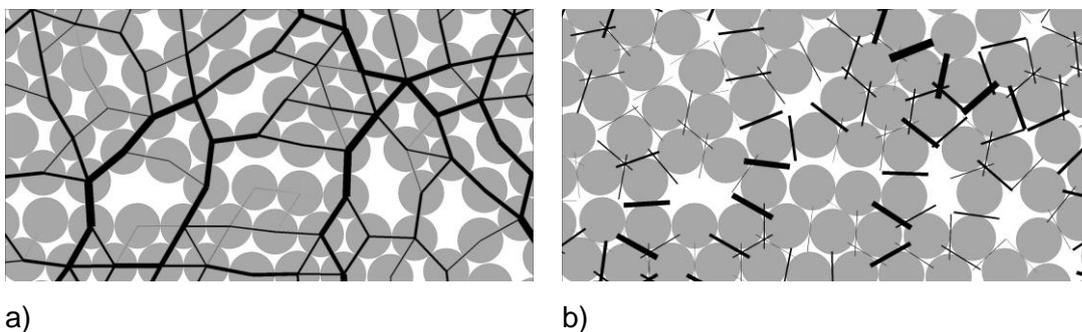


Bild 4-1: Exemplarischer Ausschnitt einer in 2D berechneten Schüttung runder Partikel mit Darstellung der am Kontakt wirkenden Normalkräfte (a) und Scherkräfte (b)

2) Simulation der Partikelbewegung und Analyse von Verweilzeitverteilungen in Abhängigkeit von der örtlichen Ansteuerung der Verschleißmechanismen

- Die Grundlage ist wie in 1) eine 2D-Simulation der bewegten Verschleißmechanismen und des Behälters mit Modellgut.
- Die 2D-Austrageinrichtung (Bild 4-2) mit seinen feststehenden und bewegten Einbauten und Verschleißmechanismen entspricht den in Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2 zu entnehmenden (realen) Dimensionen der neuartigen Austrageinrichtung (600 mm breit), wobei die Höhe der Seitenwände zu einem Behälterschaft nach oben hin verlängert sind.
- Die Verschleißmechanismen lassen sich einzeln mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Haltezeiten (einmalig) vor Simulationsbeginn parametrieren.
- Das Modellgut wird als nicht-reales Schüttgut angenommen und ist durch (ideal) kreisförmige Partikel mit gleichem Durchmesser ($d = 4\text{mm}$) erzeugt worden. Dies ist

- zulässig, da die grundlegende Wechselwirkung zwischen der Ansteuerung der Verschleißmechanismen und der Beeinflussung der Partikelbewegung studiert wurde.
- Die Modellparameter sind unveränderlich und entsprechend Tabelle 4-1 für ein allgemeines, freifließendes Verhalten adaptiert.
 - Nach einem Entleerungsvorgang wird die gleiche Anzahl Partikel von oben wieder aufgebracht (Wiederbefüllung).
 - Die Startstruktur von (roten) Tracer-Partikeln ist oberhalb einzelner Auslaufrichter gleichmäßig verteilt (Bild 4-2).
 - Die Startstruktur entspricht einem ideal-ungleichmäßigen Fließprofil über der Breite des Apparates.
 - Insgesamt wurden 36.500 Partikel in die Apparategeometrie eingebracht (davon sind 1.500 rote Tracerpartikel).
 - Oberhalb der 6 Auslaufrichter mit jeweiligem Verschleißmechanismus **A – F** wurden je 250 rote Tracerpartikel als Schicht eingebracht.

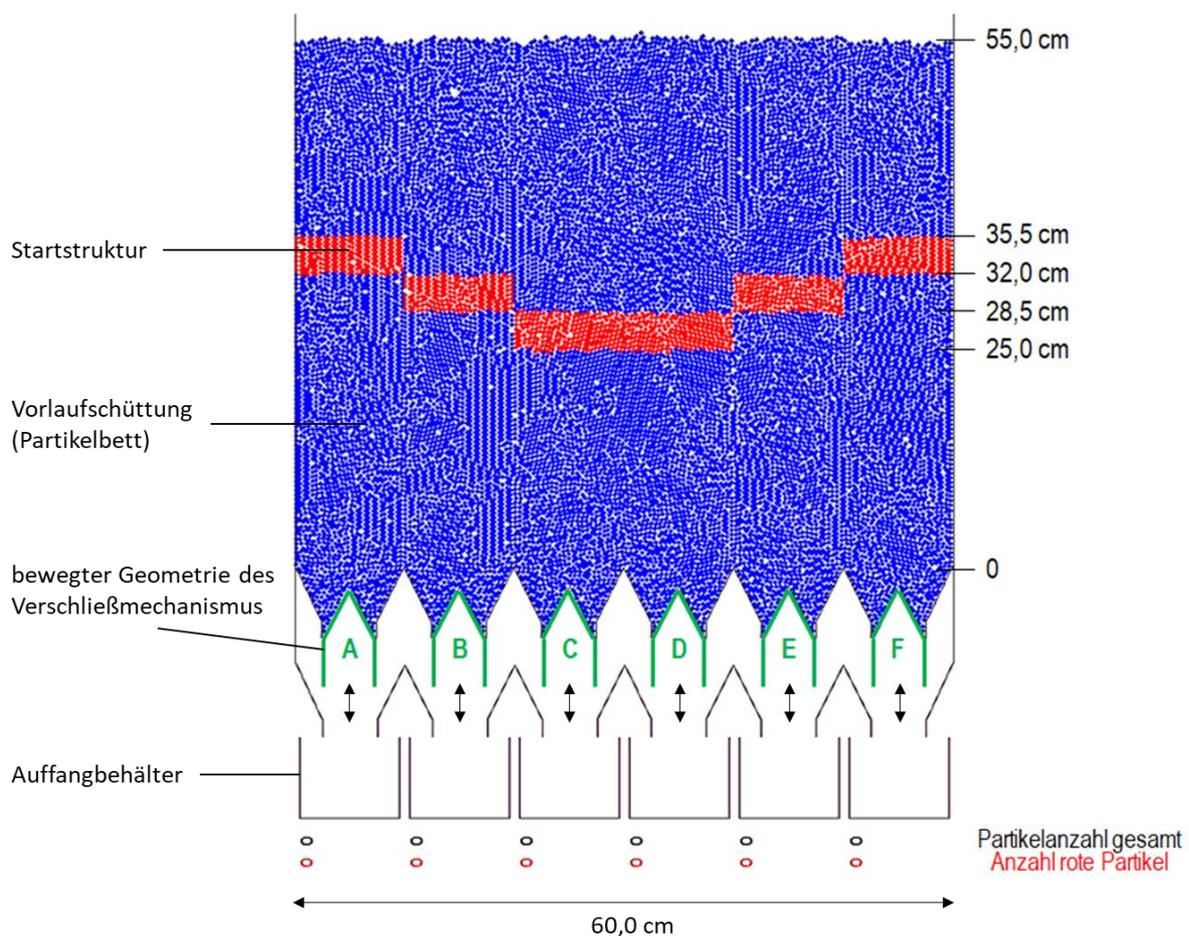


Bild 4-2: In PFC2D erstellte Behälter- und Austragsgeometrie mit roter Startstruktur (unter Angabe der realen Höhe [cm]) und implementierter Partikel-Zählfunktion unterhalb der Auffangbehälter

4.2 Verweilzeitmodellierung

Zur Charakterisierung von Verweilzeitverteilungen werden in der chemischen Reaktionstechnik Modelle eingeführt, die das Prozessverhalten idealer Reaktoren um Strömungs- und Prozessbedingungen realer Reaktoren ergänzen [107]. Die am häufigsten eingesetzten Modelle sind das *Zellenmodell* [108] und das *Dispersionsmodell* [109]. Durch den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Verweilzeitverteilungen lassen sich Prozessauswirkungen am Versuchsstand beurteilen, die aus konstruktiven Veränderungen oder abweichenden Betriebsbedingungen resultieren. Ein realer Behälter mit Schüttgut (z. B. Silo) stellt unter Annahme einer kontinuierlichen Befüllung und eines kontinuierlichen Schüttgutabzugs ein nicht-ideales Strömungsrohr dar (Bild 4-3). Aufgrund seiner Gestaltung, der Art der Entleerung, sowie der Zusammensetzung des Schüttguts mit seinen Fließeigenschaften treten im Silo örtliche Schwankungen der Fließgeschwindigkeit auf, die zur Abweichung von einer idealen Pfropfen- bzw. Kolbenströmung führen können. Zur Beschreibung eignet sich das Dispersionsmodell. Diesem Modell liegt die Annahme eines Strömungsrohres mit idealer Kolbenströmung zu Grunde, dessen Bilanzgleichung (4.1) die zeitliche Änderung der Tracerkonzentration (Bild 4-3) an einer beliebigen Position z in Strömungsrichtung beschreibt. Der konvektive Stofftransport wird durch die Strömungsgeschwindigkeit u in vertikaler Richtung bestimmt, die Rückvermischung durch den Dispersionskoeffizienten D_{ax} [110].

$$\frac{dc}{dt} = D_{ax} \frac{d^2c}{dz^2} - u \frac{dc}{dz} \quad (4.1)$$

Die Überführung der Gleichung 4.1 in eine dimensionslose und damit vergleichbare Darstellung gelingt durch Einbindung der dimensionslosen Zeit $\theta = t/\bar{\tau}$, wobei für $\bar{\tau}$ die hydrodynamische Verweilzeit mit $\tau = L/u$ und für die Strömungsweglänge z die normierte Länge mit $Z = z/L$ eingesetzt wird. Darüber hinaus wird die Bodensteinzahl Bo als Modellparameter eingeführt mit

$$Bo = \frac{u \cdot L}{D_{ax}} \quad (4.2)$$

Durch sie wird das Verhältnis von Konvektion (Stofftransport) zu Dispersion (Rückvermischung) beschrieben [65]. Damit folgt aus Gleichung 4.1

$$\frac{dc}{d\theta} = \frac{1}{Bo} \frac{d^2c}{dZ^2} - \frac{dc}{dZ} \quad (4.3)$$

Für kleine Bodensteinzahlen ($Bo < 100$) werden von *Levenspiel* [111] Berechnungsgleichungen für offene und geschlossene Systeme (Bild 4-3, rechts) angegeben. Diese werden von *Reschetilowski* [73] und *Storhas* [112] um Ansätze für halboffene Systeme ergänzt. Für große Bodensteinzahlen ($Bo > 100$) wird hier der folgende Ansatz gewählt

$$Bo = \frac{u \cdot L}{D_{ax}} = \frac{2}{\sigma_{\theta}^2} \quad (4.4)$$

Dabei ist σ_{θ}^2 die dimensionslose Varianz mit

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{\tau}^2} \quad (4.5)$$

Eine kaum vorhandene Dispersion im Strömungrohr ($D_{ax}, \sigma_0^2 \rightarrow 0$) führt zu einer großen Bodensteinzahl ($Bo \rightarrow \infty$), wodurch der Dispersionsterm in Gleichung 4.3 vernachlässigbar klein wird. In einem Schüttgutbehälter äußert sich dies durch eine gleichmäßigere Schüttgutbewegung. Zur Modellierung der Verweilzeitverteilung ist es notwendig, sich mit den Systemgrenzen des Behälters einschließlich der Austrageinrichtung auseinanderzusetzen. Zunächst einmal wird eine definierte Menge Schüttgut in den Apparat eingefüllt, die die Strömungsweglänge L festlegt. In der vorliegenden Arbeit wurde oberhalb dieser Schüttung ($z = 0$) eine glatte, nahezu homogen verteilte Schicht des Tracermaterials eingebracht (Bild 4-3). Mit der Tracerschicht wird ein Dirac-Impuls simuliert, das heißt die Dispersion an dieser Stelle ist gleich Null ($D_{ax} = 0$).

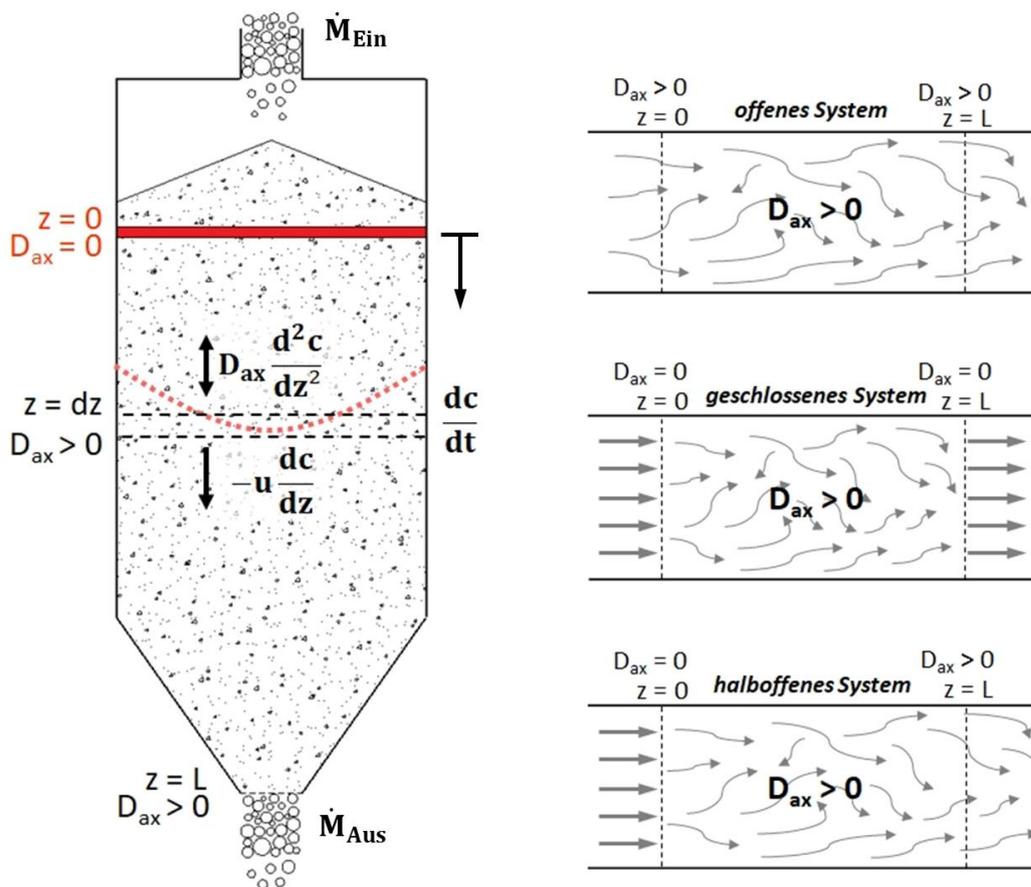


Bild 4-3: Schüttgutbehälter mit Traceraufgabe und qualitativ dargestelltem Fließprofil (links) sowie schematische Darstellung eines offenen, geschlossenen und halbseitigen Systems (rechts)

Aufgrund der Wirkung verschiedener Einflussgrößen wird sich das Tracermaterial (rot gestrichelt dargestellt) über dem Strömungsweg vermischen ($D_{ax} > 0$), bis es den Behälter über die Austrageinrichtung verlässt. Unter realen Bedingungen wird sich das Tracermaterial auch über die Bilanzgrenze hinaus (nach dem Verlassen der Austrageinrichtung) weiter vermischen ($D_{ax} > 0$). Ein solches System, bei dem an nur einer Grenze ein Sprung des Dispersionskoeffizienten auftritt, wird als *halbseitig geschlossenes System* bezeichnet. Derartige Systeme können an ihren Grenzen jeweils wie ein offenes bzw. geschlossenes System behandelt werden [109].

Für eine praktikable Berechnung der normierten Verweilzeitverteilung haben *Levenspiel* und *Smith* [113], ausgehend von einem offenen System, den folgenden Zusammenhang hergeleitet

$$E(\theta) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Bo}{\pi \cdot \theta}} \exp \left[-\frac{(1-\theta)^2 \cdot Bo}{4 \cdot \theta} \right] \quad (4.6)$$

Bei geringer axialer Dispersion bzw. großer Bodensteinzahl ($Bo > 100$) kann die berechnete Verweilzeitverteilung jedoch auch hinreichend genau wie folgt beschrieben werden [114]

$$E(\theta) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Bo}{\pi}} \exp \left[-\frac{(1-\theta)^2 \cdot Bo}{4} \right] \quad (4.7)$$

bzw.

$$E(t) = \frac{1}{2 \cdot \tau} \sqrt{\frac{Bo}{\pi \cdot \theta}} \exp \left[-\frac{(1-\theta)^2 \cdot Bo}{4 \cdot \theta} \right] \quad (4.8)$$

Aus der Integration von Gleichung 4.6 und Einführung der Gauß'schen Fehlerfunktion $\text{erf}(x)$ [70] kann darüber hinaus auch die Verweilzeit-Summenverteilung berechnet werden

$$F(t) = F(\theta) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \text{erf} \left(\frac{\sqrt{Bo}}{2} \cdot \frac{1-\theta}{\sqrt{\theta}} \right) \right) \quad (4.9)$$

mit

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4.10)$$

Mit diesen Gleichungen lässt sich ein beliebiges Verweilzeitexperiment mathematisch beschreiben und gemessenen Verteilungen gegenüberstellen.

5 Experimente und Methoden zur Untersuchung der Schüttgutbewegung

5.1 Bestimmung schüttgutmechanischer Eigenschaften

5.1.1 Versuchsmaterialien

Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die verwendeten Materialien. Der Feuchtegehalt in % w.b. (w.b. = *wet basis*/ bezogen auf feuchtes Gut) wurde mittels Trockenschrankmethode nach ASAE S352.2 bestimmt. Die Versuchsmaterialien dienen sowohl der konstruktiven Auslegung der neuartigen Austrageinrichtung als auch der anschließenden experimentellen Testung.

Tabelle 5-1: Versuchsmaterialien

		Feuchtegehalt % w.b.
Weizen	befeuchtet	$21,4 \pm 0,3$
	getrocknet	$12,3 \pm 0,3$
	geschrotet (<2mm)	$12,3 \pm 0,3$
	rot eingefärbt (Tracer)	$12,4 \pm 0,3$
Sojabohnen	getrocknet	$10,1 \pm 0,3$
	rot eingefärbt (Tracer)	$10,1 \pm 0,3$

Getrockneter Weizen: Neben Mais und Reis ist Weizen eine der wichtigsten Getreidearten weltweit [115]. Nach Schätzungen [116] lag die weltweite Erntemenge in 2018/19 bei ca. 733 Millionen Tonnen. In Deutschland dominiert Weizen mit einem Anteil von > 50% der Erntemenge den Getreideanbau. Je nach Witterung müssen davon noch erhebliche Mengen industriell getrocknet werden. Zur Getreidekonservierung werden zunehmend Durchlauftrockner eingesetzt. Durchlauftrockner sind mit ganzflächigen Austrageinrichtungen am Boden des Apparates ausgerüstet und erreichen Durchsätze von bis zu 100 Tonnen pro Stunde (Weizen) [117].

Befeuchteter Weizen: Die Lagerfähigkeit von Weizen ist erst unterhalb eines Gutfeuchtegehaltes von etwa 16 % w. b. gegeben. Oberhalb dieses Feuchtegehalts besteht die Gefahr des Verderbs (Schimmelbildung). In schwierigen Erntejahren muss oftmals bei Gutfeuchten >16 % w. b. geerntet und anschließend getrocknet werden. Bekanntlich sind die physikalischen Eigenschaften wie z. B. die Fließfähigkeit abhängig vom Gutfeuchtegehalt [118]. Bei der konstruktiven Gestaltung der neuartigen Austrageinrichtung soll deshalb feuchter Weizen (Tabelle 5-1) als Grenzfall berücksichtigt werden. Dazu wurde ein Teil des getrockneten Weizens (500g) wiederbefeuchtet. Die Wiederbefeuchtung erfolgte in einem 5 l Fass unter Zugabe von Leitungswasser bei einem Flüssigkeitspegel von etwa 3 cm oberhalb der Weizenschüttung. Durch regelmäßiges Mischen wurde sichergestellt, dass alle Körner vollständig mit Wasser umgeben waren. Nach einer Einwirkzeit von 10 min wurde das nicht vom Weizen aufgenommene Wasser abgegossen. Anschließend wurde das Versuchsmaterial ausgebreitet und für eine Dauer von 12 Stunden bei etwa 25 °C Luft getrocknet. Auf diese Weise wurde ein Feuchtegehalt von 21,4% w. b. erreicht.

Sojabohnen: Das Versuchsmaterial Sojabohnen erlangt aufgrund seines hohen Gehaltes an pflanzlichem Eiweiß (ca. 35%) eine zunehmende Bedeutung in der Lebens- und Futtermittelindustrie. Aufgrund ihrer freifließenden Schüttguteigenschaften lassen sich Sojabohnen - ähnlich dem Weizen - schon bei geringen mechanischen Einwirkungen in Bewegung versetzen. Für die experimentelle Erprobung der neu entwickelten Austrageinrichtung im Labormaßstab sind Sojabohnen hinsichtlich ihrer Partikelgröße (im Mittel 6-8 mm) am oberen Limit. Im Rahmen der Verweilzeitexperimente soll untersucht werden, inwieweit die Partikelgröße die Breite der Verweilzeitverteilung und damit die Gleichmäßigkeit der Schüttgutbewegung beeinflusst.

Weizenschrot: In der Futtermittelindustrie werden Getreidesorten wie Gerste, Roggen oder Weizen i. d. R. durch Brechwalzenstühle oder Schrotmühlen grob zerkleinert. Weizenschrot erbringt durch seine gute Verdaulichkeit vor allem als Energiefuttermittel in der Schweine- und Broilermast sowie in der Rinderfütterung gute Wachstumsleistungen [119]. In der vorliegenden Arbeit soll die Auslegung der Neigungswinkel und der Öffnungsweite der neuartigen Austrageinrichtung exemplarisch auch mit Weizenschrot erfolgen, um die Einsatzfähigkeit des neuartigen Verschleißmechanismus

Tracermaterial: Zur Verfolgung der Schüttgutbewegung und zur Aufnahme der Prozess-Verweilzeitverteilung werden von den Versuchsmaterialien (Weizen, Sojabohnen)

Tracermaterialien hergestellt. In einem Chargenmischer (Fa. Atika, Typ: Mix 130) wurden jeweils 25 kg des Versuchsmaterials für 10 min gemischt und mit Hilfe von Lebensmittelfarbe (Fa. Ruth, kirschrot) in einem reproduzierbaren Verhältnis von 32 ml/kg gleichmäßig eingefärbt. Zur Vermeidung von Farbabrieb wurde der Tracer anschließend durch Belüftungstockung bei Raumtemperatur (25°C) für 24 Stunden getrocknet. Anschließend wurde noch einmal der Feuchtegehalt (Tabelle 5-1) und die Schüttdichte (Tabelle 5-3) für das erzeugte Tracermaterial bestimmt, um auszuschließen, dass die Produkteigenschaften signifikant verändert wurden. Die Übereinstimmung der schüttgutmechanischen Eigenschaften des Versuchsmaterials und des Tracermaterials sind von Bedeutung, um den realen Prozessablauf (mit seiner charakteristischen Schüttgutbewegung) im Verweilzeitexperiment realitätsnah nachzubilden.

5.1.2 Partikelgrößenverteilung

Es gibt bereits zahlreiche Untersuchungen über die Partikelform und -größe unterschiedlicher Ernteprodukte. Eine Übersicht dazu gibt Boac in [120]. Die Partikelgrößenverteilung der Versuchsmaterialien Weizen und Sojabohnen wurde mit Hilfe eines optischen Partikelgrößen-Analysators vom Typ PartAn3D (Fa. Microtrac) ermittelt, siehe Bild 5-1. Das Messprinzip der optischen Bildanalyse sowie die Auswertung und Darstellung der Messwerte erfolgen nach ISO 13322-2 und 9276-6. Die Partikel werden über einen Trichter auf einer Vibrationsrinne vereinzelt und dosiert einer Öffnung zugeführt. Im Gegenlichtverfahren verfolgt eine Hochgeschwindigkeitskamera bei ca. 200 Bildern pro Sekunde den freien Fall und die Rotation einzelner Partikel. Dabei können einem Partikel bis zu 20 Einzelbilder zugeordnet werden, aus denen u. a. die Länge, Breite, Dicke und das Volumen des Partikels berechnet wird [121].

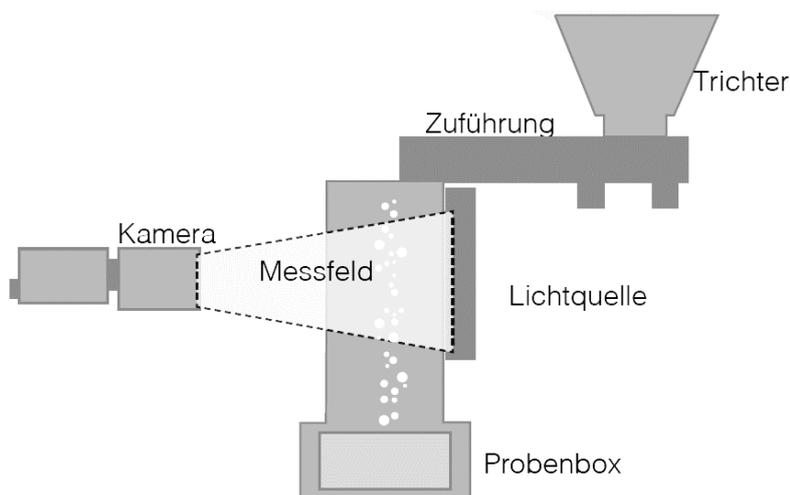


Bild 5-1: Aufbau des PartAn3D Messgerätes (Quelle: Fa. Microtrac Produktbeschreibung)

Zur Beschreibung der minimalen und maximalen Partikelgröße einer Verteilung existieren unterschiedliche Herangehensweisen. Unter anderem kann jeder unregelmäßigen Fläche eines Partikels eine äquivalente Kreisfläche zugeordnet werden (Bild 5-2). Die Partikelausdehnung wird auf diese Weise durch einen Kreisdurchmesser x_D angenähert. Ferner können unregelmäßige Flächen auch mit Sehnen der Länge (x_S) beschrieben werden, die durch den Flächenschwerpunkt verlaufen oder die Fläche entlang der Messrichtung in zwei

gleich große Flächen teilen (MARTIN-Durchmesser x_M). In vielen Fällen legt man zwei zueinander parallele Tangenten an die Partikelkontur an und bestimmt deren minimal und maximal möglichen Abstand zueinander. Dieser ist als FERET-Durchmesser definiert.

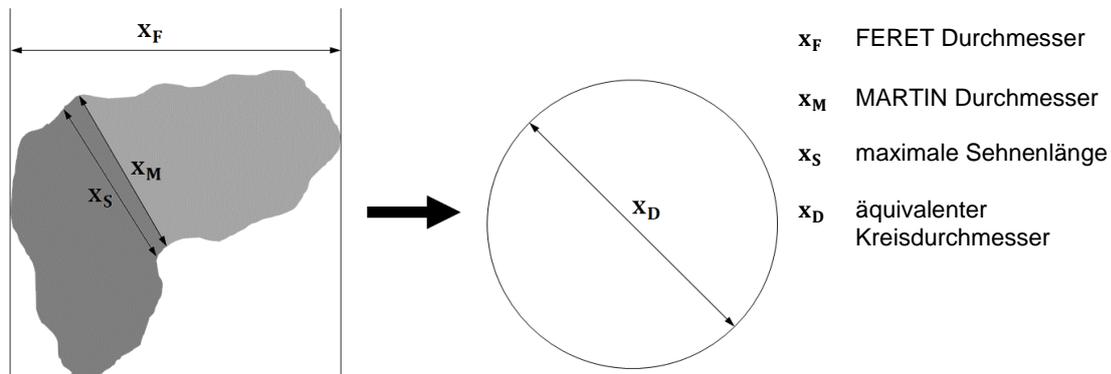


Bild 5-2: Beschreibung der Partikelgröße; unregelmäßige Partikelform (links), äquivalente Kreisfläche (rechts)

Getrockneter Weizen (12,3 % w.b.): Für das Versuchsmaterial Weizen (173g) wurde die Partikelgrößenverteilung für den minimalen FERET-Durchmesser ($x_{F,Min}$) und den maximalen FERET-Durchmesser ($x_{F,Max}$) in Form der Summenverteilung Q_0 bestimmt (Bild 5-3). Aufgrund der Partikelform lassen sich die Kurven $x_{F,Max}$ und $x_{F,Min}$ deutlich voneinander differenzieren. Es zeigt sich, dass 50% der gemessenen Partikel in ihrer Längenausdehnung kleiner als 6,5 mm sind und in Hinblick auf den minimalen FERET-Durchmesser kleiner als 2,7 mm. Mit Hilfe eines Messschiebers wurden durch Müller et al. in [122] zwanzig Weizenkörner vermessen. Den Angaben nach lag die Länge und Breite eines Partikels im Mittel bei $l = 6,40 \pm 0,38$ mm und $b = 3,19 \pm 0,45$ mm. Diese Werte liegen deutlich innerhalb der hier gemessenen Größenverteilung. Es wird angenommen, dass es sich bei den 10% Partikeln, die sich unterhalb des $x_{F,10}$ (schwarze Kurve) und oberhalb des $x_{F,90}$ (grüne Kurve) befinden, um Verunreinigungen (z. B. Spelzen, Bruchkorn) im Versuchsmaterial handelt.

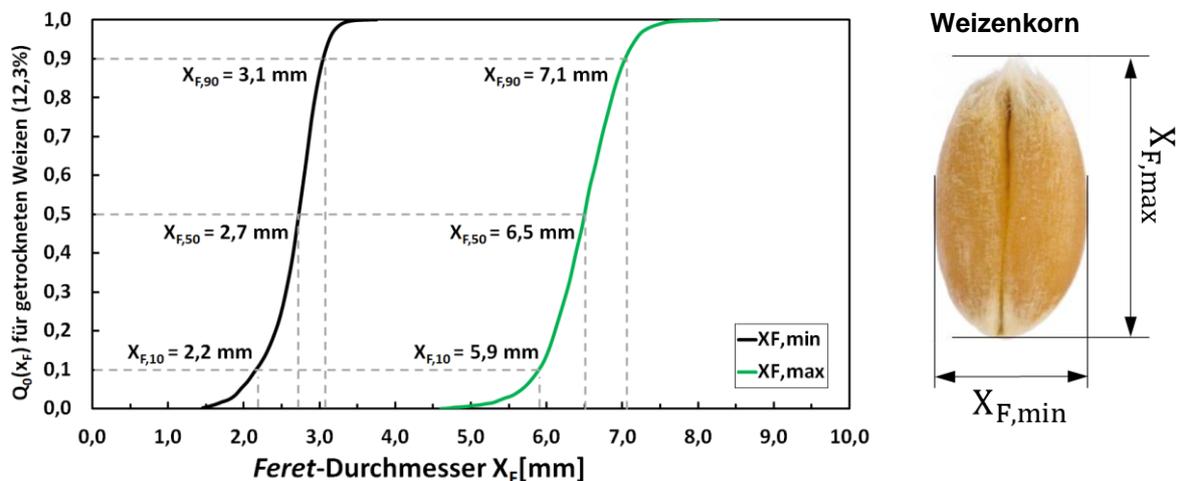


Bild 5-3: Gemessene Partikelgrößenverteilung für getrocknete Weizenkörner (vgl. rechts)

Befeuchteter Weizen (21,4 % w.b.): Der optische Eindruck des zuvor wiederbefeuchteten Weizens lässt sich als leicht „aufgequollen“ beschreiben. Dieser Eindruck bestätigte sich bei Messung der Partikelgrößenverteilung, da sich im Gegensatz zum getrockneten Versuchsmaterial (Bild 5-3) der Durchmesser für x_{50} um bis zu 0,3 mm (~10%) vergrößerte. Der Abstand zwischen minimalem und maximalem FERET-Durchmesser ist hingegen gleich geblieben, was darauf schließen lässt, dass der Quellvorgang in dieser Größenordnung proportional zur Form der Weizenkörner erfolgte.

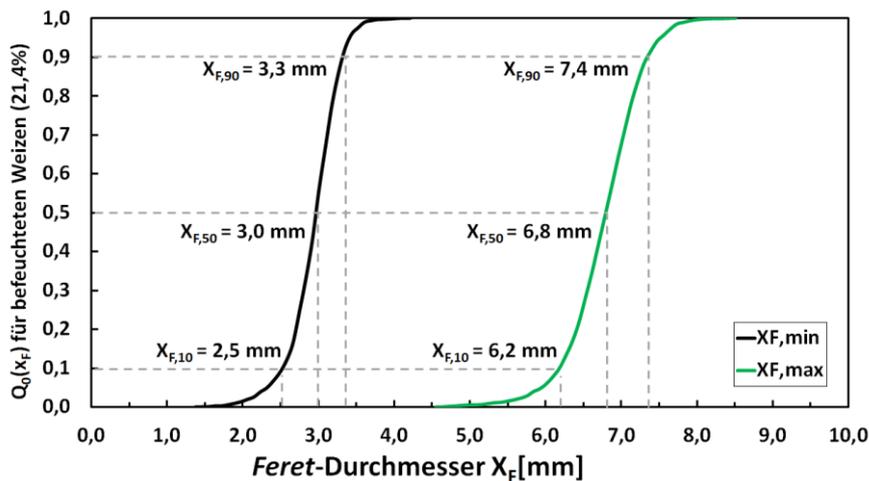


Bild 5-4: Gemessene Partikelgrößenverteilung für befeuchtete Weizenkörner

Erdmann und *Schäfer* [123] stellten fest, dass durch die Wiederbefeuchtung nicht nur ein deutliches Quellen messbar ist, sondern damit einhergehend auch eine messbare Abnahme der Schüttdichte, die im nächsten Kapitel untersucht wird. Weiterhin haben deren Messungen zur Fallzahlstabilität an verschiedenen Weizensorten gezeigt, dass sich durch Wiederbefeuchtung und nochmaliges Trocknen die Fallzahl verringert. Die Fallzahl ist vor allem in der weiterverarbeitenden Lebensmittelindustrie eine wichtige Qualitätskenngröße zur Beurteilung der Backfähigkeit.

Weizenschrot (12,3 % w.b.): Aus bereits getrockneten Weizenkörnern wurde Weizenschrot mit Hilfe einer Labormühle (Laboratory-Mill Typ: 3600, Fa. Falling Number) hergestellt und zur Zerkleinerung, Stufe 2 (<2 mm) gewählt. Aufgrund der ausgeprägten Heterogenität vermahlener Partikel und des zu erwartenden hohen Feinkornanteils wurde die Partikelgrößenverteilung mit Hilfe einer klassischen Siebanalyse und vorangegangener Riffel-Probenteilung mit einer Probenmenge von 59,3 g vorgenommen. In Bild 5-5 ist die Partikelgrößenverteilung Q_3 aufgrund ihrer Breite über der logarithmisch skalierten Abszisse dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass beim Zermahlen ein erheblicher Feinkornanteil vorzufinden ist. Darüber hinaus liegt der d_{50} mit 1,9 mm sehr nah an der vorgenommenen Spalteinstellung der Labormühle.

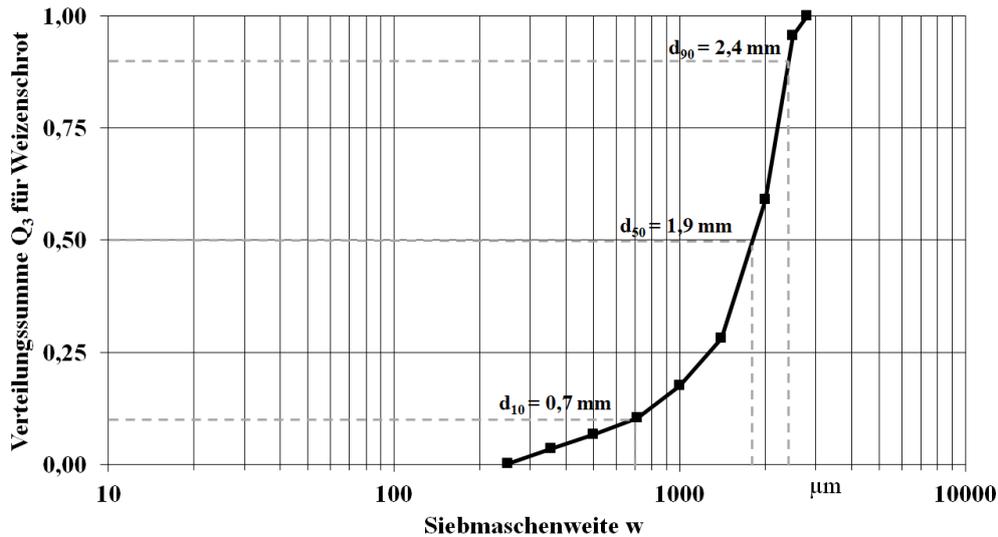


Bild 5-5: Gemessene Partikelgrößenverteilung für Weizenschrot

Sojabohnen (10,1 % w.b.): In Bild 5-6 sind die Summenverteilungen Q_0 von Sojabohnen (180g) dargestellt. Diese weisen aufgrund ihrer Lage zueinander eine Überschneidung des minimalen und maximalen FERET-Durchmessers auf, welche den Eindruck bestätigt, dass Sojabohnen je nach Ausrichtung als eher rund bzw. kugelförmig beschrieben werden können. Innerhalb einer Schüttung finden sich jedoch auch zahlreiche gebrochene bzw. halbierte Bohnen, was zu einer breitbandigeren Verteilung führt. *Kibar* und *Öztürk* [124] stellten darüber hinaus fest, dass es u. a. für Sojabohnen einen Zusammenhang zwischen der Partikelgröße, der Form und den Fließeigenschaften zwischen Feuchtegehalten von 8% bis 16% w. b. gibt. Nach deren Untersuchungen liegen die Abmessungen bei einem Gutfeuchtegehalt von 10 % w. b. im Mittel zwischen $x_{F,Min} = 5,92$ mm und $x_{F,Max} = 7,49$ mm. Gegenüber den gemessenen Zentral-werten der hier aufgenommenen Partikelgrößenverteilung (Bild 5-6) weichen diese Werte um gerade einmal 2-4% ab.

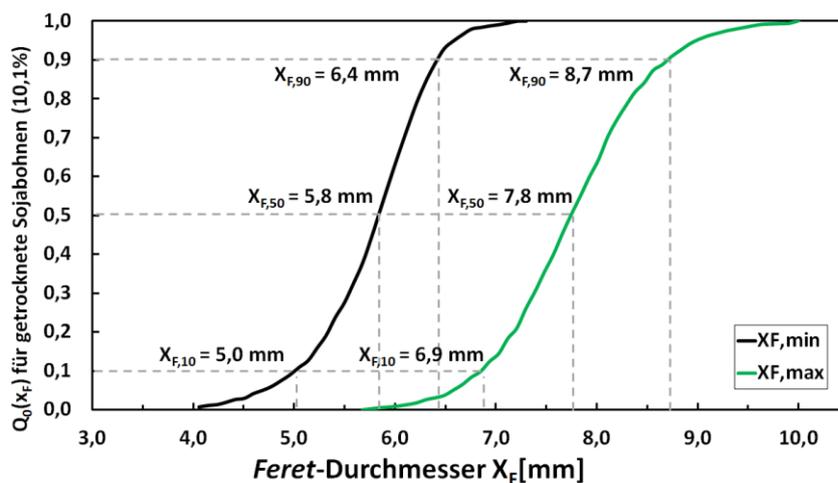


Bild 5-6: Gemessene Partikelgrößenverteilung für Sojabohnen (vgl. rechts)

5.1.3 Partikelform

Die Charakterisierung der Partikelform (Bild 5-7) erfolgt auf Grundlage der im Kapitel 5.1.2 gemessenen Partikelgrößen-Verteilungen der Versuchsmaterialien. Für jedes Versuchsmaterial wird zunächst der Durchmesser d_v einer volumenäquivalenten Kugel aus dem jeweiligen $x_{F,50}$ des minimalen bzw. maximalen FERET-Durchmessers bestimmt, siehe Bild 5-7c. Dazu werden die Weizen- und Sojabohnen-Körner, wie in Bild 5-7a gezeigt, als Rotationsellipsoide angenommen, deren Halbachsen a und b jeweils den halben, gemessenen FERET-Durchmessern entsprechen.

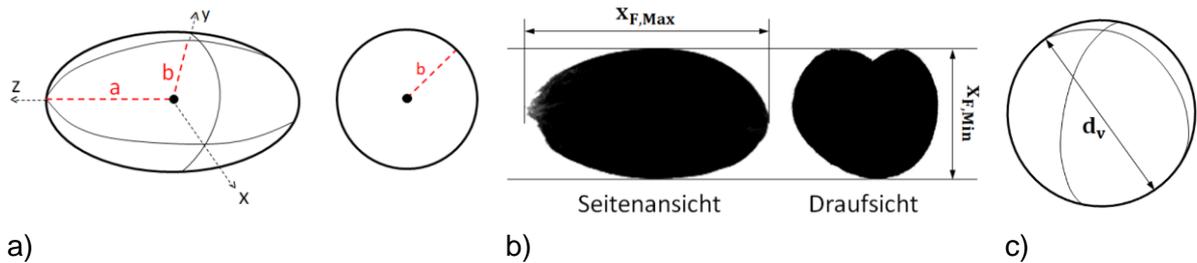


Bild 5-7: Partikelform eines Weizenkorns: a) Darstellung als Rotationsellipsoid, b) Schattenbild eines Weizenkorns und c) volumenäquivalente Kugel

Das Volumen eines Rotationsellipsoids ergibt sich nach Einsetzen der FERET-Durchmesser zu

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot a \cdot b^2 = \frac{1}{6} \pi \cdot X_{F,Max} \cdot X_{F,Min}^2 \quad (5.1)$$

Der Durchmesser der volumenäquivalenten Kugel (Bild 5-7c) berechnet sich zu

$$d_v = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{1/3} \quad (5.2)$$

und nach Einsetzen von Gleichung (5.1) in (5.2) ergibt sich

$$d_v = \sqrt[3]{X_{F,Max} \cdot X_{F,Min}^2} \quad (5.3)$$

Für das unregelmäßig geformte Versuchsmaterial Weizenschrot wird vereinfachend die Kugelform angenommen mit einem volumenäquivalenten Durchmesser, der sich aus der Siebanalyse zu $d_{50} = 1,9 \text{ mm}$ ergibt. Die berechneten Durchmesser d_v der Versuchsmaterialien sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Als Kriterium für die Rundheit eines Partikels wird außerdem die Sphärizität ψ_{Wa} nach *Wadell* berücksichtigt, die sich aus dem Verhältnis der spezifischen Oberfläche einer volumengleichen Kugel zur tatsächlichen Oberfläche der Ellipse berechnet zu [125]

$$\psi_{Wa} = \frac{\text{Oberfläche einer volumengleichen Kugel}}{\text{tatsächliche Oberfläche}} \quad (5.4)$$

Tabelle 5-2: Charakteristische Formfaktoren der Versuchsmaterialien

		d_v [mm]	ψ
Weizen	befeuchtet	4,1	0,90
	getrocknet	3,9	0,90
	geschrotet (<2mm)	1,9	-
Sojabohnen	getrocknet	6,4	0,98

Wobei die Partikelform für $\psi_{Wa} = 1$ als ideal kugelförmig beschrieben werden kann und für $\psi_{Wa} < 1$ von dieser Form abweicht. Die Oberfläche der angenommenen Ellipse wurde nach der Näherungsgleichung von *Knut Thomsen* [126] und den in Bild 5-7 angegebenen Halbachsen mit $b = c$ wie folgt berechnet

$$A_{\text{Ellipse}} \approx 4\pi \left(\frac{a^p b^p + a^p c^p + b^p c^p}{3} \right)^{1/p} \quad \text{mit } p = 1,6075. \quad (5.5)$$

Wie bereits an der Partikelgrößenverteilung von Sojabohnen diskutiert wurde, zeigt sich an der berechneten Sphärizität ψ in Tabelle 5-2, dass das Versuchsmaterial Sojabohnen eine deutlich rundere Form gegenüber Weizenkörnern besitzt. Vergleichbare Äquivalentdurchmesser wurden auch von *Boac* in [120] berechnet.

5.1.4 Schüttdichte

Füllt man ein Schüttgut in ein definiertes Volumen, so ergibt sich aus dem Verhältnis seiner Masse m zum eingenommenen Volumen V die Schüttdichte

$$\rho_s = \frac{m}{V} \quad (5.6)$$

Zur experimentellen Bestimmung der Schüttdichte wird das Versuchsmaterial üblicherweise lose in einen Einlauftrichter oder Vorratsspeicher aufgegeben. Darunter befindet sich eine Klappe, die bei Versuchsbeginn schlagartig geöffnet wird. Das Versuchsmaterial fällt daraufhin frei in einen Behälter mit definitivem Volumen. Überschüssiges Material wird vorsichtig mit Hilfe eines Spatels abgestrichen, ohne das Schüttgut innerhalb des Messvolumens zu verdichten. Mit der auf das Gewicht des Messbehälters tarierten Waage wird die Masse des Behälterinhalts bestimmt. Die Angabe der Schüttdichte erfolgt oftmals in kg/m^3 oder kg/hl . Je nach Schüttgut gibt es - abhängig von der Partikelgröße - unterschiedliche Randbedingungen für die experimentelle Bestimmung der Schüttdichte.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein *Einlaufgerät nach Böhme* mit einem Messvolumen von 1 Liter verwendet, das von der *Internationalen Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik e. V. (IFF)* bereitgestellt wurde. Die Versuchsdurchführung wird im Detail in der DIN EN 459-2 beschrieben, wobei sich diese Beschreibung auf das vorgesehene Versuchsmaterial Baukalk bezieht. Für Getreideprodukte schlägt DIN EN ISO 7971 hingegen ein Füllvolumen von 20 Litern vor, da es aufgrund der groben Struktur und Lage der Partikel zu Messunsicherheiten kommen kann. Da hierfür kein Prüfgerät mit genormtem Volumen vorhanden war, wurde die

Schüttdichte sowohl mit dem 1 Liter *Einlaufgerät nach Böhme*, als auch mit einem vollautomatischen Gutfeuchtemesssystem („Granomat“) der Firma *Pfeuffer* bestimmt. Die Abweichung zwischen beiden Prüfverfahren lag bei ~2%. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden für jedes Versuchsmaterial 5 Bestimmungen durchgeführt und der jeweilige Mittelwert in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 5-3: Gemessene Schüttdichten der Versuchsmaterialien (mit *Einlaufgerät nach Böhme*)

		ρ_s
Weizen	befeuchtet	618 kg/m ³ ± 2%
	getrocknet	746 kg/m ³ ± 2%
	geschrotet (<2mm)	593 kg/m ³ ± 2%
	rot eingefärbt	729 kg/m ³ ± 2%
Sojabohnen	getrocknet	700 kg/m ³ ± 2%
	rot eingefärbt	709 kg/m ³ ± 2%

Zwischen dem eingefärbten und dem ungefärbten Versuchsmaterial ergaben sich nur geringfügige Abweichungen in den Schüttdichten. Entsprechend der in 5.1.2 untersuchten Partikelgrößen-verteilung führt die Absorption von Wasser zu einer Volumenvergrößerung der Körner. Die Schüttdichte befeuchteter Weizenkörner lag daher rund 15% unterhalb des Wertes für getrockneten Weizen.

5.1.5 Fließeigenschaften

Bei Lager- und Transportvorgängen lässt sich das Verhalten von Flüssigkeiten unter Berücksichtigung ihrer Viskosität hinreichend genau voraussagen. Dagegen ist zur Beschreibung des Schüttgutverhaltens die Kenntnis einer Vielzahl von Materialeigenschaften notwendig, die als sog. Fließeigenschaften bei der Apparategestaltung eine große Rolle spielen. Für die Entwicklung der neuartigen Austrageinrichtung genügt es somit nicht nur die Partikelgrößenverteilung, die Schüttdichte oder die infolge der Füllmenge auftretenden Schüttgutspannungen zu kennen. Zu den wichtigsten Fließeigenschaften bei der Apparategestaltung zählen z. B. die Fließfähigkeit ff_c , der effektive Reibungswinkel φ_e , der innere Reibungswinkel φ_i sowie der Wandreibungswinkel φ_x . Darüber hinaus gibt es noch weitere Kennzahlen die u. a. auch bei der Bewertung der Produktqualität eine Aussage über die Belastbarkeit und das Kompaktieverhalten geben und in vollem Umfang von *Schulze* [6] erläutert werden. Diese Eigenschaften lassen sich mit Schergeräten bestimmen. Die in dieser Arbeit aufgeführten Versuchsmaterialien wurden mit Hilfe eines Ringschergerätes (Typ: RST-01.01) und einer Standardscherzelle vom Typ: M untersucht. Der grundlegende Messaufbau und das Prüfverfahren sind den Quellen [6], [19] zu entnehmen und werden auf Grund ihres Umfangs an dieser Stelle nicht erläutert. Schüttgutfließeigenschaften sind in einem Behälter örtlich von den einwirkenden mechanischen Spannungen abhängig. Im Kapitel 5.5 wird ein Vorversuch beschrieben, bei dem die Vertikalspannung von getrocknetem Weizen auf den Behälterboden (0,24 m²) eines Laborsilos zu $\sigma_{v,Weizen} = 4368$ Pa bestimmt wurde. Ausgehend von dieser Spannung und bezogen auf die Querschnittsfläche des Scherzelleninnenrings

(0,022 m²) ergibt sich eine maximale Anscherlast von 10,5 kg. Hieraus konnte eine geeignete Abstufung der Lasten beim An- und Abscheren für jeden Fließort festgelegt werden (Tabelle 5-4). Für Gebinde, Fässer oder Bigbags können hingegen die Empfehlungen von Schulze in [6, S. 117] dienen.

Tabelle 5-4: An- und Abscherlasten zur Bestimmung der Fließorte (FO)

	FO 1	FO 2	FO 3
Anscheren	10,5 kg	7,5 kg	5,3 kg
Abscheren 1	8,5 kg	5,9 kg	4,2 kg
Abscheren 2	5,8 kg	4,1 kg	2,9 kg
Abscheren 3	3,2 kg	2,2 kg	1,5 kg

Es ist davon auszugehen, dass sich die ausgewählten An- und Abscherlasten grundsätzlich auch für alle anderen Versuchsmaterialien in dieser Arbeit eignen. Die aus insgesamt 3 gemessenen Fließorten (siehe **Anlage 3 - Anlage 14**) bestimmten Fließeigenschaften sind in Tabelle 5-5 zusammengefasst. Die Messung des Wandreibungswinkels φ_x erfolgte auf verzinktem Stahlblech, aus dem sämtliche Versuchsaufbauten (Kap. 5.2) gefertigt wurden. Die Messung des Wandreibungswinkels φ_x erfolgte auf verzinktem Stahlblech, aus dem sämtliche Versuchsaufbauten (Kap. 5.2) gefertigt wurden. Die Messung des Wandreibungswinkels ergab für die meisten Versuchsmaterialien (**Anlage 9 - Anlage 14**) keine Ursprungsgerade. In der Regel legt man daraufhin eine gekrümmte Funktion als Wandfließort fest und bestimmt den Wandreibungswinkel als Funktion der Wandnormalspannung σ_w . In diesem können die Messpunkte jedoch durch eine Regressionsgerade angenähert werden, wodurch sich der Wandreibungswinkel für alle Punkte des Wandfließortes wie folgt bestimmen lässt

$$\varphi_x = \arctan\left(\frac{\tau_w}{\sigma_w}\right) \quad (5.7)$$

Tabelle 5-5: Gemessene Fließeigenschaften der Versuchsmaterialien und Einordnung in Bereiche unterschiedlicher Fließfähigkeit

		ff_c	φ_e	φ_i	φ_x	$ff_c < 1$	<i>nicht fließend</i>
Weizen	befeuchtet	6	44°	42°	21°	1 < ff _c < 2	<i>sehr kohäsiv</i>
	getrocknet	>10	29°	28°	18°	2 < ff _c < 4	<i>kohäsiv</i>
	geschrotet	5	41°	39°	16°	4 < ff _c < 10	<i>leicht fließend</i>
	rot eingefärbt	>10	32°	31°	16°	ff _c > 10	<i>frei fließend</i>
Sojabohnen	getrocknet	>10	36°	35°	13°		
	rot eingefärbt	>10	36°	35°	12°		

Die Versuchsmaterialien Weizen und Sojabohnen sind nach Auswertung von Tabelle 5-5 frei fließende Schüttgüter. Die Messung derartiger Schüttgüter stellt in der Regel besondere Herausforderungen an den An- und Abscherprozess. Das kleine Verhältnis zwischen Korngröße und Scherzellenfüllvolumen, sowie die heterogene Form der Partikel nehmen

erheblichen Einfluss auf die Verdichtbarkeit der Probe im Scherzellentrog. So lässt sich im Grunde genommen nur ein „scheinbar“ verdichteter Zustand beim Anschauen erreichen. Denkt man sich den Scherzellentrog weg, so bliebe dieser Zustand nicht erhalten. Weiterhin sind Weizenkörner und Sojabohnen dazu in der Lage (bei Drehung des Scherzellentrogs) frei zu rotieren und immer wieder neue Positionen einzunehmen. Hier bedarf es in Zukunft noch weiterführender Untersuchungen, da die bisherige Theorie hinter der Scherzellenmessung davon ausgeht, dass die Schüttgutprobe im Scherzellentrog „verfestigt“ ist.

Die gemessenen Winkel innerer Reibung für Sojabohnen erscheinen mit $\varphi_i = 35^\circ$ relativ hoch. In der Literatur findet man hier oft Angaben zwischen $24\text{-}31^\circ$ [127]–[129]. Zurückführen lässt sich dieses Ergebnis auf die Vielzahl von gebrochenen und halbierten Sojabohnen, die sich im Versuchsmaterial befinden und durch ihre Form sowohl ein Verkeilen begünstigen, als auch eine größere Auflagefläche bieten. Zwischen den gefärbten und ungefärbten Schüttgütern zeigen sich nur geringe Abweichungen in den gemessenen Fließeigenschaften. Dagegen besitzt Weizenschrot u. a. aufgrund seiner Form, seiner Oberfläche und seines deutlich höheren inneren Zusammenhalts nur leicht fließende Eigenschaften. Die Befeuchtung von Weizen führt aufgrund des größeren Adhäsionsvermögens zu einer Verschlechterung der Fließeigenschaften von „frei fließend“ zu „leicht fließend“.

5.2 Aufbau der Versuchsanlagen

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer neuartigen Austrageinrichtung im Technikumsmaßstab, deren Funktionsweise und Einfluss auf das Verweilzeitverhalten an einem Rechteckbehälter (Silo) und an einer Schachttrockner-Versuchsanlage getestet wurde. In diese Untersuchungen wurden Austrageinrichtungen nach dem Stand der Technik mit einfachen Schieber- und Dosierkammersystemen einbezogen, u. a. um Vor- und Nachteile des neuen Lösungsansatzes abzuschätzen. Der Aufbau dieser Systeme wird nachfolgend beschrieben.

Getreideschachttrockner im Technikumsmaßstab

Bei der Ernte landwirtschaftlicher Produkte (z. B. Weizen, Mais, Raps) fallen enorme Schüttgutmengen an, die vor ihrer Lagerung und Weiterverarbeitung in einen haltbaren Zustand überführt bzw. konserviert werden müssen. Ziel ist es, den Feuchtegehalt großer Massenströme zeitnah, produktschonend und energieeffizient zu senken, um Schimmelbildung und Verderb zu vermeiden. Weltweit etabliert hat sich die konvektive Trocknung im *Durchlauf-*, *Getreideschacht-* oder – nach der Form seiner Luftkanäle benannt – *Dächerschachttrockner*, der für Verweilzeitmessungen im Maßstab 1:5 aufgebaut (Bild 5-8) wurde. Über die Befüllsektion wird das feuchte Material in die übereinander aufgebauten Trocknungssektionen gefüllt. Das am Gestell befestigte Austragsystem verhindert dabei, dass bereits eingefülltes Material den Apparat unkontrolliert verlässt.

Die Trocknungssektionen weisen reihenweise angeordnete Zu- und Abluftkanalreihen auf, die jeweils nur einseitig in Richtung ihres namengebenden Luftkastens geöffnet sind. Dementsprechend sind alle **Abluftkanäle** stirnseitig zum **Zuluftkasten** geschlossen.

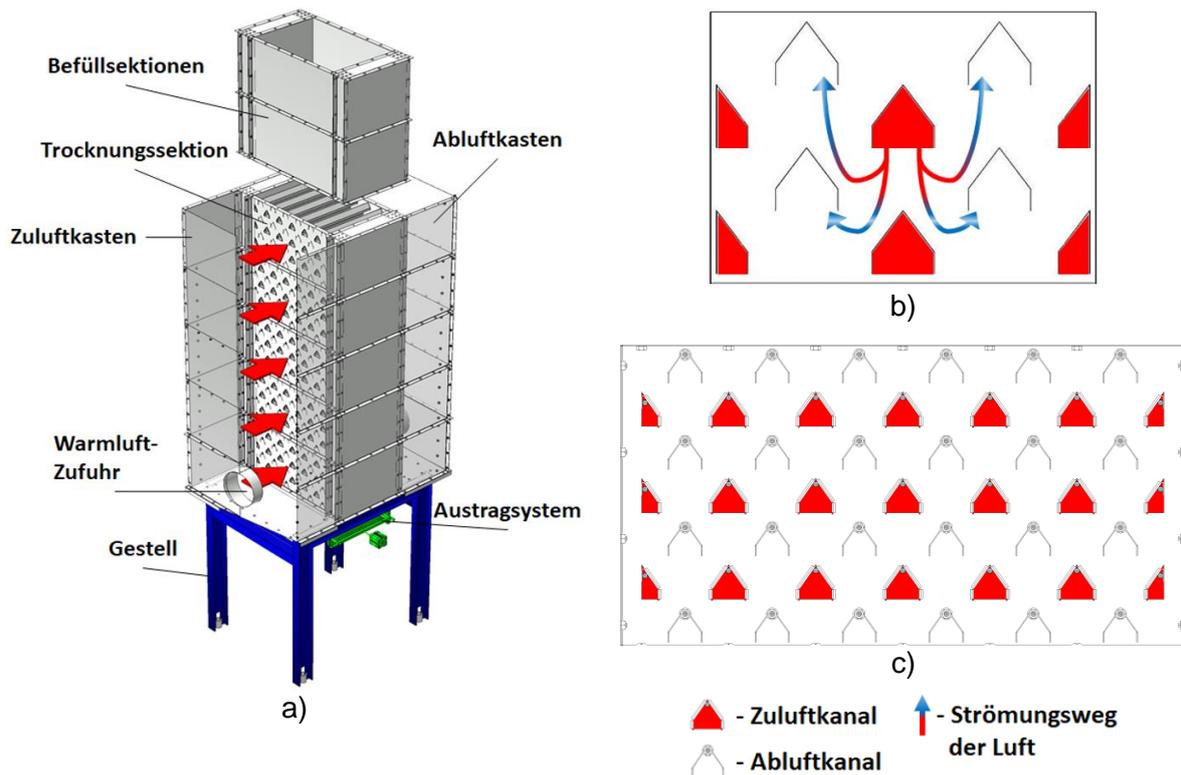


Bild 5-8: Grundlegender Aufbau des Labor-Getreideschachttrockners (a) und Trocknungssektion vom Typ I (b), sowie Trocknungssektion vom Typ II (c)

Weiterhin sind die Luftkanäle selbst nach unten hin geöffnet. Auf diese Weise kann die vom Zuluftkasten angesaugte Prozessluft das Produkt großflächig durchströmen und über die Abluftkanäle wieder verlassen (siehe Bild 5-8b). Trotz der quasi-kontinuierlichen Produktbewegung wird der Trockner kontinuierlich mit Prozessluft durchströmt. Das Getreide wird somit kontinuierlich getrocknet. Die Anzahl und die Gestaltung der Trocknungssektionen variieren in der Praxis je nach Hersteller und deren Trockneraufbau. Für experimentelle Untersuchungen stehen in dieser Arbeit zwei unterschiedliche Typen von Sektionen bereit. Im Bild 5-8b ist die Frontansicht einer Sektion (L600 x B400 x H420 mm) mit 4 Luftkanalreihen dargestellt. Die Abmessungen der Luftkanäle (**Typ I**: B100 x H130 mm, $\theta_{eb} = 30,5^\circ$) entsprechen dem Maßstab realer Luftkanäle in der Praxis. Mit nur zwei Luftkanälen je Reihe entspricht diese Sektion jedoch nur dem Ausschnitt eines großtechnischen Getreideschachttrockners. Dagegen ist die im Bild 5-8c gezeigte Trocknungssektion (**Typ II**: L600 x B400 x H350 mm) im Maßstab 1:5 herunter skaliert worden, wie auch deren Luftkanäle (B40 x H40 mm, $\theta_{eb} = 35^\circ$). Für die experimentellen Untersuchungen zur Schüttgutbewegung wurden die modular aufgebauten Trocknungssektionen ohne Anschluss der Luftkästen verwendet.

Rechteckbehälter

Für den Aufbau eines einfachen Rechteckbehälters wurden modulare, miteinander verschraubbare Sektionen (3) aus verzinktem Stahlblech (L600 x B400 x H350 mm) auf einem Gestell (6) platziert, siehe Bild 5-9. Mit Hilfe dieser Sektionen lässt sich eine variable Füllhöhe oberhalb der Austrageinrichtung (1) einstellen und damit die Strömungsweglänge des

Versuchsmaterialies variieren. Durch den bewussten Verzicht auf Einbauten wirkt der Rechteckbehälter wie eine natürliche Verlängerung der Austragswanne, in der sich das Versuchsmaterial frei bewegen kann. Mit Hilfe dieses Aufbaus sollte u. a. die Arbeitsweise der Austrageinrichtung und deren Auswirkung auf das Verweilzeitverhalten untersucht werden.



- 1 Austrageinrichtung
- 2 Steuereinheit
- 3 Rechteckbehälter (Sektionen)
- 4 Auffangbehälter
- 5 Labor-Hubwagen
- 6 Gestell

Bild 5-9: Versuchsanlage mit modular aufgebautem Rechteckbehälter

Schieber-Austrageinrichtung

Eine relativ einfache Art der Entleerung lässt sich mit Hilfe der Schieber-Austrageinrichtung (Bild 5-10) umsetzen. Die Abmessungen der Austragswanne sind auf die Dimensionen der Trocknungs- und Befüllsektionen (L600 x B400 mm) angepasst, sodass eine ungehinderte Schüttgutbewegung frei fließender Schüttgüter in Richtung der Öffnungsschlitzte möglich ist. Die verwendete Schieber-Austrageinrichtung besitzt 11 Auslaufrichter mit einer Öffnungsweite von $B = 10 \text{ mm}$. Der Neigungswinkel der feststehenden Leitbleche (Bild 5-10, unten) beträgt $\theta_{eb} = 13,4^\circ$. Unterhalb der Öffnungsschlitzte befindet sich ein horizontal beweglicher Schieber (grün). Der Schieber besteht aus mehreren Rechteckprofilen, die unterhalb der Öffnungsschlitzte positioniert sind und diese in der Ruheposition verschließen. Durch seitliche Bewegung des Schiebers können die Öffnungsschlitzte gleichzeitig freigeben und wieder verschlossen werden. Der Schieber wird durch zwei synchron arbeitende pneumatische Zylinder (Fa. AIRTEC Typ: Pneumatic NXD-040-020-210) bewegt, die an eine gemeinsame Druckluftversorgung (ca. 6 bar) angeschlossen sind.

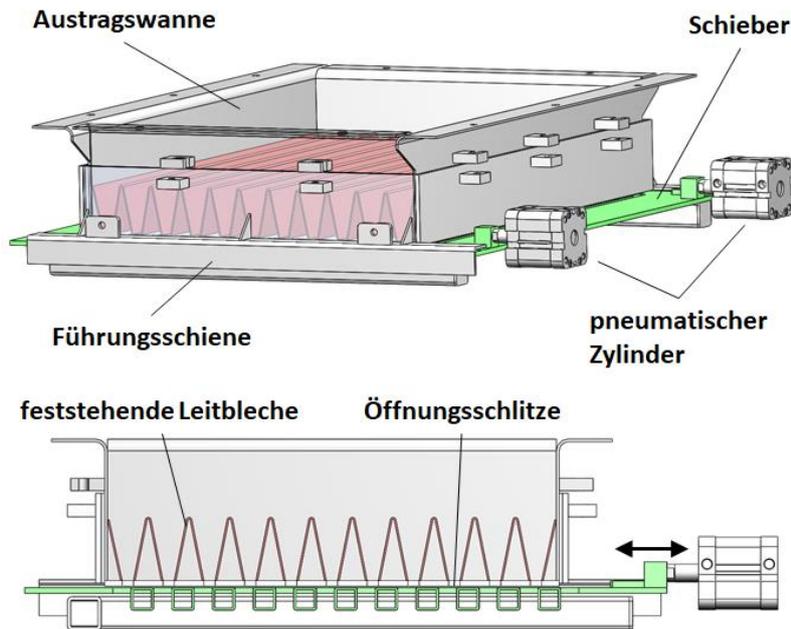


Bild 5-10: Schrägbild und Seitenansicht der Schieber-Austrageinrichtung

Die Fahr- und Haltezeiten der Zylinder bestimmen die Dauer, die ein vollständiger Öffnungsvorgang benötigt. Aus der Austragszeit, der Gestaltung der Austrageinrichtung und der auf das Schüttgut einwirkenden Schwerkraft ergibt sich der Austragsmassenstrom. Die Konstruktion und der Aufbau dieser Austrageinrichtung erfolgten im Rahmen einer Diplomarbeit [130]. Diese Austrageinrichtung wurde, abweichend von praxisüblichen Systemen, bewusst mit einer hohen Anzahl parallel angeordneter Öffnungsschlitze gestaltet, um detaillierte Untersuchungen zur Massenstromverteilung, Gutfeuchte- und Guttemperaturverteilung über dem Trocknerquerschnitt im Technikumsmaßstab zu ermöglichen. Eingehende Untersuchungen hierzu wurden u. a. von Teodorov und Mellmann [61], *Mellmann et al.* [31] und *Kocsis et al.* [131] durchgeführt.

Dosierkammer-Austrageinrichtung

In der *DE202007005737U1* wird ein patentierter Durchlauftrockner mit einer Austrageinrichtung beschrieben, die anstelle eines einfachen Schiebers horizontal bewegte Dosierkammern aufweist. Dieses Austragssystem wurde im Verhältnis 1:5 in den Technikumsmaßstab herunter skaliert und für experimentelle Untersuchungen aufgebaut (Bild 5-11). Der grundlegende Aufbau erinnert an das zuvor beschriebene System mit Schieber. Die Gestaltung der feststehenden Leibleche innerhalb der Austragswanne weist jedoch Besonderheiten auf: Die Neigungswinkel θ_{eb} der dachförmigen Leitbleche (rot) ist mit 36° relativ flach gewählt, aber immer noch für eine Vielzahl frei fließender Schüttgüter geeignet. Die Öffnungsschlitze zwischen den Leitblechen haben eine Weite von $B \approx 35 \text{ mm}$. Das Austragssystem verfügt damit über insgesamt sechs Öffnungsschlitze über der Breite. An den Stirnwänden der Austragswanne befinden sich nach innen geneigte Leitbleche ($\theta_{eb} \approx 22^\circ$), die zum Schutz der darunter befindlichen Rollenlager benötigt werden. Die Rollenlager gewährleisten eine gleichmäßige Verschiebung der miteinander verbundenen Dosierkammern (grün). Die Verschiebung erfolgt mit Hilfe eines pneumatischen Zylinders. Der Fahrweg des

darin befindlichen Kolbens wurde so bemessen, dass sich die mit Material gefüllten Kammern ($V_{\text{Kammer}} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$) beim Verschieben unterhalb der feststehenden Leitbleche entleeren. Zur gleichen Zeit werden die zuvor entleerten Kammern befüllt, die sich nun zwischen den Öffnungsschlitzten der Austragswanne befinden. Je Abspeisung werden zwei Hubvorgänge (nach links und rechts) ausgeführt, wodurch ein einseitiger Schüttgutabzug aus dem Behälter verhindert wird. Im Gegensatz zur Schieber-Austrageeinrichtung ist mit diesem Austragssystem kein rascher, ungehinderter Auslauf aus dem Schüttgutbehälter möglich, da immer nur das Füllvolumen der Kammern entleert wird. Für eine vollständige Behälterentleerung ist deshalb eine Vielzahl von Hubvorgängen erforderlich.

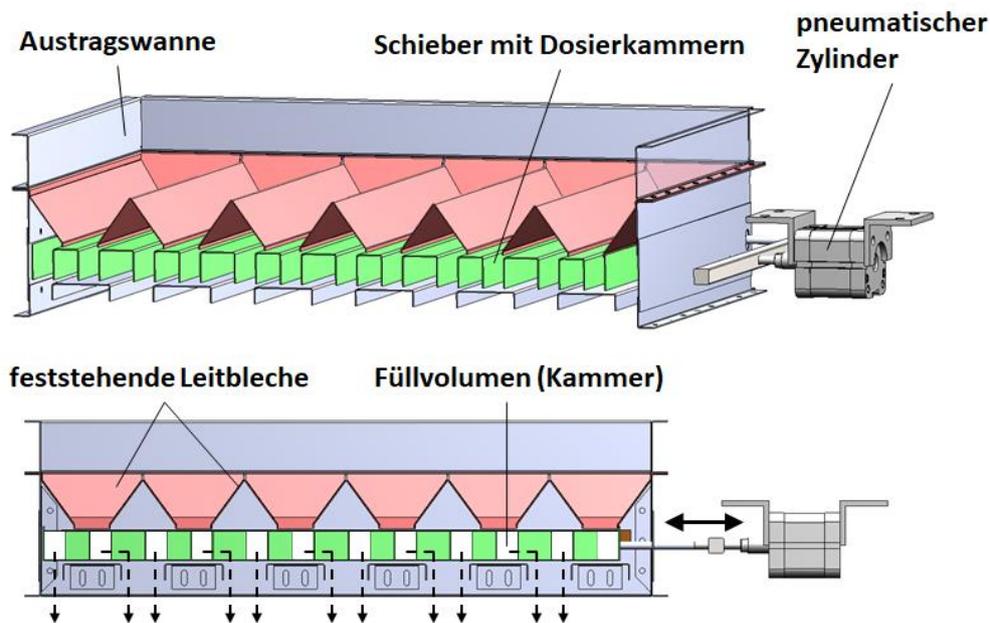


Bild 5-11: Schrägbild und Seitenansicht der Austrageinrichtung mit Dosierkammern

5.3 Ermittlung der Austragscharakteristik

Zur Untersuchung der Austragscharakteristik wurde eine Probenschublade gefertigt, die unterhalb der Austrageinrichtung platziert wird. Die Probenschublade wurde so gestaltet, dass sie zur Testung der verschiedenen o. g. Austrageinrichtungen einschließlich der neuartigen Vorrichtung geeignet ist (Bild 5-12). Bei deren Aufbau wurde berücksichtigt, dass sich die Reihen A - F der Probenbehälter jeweils mittig unterhalb der Öffnungsschlitzte der Austrageinrichtung befinden. Dadurch wird eine Vermischung von ausgetragenen Versuchsmaterial aus benachbarten Öffnungsschlitzten vermieden. Die Probenbehälter lassen sich einzeln herausnehmen, um den Inhalt zu verwiegen. Mit einem Raster von 6x4 Probenbehältern wird eine hohe Auflösung der gemessenen Schüttgutverteilung über dem Apparatequerschnitt erzielt. Dies ist eine wichtige Voraussetzung zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit der vertikalen Schüttgutströmung im Apparat. Dazu werden die gemessenen Massenverteilungen über der Fläche der Austrageinrichtung dargestellt und analysiert. In den Kapiteln 8.1.2 und 8.2 wird die Probenschublade zur Beurteilung der Dosiergenauigkeit und zur Auswertung von Verweilzeitverteilungen verwendet.

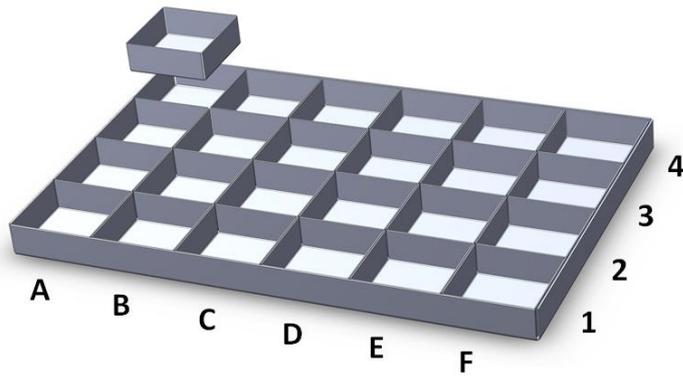


Bild 5-12: 3D-Zeichnung der Probenschublade (L600 x B400 mm) mit herausnehmbaren Behältern (L99 x B97 x H36 mm)

5.4 Experimentelle Verweilzeitanalyse

5.4.1 Auswahl der Markierungsmethode

Das Prozessverhalten in Schüttgutapparaten wird maßgeblich von der Art der Partikelbewegung und der Verweilzeitverteilung beeinflusst. Der Stand des Wissens zur experimentellen Verweilzeitanalyse in Schüttgutbehältern wurde bereits im Kapitel 2.4 erläutert. Eine häufig angewendete Methode ist die Aufgabe eines sogenannten Dirac-Impulses von Tracermaterial am Prozesseingang. Bild 5-13 veranschaulicht verschiedene Methoden der Aufgabe eines Dirac-Stoßes in einem konventionellen Silo und in einem Schüttgutapparat mit ganzflächig wirkender Austrageinrichtung. Um das Verweilzeitverhalten eines Apparates zu untersuchen, wird der Tracer üblicherweise direkt in den Zulaufstrom aufgegeben, wie dies am Beispiel eines Silos im Bild 5-13a dargestellt ist. Unterhalb des Produktzulaufs bildet sich ein Schüttkegel aus, über den das Schüttgut über dem Siloquerschnitt verteilt wird. Dadurch wird auch das aufgegebene Tracermaterial über dem Apparatequerschnitt vereinzelt. Dieser zusätzliche Mischvorgang beeinflusst das Verweilzeitverhalten im gesamten Silo. Um diesen Mischvorgang zu vermeiden, der eine breitere Verweilzeitverteilung zur Folge hat, und allein die Schüttgutbewegung innerhalb des Apparates untersuchen zu können, bietet sich alternativ die Methode der Einbringung einer horizontalen Tracerschicht an, die im Bild 5-13b dargestellt ist. Diese ausschließlich in der Schüttguttechnik anwendbare, alternative Messmethode ist zwar in der großtechnischen Praxis kaum realisierbar. Sie ist jedoch für Forschungszwecke im Labor- und Technikumsmaßstab relevant, um die Partikelbewegung und das Verweilzeitverhalten in Schüttgutapparaten zu analysieren.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Methode der Einbringung einer horizontalen Tracerschicht gewählt (Bild 5-13c) mit dem Ziel, den Einfluss der konstruktiven Gestaltung und Betriebsweise der neuartigen Austrageinrichtung auf das Verweilzeitverhalten zu untersuchen. Als Tracermaterial wurden gefärbte Weizenkörner verwendet, deren Herstellung im Kapitel 5.1.1 erläutert wurde. Durch die Einbringung der horizontalen Schicht aus Tracerpartikeln wird an der Aufgabestelle (Anfang des „Strömungsweges“, $z = 0$) eine Pfropfenströmung vorgegeben. Das heißt, alle Tracerpartikel haben vor Versuchsbeginn vergleichbare Anfangsbedingungen.

Im Bild 5-13 unten sind die zu erwartenden Verweilzeitverteilungen qualitativ dargestellt. Zusätzlich wurden die qualitativen Verläufe der Partikelgeschwindigkeitsverteilungen in der Schüttung als gestrichelte Linien (rot) gekennzeichnet. Es wird erwartet, dass mit der neuartigen, ganzflächig wirkenden Austrageinrichtung eine homogenere Partikelgeschwindigkeitsverteilung und eine schmalere Verweilzeitverteilung im Vergleich zu anderen Austrageinrichtungen unterhalb von Schüttgutbehältern erzielt werden (Bild 5-13c).

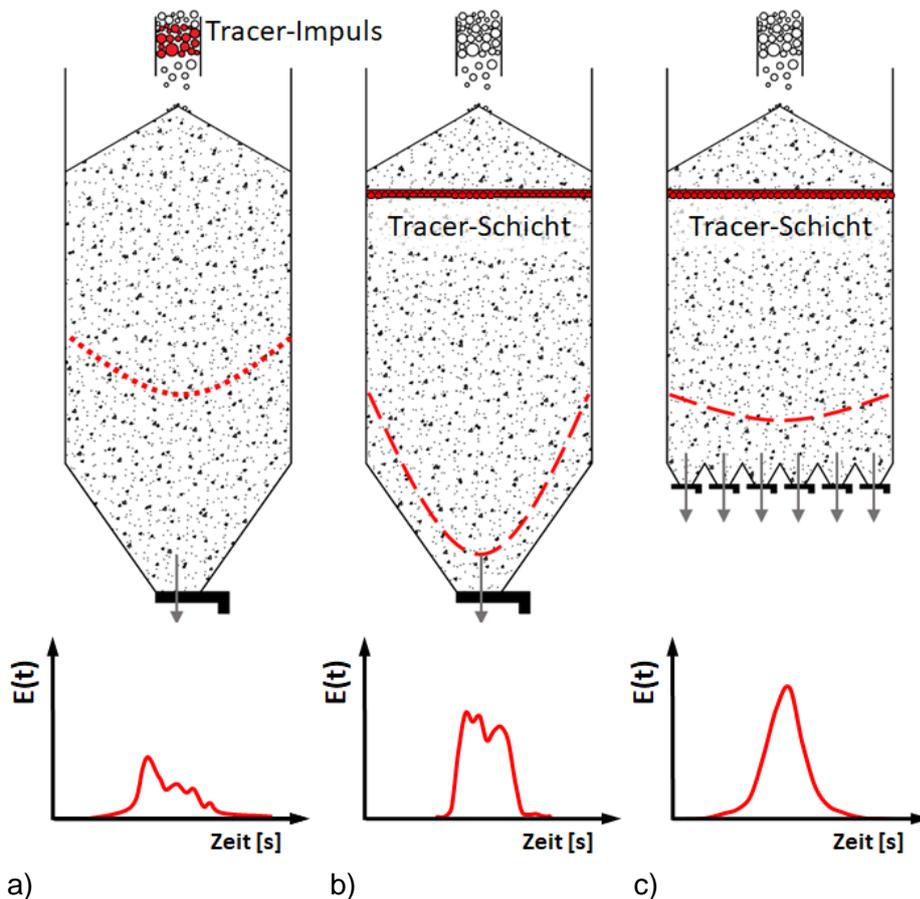


Bild 5-13: Aufgabe eines Dirac-Impulses (a) durch Tracerinjektion in den Zulaufstrom eines Silos oder (b, c) durch Einbringung einer horizontalen Tracerschicht in die Schüttung unterhalb des Zulaufs. Qualitative Verläufe der zu erwartenden Verweilzeitverteilungen am Austrag (unten) sowie der vertikalen Partikelgeschwindigkeitsverteilungen in der Schüttung (gestrichelte, rote Linien).

5.4.2 Ermittlung der Verweilzeitverteilung

Vor Versuchsbeginn ist die Strömungsweglänge festzulegen, die von den Tracerpartikeln zurückzulegen ist. Diese entspricht der Höhe der Schüttgutsäule oberhalb der Austrageinrichtung, bis zu der der Apparat mit ungefärbtem Versuchsmaterial als „Vorlaufschüttung“ aufgefüllt wird. Die Schüttungsoberfläche wird glattgestrichen, um anschließend die Tracerschicht gleichmäßig auftragen zu können. Um eine reproduzierbare Aufgabe des Eingangsimpulses zu gewährleisten, wurde die gesamte Tracermasse einer Schicht (560g) auf 24 gleich große Flächen verteilt, siehe Bild 5-14. Nach Einbringung der Tracerschicht wird ungefärbtes Versuchsmaterial vorsichtig und gleichmäßig solange aufgegeben, bis der gewünschte Füllstand des Behälters erreicht ist.

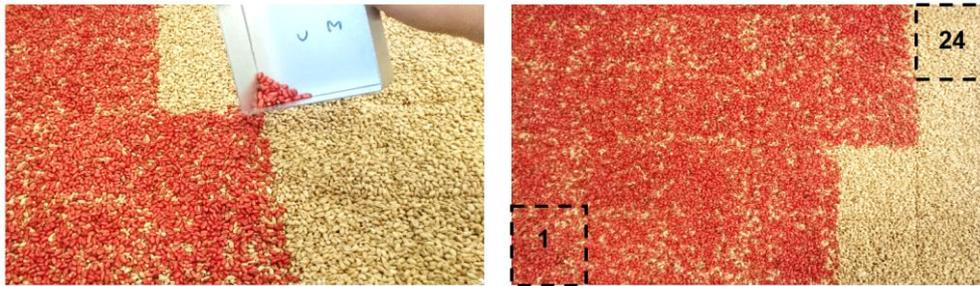


Bild 5-14: Einbringen gefärbter Weizen Tracerpartikel (Draufsicht)

Im Anschluss an diese Vorbereitungen wird das Verweilzeitexperiment mit der Inbetriebnahme der Austrageinrichtung gestartet. Die Austrageinrichtung wird intermittierend (diskontinuierlich) betrieben. Um nahezu stationäre Bedingungen im Versuchsbetrieb zu erreichen, wird der Füllstand des Behälters fortwährend konstant gehalten. Nach Ablauf der sog. Tracer-Durchbruchzeit werden in der Probenschublade die ersten Tracerpartikel beobachtet. Von diesem Zeitpunkt an wird jede ausgetragene Schüttgutprobe analysiert. Um die Tracerkonzentration nach einem Öffnungszyklus von N_D Austragungen (siehe Kapitel 6.4.1) zu bestimmen, wird die Probenschublade unterhalb der Austrageinrichtung entleert. Vom Inhalt der Probenschublade wird eine repräsentative Probe entnommen und deren Tracerkonzentration bestimmt. Hierzu wird die Probe mit Hilfe eines Farbscanners eingescannt (Bild 5-15). Auf diese Weise können einem Öffnungszyklus ein oder mehrere Scan-Bilder zugeordnet werden. Zur Ermittlung der Anzahl der Tracerpartikel (rote Weizenkörner) aus den Scan-Bildern wurde die Software „Farbanalyse.exe“ verwendet, die am *Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e. V. (ATB)* entwickelt wurde. Eine ähnliche Methode nutzten *Eichler* und *Dau* [66] unter Abtastung von Graustufen. Die Graustufendetektion setzt jedoch eine sehr präzise Ausleuchtung voraus, um möglichst hohe Kontraste zwischen Hintergrund und Messobjekt zu erzielen. Diese Methode birgt die Gefahr, dass störende Schattenwürfe die Messungen verfälschen. Die am *ATB* entwickelte Software wurde auf die Farbe des verwendeten Tracermaterials und deren Winkel im Farbkreis kalibriert (Bild 5-15 rechts). Hierfür wurde einmalig vor Versuchsbeginn eine repräsentative Menge des Tracermaterials auf den Scanner gelegt, eingescannt und von der Software auf die Farbabstufungen, die Sättigung und die Helligkeit abgetastet (**Anlage 1**).

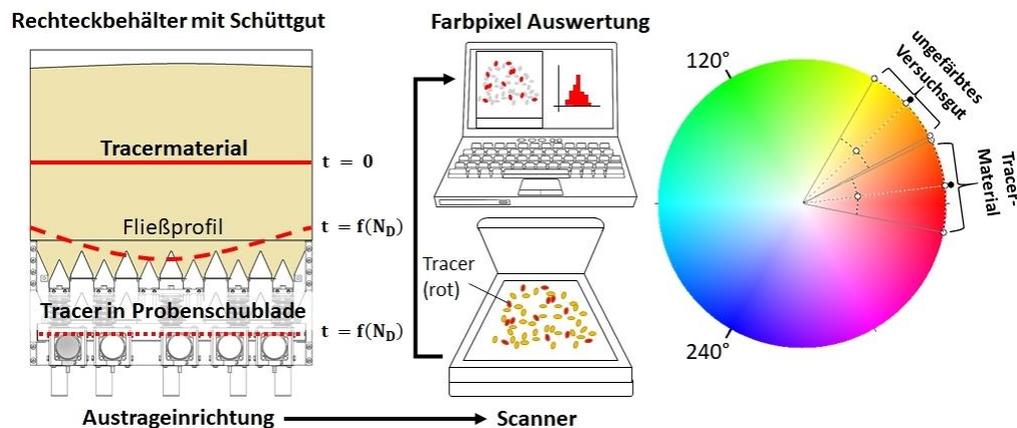


Bild 5-15: Aufbau des Messplatzes zur Bestimmung der Verweilzeitverteilung (links) und Darstellung des Farbwinkels der Tracerpartikel (rechts)

Anschließend wurde das gespeicherte Farbprofil für den Versuchsbetrieb aktiviert und bei der Auswertung der Scan-Bilder auf jedes eingeleseene Bild angewendet. In einem Bild darf sich dabei auch ungefärbtes Versuchsmaterial befinden, da es vom Farbprofil und der darauf angewendeten Farbpixelzählung nicht berücksichtigt wird (**Anlage 2**). Bild 5-16 veranschaulicht das Ergebnis einer Testmessung zur Überprüfung der Messmethode. Dargestellt ist die mit Hilfe der Software ermittelte Anzahl von Farbpixeln über der Anzahl N_D an Austragungen bzw. Öffnungszyklen. Die Anzahl von Tracerpartikeln (rote Balken) wurde für jeden Öffnungszyklus manuell ausgezählt. Insgesamt wurden bei der Methodvalidierung $N_{\text{Tracer}} = 13.027$ Tracerpartikel ermittelt. Wie Bild 5-16 verdeutlicht, stimmt der zeitliche Verlauf der berechneten Pixelanzahl sehr gut mit der Anzahlverteilung der ausgezählten Tracerpartikel überein.

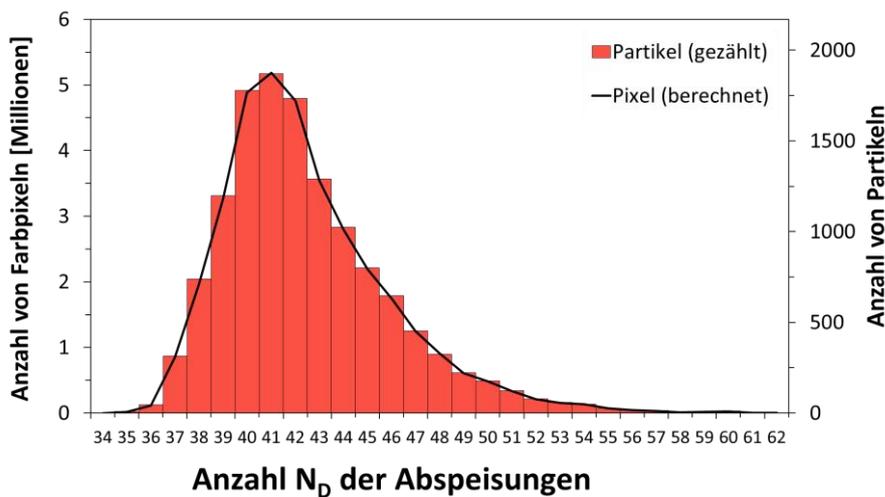


Bild 5-16: Vergleich zwischen der berechneten Farbpixel-Anzahl und der gemessenen (gezählten) Anzahl an Tracerpartikeln

Vor Beginn der Testmessung wurde das Tracermaterial (560 g Weizen) vollständig eingescannt. Mit Hilfe der Analysesoftware ergab sich daraus eine Anzahl roter Farbpixel von $N_{\text{Pixel}} \approx 33,9$ Millionen. Im Vergleich dazu errechnete sich aus der Integration der zeitlichen Farbpixel-Verteilung nach Bild 5-16 eine Gesamtanzahl von $\sim 35,4$ Mill. Pixeln. Die Abweichung beträgt ca. 4,2 % und kann auf die zufällige Ausrichtung und Lage der Partikel auf dem Scanner zurückgeführt werden. Um diese Annahme zu verifizieren, wurden nochmals Sammelproben (~ 50 g) der Tracermaterialien Weizen und Sojabohnen jeweils 10x eingescannt. Dabei wurden die Proben bei jedem Scan-Vorgang neu auf dem Scanner verteilt. Nach Auswertung dieser Testmessungen ergaben sich für die Versuchsmaterialien im Durchschnitt folgende Toleranzen zwischen minimaler und maximaler Anzahl von gezählten Pixeln:

- Weizen $\sim 4,2$ %
- Sojabohnen $\sim 3,4$ %.

Das Ergebnis zeigt, dass die so ermittelten Toleranzen in der gleichen Größenordnung liegen wie die oben genannte Messabweichung. Die gewählte Farbpixel-Messmethode kann somit als hinreichend genau für die Ermittlung der Verweilzeitverteilungen bewertet werden. Für die

in Bild 5-16 gewählte Darstellungsform von berechneten Farbpixeln und der Anzahl gezählter Tracerpartikel erscheint für die Validierung der Verweilzeitmessung als nachvollziehbar und praktikabel. Bei der Steuerung der Verweilzeitverteilung mittels neuartiger Austrageinrichtung kann (bei unterschiedlichen Versuchen) der Kurvenpeak jedoch stark links- oder rechtsverschoben sein. Eine Vergleichbarkeit der Kurven ist auf diese Weise nicht möglich. Aus diesem Grund werden im Ergebnisteil der vorliegenden Arbeit die theoretischen Grundlagen der Verweilzeitanalyse (siehe Kapitel 2.4.2) auf die berechnete Anzahl von Farbpixeln angewendet. Hieraus ergeben sich dann die normierte Verweilzeitdichtefunktion $E(\theta)$ und die Verweilzeitsummenfunktion $F(\theta)$.

5.5 Ermittlung der Spannungsverläufe

Die Funktionalität der Austrageinrichtung wird maßgeblich von deren Gestaltungsweise und der Ansteuerung der Verschleißmechanismen bestimmt. Für eine funktionsgerechte Auslegung ist es notwendig die Belastungen der Austrageinrichtung, die in Form von Schüttgutspannungen auftreten, zu kennen und zu ermitteln. Auf deren Basis können u. a. Statik- bzw. Festigkeitsberechnungen zur Vermeidung von Schäden [132] durchgeführt werden. Die Fließeigenschaften des Schüttgutes können entsprechend dem Spannungszustand im Behälter bestimmt werden [133]. Im Kapitel 2.2 wurde der wissenschaftliche Erkenntnisstand über den aktiven und passiven Spannungszustand eines Schüttgutes in einem Massenflusssilo erläutert. Dem zu Folge liegen in der aktuellen Literatur bisher keine Untersuchungsergebnisse über den Spannungsverlauf inner- und oberhalb von Austrageinrichtungen oder Behältern mit mehreren parallel liegenden Trichtern vor. Im Folgenden wird deshalb der Versuch unternommen, die möglichen Spannungsverläufe in einem Schüttgutbehälter mit ganzflächig wirkender Austrageinrichtung in Anlehnung an die Bedingungen in ein Massenflusssilo qualitativ für den aktiven und passiven Spannungszustand zu skizzieren, siehe Bild 5-17.

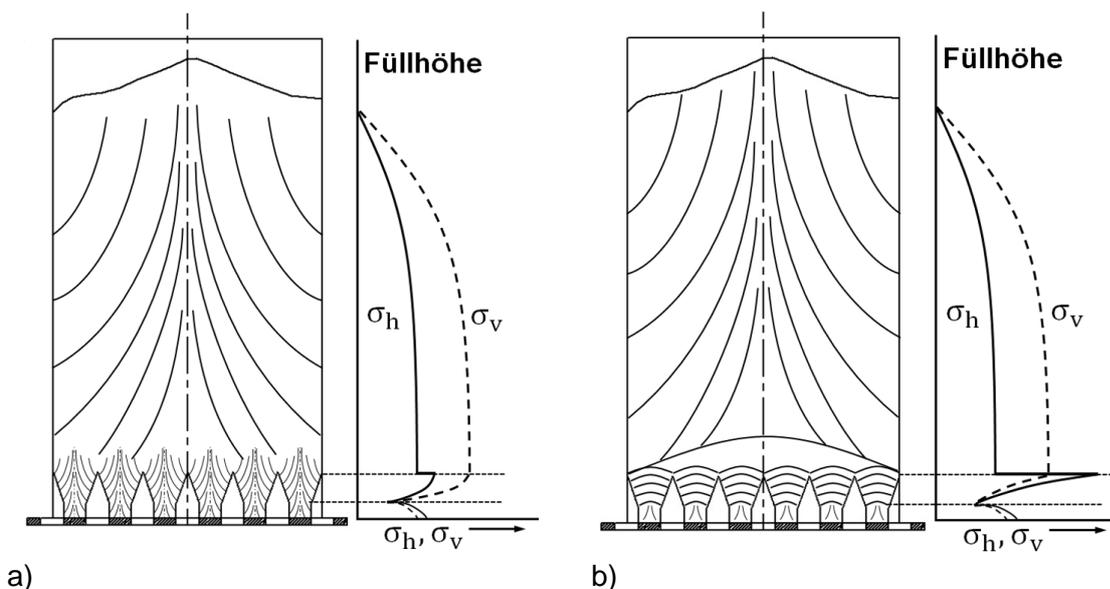


Bild 5-17: Angenommene Spannungsverläufe in einem Behälter mit ganzflächiger Austrageinrichtung und Schlitzboden (Schieber) im a) Befüllzustand und b) Entleerungszustand

Hierzu wurden die bekannten Spannungsverläufe in einem Massenflusssilo nach Bild 2-5 (S. 15) geometrisch auf den experimentellen Aufbau (Bild 5-9) übertragen. Bild 5-17 veranschaulicht die angenommenen qualitativen Spannungszustände in einem Rechteckbehälter mit ganzflächig wirkender Austrageinrichtung, die aus mehreren parallel angeordneten Trichtern besteht. Analog zum klassischen Silo mit großem Auslauftrichter werden in den kleineren Massenflusstrichtern ähnliche Spannungsverläufe erwartet. Es ist davon auszugehen, dass sich die qualitativen Verläufe der horizontalen und vertikalen Spannungen im Behälterschaft, wie im Bild 2-5 (S. 15), über die Füllhöhe nach oben hin fortsetzen. Die auf den Behälterboden wirkende Belastung wird insbesondere von den parallel angeordneten Trichtern aufgenommen.

In Bild 5-17 sind weiterhin auch die qualitativ angenommenen Verläufe von σ_v und σ_h dargestellt. Die eingezeichneten Spannungsverläufe mit ihrem Sprung am Übergang zum Trichter (Switch) verstehen sich als gedachte Aufsummierung der Spannungen aller Trichter der nebenstehenden Skizze. Im Gegensatz zu einem großen Silotrichter (vgl. Kap. 2.2.2) ist die Trichterhöhe hier um ein Vielfaches kleiner. Dadurch liegen die qualitativen Spannungsverläufe im Bereich der Austrageinrichtung sehr eng beieinander, wie im unteren Abschnitt der nebenstehenden Diagramme in Bild 5-17 ersichtlich ist. In den äußeren Trichtern verlaufen σ_v und σ_h vermutlich anders als in der Mitte des Behälters. Aufgrund der Nähe zur Behälterwand ist dort eine deutlich geringere Vertikalspannung zu erwarten. Die qualitativen Spannungsverläufe lassen weiterhin vermuten, dass aufgrund der Vielzahl von Trichtern eine signifikante Abnahme der auf den Verschleißmechanismus wirkenden Vertikalspannung zu erwarten ist (ähnlich den bei *Strusch* [45] eingesetzten Einbauten). Die Vertikalspannung σ_v würde auch hier in Richtung einer gedachten Trichterspitze gegen „Null“ streben. Durch die konstruktiv festgelegten Öffnungsweiten wirkt dennoch ein signifikanter Teil des Behälterinhalts auf den Verschleißmechanismus. Dies konnte mit Hilfe eines Versuches im Befüllzustand nachgewiesen werden, der nachfolgend erläutert wird.

Das sogenannte *Janssen-Experiment* [38] wurde für folgende Varianten des Versuchsaufbaus durchgeführt (Bild 5-18):

- a) Rechteckbehälter ohne Auslauftrichter
- b) Rechteckbehälter mit 6 Auslauftrichtern über der Breite
(Öffnungsweite $B = 0,05$ m, Neigungswinkel $\theta_{eb} = 25^\circ$)

Der Rechteckbehälter (600x400mm) wurde, wie in Kap. 5.2 beschrieben, aus 6 einzelnen Befüllsektionen aufgebaut und gleichmäßig (ohne zu verdichten) mit getrocknetem Weizen (12,3% w.b.) befüllt. Die Massenzunahme des Versuchsaufbaus wurde mit Hilfe einer digitalen Plattformwaage (KERN, ITB 150K5IP) gemessen. Mit jeder vollen Sektion wurde das auf der Waage lastende Gewicht notiert und als Funktion der Füllhöhe in einem Diagramm aufgetragen. Die Vertikalspannung σ_v für den Versuchsaufbau ohne Auslauftrichter (Bild 5-18a) wurde nach Gleichung 2.2 (siehe S. 14) berechnet, die Horizontalspannung σ_h nach Gleichung 2.4. Das hierfür benötigte Horizontallastverhältnis für Weizen wird in älteren Quellen oft mit $\lambda = 0,6$ [22], [134] und in neueren Quellen [36], [135] mit $\lambda = 0,54$ angegeben. Bei Verwendung von $\lambda = 0,6$ und der in Kap. 5.1.4 gemessenen Schüttdichte für getrockneten

Weizen ($\rho_s = 746 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) sowie unter Einbeziehung des Wandreibungswinkels von $\varphi_{x,\text{Weizen}} = 18^\circ$, stimmt der berechnete Verlauf von σ_v sehr gut mit den Messungen im Behälter ohne Auslauftrichter überein.

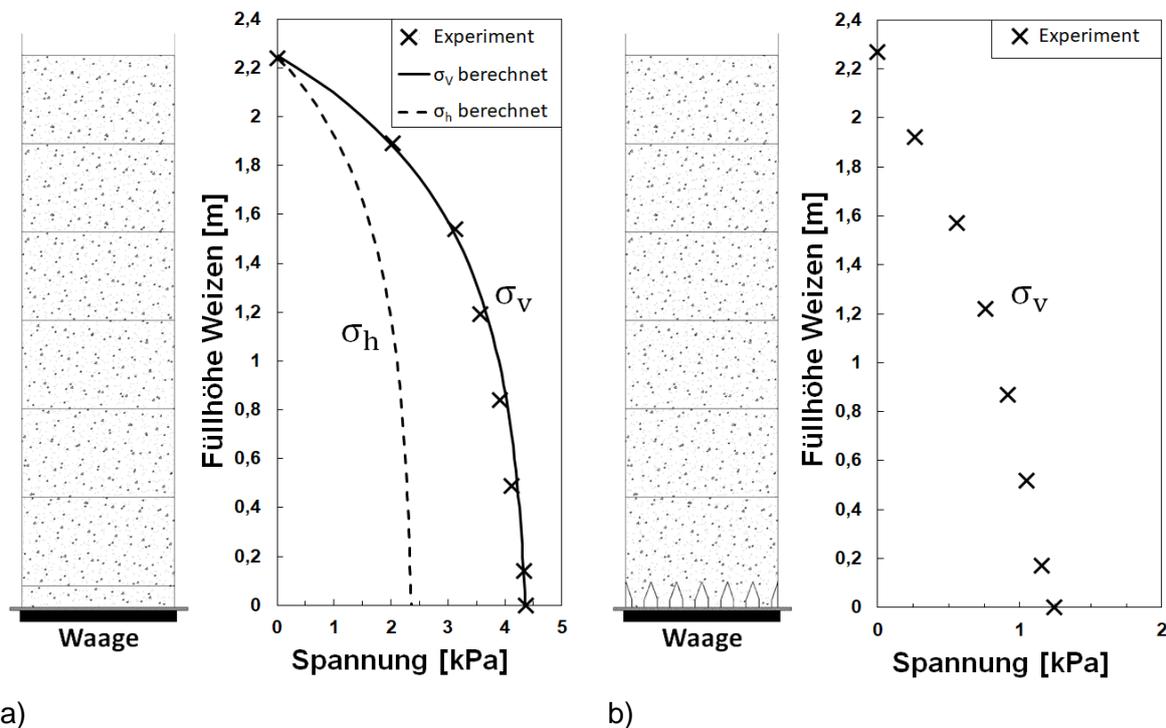


Bild 5-18: Bestimmung der Vertikalspannung in einem Behälter a) ohne Auslauftrichter und b) mit Auslauftrichtern

Der Rechteckbehälter wurde im Experiment mit insgesamt 455 kg Weizen befüllt. Daraus resultierte eine vertikale Spannung von $\sigma_{v1,\text{Weizen}} = 4368 \text{ Pa}$, die auf den Behälterboden wirkt. Bei einer Grundfläche von 600x400mm entspricht dies einer Last von lediglich $m = 107 \text{ kg}$.

In dem Experiment mit Sojabohnen (**Anlage 15**) wurde eine Vertikalspannung von $\sigma_{v,\text{Sojabohnen}} = 4542 \text{ Pa}$ ermittelt, die nur geringfügig von dem Messwert für Weizen abwich. Dagegen zeigt sich bei Untersuchung des Einflusses mehrerer Auslauftrichter über der Breite (Bild 5-18b), dass diese den darunter liegenden Verschleißmechanismus erheblich entlasten. Im Experiment diente die Plattformwaage als Verschleißmechanismus, die direkt unterhalb der Auslauftrichter angeordnet wurde. Nach Befüllung des Behälters mit Weizen gleicher Füllmenge (455 kg) stellte sich eine deutlich geringere Vertikalspannung von $\sigma_{v2,\text{Weizen}} = 1246 \text{ Pa}$ ein. Wie viel Last von dem Verschleißmechanismus aufgenommen wird, hängt von der Anzahl und Gestaltung der Auslauftrichter ab. Eine Berechnungsgrundlage gibt es hierfür noch nicht. Der asymptotische Spannungsverlauf lässt sich nur bis knapp oberhalb der Auslauftrichter verfolgen. In dem hier dargestellten *aktiven Spannungszustand* kommt es im Gegensatz zu Bild 5-18a bei einer Füllhöhe von etwa 0,2 m zu einem lokalen Sprung der Vertikalspannung („Switch“). Ein ähnlicher Sprung ist auch in dem qualitativen Spannungsverlauf nach Bild 5-17a zu sehen. Es ist davon auszugehen, dass sich im *passiven Spannungszustand* bei kurzzeitiger Entleerung ein vergleichbarer Zustand wie in Bild 5-17b mit einem deutlich stärkeren lokalen Sprung einstellen wird.

6 Entwicklung der neuartigen Austrageinrichtung

6.1 Fließtechnische Gestaltung

6.1.1 Neigungswinkel der Einbauten

Bei der Konstruktion und Gestaltung der neuartigen Austrageinrichtung müssen deren Wechselwirkungen mit dem Schüttgut beachtet werden. Die Dimensionen der feststehenden und bewegten Elemente sowie der erforderlichen Öffnungsweiten und Neigungswinkel werden maßgeblich durch die Fließeigenschaften des Schüttgutes bestimmt. Wie in Bild 5.17 und Bild 6.3 dargestellt, entstehen mit Hilfe geneigter Leitbleche mehrere keilförmige Auslauftrichter, die in paralleler Anordnung die Austragswanne des Behälters bilden. Zur Vermeidung bereits genannter Fließprobleme besteht die Voraussetzung, dass für jeden Trichter das Massenflusskriterium erfüllt ist. Als Grundlage zur Dimensionierung der Auslauftrichter werden deshalb Auslegungsverfahren verwendet, die sich bei der Planung von Silos in der Praxis bewährt haben.

Mitte des 20. Jhd. entwickelte *Jenike* [48] das noch bis heute eingesetzte Verfahren zur Schüttgut gerechten Auslegung des Trichterneigungswinkels. Für den axialsymmetrischen Fließzustand in konischen Trichtern wird dieser Neigungswinkel im Allgemeinen mit θ_{ax} angegeben, für den ebenen Fließzustand in keilförmigen Bauformen mit θ_{eb} . Die Grundlagen dieses Auslegungsverfahrens werden für unterschiedliche Trichterformen ausführlich in [6, S. 339–372] beschrieben und an dieser Stelle nicht im Detail diskutiert. Für keilförmige Trichter mit senkrechten Stirnwänden, wie sie in ganzflächigen Austragsystemen zu finden sind, können die Grenzen zwischen Massenfluss und Kernfluss im *Jenike*-Diagramm (wie in Bild 6-1) dargestellt werden. Vom Schüttgut müssen der *Effektive Reibungswinkel* φ_e und der materialabhängige *Wandreibungswinkel* φ_x bekannt sein.

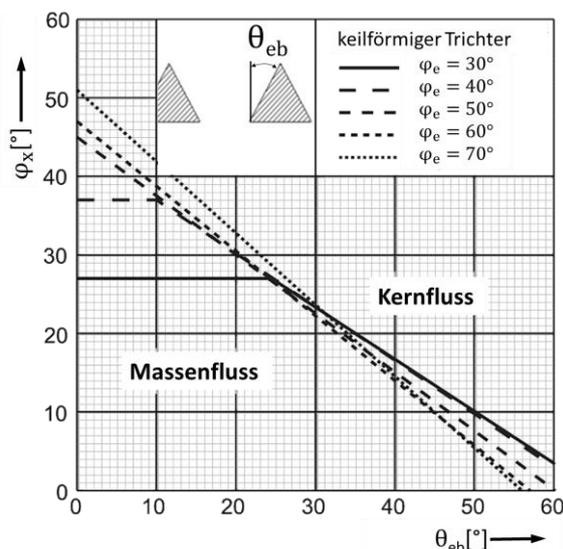


Bild 6-1: *Jenike*-Diagramm zur Auslegung des Trichterneigungswinkels für keilförmige Trichter, mit $L > 3B$ (frei nach [6])

Der zu wählende Trichterneigungswinkel θ_{eb} , für den sich innerhalb der Auslauftrichter noch Massenfluss einstellt, lässt sich direkt an der Abszisse ablesen. Nach Schulze [6] sollten zur

Sicherheit 2 – 3° vom Neigungswinkel abgezogen werden. Zur Berechnung des Neigungswinkels keilförmiger Trichter gibt *Ter Borg* [136] folgende Näherungsgleichung an

$$\theta_{eb} \leq \left(60,5^\circ + \frac{1}{15,07} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{50^\circ - \varphi_e}{7,73} \right) \right) \left(1 - \frac{\varphi_x}{42,3 + 0,131 \cdot e^{0,06 \cdot \varphi_e}} \right) \quad (6.1)$$

Gleichung (6.1) gilt unter der Voraussetzung, dass $\varphi_x < \varphi_e - 3^\circ$ und $\theta_{eb} \leq 60^\circ$ erfüllt sind. Nach *ter Borg* wird unter Verwendung dieser Gleichung „erfahrungsgemäß kein Sicherheitsabstand“ [136] benötigt. Aus den Fließeigenschaften von Weizen und Sojabohnen (siehe Kapitel 5.1.5) resultieren die in Tabelle 6-1 zusammengetragenen Neigungswinkel, die grafisch aus dem *Jenike*-Diagramm (ohne Abzug von 2 – 3° Sicherheit) bzw. durch Berechnung nach *ter Borg* ermittelt wurden.

Tabelle 6-1: Minimale Trichterneigungswinkel für Massenfluss verschiedener Versuchsmaterialien

		θ_{eb} [°] nach Jenike	θ_{eb} [°] nach ter Borg
Weizen	befeuchtet	32°	33°
	getrocknet	38°	38°
	Geschrotet (<2mm)	39°	40°
	rot eingefärbt	41°	41°
Sojabohnen	getrocknet	44°	45°
	rot eingefärbt	46°	47°

Vergleicht man die erforderlichen Neigungswinkel der rot eingefärbten Schüttgüter mit denen der getrockneten Ausgangsmaterialien stellt man fest, dass die Trichterneigung für eingefärbte Materialien flacher gewählt werden kann. Es ist zu vermuten, dass die Lebensmittelfarbe (Fa. Ruth) zu einem verbesserten Fließen des Schüttguts beiträgt. Bei sehr feuchtem Weizen müssen hingegen steilere Neigungswinkel gewählt werden, um einen Massenflusstrichter auszulegen. Die nach *Ter Borg* berechneten Winkel stimmen im Wesentlichen mit den grafisch ermittelten überein. Durch das breite Spektrum schüttgutabhängiger Trichterneigungswinkel wurden sämtliche Neigungswinkel der neuartigen Austrageinrichtung großzügig auf $\theta_{eb} = 25^\circ$ festgelegt.

6.1.2 Dimensionierung der Auslauföffnung

Nachdem im vorangegangenen Kapitel der Trichterneigungswinkel für Massenfluss ausgelegt worden ist, muss die Auslauföffnung (in diesem Fall die Öffnungsweite B) so dimensioniert werden, dass Brückenbildung vermieden wird. In der Literatur gibt es hierfür unterschiedliche Herangehensweisen. Nach *Wilms* [137] und *Stieß* [125] kann die Öffnungsbreite in einem keilförmigen Auslauftrichter für kohäsionslose und grobkörnige Schüttgüter erfahrungsgemäß über den Zusammenhang

$$B_{keilf.} > 7 \cdot x_{Max} \quad (6.2)$$

bestimmt werden, wobei x_{Max} den größten Partikeldurchmesser beschreibt.

Speziell für längliche Schlitze ($L > 3B$) mit rechteckigem Querschnitt empfiehlt *Tomas* [39] den Ansatz

$$B_{\text{Min}} = 5 \cdot d_0 \cdot \sqrt{3} \quad (6.3)$$

mit $d_0 \approx d_{95}$ als oberer Partikeldurchmesser.

Nach Gleichung 6.3 ergeben sich für einige der im Kapitel 5.1 verwendeten Versuchsmaterialien folgende Öffnungsweiten zur Vermeidung eines Verkeilens oberhalb der Auslauföffnung (Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2: Berechnete Öffnungsweiten der Auslauföffnung für das Versuchsmaterial

		x_{Max} bzw. d_{95}	nach <i>Wilms &</i> <i>Stieß</i>	nach <i>Tomas</i>
Weizen	befeuchtet	7,7 mm	53,9 mm	66,7 mm
	getrocknet	7,3 mm	51,1 mm	63,2 mm
	geschrotet (<2mm)	2,5 mm	17,5 mm	21,7 mm
Sojabohnen	getrocknet	9,0 mm	63,0 mm	77,9 mm

Die nach *Tomas* berechneten Öffnungsweiten fallen deutlich größer aus als die nach *Wilms* und *Stieß* und bilden demnach für die Praxis deutlich sicherere Orientierungswerte. Die nach Gleichungen 6.2 und 6.3 ermittelten Öffnungsweiten sind lediglich vom Partikeldurchmesser abhängig (maximaler Feret-Durchmesser in Tabelle 6-2). Wichtige Einflussgrößen wie die Partikelform und die Fließeigenschaften des Schüttgutes bleiben bei der Dimensionierung dieser Auslaufweiten jedoch unberücksichtigt. Ellipsoide und längliche Partikel können während der Fließbewegung im Auslauftrichter unterschiedlich ausgerichtet sein (Partikelrotation). An der Auslauföffnung ergibt sich dadurch eine breite Verteilung unterschiedlicher Längenausdehnungen der Partikel. Diese Heterogenität kann bei glatter Oberfläche der Partikel sogar Brückenbildung vorbeugen und auf diese Weise auch kleinere Öffnungsweiten zulassen.

Ein wichtiges Kriterium für mögliche Brückenbildung am Auslauf ist die einaxiale Druckfestigkeit σ_c . Diese gibt die maximale Spannung an, die von einer vorverdichteten Schüttgutprobe aufgenommen werden kann, bis sie bricht. Freifließende Schüttgüter wie Weizen und Sojabohnen lassen sich unter Last nur sehr schwer bis gar nicht verdichten. Deren einaxiale Druckfestigkeit ist daher entsprechend gering. Brückenbildung resultiert – wenn überhaupt – nur durch ein mechanisches Verkeilen oder (bei hoher Feuchtigkeit) durch Adhäsionskräfte an den Partikeloberflächen. Verdichtet man hingegen leicht fließende oder kohäsive Schüttgüter in einem Trichter, so erreichen diese einen stabilen Zustand in Form einer Brücke über dem Auslauf. Die minimale Öffnungsweite zur Vermeidung von Brückenbildung muss folglich über die gemessenen Fließeigenschaften bestimmt werden.

Die Dimensionierung der minimalen Öffnungsweite der neuartigen Austrageinrichtung wird im Folgenden für das Schüttgut Weizenschrot durchgeführt, das nach Tabelle 5-5 (S. 38) leicht

fließende Eigenschaften besitzt. Damit ist die Austrageinrichtung für ein breites Spektrum an Versuchsmaterialien einsetzbar.

In einem Auslauftrichter kommt es bekanntlich dort zur Brückenbildung, wo die an der Wand wirkende Auflagerspannung σ'_1 kleiner ist als die einaxiale Druckfestigkeit σ_c des Schüttguts, die hier als Druckfestigkeit der Brücke betrachtet werden kann [125].

$$\sigma_c > \sigma'_1 \quad (6.4)$$

Schwedes [138] leitet auf dieser Annahmen folgende Berechnungsgleichung für die Brückenaufspannung her

$$\sigma'_1 = \frac{\rho_s \cdot g \cdot B}{(1+m) \cdot \sin 2(\theta + \varphi_x)} \quad (6.5)$$

mit $m = 0$ für keilförmige Trichter
 $m = 1$ für konische Trichter.

Die Auflagerspannung σ'_1 nach Gleichung 6.5 ist direkt proportional der Öffnungsweite B . Für Abschätzungen kann der Term $\sin 2(\theta + \varphi_x) = 1$ gesetzt werden (siehe in [22, S. 91]), wodurch sich Gl. 6.5 vereinfachen lässt zu

$$\sigma'_1 = \frac{\rho_s \cdot g \cdot B}{1+m} \quad (6.6)$$

Für den Übergang zwischen Brückenbildung und ungehindertem Fließen des Schüttgutes muss nach Gl. 6.4 gelten

$$\sigma'_1 = \sigma_{c,krit} \quad (6.7)$$

Für keilförmige Trichter ($m=0$) ergibt sich aus Gleichung 6.6 unter Anwendung des Fließkriteriums 6.7 die minimale Öffnungsweite B_{Min} für ungehindertes Fließen zu

$$B_{Min} = \frac{\sigma_{c,krit}}{\rho_{S,krit} \cdot g} \quad (6.8)$$

Jenike [48] erweiterte diesen Ansatz unter Einbindung des vom Neigungswinkel abhängigen Trichterformfaktors $H(\theta)$ zu

$$B_{Min} = H(\theta) \frac{\sigma_{c,krit}}{\rho_{S,krit} \cdot g} \quad (6.9)$$

Dieser wird für gewöhnlich aus dem Formfaktordiagramm, z. B. in [22, S. 92], abgelesen oder über die analytische Annäherung nach *Tomas* [39, S. 94] wie folgt berechnet

$$H(\theta) = (m + 1) \cdot \left(1 + 0,25 \cdot \frac{\theta}{40^\circ}\right) \quad (6.10)$$

Für die keilförmigen Trichter der neuartigen Austrageinrichtung mit $\theta = 25^\circ$ berechnet sich der Formfaktor zu $H(\theta) = 1,16$. Zur Bestimmung der kritischen Druckfestigkeit $\sigma_{c,krit}$ und der an dieser Stelle des Trichters vorliegenden Schüttgutedichte $\rho_{S,krit}$ werden die Fließfunktion $\sigma_c(\sigma_1)$

und die Schüttdichten ρ_s aller gemessenen Fließorte über der Verfestigungsspannung (wie in Bild 6-2) aufgetragen. In das Diagramm $\sigma_c(\sigma_1)$ wird weiterhin die Funktion der Brückenauflasserspannung unter Einbeziehung des Fließfaktors ff mit

$$\sigma'_1 = \frac{\sigma_1}{ff} \quad (6.11)$$

eingezeichnet. Am Schnittpunkt mit der linearisierten Fließfunktion $\sigma_c(\sigma_1)$ werden die kritische Druckfestigkeit und die kritische Schüttdichte abgelesen.

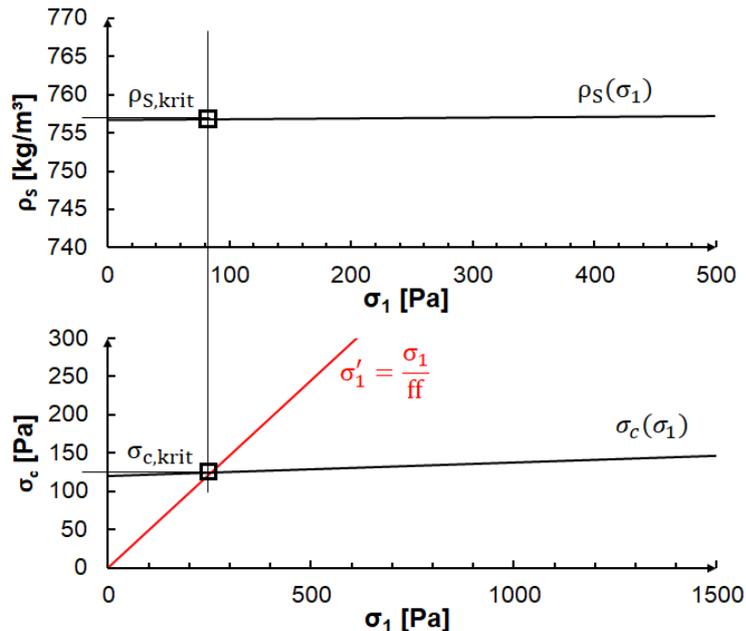


Bild 6-2: Dimensionierung der Öffnungsweite anhand der Verfestigungsfunktion

Der Fließfaktor ff in Gleichung 6.11 beschreibt die Fließfähigkeit des Schüttgutes innerhalb eines Trichters unter Berücksichtigung des vorab bestimmten Trichterneigungswinkels θ . Zur Bestimmung dieses Fließfaktors verwendet *Jenike* [48] Ablesediagramme für verschiedene Trichterformen und effektive Reibungswinkel des Schüttgutes. Aktuellere Darstellungen finden sich z. B. in [6, S. 356–359]. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von analytischen Ansätzen zur Berechnung des Fließfaktors [139]–[141]. Für keilförmige Trichter gibt *Tomas* [39] folgende, für die Praxis handhabbare Berechnungsgleichungen an

$$ff_{\text{keil}} = 65,443 \cdot \varphi_e^{-1,0298} \quad \text{für } \varphi_e < 42^\circ \quad (6.12)$$

$$ff_{\text{keil}} = 9,185 \cdot \varphi_e^{-0,5078} \quad \text{für } \varphi_e \geq 42^\circ \quad (6.13)$$

$$ff_{\text{keil}} = 1 \quad \text{für } \varphi_e > 79^\circ \quad (6.14)$$

Für die Fließeigenschaften von Weizenschrot ergibt sich aus Gleichung 6.12 ein Fließfaktor von $ff = 2$. Nach Gleichung 6.11 berechnet sich daraus die im Bild 6-2 dargestellte Funktion $\sigma'_1(\sigma_1)$, siehe rote Linie. Aus deren Schnittpunkt mit der Funktion $\sigma_c(\sigma_1)$ ergeben sich durch Abtragen an der Ordinate eine kritische Druckfestigkeit von $\sigma_{c,\text{krit}} = 124 \text{ Pa}$ und eine kritische Schüttdichte von $\rho_{s,\text{krit}} = 757 \text{ kg m}^{-3}$.

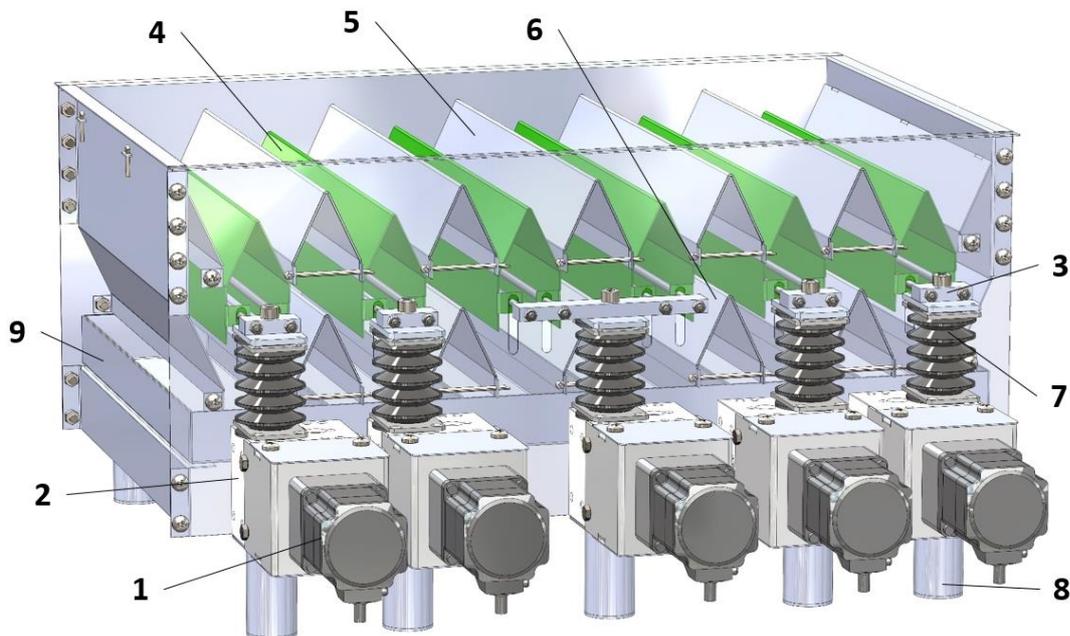
Nach Gleichung 6.9 ergibt sich für Weizenschrot, unter Berücksichtigung der Fließeigenschaften, eine minimale Öffnungsweite von $B_{\text{Min}} = 16 \text{ mm}$ zur Vermeidung von Brückenbildung. Im Vergleich zu den in Tabelle 6-2 ermittelten Werten ist hier noch eine kleiner Öffnungsweite zulässig. Dagegen wurde für befeuchteten Weizen festgestellt, dass die adhäsiven Eigenschaften zu größeren Öffnungsweiten führen (siehe Tabelle 6-3). Zur Bestimmung der minimalen Öffnungsweite sollten demnach auch bei grobkörnigen Schüttgütern neben der Partikelgröße auch die Fließeigenschaften berücksichtigt werden. Es ist vorgesehen, die neuartige Austrageinrichtung bevorzugt für grobkörnige Materialien wie Getreide, Mais oder Raps einzusetzen. Als Kompromiss wird eine Öffnungsweite von $B = 50 \text{ mm}$ für den Versuchsaufbau Technikumsmaßstab festgelegt.

Tabelle 6-3: Berechnete Öffnungsweiten aus Schüttgut-Fließeigenschaften

		ff	$\sigma_{c,krit}$ [Pa]	$\rho_{s,krit}$ [kgm ⁻³]	B_{Min} [mm] <i>nach Gl. 6.9</i>
Weizen	befeuchtet	1,4	414	610	81
	getrocknet	2,0	124	757	19
	rot eingefärbt	1,9	179	748	29
	geschrotet (<2mm)	1,9	82	599	16
Sojabohnen	getrocknet	1,6	280	730	44
	rot eingefärbt	1,7	335	731	52

6.2 Aufbau und Funktionsweise

Basierend auf den Voruntersuchungen und Auslegungsverfahren wurde die neuartige Austrageinrichtung konstruiert und aufgebaut. Der Lösungsansatz ist bevorzugt für den Einsatz an Behältern mit rechteckigem Querschnitt und die Entleerung leicht bis frei fließender Schüttgüter konzipiert. Bild 6-3 zeigt eine 3D-CAD Konstruktion der Austrageinrichtung, bei der die wichtigsten Bauteile beschriftet sind. Für die Erprobung im Technikumsmaßstab wurden die grundlegenden Dimensionen des Lösungsansatzes an die im Technikum bestehenden Anlagen und Behälter von L600 x B400 mm angepasst. Im Trocknungstechnikum des *Leibniz-Instituts für Agrartechnik und Bioökonomie* (ATB) existieren bereits vergleichbare Austragsysteme mit Schlitzboden und Dosierkammern.



- | | | | |
|---|-----------------------|---|-----------------------|
| 1 | Schrittmotor | 6 | untere Leitblechreihe |
| 2 | Zahnstangengetriebe | 7 | Faltenbalg |
| 3 | Verbindungsstück | 8 | Staubschutz |
| 4 | Verschließmechanismus | 9 | Probenschublade |
| 5 | obere Leitblechreihe | | |

Bild 6-3: CAD-Konstruktion (*SolidWorks 2014*) der neuartigen Austrageinrichtung mit Beschriftung wesentlicher Bauteile und transparent dargestellter Frontwand

In ihrem grundlegenden Aufbau besteht die Austrageinrichtung aus Leitblechreihen (5, 6), die jeweils in einer waagerechten Ebene nebeneinander angeordnet sind. Zwischen diesen Leitblechen ergeben sich einheitliche, keilförmige Trichter mit rechteckigem Auslaufquerschnitt. Im Gegensatz zu Systemen mit rotierenden oder horizontal bewegten Verschließmechanismen werden die Auslauföffnungen einzeln oder gemeinsam durch vertikal bewegte Leitorgane (4, grün) freigegeben. Diese sind über das Verbindungsstück (3) mit einem Zahnstangengetriebe (2) verbunden (Typ 5.0 lean SL, Firma *Leantechnik AG*). Der Antrieb einzeln oder paarweise bewegter Verschließmechanismen (Bild 6-4, **A-F**) erfolgt über jeweils

einen der fünf Schrittmotoren (1) (Typ: ARM66MK, Firma Oriental Motor Co., Ltd). Über die mitgelieferte Software „MEXE02“ kann die Parametrierung vorgenommen werden. Neben der Anzahl der vom Motor ausgeführten Schritte ($\Omega = 0.036^\circ/\text{Schritt}$), der Rotations-Geschwindigkeit und der Beschleunigung lassen sich Haltezeiten und Offsets festlegen. Als Haltezeit wird die Zeitspanne definiert, in der ein Motor seine Position beibehält nachdem er eine festgelegte Schrittweite zurückgelegt hat, bevor er sich anschließend in seine Ausgangsposition zurückbewegt. Auf diese Weise ist es möglich, jedem Motor eine individuelle Fahrkurve zuzuweisen und diese durch ein Startsignal auszulösen. Das Drehmoment wird daraufhin von einer Profilhelle aufgenommen und über ein rotierendes Zahnrad an die translatorisch bewegte Zahnstange im Inneren des Getriebes übertragen. Durch die unabhängige Ansteuerung der Verschlussmechanismen (4) ist es möglich, den Massenstrom über die Austragszeit und/oder die Öffnungsweite zu jeder Zeit örtlich auf die Schüttgutbewegung im Behälter anzupassen. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Entleerungsweisen, die als Fahrprofil im Bild 6-4 dargestellt sind.

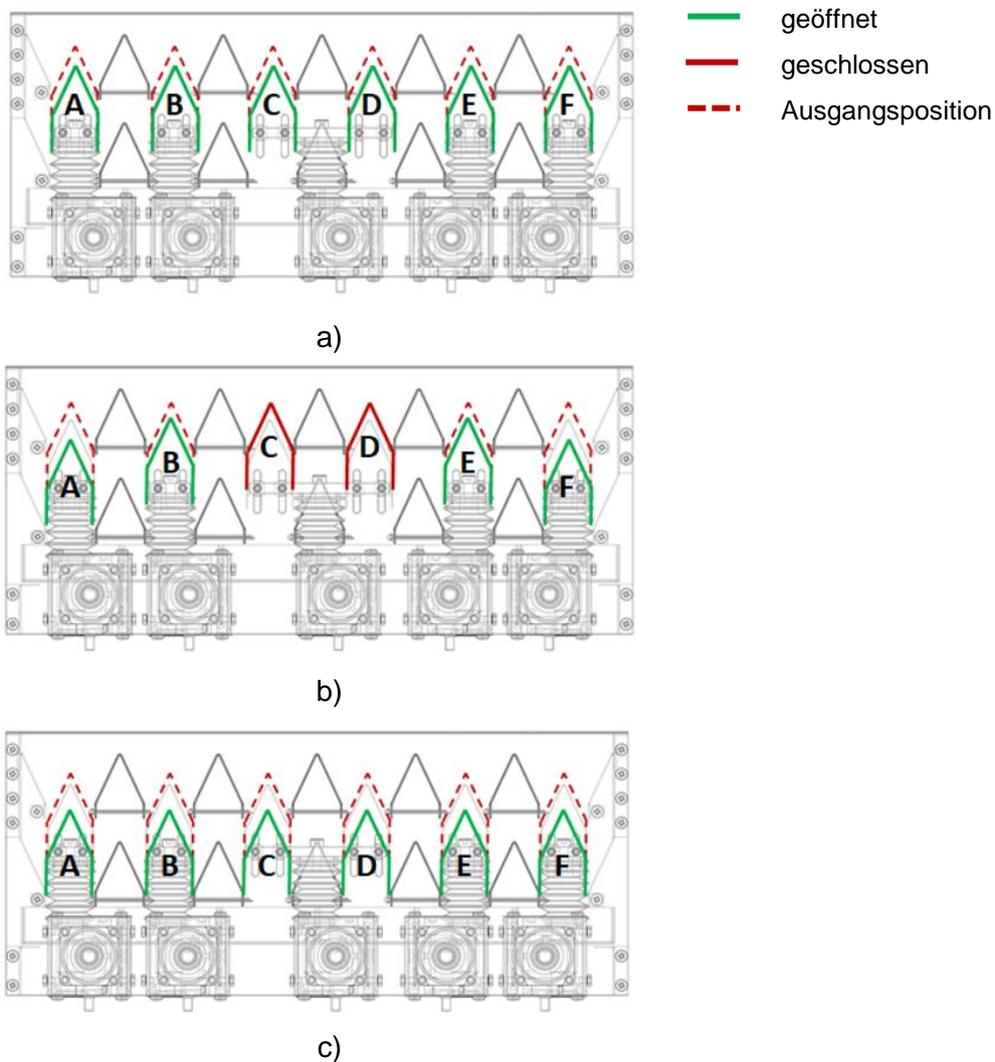


Bild 6-4: Darstellung unterschiedlicher Fahrweisen a) gleichzeitige Freigabe, b) zeitlich und örtlich unabhängige Freigabe c) Entleerung über das Füllvolumen

Bei Fahrweise a) werden alle Verschließmechanismen (**A-F**) zeitgleich freigegeben. Aufgrund der geometrisch günstigen Form des Verschließmechanismus ergeben sich zu beiden Seiten (zwei) Auslauföffnungen, wodurch einseitiger Schüttgutabzug vermieden wird. Das Schüttgut kann sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich (intermittierend) ausgetragen werden. Die Fahrweise b) zeigt beispielhaft die zeitlich und örtlich unabhängige Entleerungsweise der Austrageinrichtung. Dabei können die Verschließmechanismen auch paarweise mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, Fahrwegen oder Haltepositionen belegt sein. Fahrweise c) im Bild 6-4 veranschaulicht eine weitere Option, die an Systeme mit Dosierkammern erinnert. Zwischen der oberen und unteren Leitblechreihe ergibt sich ein leerer Raum, der sich bei maximalem Absenken der Verschließmechanismen mit Schüttgut füllt. Bei einer Aufwärtsbewegung wird bevorzugt aus diesem definierten Volumen Material ausgetragen. Detaillierte Beschreibungen zum Aufbau sind der Arbeit von *Wischniewski* [142] und den angemeldeten Schutzrechten in DE 10 2016 101 508 B3 [143] zu entnehmen.

6.3 Parametrierung des Verschließmechanismus

6.3.1 Einstellung der effektiven Öffnungsweite

Die Auslauföffnung bzw. die Öffnungsweite B von ganzflächig austragenden Systemen ergibt sich für gewöhnlich aus dem Abstand benachbarter Leitbleche. Je nach Verschließmechanismus erfolgt die Entleerung ungehindert, unter Einwirkung der Schwerkraft auf das Schüttgut, oder durch Abspeisung aus einem festgelegten Füll- oder Ladevolumen. Bei der neuartigen Austrageinrichtung wird die Auslauföffnung über den Hubweg h_1 des Verschließmechanismus in vertikaler Richtung bestimmt (Bild 6-5). Die effektive Öffnungsweite s_{eff} ergibt sich aus dem Abstand zwischen der Unterkante feststehender Leitbleche (Punkt P_1) und der geneigten Fläche des Verschließmechanismus.

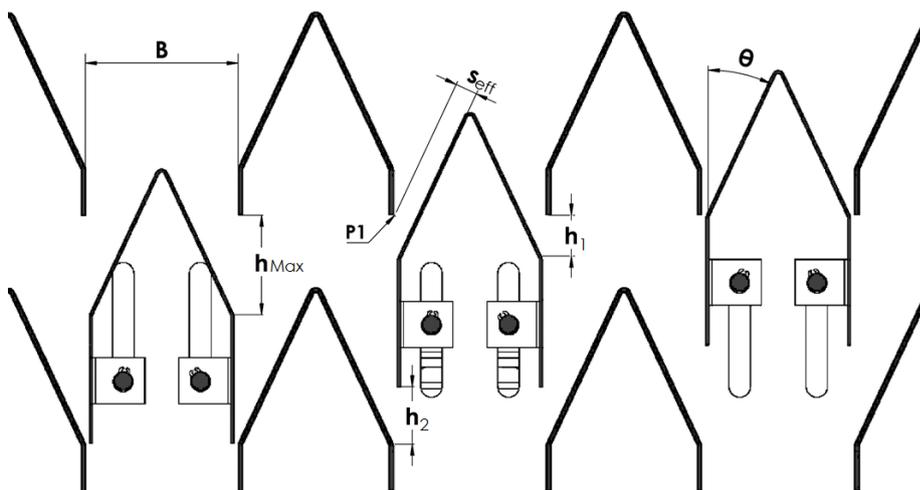


Bild 6-5: Auslauföffnung der neuartigen Austrageinrichtung

In Abhängigkeit vom Hubweg h_1 und dem Neigungswinkel $\theta_{eb} = 25^\circ$ des Verschließmechanismus ergibt sich die effektive Öffnungsweite zu

$$s_{eff} = h_1 \cdot \sin \theta \quad . \quad (6.15)$$

Aufgrund der konstruktiven Gestaltung und der feststehenden Leitblechreihe ist der maximale Hubweg im Technikumsmaßstab auf $h_{\text{Max}} = 31,4 \text{ mm}$ begrenzt. Die geneigte Fläche des Verschleißmechanismus ist – wie die der feststehenden Leitbleche – unter einem Winkel $\theta_{\text{eb}} = 25^\circ$ zur Vertikalen geneigt. Darüber hinaus lässt sich der Hubweg h_1 aus der Übersetzung i_G des Hubgetriebes, dem Drehwinkel Ω und der Anzahl N_S der Motorschritte bestimmen zu

$$h_1 = N_S \cdot i_G \cdot \Omega \quad (6.16)$$

mit $i_G = \frac{62,8 \text{ mm}}{360^\circ}$ und $\Omega = 0,036^\circ/\text{Schritt}$ (Herstellerangaben).

Die Eingabe der Schritte erfolgt über die mitgelieferte Parametriersoftware „MEXE02“ der Motoren. Bei einer Anzahl von $N_S = 2500$ ausgeführter Schritte befindet sich der Verschleißmechanismus mit $h_1 = 15,6 \text{ mm}$ genau in der Mitte zwischen beiden Leitblechreihen. Das entspricht einer effektiven Spaltweite von $s_{\text{eff}} = 6,6 \text{ mm}$. Es gilt zu beachten, dass sich aufgrund der „optionalen“ unteren Leitblechreihe beim Absenken des Verschleißmechanismus gleichzeitig die untere Auslauföffnung verringert. Die effektive Spaltweite der unteren Auslauföffnung berechnet sich nach Gleichung (6.15) aus dem Abstand h_2 , der aus der Differenz $h_{\text{Max}} - h_1$ resultiert. Entspricht der Hubweg h_1 genau dem maximalen Hubweg ($h_1 = h_{\text{max}}$), so würde aufgrund der unteren Leitblechreihe kein Schüttgut mehr die Austrageinrichtung durchqueren. Erst beim Zurückfahren der Verschleißmechanismen in ihre Startposition wird in diesem Fall wieder Material entsprechend der Fahrweise c) im Bild 6-4 ausgetragen.

6.3.2 Berechnung der Austragszeit und Einstellung der Motor-Drehzahl

Neben der vorab diskutierten *effektiven Öffnungsweite* ist auch die Austragszeit t_D ein wichtiger Betriebsparameter. Die Austragszeit bestimmt die pro Zeiteinheit ausgetragene Schüttgutmasse. *Mellmann* und *Teodorov* [60] untersuchten das Austragsverhalten einer pneumatisch betriebenen, ganzflächig wirkenden Schieberboden-Austrageinrichtung an einem Getreideschachttrockner und ermittelten unter anderem die Austragszeit des Systems. Eine ähnliche Charakteristik besitzt auch die neuartige Austrageinrichtung. Bild 6-6 veranschaulicht den qualitativen Verlauf einer „Fahrkurve“ des Systems Schrittmotor + Verschleißmechanismus.

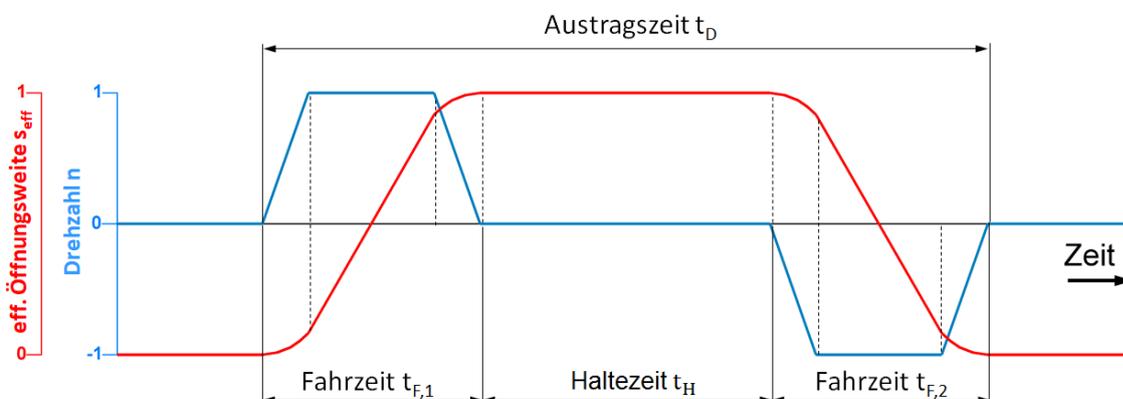


Bild 6-6: Qualitativer Verlauf der Fahrkurve des Verschleißmechanismus (Öffnungszyklus)

Während der Fahrzeiten $t_{F,1}$ und $t_{F,2}$ wird der Verschleißmechanismus geöffnet bzw. geschlossen, der bei konstanter Drehzahl (blaue Kurve) gleichförmige Bewegungen ausführt. Die effektive Öffnungsweite s_{eff} (rote Kurve) nimmt in dieser Zeit bis zum Erreichen der gewünschten Endposition zu bzw. ab. Die Austragszeit t_D und die dabei ausgetragene Schüttgutmasse werden maßgeblich durch die Haltezeit t_H bestimmt (vgl. „waiting time“ in [60]), die frei wählbar ist. Während der Haltezeit verharrt der Verschleißmechanismus in geöffneter Position solange, bis ein Trigger Signal den Schließvorgang auslöst. Die Gesamtdauer eines Austragsvorgangs t_D an einem Verschleißmechanismus berechnet sich damit aus der Fahrzeit t_F (mit $t_F = t_{F,1} + t_{F,2}$) und der Haltezeit t_H zu

$$t_D = t_F + t_H \quad . \quad (6.17)$$

Die Haltezeit t_H kann über die Parametriersoftware „MEXE02“ (Fa. Oriental Motor Co., Ltd) direkt als „Dwell-Time“ eingegeben werden. Die Fahrzeit t_F ergibt sich aus der eingestellten effektiven Öffnungsweite bzw. dem Hubweg h_1 und der Drehzahl $n[\text{min}^{-1}]$ des Schrittmotors. Die Drehzahl wird in der Software über den äquivalenten Parameter „*Operation Speed*“ eingestellt, der in $n[\text{Hz}]$ bzw. $n[\text{Schritte/s}]$ angezeigt wird.

Die Umrechnung erfolgt allgemein über folgenden Zusammenhang

$$n[\text{min}^{-1}] = \frac{n[\text{Hz}] \cdot \Omega}{360^\circ} \cdot \frac{60\text{s}}{\text{min}} \quad . \quad (6.18)$$

Für Haltezeiten $t_H \gg t_F$ folgt aus Gleichung 6.17

$$t_D \approx t_H \quad ,$$

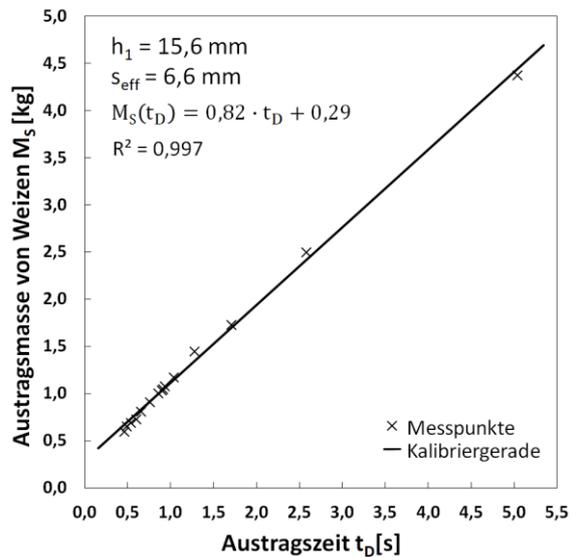
so dass die ausgetragene Masse bzw. der Massenstrom nur noch durch die Haltezeit t_H bestimmt wird. Dennoch ist der Einfluss des Öffnungs- und Schließvorganges und damit der Fahrzeit t_F auf den Massenstrom nicht vernachlässigbar und soll nachfolgend ermittelt werden.

Für $t_H = 0$ wird

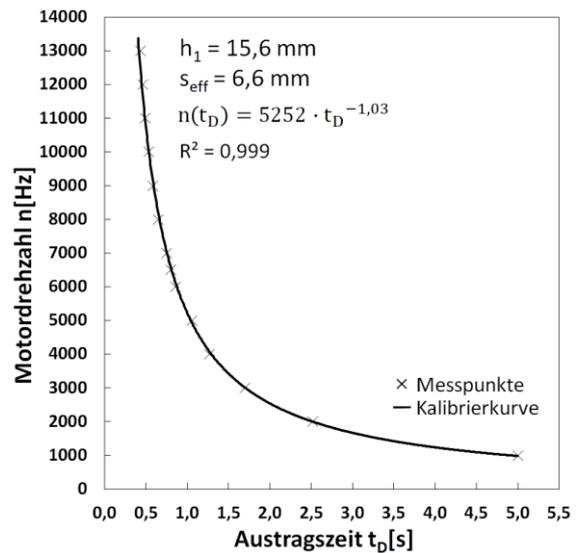
$$t_D = t_F \quad ,$$

das heißt die Austragszeit entspricht der benötigten Fahrzeit des Austragssystems. Bild 6-7a veranschaulicht dazu am Beispiel des Versuchsmaterials Weizen den Zusammenhang zwischen der benötigten Fahrzeit des Verschleißmechanismus und der eingestellten Motordrehzahl für einen Hubweg von $h_1 = 15,6 \text{ mm}$ ($s_{eff} = 6,6 \text{ mm}$). Bei diesem mittleren Hubweg befindet sich der Verschleißmechanismus genau in der Mitte zwischen oberer und unterer Leitblechreihe (Bild 6-5). Wie die nachfolgende Grafik zeigt, nähert sich die Fahrzeit mit steigender Drehzahl asymptotisch einem Minimum von etwa 0,5 s (bei ca. 13.000 Hz). Umgekehrt steigt die Fahrzeit mit abnehmender Drehzahl stark an und erreicht bei einer Drehzahl von nur 1.000 Hz etwa das Zehnfache (5 s). Für diesen Bereich einstellbarer Fahrzeiten mit $0 < t_F < 5 \text{ s}$ wurde die ausgetragene Schüttgutmasse experimentell ermittelt. Das Ergebnis ist im Bild 6-7b dargestellt. Der Verlauf der Messwerte zeigt, dass die

ausgetragene Schüttgutmasse etwa linear mit der Fahrzeit ansteigt. Der ermittelte Gradient von 0,82 kg/s gibt an, wieviel Schüttgut pro Zeiteinheit bei jedem Öffnungs- und Schließvorgang für einen mittleren Hubweg von 15,6 mm den Apparat verlässt.



a)



b)

Bild 6-7: Darstellung der Kalibrierkurven zur a) Einstellung der Austragsmasse ($t_H = 0$ ms) und b) Parametrierung der Motordrehzahl bei entsprechender Austragszeit

Zur Einstellung einer bestimmten effektiven Öffnungsweite s_{eff} (Bild 6-5) und damit eines bestimmten Hubweges h_1 des Verschleißmechanismus werden unterschiedliche Fahrzeiten benötigt. Dieser Zusammenhang wird in Bild 6-8 am Beispiel einer Motordrehzahl von $n = 10.725$ Hz veranschaulicht.

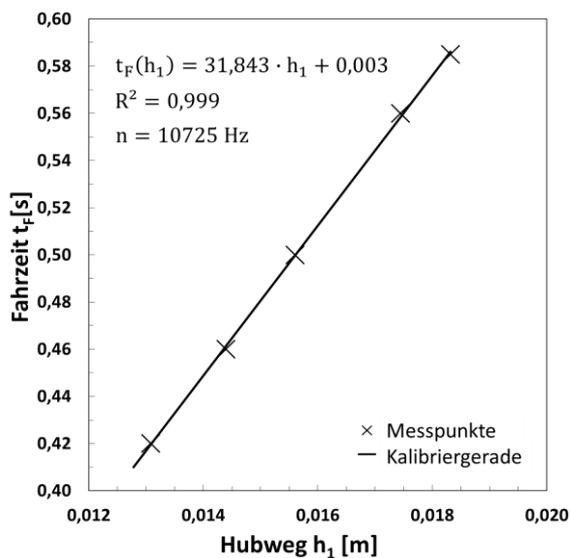


Bild 6-8: Fahrzeit für einen gesamten Öffnungs- und Schließvorgang (Hub) als Funktion des eingestellten Hubweges

6.4 Steuerung des Schüttgutmassenstroms und der Verweilzeitverteilung

Mit Hilfe der Austrageinrichtung kann der Schüttgutmassenstrom und die Produktverweilzeit im Apparat eingestellt und zur Steuerung einer relevanten Prozessgröße (z. B. Temperatur im Reaktor) variiert werden. Sind beide Parameter aufeinander abgestimmt, so ergibt sich – je nach Betriebsart der Austrageinrichtung – ein mittlerer Durchsatz. In der Praxis kann der Durchsatz wahlweise über die *kontinuierliche* oder *intermittierende* Betriebsweise der Austrageinrichtung eingestellt werden. Beide Betriebsweisen können auch zur Steuerung der Verweilzeitverteilung Anwendung finden, wobei der Fokus in der vorliegenden Arbeit auf der intermittierenden Betriebsweise liegt.

6.4.1 Intermittierende Betriebsweise

Die intermittierende Betriebsweise von ganzflächigen Austrageinrichtungen wird üblicherweise bei thermischen Schüttgutprozessen wie der Trocknung praktiziert. Sie wird meist deshalb genutzt, weil bei kontinuierlicher Betriebsweise der Austrageinrichtung zu hohe Massenströme erreicht werden. Beispielsweise wird in einem Trocknungsprozess mit Hilfe der Austrageinrichtung versucht, die Verweilzeit im Apparat der erforderlichen Trocknungsdauer anzunähern. Diese wird in der Regel entsprechend der Produktfeuchte am Eingang angepasst.

Charakteristisch für die intermittierende Betriebsweise ist das kurzzeitige Öffnen und Schließen der Austrageinrichtung, wodurch im Schüttgutapparat eine quasi-kontinuierliche Partikelbewegung erzeugt wird. *Mellmann* und *Teodorov* [61] untersuchten die intermittierende Betriebsweise an einem Getreideschachttrockner mit ganzflächig wirkender Austrageinrichtung und leiteten grundlegende Gleichungen für die Berechnung des Produktmassenstroms und die Zeitsteuerung der Austrageinrichtung her. Diese Gleichungen sind auf die neuartige Austrageinrichtung übertragbar.

In Getreidetrocknern muss die Trocknungsdauer bzw. die Verweilzeit fortlaufend an Schwankungen der Gutfeuchte am Produkteingang angepasst werden. In der Praxis geschieht dies durch Einstellung der sog. „Standzeit“. Nach [61] ergibt sich die Standzeit (standstill time t_S) aus der Austragszeit (discharge time t_D), siehe Gleichung 6.17, und der Ruhezeit zwischen zwei Abspeisungen (resting time t_R) zu

$$t_S = t_D + t_R \quad . \quad (6.19)$$

Im laufenden Trocknungsprozess wird die Standzeit als Stellgröße ständig variiert und ist zu jedem Zeitpunkt ein Momentanwert ($t_S \neq konst.$). In kommerziellen Getreidetrocknern wird meist die Austragszeit konstant gehalten ($t_D = konst.$), so dass die Standzeit durch Variation der Ruhezeit t_R eingestellt wird. Die Ruhezeit variiert typischerweise im Bereich zwischen 60s und 90s. Bei festgelegter Austragszeit t_D wird eine bestimmte, als konstant angenommene, Masse des Getreides pro Abspeisung $M_{S,D}$ ausgetragen. Diese ist produktspezifisch und wird vom jeweiligen Trocknerhersteller angegeben. Daraus berechnet sich der Momentanwert des Austragsmassenstroms zu [60]

$$\dot{M}_S = \frac{M_{S,D}}{t_S} \quad . \quad (6.20)$$

Wie Gleichung (6.20) verdeutlicht, ist der Produktmassenstrom $\dot{M}_S(t)$ umgekehrt proportional der Standzeit t_S . Dieses nichtlineare Verhalten ist bei der Prozesssteuerung zu berücksichtigen. Über einen bestimmten Zeitraum des Trocknerbetriebes Δt_B kann ein mittlerer Produktmassenstrom \overline{M}_S berechnet und daraus eine mittlere Anzahl von Abspeisungen pro Zeiteinheit (mittlere Abspeiserate \overline{N}_D) ermittelt werden zu

$$\overline{N}_D = \frac{\overline{M}_S}{M_{S,D}} \quad . \quad (6.21)$$

Gleichung (6.21) gilt unter der Voraussetzung, dass die Abspeisemenge $M_{S,D}$ zeitlich konstant ist, was bei variierenden Trocknungsbedingungen und daraus resultierenden Schwankungen der Gutfeuchte am Austritt streng genommen nicht der Fall ist.

Das Ziel von Verweilzeitexperimenten ist die Bestimmung der Verweilzeitverteilung und der mittleren Verweilzeit in einem Apparat unter möglichst praxisnahen Bedingungen. Bezogen auf das Beispiel Getreidetrocknung sollte die mittlere Verweilzeit idealerweise mit der erforderlichen Trocknungsdauer übereinstimmen. Diese Bedingung lässt sich im Technikumsmaßstab leichter realisieren als unter großtechnischen Bedingungen. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus der Verweilzeituntersuchungen auf der experimentellen Analyse der neuartigen Austrageinrichtung. Diese wurde als Austragssystem am Boden eines rechteckigen Schüttgutbehälters im Technikumsmaßstab aufgebaut, siehe Kapitel 5.2. Im Unterschied zum realen Prozess wird im Verweilzeitexperiment ein konstanter Austragsmassenstrom eingestellt mit

$$\dot{M}_S = konst. \quad . \quad (6.22)$$

Zudem wird anstelle der Ruhezeit (Gleichung 6.19) die Austragszeit t_D mit Hilfe der neuartigen Austrageinrichtung variiert, die Ruhezeit wird $t_R = 0$. Damit reduziert sich Gleichung (6.19) auf

$$t_S = t_D \quad . \quad (6.23)$$

Das heißt, die Standzeit entspricht der Austragszeit t_D . Damit ist die Prozesszeit t_P im Verweilzeitexperiment als eine Aneinanderreihung von N_D Abspeisungen zu betrachten und lässt sich berechnen zu

$$t_P = N_D \cdot t_D \quad . \quad (6.24)$$

Gleichung (6.24) gilt für den konventionellen Betrieb mit synchroner, gleichmäßiger Öffnung der Verschleißmechanismen. Die Dauer eines Verweilzeitexperiments beträgt bekanntlich das Mehrfache der mittleren Verweilzeit \bar{t} . Um sicher zu gehen, dass die abklingende Funktion der Verweilzeitverteilung vollständig erfasst wird, sollte die Versuchsdauer etwa

$$t_P \approx 2 \cdot \bar{t} \quad (6.25)$$

betragen.

Synchrone und gleichmäßige Öffnung aller Verschleißmechanismen (konventioneller Betrieb)

Der konventionelle Betrieb der neuartigen Austrageinrichtung mit synchroner, gleichmäßiger Öffnung der Verschleißmechanismen ist vergleichbar mit der Betriebsweise kommerzieller, ganzflächig wirkender Austrageinrichtungen. Diese Betriebsart wird deshalb nachfolgend als *konventioneller Betrieb* bezeichnet. Die Ansteuerung der Verschleißmechanismen erfolgt analog zu dem Vorgehen im kontinuierlichen Betrieb (Kapitel 6.4.2).

Vor Beginn des Verweilzeitexperiments wird die Anzahl der Abspeisungen N_D abgeschätzt, die im Verlauf des Experiments durchgeführt werden. Nach Gleichung (6.24) und (6.25) ergibt sich diese zu

$$N_D = \frac{t_P}{t_D} \approx 2 \cdot \frac{\bar{t}}{t_D} \quad . \quad (6.26)$$

Die tatsächliche Anzahl der Abspeisungen steht letztendlich erst nach Ablauf des Versuches fest. Die mittlere Verweilzeit \bar{t} entspricht schätzungsweise der hydrodynamischen Verweilzeit τ (s. Kapitel 2.4), die sich nach Gleichung (2.31) berechnen lässt. Daraus folgt

$$\bar{t} \approx \tau = \frac{M_S}{\dot{M}_S} \quad . \quad (6.27)$$

Der im Versuch eingestellte Austragsmassenstrom \dot{M}_S ergibt sich nach Gleichung (6.20) und Gleichung (6.23) zu

$$\dot{M}_S = \frac{M_{S,D}}{t_D} \quad . \quad (6.28)$$

Die pro Abspeisung ausgetragene Schüttgutmasse $M_{S,D}$ ist abhängig von der eingestellten Austragszeit t_D (für alle Verschleißmechanismen gleich) und resultiert aus der gemessenen Austragscharakteristik, siehe Kapitel 8.2.

Asymmetrische Ansteuerung der Verschleißmechanismen

Der Neuheitswert der innovativen Austrageinrichtung kommt erst in seiner asymmetrischen Betriebsweise zur Geltung. Durch die Möglichkeit der individuellen Ansteuerung einzelner Verschleißmechanismen kann ein definiertes Schüttgutfließprofil über der Breite des Apparates eingestellt werden. Hieraus ergibt sich ein bisher noch nicht ausgeschöpftes Potenzial für die Optimierung von Schüttgutapparaten und -prozessen.

Durch die individuelle Ansteuerung der Verschleißmechanismen lassen sich über der Breite des Schüttgutapparates pro Abspeisung unterschiedliche Öffnungsweiten s_{eff} (Gleichung 6.15) und verschiedene Austragszeiten t_D (Gleichung 6.17) je Verschleißmechanismus einstellen. Damit werden je Auslauföffnung unterschiedliche Austragsmassenströme $\dot{M}_{S,i}$ generiert. Wie im Kapitel 8.3 gezeigt wird, wird dadurch die Verweilzeitverteilung im Schüttgutapparat signifikant beeinflusst.

Vor Beginn des Verweilzeitexperiments bei asymmetrischer Abspeisung wird die Anzahl der Abspeisungen N_D abgeschätzt, die im Verlauf des Experiments ausgeführt werden. Anhand

der vorab gemessenen Austragscharakteristik können für jede individuelle Einstellung der Verschleißmechanismen i die effektiven Öffnungsweiten $s_{\text{eff},i}$, die Austragszeiten $t_{D,i}$ und die Austragsmassenströme $\dot{M}_{S,i}$ ermittelt werden. Die pro Abspeisung der Austrageinrichtung insgesamt ausgetragene Schüttgutmasse $M_{S,D}$ ergibt sich aus der Summe der individuell abgespeisten Massen zu

$$M_{S,D} = \sum_{i=1}^n M_{S,i} \quad (6.29)$$

In Analogie zu Gleichung (6.19) entspricht die Prozesszeit $t_{P,D}$, die während einer Abspeisung der Austrageinrichtung verstreicht, der Prozesszeit des Verschleißmechanismus mit der längsten, eingestellten Austragszeit zu

$$t_{P,D} = (t_{D,i} + t_{R,i})_{\text{max}} \quad (6.30)$$

Die Verschleißmechanismen mit kürzerer Austragszeit $t_{D,i}$ haben eine entsprechend längere Ruhezeit $t_{R,i}$. Das heißt, die entsprechenden Auslauföffnungen werden Bruchteile von Sekunden früher geschlossen. Analog zu Gleichung (6.24) ergibt sich die Prozesszeit im Verweilzeitexperiment als eine Aneinanderreihung von Abspeisungen der Dauer von $t_{P,D}$ zu

$$t_P = N_D \cdot t_{P,D} \quad (6.31)$$

Der im Experiment eingestellte, effektive Austragsmassenstrom beträgt

$$\dot{M}_S = \frac{M_{S,D}}{t_{P,D}} \quad (6.32)$$

6.4.2 Kontinuierliche Abspeisung

Bei der kontinuierlichen Schüttgutaustragung ist die Austrageinrichtung dauerhaft geöffnet. Hierfür muss bei der neuartigen Austrageinrichtung lediglich die Haltezeit t_H entsprechend lang gewählt werden. Der Vorteil dieser Betriebsweise liegt darin, dass das Schüttgut immer in Bewegung ist. Praktische Beobachtungen zeigen nämlich, dass (nach Ansteuerung der Verschleißmechanismen) zwischen dem „sich-in-Bewegung-setzen“ des Schüttgutes und dem Ausfließen ein Zeitversatz liegt. Dieser ist einerseits begründet durch die Trägheit des Schüttgutes und zum anderen durch das – über der Schütthöhe fortschreitende – „Einstürzen“ instabiler, mechanischer Brücken (siehe Seite 59) zwischen den feststehenden Behältereinbauten (z. B. zwischen Luftkanälen in Trocknern). Abhängig davon, wie die Verschleißmechanismen der neuartigen Austrageinrichtung angesteuert werden, kann die kontinuierliche Abspeisung eines Schüttgutapparates durch folgende zwei Betriebsweisen realisiert werden.

Synchrone und gleichmäßige Ansteuerung der Verschleißmechanismen (konv. Betrieb)

Zur Erreichung einheitlicher Austragsmassen (Bild 6-9, blaue Pfeile) über dem Querschnitt des Schüttgutapparates werden alle Verschleißmechanismen **A - F** gleichzeitig und gleichmäßig bis zum vorab (über den Hubweg) festgelegten Haltepunkt angesteuert. Bei der neuartigen Austrageinrichtung werden dabei $N = 12$ Öffnungsschlitze mit konstanter effektiver Öffnungsweite freigegeben. Der gesamte kontinuierliche Austragsmassenstrom – $\dot{M}_{S,\text{kont.,m.}}$

lässt sich mittels Gleichung 8.3 (auf Seite 90) theoretisch vorausberechnen. Die Prozesszeit t_p entspricht der seit Austragsbeginn verstrichenen Realzeit ($t_p = t$).

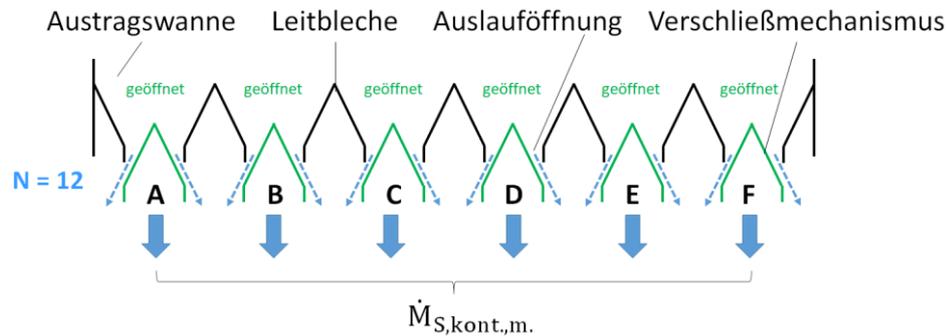


Bild 6-9: Resultierender Massenstrom bei gleichmäßiger Ansteuerung der Verschleißmechanismen

Asymmetrische Ansteuerung der Verschleißmechanismen

Im Gegensatz zur synchronen und gleichmäßigen Ansteuerung wird bei der asymmetrischen Ansteuerung der Verschleißmechanismen die effektive Öffnungsweite über dem Querschnitt der Austrageinrichtung gezielt variiert, um örtlich unterschiedlich viel Material kontinuierlich auszutragen. Folglich variiert auch die Fließgeschwindigkeit des Schüttguts oberhalb der Öffnungen (Bild 6-10, blaue Pfeile) und es ergeben sich örtlich unterschiedliche Produktverweilzeiten. Die örtliche Variation der Verweilzeit ist in einer mehr oder weniger schmalen oder breiten Verweilzeitverteilung messbar und kann als Indikator zur Bewertung einer gleichmäßigen Schüttgutbewegung dienen. Der kontinuierliche Austragsmassenstrom $\dot{M}_{S, \text{kont., m.}}$ ergibt sich (ähnlich der asymmetrischen Ansteuerung beim intermittierenden Betrieb) aus der Summe der individuell eingestellten Massenströme $\dot{M}_{S, i}$ zu

$$\dot{M}_{S, \text{kont., m.}} = \sum_{i=1}^n \dot{M}_{S, i} \quad (6.33)$$

Zur Vorausberechnung von $\dot{M}_{S, i}$ – über Gleichung 8.3 (auf Seite 90) – ist die örtlich eingestellte effektive Öffnungsweite $s_{\text{eff}, i}$ einzubeziehen und die Anzahl der Öffnungsschlitze am Verschleißmechanismus auf $N_i = 2$ festzulegen. Auch bei asymmetrischer Ansteuerung der Verschleißmechanismen ergibt sich die Prozesszeit t_p aus der seit Austragsbeginn verstrichenen Realzeit ($t_p = t$).

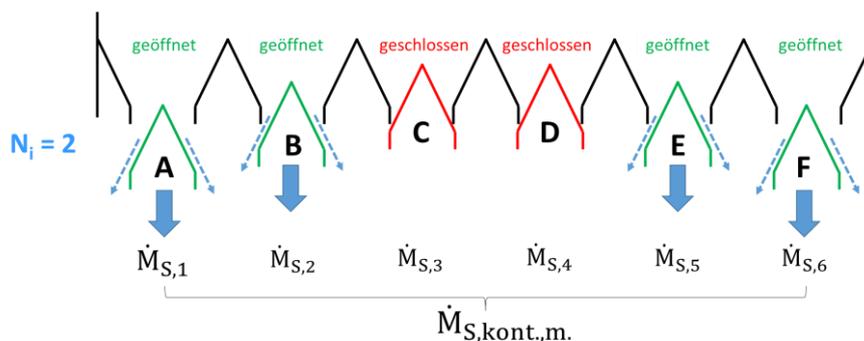


Bild 6-10: Resultierender Massenstrom bei asymmetrischer Ansteuerung der Verschleißmechanismen

7 Numerische Untersuchung der neuartigen Austrageinrichtung

7.1 Berechnung der qualitativen Spannungsverläufe im Schüttgut

Im Kapitel 2.2.2 wurden Spannungsverläufe diskutiert, mit denen sich qualitative Abschätzungen über die größten zu erwartenden Spannungen und Beanspruchungen im Schüttgutsilo oberhalb der Austrageinrichtung ableiten lassen. Eine quantitative Überprüfung der tatsächlich wirkenden Spannungen auf einen Behälter mit neuartiger Austrageinrichtung wäre experimentell sehr aufwändig und nur mit einer Vielzahl von Kraftmessdosen über der Höhe des Schüttgutapparates möglich. Stattdessen sollen in diesem Kapitel qualitative Spannungsverläufe an der neuartigen Austrageinrichtung mit Hilfe der numerischen Simulation unter Verwendung eines vorab kalibrierten Modellgutes bestimmt werden. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, den Einfluss der konstruktiven Gestaltung der neuartigen Austrageinrichtung auf den Verlauf der Schüttgutspannungen im Behälter zu erklären.

Ausgangssituation und Voruntersuchungen

Bereits im Kapitel 2.5.3 wurde auf Forschungsarbeiten verwiesen, in denen die grafische Darstellung von Kontaktkräften verwendet wurde, um Spannungsverläufe in einer modellierten Silogeometrie sichtbar zu machen. Zur Überprüfung, ob der Einsatz des Modellgutes Weizen⁴ für die Simulation qualitativer Spannungsverläufe geeignet ist, wurde zunächst eine einfache Modellgeometrie (2D-Modellsilo⁵, siehe Bild 7-1) mit 40.000 Partikel befüllt und auf die Spannungszustände hin untersucht. Für einen besseren Kontrast zu den in schwarz gezeichneten Kontaktkräften (in Scherrichtung) wurden die Clumps hellgrau dargestellt. Diese erste Simulation diente einer Plausibilitätsprüfung, ob sich mit Hilfe des Modellgutes und den verwendeten Modellparametern ähnliche qualitative Spannungszustände ableiten lassen, wie in Kapitel 2.2.2. Bild 7-1a zeigt den aktiven Spannungszustand, der sich direkt nach dem Befüllen der Modellgeometrie einstellt. Unter dem Trichterauslauf verhinderte eine erzeugte (horizontale) Linie, dass Material unkontrolliert ausgetragen werden konnte. Wie der Verlauf der Kontaktkräfte zeigt, sind über dem Auslaufquerschnitt in der Mitte die größten Scherkräfte zu verzeichnen. Diese setzen sich in Form von nahezu vertikalen Gebilden nach oben hin fort. Vergleichbar ist dieses Ergebnis mit den bereits im Kapitel 2.2.2 gezeigten, qualitativen Spannungsverläufen für den aktiven Spannungszustand. Gleiches gilt auch für den passiven Spannungszustand (Bild 7-1b). Dieser stellte sich ein, nachdem etwa 500 Partikel über dem Auslaufquerschnitt ausgetragen (gelöscht) wurden und sich dadurch der Behälterinhalt kurzzeitig in Bewegung setzte. Hier zeichnen sich die Kontaktkräfte in Scherrichtung nahezu brückenartig über dem Auslauf ab. Die Horizontal-komponente der Schüttgutspannung nimmt dabei an den Trichterwänden deutlich zu. Ansatzweise ist hier auch zu erkennen, wie sich die Kontaktkräfte oberhalb des Trichters wieder vermehrt in vertikaler Richtung aufbauen.

⁴ von Weigler und Mellmann [75] validiertes Modellgut (siehe Tabelle 4-1 auf Seite 29) mit entsprechender Partikelgeometrie (vgl. Bild 2-12, Seite 27)

⁵ Breite des Siloschafts 600 mm, Breite des Auslaufs 80 mm, Trichterneigung $\theta = 30^\circ$

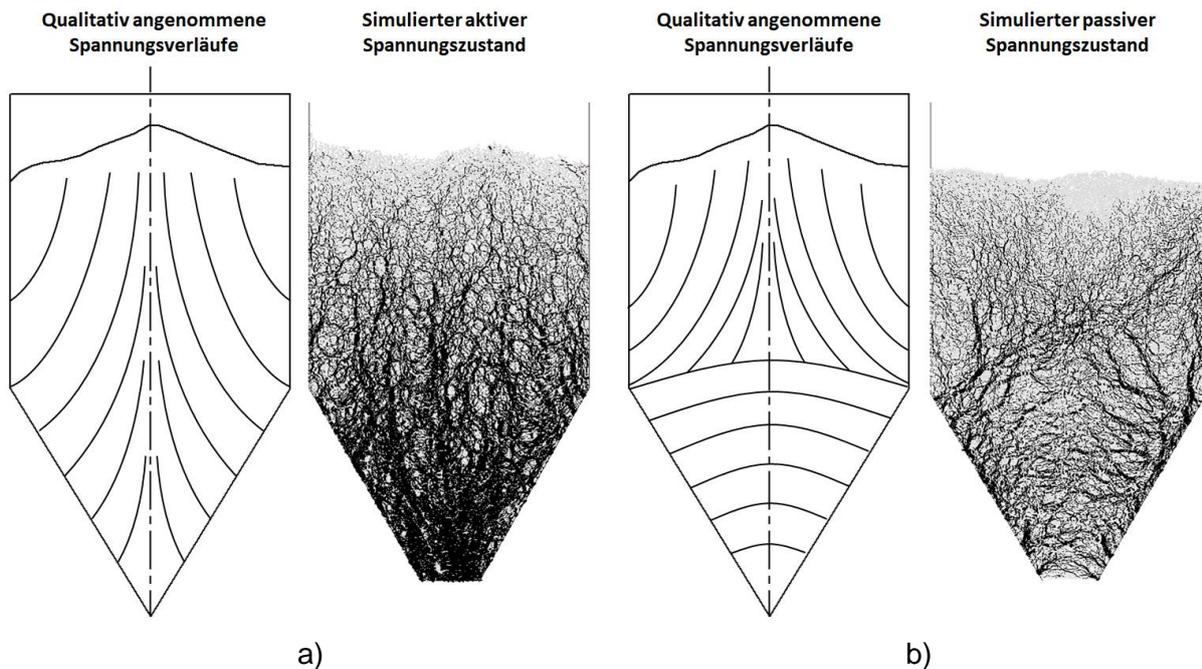


Bild 7-1: Gegenüberstellung der qualitativen Spannungsverläufe im aktiven (a) und passiven (b) Spannungszustand eines Silos [22], [41] mit 2D-DEM-Simulationen und Darstellung der Normalkräfte beim Partikelkontakt

Untersuchung an feststehenden Leitblechen der neuartigen Austrageinrichtung

Auf Grundlage der oben beschriebenen Voruntersuchungen wurde im Anschluss die Geometrie einer ganzflächigen Austrageinrichtung mit mehreren feststehenden Leitblechen erzeugt, um erstmals numerisch die qualitativen Spannungsverläufe für derartige Systeme zu ermitteln. Weiterhin soll überprüft werden, ob das Simulationsergebnis mit den im Kapitel 5.5 (Bild 5-17) angenommenen, qualitativen Spannungsverläufen vergleichbar ist. Vorlage für die Dimensionierung und Anordnung der Leitbleche bildete die neuartige Austrageinrichtung ohne Absperrorgan bzw. Verschlussmechanismen. Hierfür wurde eine Modellgeometrie bestehend aus einem Schüttgutbehälter mit $L = 600\text{mm}$ und sechs Auslauftrichtern erzeugt (Bild 7-2b). Das Bild 7-2a veranschaulicht noch einmal die angenommenen, qualitativen Spannungsverläufe, siehe Bild 5-17 im Kapitel 5.5. Zum Befüllen des Behälters wurden analog zu den Voruntersuchungen 35.000 *Clumps* generiert.

Vergleichbar mit dem simulierten, aktiven Spannungszustand in einem einzelnen Silotrichter (vgl. Bild 7-1a), zeichnet sich in der Simulation des Behälters mit mehreren Trichtern (Bild 7-2b) ein ähnliches Profil der Kontaktkräfte ab, die sich in vertikaler Richtung aufbauen. Nach dem Befüllen sind die größten Spannungen zwischen den feststehenden Leitblechen bzw. parallel liegenden Trichtern festzustellen. In der Praxis würden diese in Form einer Gewichtskraft z. B. direkt auf einen horizontal beweglichen Schieber wirken. Wie der Vergleich in Bild 8-2 zeigt, lassen sich die in der 2D DEM-Simulation ermittelten Kontaktkräfte den qualitativen Verläufen in Bild 7-2a nicht ohne weiteres zuordnen. Dennoch ist eine gewisse Vergleichbarkeit gegeben. Ob sich reale Spannungsverläufe – wie in a) dargestellt – diagonal nach oben hin fortsetzen, hängt u. a. davon ab, wie groß die Reibungskräfte zwischen Schüttgut und den Behälterwänden sind, und wie der Behälter dimensioniert ist.

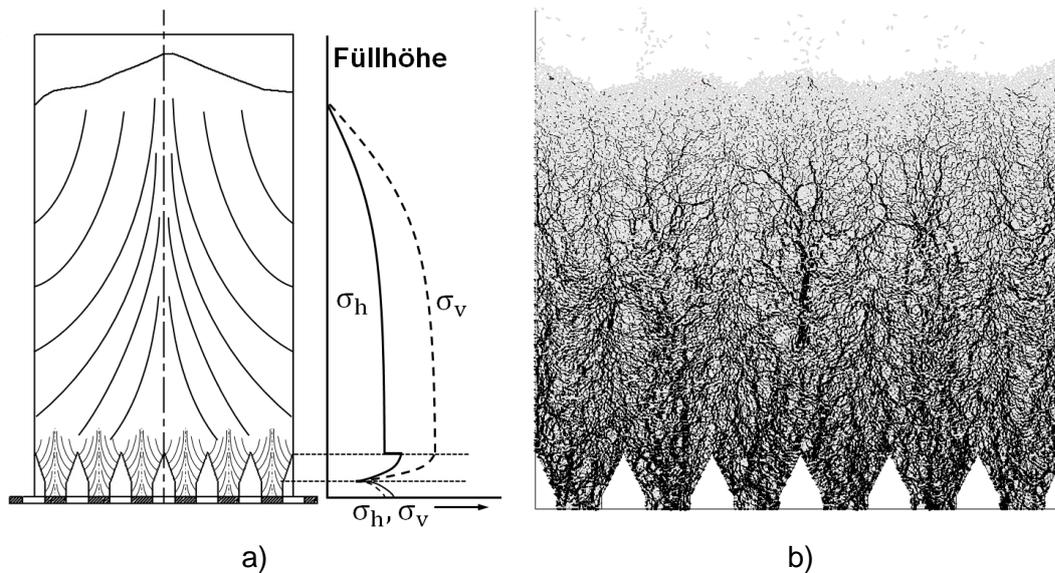


Bild 7-2: Aktiver Spannungsverlauf im Schüttgutbehälter mit ganzflächig wirkender Austrageinrichtung: (a) angenommener, qualitativer Verlauf und (b) berechneter Spannungsverlauf (2D DEM-Simulation) mit Darstellung der Kontaktkräfte in Scherrichtung

Zur Simulation des passiven Spannungszustandes wurden alle *Clumps*, die sich innerhalb des geraden Teils der Trichter (in Bild 7-3b rot-gestrichelt dargestellt) befanden, gelöscht. Dies simuliert eine kurzzeitige Entleerung, wodurch der Behälterinhalt nach unten hin nachrutschen kann. Oberhalb des gedachten Verschleißmechanismus kommt es zur Entlastung der vertikal wirkenden Schüttgutspannung. Beim Einsetzen der Partikelbewegung wird das Modellgut zwischen den geneigten Leitblechen „zusammengedrückt“, wodurch sich (wie in Bild 7-1b und Bild 7-3a) die Kontaktkräfte brückenartig über den Trichtern aufbauen. Der Anteil vertikal wirkender Spannungen im unteren Teil der Trichter ist dadurch verschwindend gering. Vermutlich wirken nach diesem Schüttgutabzug nur noch geringe Kräfte auf den Verschleißmechanismus. Im Bild 7-3b sind helle Bereiche in der Schüttung oben links und rechts in der Abbildung erkennbar. Hier wirken vergleichsweise geringe Spannungen auf die Behälterwände. Mit Hilfe der Simulation konnten somit die im Bild 8-3a angenommenen, qualitativen Verläufe in diesen Bereichen der Schüttung bestätigt werden. Der experimentelle Beweis hierfür ist jedoch noch in weiterführenden Studien zu erbringen.

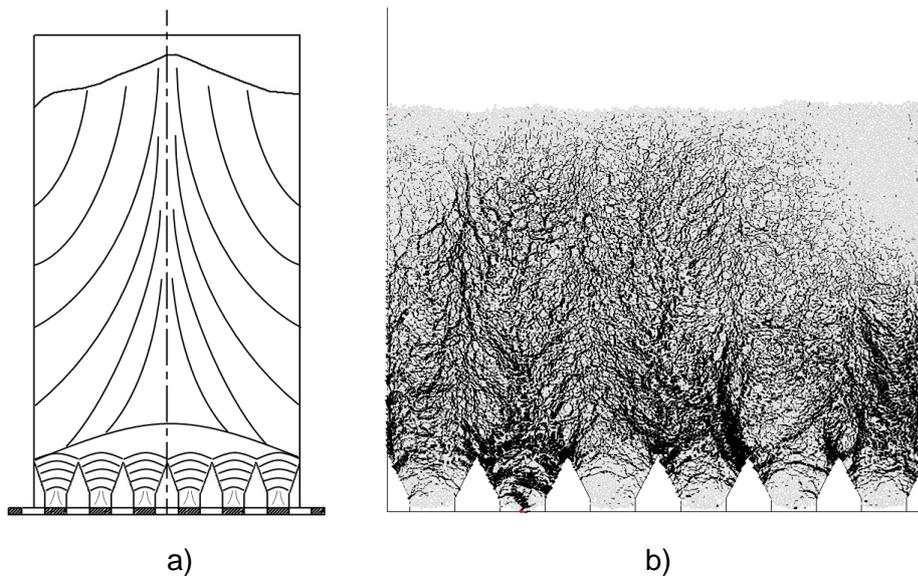


Bild 7-3: Passiver Spannungszustand im Schüttgutbehälter mit ganzflächig wirkender Austrageinrichtung: (a) angenommener, qualitativer Verlauf und (b) berechneter Spannungsverlauf (2D DEM-Simulation) mit Darstellung der Kontaktkräfte in Scherrichtung

Auf gleiche Weise wurde die Geometrie der neuartigen Austrageinrichtung einschließlich der Verschleißmechanismen simuliert. Hierbei zeigten die Berechnungen ähnliche Ergebnisse, die in **Anlage 17** zusammengefasst sind. Es sei darauf hingewiesen, dass die Intensität der schwarz dargestellten Kontaktkräfte vom Nutzer skalierbar ist, um eine möglichst gute Darstellung der qualitativen Verläufe zu erreichen. Die Ausschnitte einzelner Simulationen sind daher nur für sich selbst zu bewerten. Gemessen an der Größe der dargestellten Kontaktkräfte, lassen sich die Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichen.

7.2 Diskrete Simulation der Verweilzeitverteilung

Vor der konstruktiven Umsetzung der neuartigen Austrageinrichtung wurden Voruntersuchungen (vergleichbar mit einer Machbarkeitsstudie) mit Hilfe von DEM-Simulationen zur Partikelbewegung durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, die Wirkungsweise der neuartigen Austrageinrichtung und deren Einflussnahme auf die Verweilzeitverteilung zu analysieren. Als Simulationsobjekt diente ein Schüttgutbehälter mit der neuartigen Austrageinrichtung als Abspeseorgan. In **Anlage 28** ist der DEM-Quellcode für die vorliegenden Simulationen dargestellt. Dieser soll an dieser Stelle nicht im Detail diskutiert werden.

Simulationsbedingungen

Die Simulationsbedingungen sind bereits im Methodenteil (Kapitel 4.2) der vorliegenden Arbeit zusammengefasst. Zur Reduzierung der Simulationszeit wurden anstelle aufwändig zu simulierender 2D-Clumps (z. B. als Modellgut für Weizenkörner) kreisförmige Partikel als Modellgut erzeugt. Die für freifließende Eigenschaften notwendigen Parameter (Kontaktsteifigkeit, Reibungskoeffizienten etc.) des erzeugten Modellguts sind Tabelle 4-1 (Seite 29) zu entnehmen. Die Adaption dieser – für das Modellgut, Weizen, ermittelten –

Parameter ist zulässig, da keine Gegenüberstellung zwischen realem Fließverhalten eines Produktes und numerischer Simulation beabsichtigt war (Validierung), sondern die Beeinflussung eines Partikelsystems durch die Fahrweise der Verschleißmechanismen untersucht wurde. Für die im Folgenden beschriebenen Studien war es daher vollkommen hinreichend, die in Kapitel 4.2 (unter Pkt. 2) zusammengefassten Vereinfachungen zu implementieren.

Modellgeometrie und Partikelsystem

Die Modellgeometrie (neuartige Austrageinrichtung + Behälter) ist im Bild 8-4 in vertikaler Schnittebene dargestellt. Diese wurde als Vorlage für den späteren Prototyp verwendet und umfasst die Neigungswinkel und Abstände der feststehenden Leitbleche, die in die Konstruktion der Austrageinrichtung übernommen wurden, siehe Kapitel 6.1. In einer ersten Simulation mit gleichmäßiger Bewegung aller Verschleißmechanismen zeigte sich, dass sich im 2D-Modell aufgrund der getroffenen Vereinfachungen (u. a. runde Partikel) und der relativ kurzen Strömungsweglänge kein ausgeprägtes Fließprofil oberhalb der Austragsgeometrie einstellt. Aus diesem Grund wurde ein Fließprofil mittels roter Tracerpartikel vorgegeben, welches der im Bild 8-4 dargestellten roten „Startstruktur“ entspricht.

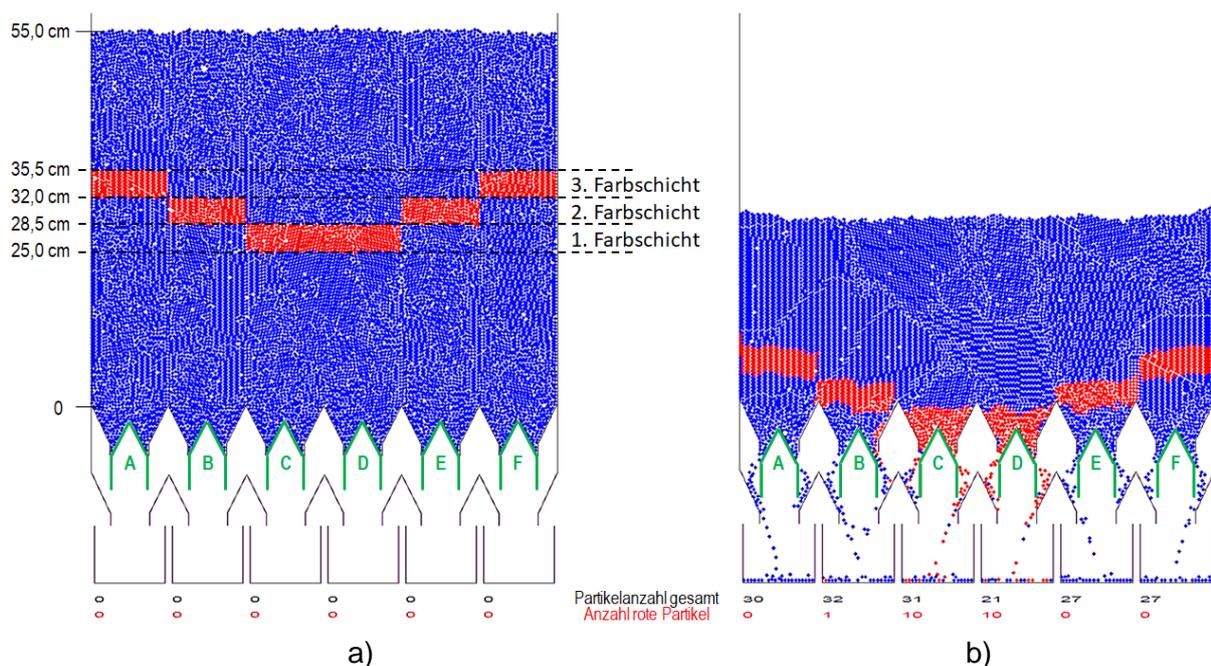


Bild 7-4: DEM-Simulation der Partikelbewegung im Modellbehälter mit neuartiger Austrageinrichtung: a) im Befüllzustand mit leeren Auffangbehältern und b) während der Entleerung

Ziel der Simulation war es herauszufinden, in wieweit sich diese Startstruktur durch eine örtliche Anpassung der simulierten Verschleißmechanismen vergleichmäßigen lässt. Der Nachweis erfolgte über eine Verweilzeitanalyse, die im nächsten Schritt am Prototyp der Austrageinrichtung (in Kapitel 8.3) anhand von Verweilzeitexperimenten durchgeführt wurde. Hierfür wurden unterhalb der Austrageinrichtung sechs Auffangbehälter generiert, um die ausgetragenen Partikel der einzelnen Verschleißmechanismen separat aufzunehmen. Die Anzahl ausgetragener Partikel wird nach jedem Austragsvorgang von den Zählern unterhalb

der Auffangbehälter mitgeschrieben. Auf diese Weise kann jedem diskontinuierlich ausgeführten Austragsvorgang eine Anzahl von roten Partikeln zugeordnet und (ähnlich der Konzentration an Tracerpartikeln) als Verweilzeitverteilung dargestellt werden. Für alle Verschleißmechanismen wurde die gleiche Fahrgeschwindigkeit $v_1 = 0,0335 \text{ m/s}$ gewählt. Der Hubweg h_1 ergibt sich aus dem im Bild 7-5 dargestellten Umkehrpunkt zwischen beiden Leitblechreihen.

Programmierung des Fahrverhaltens der Verschleißmechanismen

Im Folgenden wird die Programmierung des Fahrverhaltens der einzelnen Verschleißmechanismen (**A - F**) erläutert. Als kompliziert erwies sich die Justierung unterschiedlicher Haltezeiten t_H bzw. Pausen, in denen die Verschleißmechanismen praktisch keine Bewegung ausführen. Anhand von Bild 7-5 soll die programmtechnische Umsetzung beschrieben werden. Nachdem ein Verschleißmechanismus beim Öffnungsvorgang mit der Geschwindigkeit v_1 seinen Hubweg (hier $h_1 = 0,01675 \text{ m}$) zurückgelegt hat, wird seine Geschwindigkeit auf $v_3 = 0,00225 \text{ m/s}$ reduziert. Mit dieser Geschwindigkeit legt er noch weitere $100 \mu\text{m}$ nach unten hin zurück, bevor er mit $-v_1$ wieder nach oben fährt. Es ist davon auszugehen, dass die zusätzliche Distanz von $100 \mu\text{m}$ nur einen marginalen Einfluss auf die Austragsmenge und die Partikelbewegung nimmt. Durch diesen bei reduzierter Geschwindigkeit zurückgelegten Weg wird eine Zeitdifferenz generiert, die während der Simulation als Ruhezeit oder Haltezeit der Verschleißmechanismen fungiert. Durch Justierung von v_3 können praktisch beliebig lange Haltezeiten realisiert werden. Am „Umkehrpunkt“ des Verschleißmechanismus (Bild 7-5) entsteht für den beschriebenen Fall eine zeitliche Verzögerung von $t_3 = 0,044 \text{ s}$, die hier als „simulierte Haltezeit“ definiert wird. Nach gleichem Vorgehen erreicht der Verschleißmechanismus beim Schließvorgang wieder seinen Startpunkt, an dem eine „Wartezeit“ von $t_2 = 0,2 \text{ s}$ über $v_2 = 0,0005 \text{ m/s}$ festgelegt wurde.

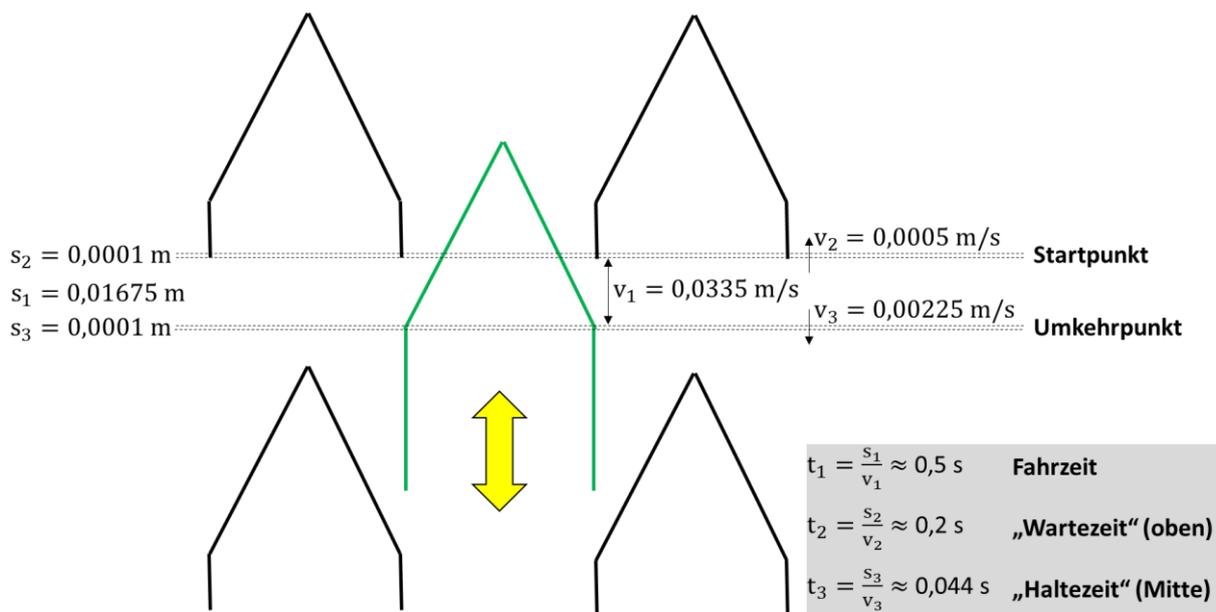


Bild 7-5: Exemplarisch dargestellte Parametrierung eines Verschleißmechanismus mit Warte- und Haltezeiten

Die Gesamtdauer $t_{D,sim}$ eines simulierten Hubvorgangs berechnet sich unter Vernachlässigung der Wartezeit am Startpunkt für einen einzelnen Verschleißmechanismus zu

$$t_{D,sim} = \left(\frac{2s_1 + s_3}{v_1} \right) + \frac{s_3}{v_3} \quad (7.1)$$

Simulation der Verweilzeitverteilung in der Modellgeometrie + Partikelsystem

Durch Variation der simulierten Haltezeit t_H wurden insgesamt 8 Einstellungen der Verschleißmechanismen untersucht (siehe Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: Übersicht über die simulierten Haltezeiten der Verschleißmechanismen

Verschleißmechanismus	Haltezeit t_H [ms]					
	A	B	C	D	E	F
Simulation 1	0	0	0	0	0	0
Simulation 2	35	25	0	0	25	35
Simulation 3	44	30	0	0	30	44
Simulation 4	50	30	0	0	30	50
Simulation 5	55	35	0	0	35	55
Simulation 6	60	35	0	0	35	60
Simulation 7	75	35	0	0	35	75
Simulation 8	75	40	0	0	40	75

In der Simulation 1 wurde der Ausgangszustand der neuartigen Austrageinrichtung mit synchroner Bewegung aller Verschleißmechanismen nachempfunden. Die erzeugte Startstruktur bewegte sich hierbei nahezu gleichmäßig durch den Modellbehälter. Erwartungsgemäß erreichte zunächst die untere Tracerschicht die Verschleißmechanismen **C** und **D** (Bild 7-4).

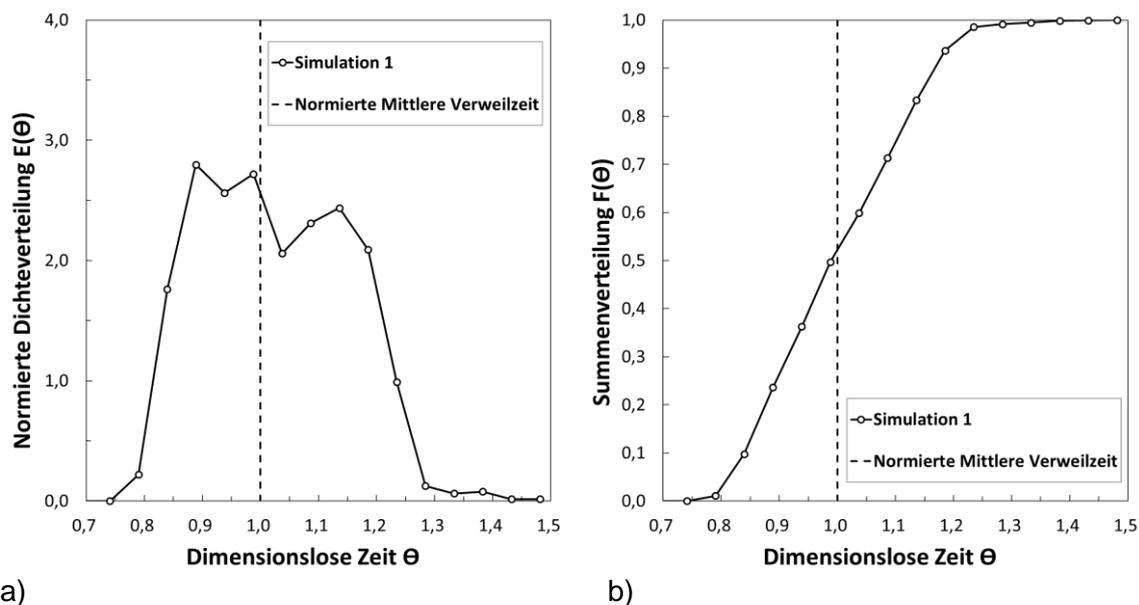


Bild 7-6: 2D DEM-Simulation der Verweilzeitverteilung (Simulation 1): a) normierte Dichteverteilung und b) Summenverteilung bei synchroner Freigabe der Verschleißmechanismen.

In der simulierten normierten Dichteverteilung (Bild 7-6a) äußert sich dies in einem steilen Anstieg der normierten Dichteverteilung auf einen Wert von $E(\theta) = 2,8$ bei $\theta = 0,89$. Nachdem ein Großteil der unteren Farbschicht bereits ausgetragen wurde, erreichten die nächsten Tracerschichten (vgl. Bild 7-4b) die Verschleißmechanismen B und E. Ähnlich setzte sich die Partikelbewegung auch im Randbereich fort, wo die äußeren Farbschichten die Austrageinrichtung erreichten. Infolge der gleichförmigen Bewegung der Startstruktur durch den Behälter ist die Verweilzeitverteilung durch einen multimodalen Verlauf gekennzeichnet, wodurch die Summenverteilung relativ deutlich von der normierten mittleren Verweilzeit abweicht. Im Mittel variierten die Austragsmengen pro Öffnungszyklus in den einzelnen Auffangbehältern der Simulationsgeometrie um ca. 4%. Die durchschnittliche Anzahl ausgetragener Partikel lag bei 524 Partikel pro Austragsvorgang.

In den weiteren, darauf aufbauenden Simulationen (Tabelle 7-1) wurden die Haltezeiten der Verschleißmechanismen örtlich variiert mit dem Ziel, die Partikelbewegung der gewählten Startstruktur im Modellbehälter zu beeinflussen und die Verweilzeitverteilung zu verschmälern. Die untere Farbschicht wurde hierbei als Referenz betrachtet. Durch Justierung der Haltezeit der äußeren Verschleißmechanismen sollten die anderen Farbschichten der Startstruktur schrittweise möglichst so beschleunigt werden, dass alle Schichten etwa auf einheitlicher Höhe über der Apparatebreite ausgetragen werden. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind zusammenfassend im Bild 7-7 (*Simulationen 1, 3, 7, 8*) und **Anlage 26** (*Simulationen 1 – 8*) dargestellt.

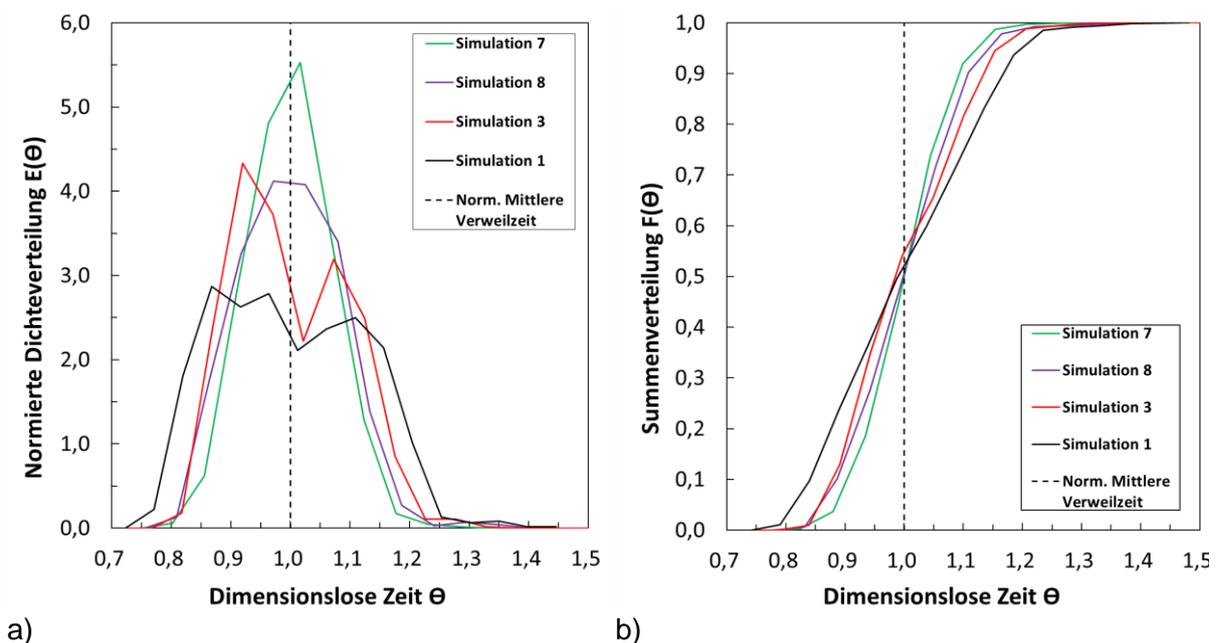


Bild 7-7: 2D DEM-Simulation der Verweilzeitverteilung (Simulationen 1-8): a) normierte Dichteverteilung und b) Summenverteilung bei gesteuerter Freigabe der simulierten Verschleißmechanismen

Wie die Ergebnisse der *Simulation 3* (rote Kurve) zeigen, konnte durch Beschleunigung der Randbereiche des Schüttgutes zunächst eine bi-modale Verteilung erreicht werden. Das Maximum, das sich links von der normierten mittleren Verweilzeit befindet, resultierte aus der

Verschiebung der zweiten vorgegebenen Tracer-Farbschicht (vgl. Bild 7-4) auf das Niveau der ersten, voraneilenden Farbschicht. Durch schrittweise Anpassung der Haltezeiten der Verschleißmechanismen **A** und **F** konnte das vorgegebene Fließprofil weiter vergleichmäßigt werden und die Verweilzeitverteilung in eine mono-modale Verteilung überführt werden (*Simulation 8*). In den nachfolgenden Simulationen äußerte sich dies in immer schmäler werdende Verweilzeitverteilungen. In der Darstellung der Summenverteilung (Bild 7-7b) resultiert ein immer schärfer werdender Kurvenverlauf, bei dem sich die Verweilzeitverteilung schrittweise in Richtung der normierten mittleren Verweilzeit bewegt.

Im Folgenden sind die Simulationen 7 und 8 exemplarisch noch einmal dargestellt, um diese unter Einbindung der Verweilzeitmodellierung (siehe Kapitel 4.2) und der Bodensteinzahl zu bewerten und zu vergleichen. In Bild 7-8 sind neben den Messpunkten der *Simulation 8* auch die (mittels Dispersionsmodell berechneten) Modellkurven als Normierte Dichteverteilung $E(\theta)$ und Summenverteilung $F(\theta)$ bei einer Bodensteinzahl von $B_o = 280$ dargestellt. Aus dem Verlauf der Normierten Dichteverteilung für die iterativ ermittelte Bodensteinzahl ist erkennbar, dass die Höhe des Peaks nicht exakt dem zu erwartenden Niveau des Maximums der Messpunkte entspricht. Der Kurvenverlauf lässt sich hingegen relativ gut durch die Messpunkte legen. Vergleicht man beide Verläufe hingegen innerhalb der Summenverteilung (Bild 7-8b), so zeigt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen simulierter und modellierter Verweilzeitverteilung. Die Abweichung zwischen beiden Ergebnissen tritt hier nur marginal in einem steileren Anstieg der Messpunkte hinter der Normierten Mittleren Verweilzeit auf.

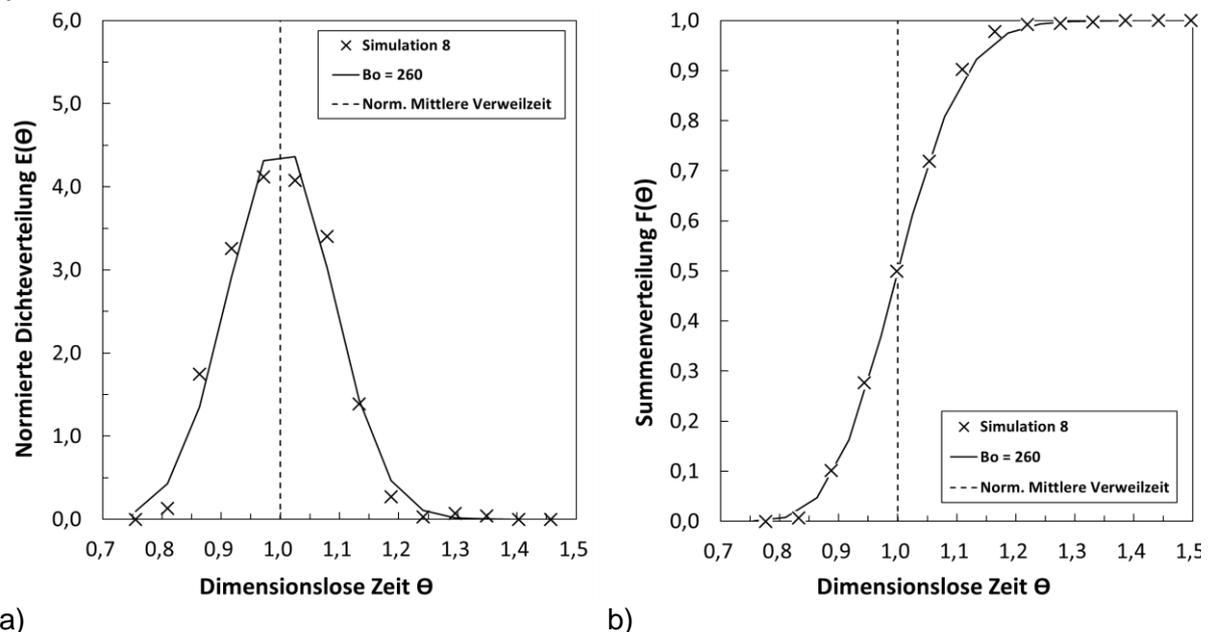


Bild 7-8: 2D DEM-Simulation der Verweilzeitverteilung (Simulationen 8): a) normierte Dichteverteilung und b) Summenverteilung bei gesteuerter Freigabe der simulierten Verschleißmechanismen

In der Simulation wurde zudem qualitativ beobachtet, dass insbesondere die Partikelgeschwindigkeit im Wandbereich der Behältergeometrie (aufgrund der dort wirkenden Reibung) deutlich langsamer ist. Es wird davon ausgegangen, dass die hiervon beeinflusste,

zeitversetzte Austragung der Tracerpartikel (unter Berücksichtigung der dem Dispersionsmodell zugrundeliegenden Pfropfenströmung) einen signifikanten Einfluss auf die Lage der gemessenen Verweilzeitverteilung hat. Ähnlich fiel auch das Ergebnis für *Simulation 7* (Bild 7-9) aus, deren Verweilzeitverteilung mit einer Bodensteinzahl von $B_o = 410$ modelliert wurde. Aus der, gegenüber *Simulation 8*, deutlich höheren Bodensteinzahl und dem Maximum bei $E(\theta) = 5,5$ lässt sich mittels Dispersionsmodell quantitativ bewerten, dass die Wahl der entsprechenden Haltezeiten (siehe Tabelle 7-1) an der Austragsgeometrie zu einer deutlich schmaleren Verweilzeitverteilung geführt hat. Die schmalere Verweilzeitverteilung findet sich innerhalb der Simulation in einem gleichmäßigeren Fließprofil der Partikel wieder.

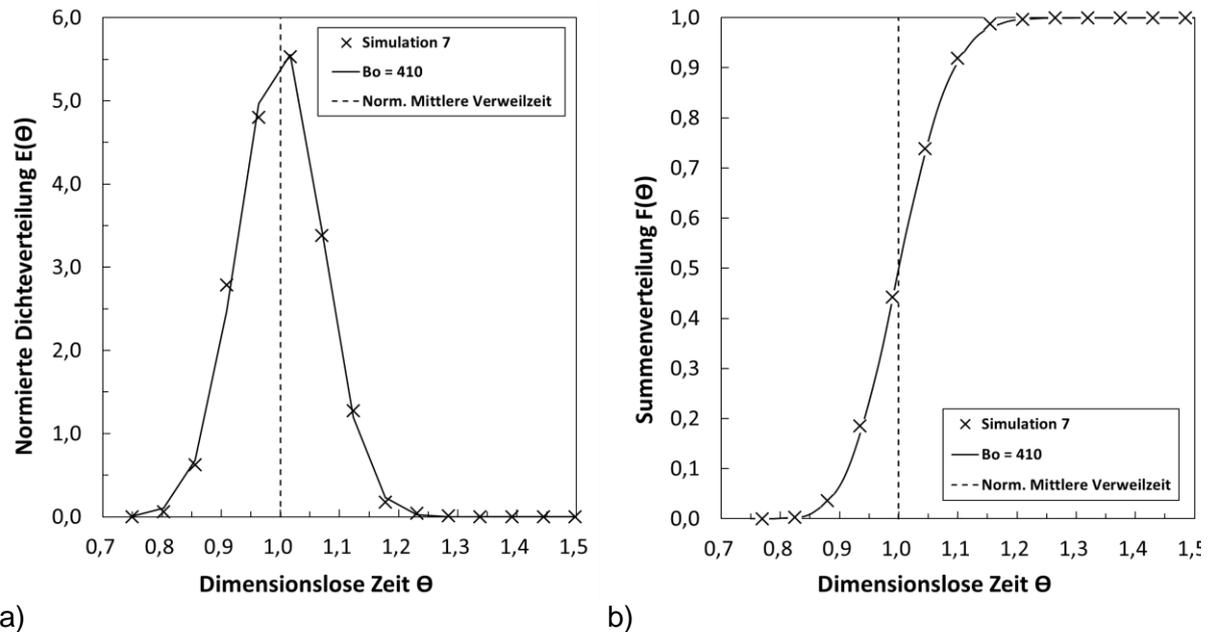


Bild 7-9: 2D DEM-Simulation der Verweilzeitverteilung (Simulationen 7): a) normierte Dichteverteilung und b) Summenverteilung bei gesteuerter Freigabe der simulierten Verschleißmechanismen

Die mittels DEM und Dispersionsmodell gewonnenen Erkenntnisse lieferten den theoretischen Grundstein zur Bestätigung des Funktionsprinzips der neuartigen Austrageinrichtung und die Anwendung der Verweilzeitmodellierung zur Bewertung des Kurvenverlaufs. Hieran schließen sich die konstruktive Fertigung und die experimentelle Erprobung der neuartigen Austrageinrichtung an. Dem DEM-Modell und seinem Partikelsystem liegen eine Vielzahl an Vereinfachungen zu Grunde. Dennoch lassen sich aus den Simulationen die grundlegenden Effekte bei der Wechselwirkung einer örtlichen Ansteuerung der Verschleißmechanismen mit Verweilzeitverteilungen studieren. In zukünftigen Forschungsarbeiten kann an diese Ergebnisse angeknüpft werden, um z. B. experimentell ermittelte Verweilzeitverteilungen realer Schüttgüter zur Kalibrierung und Validierung eines DEM-Modells zu nutzen. Mittels „digitalem Zwilling“ des Versuchsaufbaus ließen sich z. B. die optimalen Haltezeiten der Verschleißmechanismen am Computer bestimmen.

8 Experimentelle Erprobung der neuartigen Austrageinrichtung

8.1 Gleichmäßigkeit und Dosiergenauigkeit der Austragung

8.1.1 Gleichmäßigkeit

Ganzflächig wirkende Austrageinrichtungen besitzen - unabhängig von der Art des Verschleißmechanismus (z. B. Schieber, rotierende Walzen) - mehrere, parallel angeordnete Auslaufrichter mit länglichen, rechteckigen Austragsöffnungen. Bei gleichzeitiger Freigabe dieser Schlitze wird erwartet, dass sich die ausgetragenen Schüttgutmengen örtlich nur geringfügig voneinander unterscheiden. Ist dies der Fall, so kann (bezogen auf die örtliche Entleerungsmenge) von einer gleichmäßigen Austragung gesprochen werden.

Die Gleichmäßigkeit der Entleerung der neuartigen Austrageinrichtung wurde am Beispiel von getrocknetem Weizen analysiert (zum Versuchsaufbau siehe Kapitel 5.3). Das Ziel der Untersuchungen war es festzustellen, inwieweit auftretende Schwankungen der Austragsmasse durch nachträgliche Justierung der Verschleißmechanismen kompensiert werden können. Für den Versuch wurden folgende Parameter eingestellt:

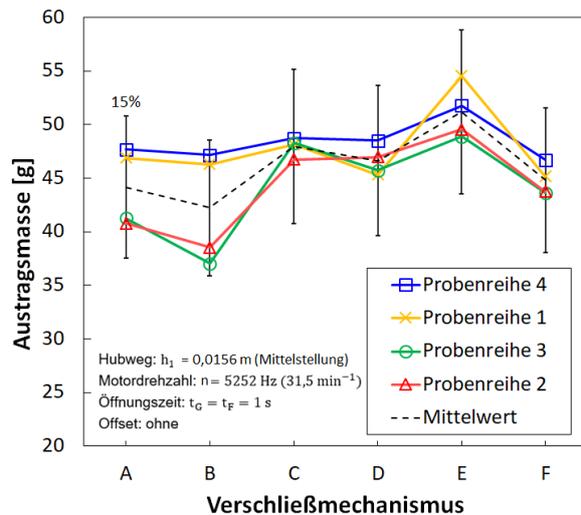
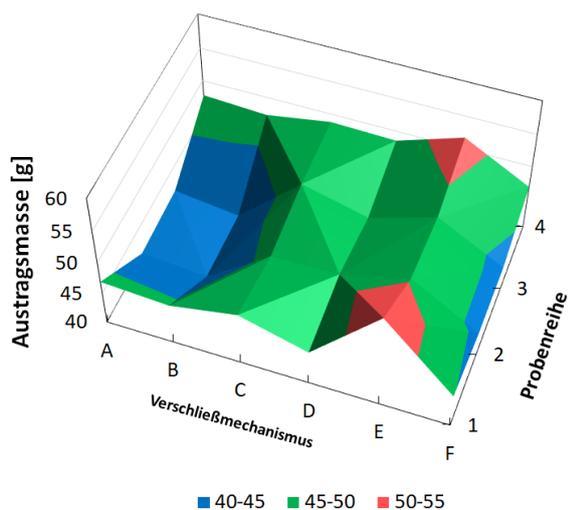
Betriebsweise: intermittierend (konventioneller Betrieb)

Hubweg: $h_1 = 0,0156 \text{ m}$ (Mittelstellung)

Motordrehzahl: $n = 5252 \text{ Hz}$ ($31,5 \text{ min}^{-1}$)

Austragszeit: $t_D = t_F = 1 \text{ s}$.

Gemessen wurde die örtliche Verteilung der Austragsmasse mit Hilfe der Probenschubblade (Bild 5-12). Je Öffnungsvorgang wurden im Durchschnitt $\bar{M}_{S,D} = 1,112 \text{ kg}$ Weizen ausgetragen. Bild 8-1 zeigt das Ergebnis der Messungen. Im Bild 8-1a ist die Massenverteilung über der Fläche der Austrageinrichtung dargestellt. Bild 8-1b zeigt das entsprechende Profil der ausgetragenen Massen über der Breite der Austrageinrichtung in jeder Probenreihe 1-4. Wie die Grafik zeigt, schwanken diese über der Tiefe der Probenschubblade gemessenen Werte zum Teil erheblich, wie die Mittelwerte (gestrichelte Linie) und die Standardabweichungen veranschaulichen. Bild 8-1 zeigt, dass über die Verschleißmechanismen **C** und **D** (vgl. Bild 6-4) etwa gleich viel Schüttgut ausgetragen wurde. Dagegen wurden in den Probenreihen 2 und 3 der Verschleißmechanismen **A**, **B** und **F** deutlich geringere Mengen ausgetragen, siehe Flächendiagramm in Bild 8-1a. Die Auswertung der Messungen zur Gleichmäßigkeit der Austragung ergab eine Schwankungsbreite von bis zu 15%.



a)

b)

Bild 8-1: Austragscharakteristik der neuartigen Austrageinrichtung: a) 3D Massenverteilung und b) Austragsmassen über der Breite der Austrageinrichtung. Versuchsmaterial Weizen.

Eine mögliche Ursache der ermittelten Ungleichverteilungen sind Fertigungsabweichungen zwischen den einzelnen Verschleißmechanismen. Durch Vermessung der Bleche wurden Abweichungen von 1 – 2 mm festgestellt, die als Materialwölbungen (sog. „Bombierungen“) sichtbar waren. Im Rahmen einer Serienproduktion und Markteinführung der neuartigen Austrageinrichtung in den Industriemaßstab wäre dies zu berücksichtigen. Am Verschleißmechanismus E liegt dadurch die Differenz der Austragsmenge zwischen Probenreihe 3 und 1 bei etwa 15%. Im Ergebnis dieses Gleichmäßigkeitstests wurde entschieden, für die Auslaufrichter **A**, **B**, **E** und **F** neue Verschleißmechanismen zu fertigen. Die Fertigungstoleranz wurde auf ≤ 1 mm limitiert.

Weiterhin auftretende Schwankungen der Austragsmasse können durch örtliche Variation der Startposition einzelner Verschleißmechanismen ausgeglichen werden. Diese Justierung ist mit Hilfe der Parametriersoftware der Schrittmotoren relativ einfach umsetzbar, indem den einzelnen Startpositionen ein Offset hinzugefügt wird. Die Eingabe des Offsets erfolgt in Schritten („Steps“). Mit den neugefertigten Verschleißmechanismen wurde der Versuch wiederholt und in einem ersten Anlauf kleinere Schwankungen durch die Offsetbelegung ausgeglichen. Dies soll kurz am Beispiel des Verschleißmechanismus **B** erläutert werden:

Mit einem Messschieber wurde festgestellt, das Verschleißmechanismus **B** um ca. 2 mm angehoben werden müsste, um auf gleicher Höhe mit den anderen Verschleißmechanismen zu liegen. Um diese Differenz auszugleichen sollte die Startposition mittels Offsetparametrierung verschoben werden, für die die Anzahl von Steps zu berechnen sind. Nach Umstellen von Gleichung (6.16) ergab sich die (als Offset einzustellende) Anzahl von Steps zu

$$N_S = \frac{h_1}{i_G \cdot \Omega} = \frac{2\text{mm} \cdot 360^\circ}{62,8 \text{ mm} \cdot 0,036^\circ} \approx 319 \text{ Steps} \quad (8.1)$$

Mit der so modifizierten Austrageinrichtung wurde ein erneuter Test zur Gleichmäßigkeit mit den gleichen Parametern durchgeführt. Wie das Ergebnis im Bild 8-2 veranschaulicht, wurde eine sehr homogene Verteilung der Austragsmassen über dem Apparatequerschnitt erreicht. Die Verteilung der ausgetragenen Schüttgutmassen über der Breite der Austrageinrichtung zeigt (Bild 8-2b), dass nur geringe Abweichungen zwischen den einzelnen Verschleißmechanismen A - F und zwischen den Probenreihen 1 - 4 vorliegen. Verglichen mit dem in Bild 8-1 dargestellten Zustand reduzierte sich die Differenz der Austragsmenge zwischen Probenreihe 3 und 1 auf nur noch 5%. Die höhere Präzision in der Fertigung der Verschleißmechanismen und die Offset-Programmierung einzelner Antriebe führten zu einer sehr gleichmäßigen Austragung über dem Apparatequerschnitt, wie Bild 8-2a bestätigt.

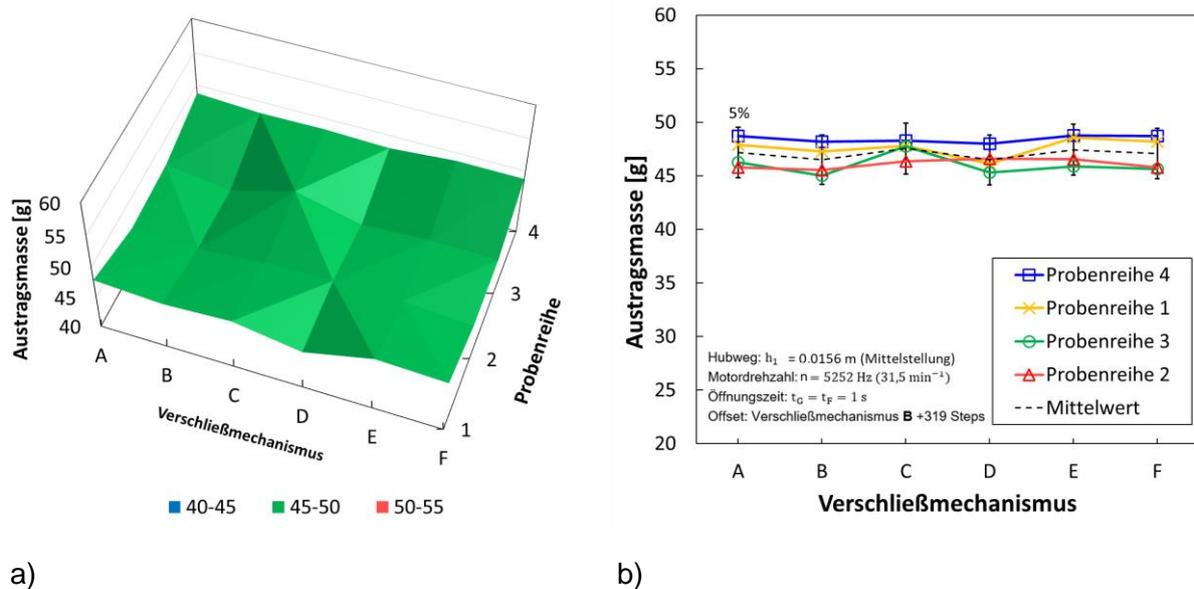


Bild 8-2: Austragscharakteristik der neuartigen Austrageinrichtung nach Justierung der Verschleißmechanismen: a) 3D Massenverteilung und b) Austragsmassen über der Breite der Austrageinrichtung. Versuchsmaterial Weizen.

Wie der zweite Test gezeigt hat, können Ungleichmäßigkeiten in der Entleerungsmenge einzelner Verschleißmechanismus durch eine Offsetbelegung ausgeglichen werden. Denkbar wäre jedoch auch die Variation der Fahrzeit (Variation der Motordrehzahl) und der Haltezeit. Da diese Art der Parametrierung jedoch der Steuerung der Verweilzeitverteilung vorbehalten bleiben soll, empfiehlt es sich die Austragscharakteristik einzelner Trichter schon zu Beginn so exakt wie möglich einzustellen. Die auf Grundlage der durchgeführten Justierung erzielte Austragscharakteristik (Bild 8-2) der neuartigen Austrageinrichtung bildet den Ausgangszustand für weiterführende Untersuchungen.

Vergleich der erzielten Gleichmäßigkeit mit anderen ganzflächigen Austrageinrichtungen

Zur Gegenüberstellung der Austragscharakteristik der neuartigen Austrageinrichtung mit dem Ist-Zustand bereits etablierter Austrageinrichtungen wurde die intermittierende Betriebsweise (konventioneller Betrieb) als Referenz für eine Gegenüberstellung genutzt. In den Vergleich einbezogen wurde ein ganzflächiges Austragsystem mit Dosierkammern und ein System mit

Schieber, siehe Kapitel 5.1. Im Unterschied zur neuartigen Austrageinrichtung sind deren Möglichkeiten zur Justierung jedoch begrenzt. Für die Tests wurde der Versuchsaufbau nach Bild 5-9 mit Probenschublade (Bild 5-12) verwendet. Als Versuchsmaterial diente getrockneter Weizen. Die Ergebnisse sind dem Anhang (Anlagen 18-20) zu entnehmen und verdeutlichen, dass die Austragscharakteristiken dieser Systeme durch starke Profilbildung mit zum Teil erheblichen Schwankungen der lokalen Austragsmassen gekennzeichnet sind. Diese Erkenntnisse wurden auf ähnliche Weise experimentell und auch numerisch von *Iroba et al.* [14, 30] festgestellt.

8.1.2 Dosiergenauigkeit

Die neuartige Austrageinrichtung ist in ihrer grundlegenden Funktion zunächst nur ein Absperrorgan, das zu gegebener Zeit eine kontinuierliche oder diskontinuierliche Absperrung bzw. Behälter-Entleerung bewirken soll. Bei der Entwicklung innovativer Schüttgutprozesse werden zunehmend hohe Anforderungen an die Dosiergenauigkeit von Austrageinrichtungen gestellt. Dies setzt eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit der eingestellten Austragsmenge voraus. Zur Ermittlung der Dosiergenauigkeit wurden Austragsversuche mit zwei Parameter-Einstellungen (ohne bzw. mit Haltezeit) durchgeführt, siehe Tabelle 8-1.

Tabelle 8-1. Austragsversuche zur Dosiergenauigkeit.

Versuch Nr.	Hubweg h_1 [m]	Fahrzeit t_F [s]	Haltezeit t_H [s]	Zahl d. Wiederh. n	Mittlere Austragsmasse $\bar{M}_{S,D}$ [kg]	Standard-abw. σ [kg]
1	0,0156	0,5	0	30	0,712	0,0076
2	0,0156	0,5	0,5	30	1,096	0,0079

In der ersten Versuchsreihe wurden ein Hubweg von $h_1 = 15,6$ mm (Mittelstellung) und eine Fahrzeit $t_F = t_G = 0,5$ s ($n = 10700$ Hz) eingestellt. Nach jedem Öffnungsvorgang wurde die Austragsmasse gewogen. Aus den 30 Wiederholungen ergab sich ein arithmetischer Mittelwert der Austragsmasse von $\bar{M}_{S,D} = \mu \approx 0,712$ kg ($\sigma = 0,0076$ kg). Bild 8-3 veranschaulicht die Häufigkeitsverteilung der aufgetragenen Schüttgutmassen. Wie die Grafik zeigt, folgt diese Verteilung in etwa einer Gauß'schen Normalverteilung, die sich nach Gleichung (8.2) wie folgt berechnet

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad . \quad (8.2)$$

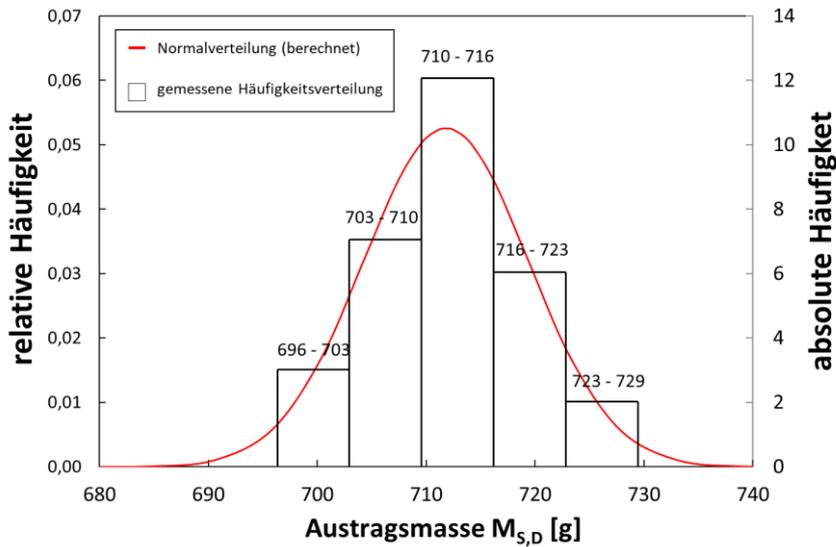


Bild 8-3: Häufigkeitsverteilung der Austragsmassen für eine Austragszeit $t_D = 0,5$ s.

Mit Hilfe der Standardabweichung und Gleichung (8.2) lässt sich eine Normalverteilung [144] um diesen Mittelwert legen, die eine relativ gute Übereinstimmung mit den Messwerten erkennen lässt. Stellt man darüber hinaus die Summenhäufigkeitsverteilung der Austragsmassen in einem Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmierter Ordinate dar, so sollten sich im Fall einer Normalverteilung nahezu alle Messwerte in der Nähe der Ausgleichsgeraden befinden. Wie Bild 8-4 zeigt, deutet die Lage der Messwerte auf eine Normalverteilung hin. Das heißt, mit der neuartigen Austrageinrichtung werden eine sehr gute Reproduzierbarkeit und damit eine hohe Dosiergenauigkeit erreicht.

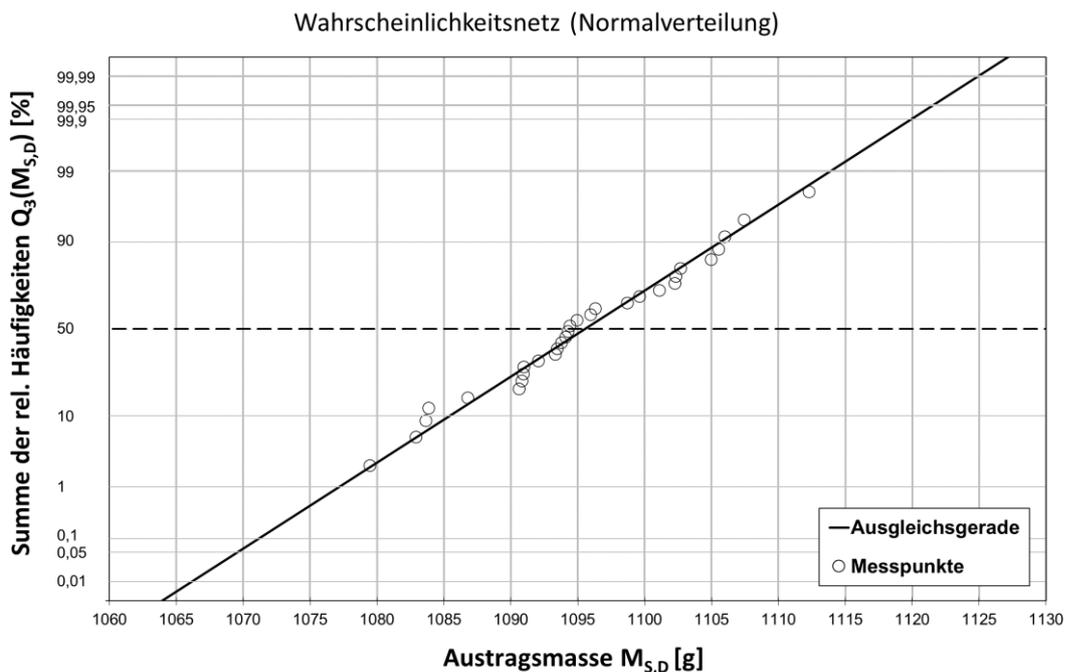


Bild 8-4: Summenhäufigkeitsverteilung der Austragsmassen im Wahrscheinlichkeitsnetz für eine Austragszeit $t_D = 0,5$ s.

Die zweite Testreihe zur Dosiergenauigkeit wurde für eine höhere Austragsmasse durchgeführt (Versuchsreihe 2, Tabelle 8-1). Dazu wurde bei gleicher Antriebsdrehzahl eine Haltezeit von $t_H = 0,5$ s eingestellt. Nach den 30 Wiederholungen der Austragsversuche ergab sich eine mittlere Austragsmasse von $\bar{M}_{S,D} \approx 1,096$ kg mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0,0079$ kg. Das Ergebnis dieser Versuchsreihe veranschaulicht Bild 8-5, in dem die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Austragsmassen und die berechnete Normalverteilung dargestellt sind. Darüber hinaus kann **Anlage 21** die Darstellung im Wahrscheinlichkeitsnetz entnommen werden.

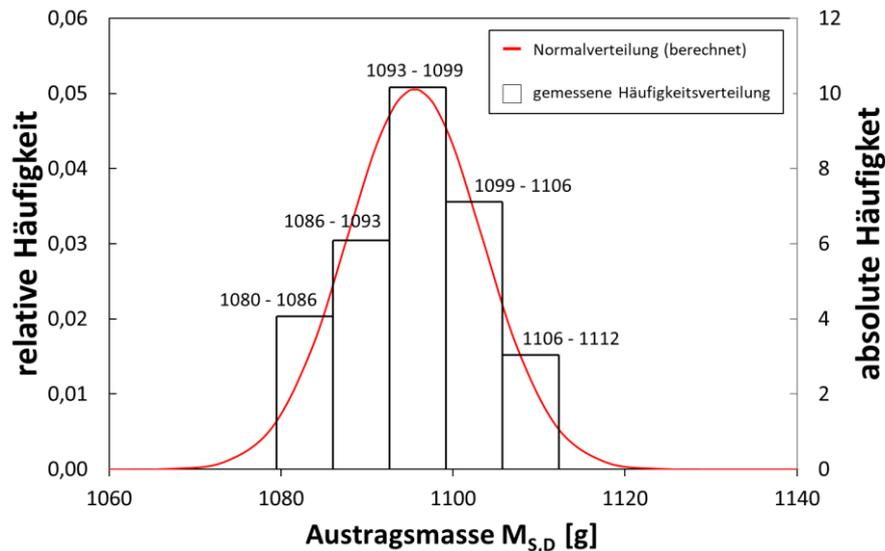


Bild 8-5: Häufigkeitsverteilung für eine Austragszeit $t_D = 1,0$ s der neuartigen Austrageinrichtung.

8.2 Austragscharakteristik und Austragsmassenstrom

Für den Praxiseinsatz der neuartigen Austrageinrichtung ist es von großer Bedeutung, dass sich der Austragsmassenstrom in Abhängigkeit von der konstruktiven Gestaltung und der Schüttgutart abschätzen lässt. Erst auf dieser Basis können vor- und nachgelagerte Teilprozesse einer späteren Gesamtanlage aufeinander abgestimmt werden. Der Austragsmassenstrom wurde mit Hilfe des Versuchsaufbaus nach Bild 5.9 (S. 41) und dem Versuchsmaterial Weizen experimentell ermittelt. Variiert wurde der Hubweg h_1 bzw. die effektive Öffnungsweite s_{eff} der Verschleißmechanismen bei konstanter Motordrehzahl ($n = 10.725$ Hz) und synchron zueinander laufender Antriebe. Hierbei ergaben sich unterschiedliche Fahrzeiten, die in Tabelle 8-2 zusammengefasst sind.

Tabelle 8-2. Versuche zum Auslaufmassenstrom.

Versuch	Hubweg	Effektive Öffnungsweite	Fahrzeit
	h_1 [m]	s_{eff} [m]	t_F [s]
1	0,0131	0,0055	0,42
2	0,0144	0,0061	0,46
3	0,0156	0,0066	0,50
4	0,0173	0,0073	0,56

Die Haltezeit t_H aller Antriebe wurde in jedem Versuch schrittweise um 0,2 s erhöht und mit jeder einzelnen Abspeisung die Austragsmasse $M_{S,D}$ verwogen. Bild 8-6 stellt den linearen Zusammenhang zwischen der Austragszeit (siehe Gl. 6-17) und der ansteigenden Austragsmasse grafisch dar. Weiterhin sind die Gleichungen der Regressionsgeraden bei entsprechender effektiver Öffnungsweite aufgeführt, aus denen sich für die Messpunkte ein mittlerer Austragsmassenstrom in Form des Geradenanstiegs ablesen lässt. Für eine effektive Öffnungsweite von $s_{\text{eff}} = 0,0055$ m kann beispielsweise der Austragsmassenstrom zu $\dot{M}_{S,D} = \frac{M_{S,D}}{t_D} = 1,69$ kg/s bestimmt werden.

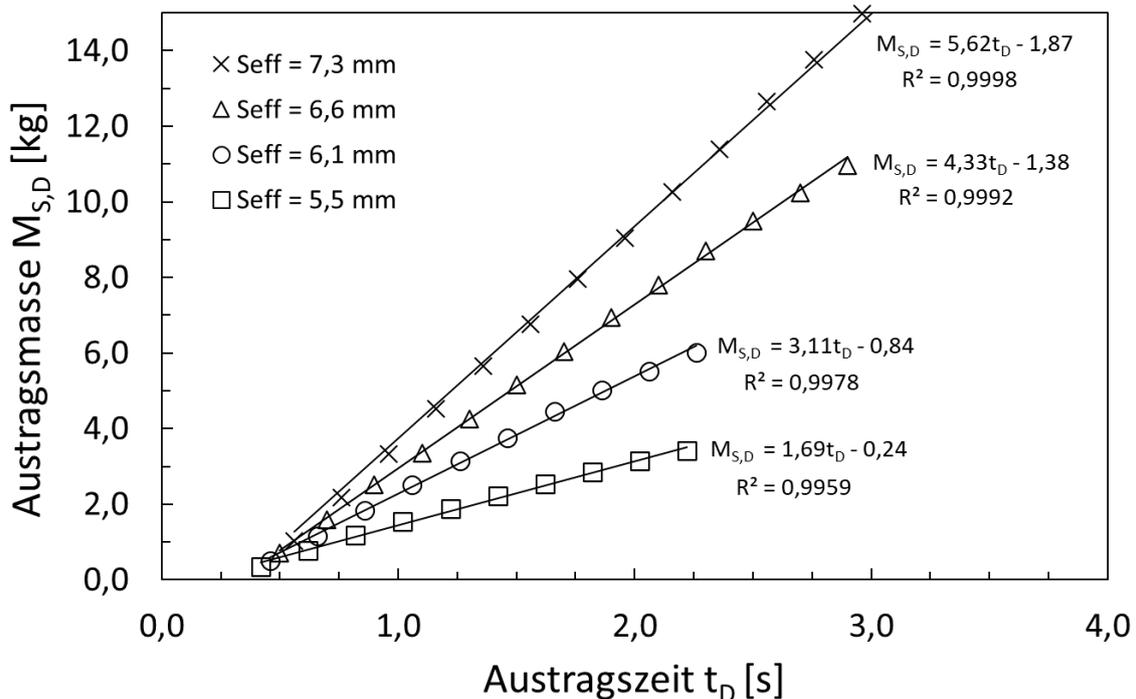


Bild 8-6: Austragscharakteristik bei unterschiedlichen effektiven Öffnungsweiten unter Verwendung des Versuchsmaterials Weizen (Ausschnitt des gesamten Messbereichs $0,42 \text{ s} \leq t_D \leq 7,96 \text{ s}$).

Als erste Näherung scheint dieses Vorgehen zur experimentellen Bestimmung des Austragsmassenstroms bei unterschiedlicher effektiver Öffnungsweite hinreichend genau zu sein. Wie nachfolgend darstellt, besitzt das Bestimmtheitsmaß R^2 der jeweiligen Regressionsgerade in Bild 8-6 jedoch größere Bedeutung als zunächst angenommen:

Aus der Praxis der Schüttgutaustragung ist bekannt, dass sich erst nach einer bestimmten Austragszeit ein annähernd konstanter, kontinuierlicher Auslaufmassenstrom $\dot{M}_{S,\text{kont.}}$ einstellt. Exemplarisch wurden daher die Regressionsgeraden noch einmal nur durch die letzten drei Messpunkte der jeweiligen Einstellung gelegt (siehe **Anlage 27**) aus deren Geradenanstiegen sich ein geringerer Auslaufmassenstrom ermitteln lässt. Die Ergebnisse der aus Bild 8-6 zu entnehmenden Auslaufmassenströme sind in Tabelle 8-3 noch einmal gegenübergestellt. Im Direktvergleich zeigt sich, dass abhängig vom betrachteten Messbereich (bei gleicher effektiver Öffnungsweite) Abweichungen von bis zu 19% zwischen den ermittelten Auslaufmassenströmen liegen.

Tabelle 8-3. Ermittelter Auslaufmassenstrom in Abhängigkeit der eff. Öffnungsweite.

Effektive Öffnungsweite	Auslaufmassenstrom (Regressionsgerade über alle Messpunkte des, siehe Bild 8-6)	Messbereich	Auslaufmassenstrom (Regressionsgerade über die letzten 3 Messpunkte, siehe Anlage 31)	Messbereich
	$\dot{M}_{S,D}$ [kg/s]		$\dot{M}_{S,D}$ [kg/s]	
s_{eff} [m]	$\dot{M}_{S,D}$ [kg/s]		$\dot{M}_{S,D}$ [kg/s]	
0,0055	1,69	$0,42 \text{ s} \leq t_D \leq 2,22 \text{ s}$	1,40	$1,82 \text{ s} \leq t_D \leq 2,22 \text{ s}$
0,0061	3,11	$0,46 \text{ s} \leq t_D \leq 2,26 \text{ s}$	2,52	$1,86 \text{ s} \leq t_D \leq 2,26 \text{ s}$
0,0066	4,33	$0,50 \text{ s} \leq t_D \leq 2,90 \text{ s}$	3,65	$2,50 \text{ s} \leq t_D \leq 2,90 \text{ s}$
0,0073	5,62	$0,56 \text{ s} \leq t_D \leq 7,96 \text{ s}$	5,36	$7,16 \text{ s} \leq t_D \leq 7,96 \text{ s}$

Zur Abschätzung des zu erwartenden (kontinuierlichen) Austragsmassenstroms $\dot{M}_{S,kont.}$ aus Trichtern bzw. ganzflächigen Austragsystemen mit einer Vielzahl von Trichtern (vgl. Bild 2-3, S. 12), hat sich auch die Erweiterung der *Beverloo*-Gleichung (siehe Gl. 2.26) nach *Mellmann* und *Teodorov* in [61], [145] bewährt. Bei der Vorausberechnung des Austragsmassenstroms der neuartigen Austrageinrichtung wurde in Gleichung 2.26 die Öffnungsweite B durch die effektive Öffnungsweite s_{eff} des Verschleißmechanismus mit $s_{eff} = h_1 \cdot \sin \theta$ ersetzt (siehe Bild 6-5, S.64). Daraus ergibt sich Gleichung 2.26 zu:

$$\dot{M}_{S,kont.} = C \cdot \rho_S \cdot \sqrt{g} \cdot N \cdot (L - k \cdot \delta) (s_{eff} - k \cdot \delta)^{1,5} \cdot (\tan \theta)^{-0,35} \quad (8.3)$$

Im Folgenden wird die Gültigkeit von Gl. 8.3 am Beispiel des Versuchsmaterials getrockneter Weizen überprüft und den experimentellen Messdaten gegenübergestellt:

Die Schüttdichte von getrocknetem Weizen wurde zu $\rho_S = 746 \text{ kg/m}^3$ bestimmt (s. Kapitel 5.1.4). Wie in [145] wurde bei der Festlegung von Partikelform und -durchmesser das bekannte Phänomen berücksichtigt, wonach sich der Großteil der Getreidekörner beim Passieren der Auslauftrichter längs ausrichten. Unter dieser Annahme ist der Partikelquerschnitt der Weizenkörner am Austrag nahezu rund, damit wird $k = 1,6$. Die mittlere Korndicke δ von Weizen ergibt sich aus der gemessenen Partikelgrößenverteilung (Bild 5-3, S. 37) zu $\delta = 0,0027 \text{ m}$. Die empirische Konstante C berücksichtigt die Art und Form des Öffnungsquerschnittes und wurde iterativ mit $C = 2,24$ angenähert. Aufgrund der keilförmigen Gestalt der Verschleißmechanismen ergibt sich aus der Geometrie der neuartigen Austrageinrichtung eine Anzahl von $N = 12$ Öffnungsschlitze mit einer Länge von $L = 0,4 \text{ m}$. Der Trichterneigungswinkel beträgt einheitlich $\theta = 25^\circ$. Die hieraus resultierenden kontinuierlichen Austragsmassenströme sind in Tabelle 8-4 zusammengefasst.

Tabelle 8-4. Berechneter kontinuierlicher Austragsmassenstrom.

Effektive Öffnungsweite	Kontinuierlicher Austragsmassenstrom
s_{eff} [m]	$\dot{M}_{S,kont.}$ [kg/s]
0,0055	1,38
0,0061	2,41
0,0066	3,52
0,0073	5,31

Vergleicht man den berechneten (kontinuierlichen) Austragsmassenstrom mit dem experimentellen Daten aus Tabelle 8-3, so bestätigt sich das der Austragsmassenstrom eine gewisse Austragszeit benötigt, um sich als annähernd kontinuierlich einzuschwingen. Insbesondere die grafisch ermittelten Austragsmassenströme aus **Anlage 31** liegen sehr nah an den berechneten Werten in Tabelle Tabelle 8-4.

Gleichung 8.3 gilt prinzipiell unter der Annahme, dass alle Öffnungsquerschnitte gleichzeitig und schlagartig freigegeben werden und dass der Einfluss der Öffnungs- und Schließvorgänge vernachlässigbar gering ist (kurze Fahrzeiten t_F der Verschleißmechanismen mit $t_F \cong 0$). Für den Direktvergleich soll auch noch einmal der experimentelle Austragsmassenstrom $\dot{M}_{S,exp.}$ (als Quotient aus der gemessenen Austragsmasse $M_{S,D}$ und der Austragszeit t_D) über der Austragszeit grafisch dargestellt werden. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass im Experiment bereits schon während der Fahrzeit der Verschleißmechanismen bedeutende Mengen an Schüttgut ausgetragen werden. Daher muss bei der Bestimmung des experimentellen Austragsmassenstroms

$$\dot{M}_{S,exp.} = \frac{M_{S,D} [\text{kg}] - M_{S,F} [\text{kg}]}{t_D [\text{s}]} \quad (8.4)$$

die Schüttgutmenge $M_{S,F}$, die beim Öffnungs- und Schließvorgang ($2x$ Hubweg h_1) die Öffnungsschlitze bereits durchquert, von der gesamten Austragsmasse $M_{S,D}$ abgezogen werden.

Wie die Diagramme im Bild 8-7 verdeutlichen steigt der gemessene Austragsmassenstrom $\dot{M}_{S,exp.}$ in Abhängigkeit der Austragszeit und nähert sich asymptotisch dem nach Gleichung 8.3 berechneten, kontinuierlichen Austragsmassenstrom an. Für $s_{eff} = 0,0055$ m (Versuch 1) wird der kontinuierliche Auslaufmassenstrom nach etwa $t_D = 1,8$ s erreicht und stimmt sehr gut mit dem berechneten Wert von $\dot{M}_{S,kont.} = 1,38$ kg/s überein. Bei weiterer Erhöhung der Austragszeit blieb der Auslaufmassenstrom wie erwartet konstant.

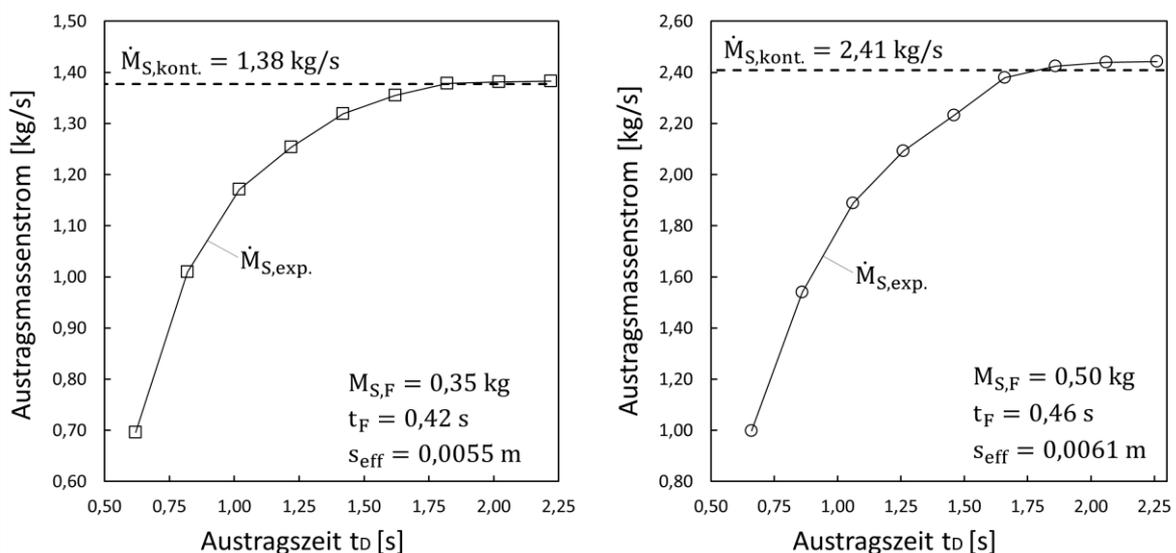


Bild 8-7: Schüttgutmassenstrom für Weizen bei kontinuierlicher Entleerung als Funktion der Öffnungsdauer bei einem Hubweg $h_1=0,0131$ m (links) bzw. $h_1=0,0144$ m (rechts).

Ein ähnliches Ergebnis stellte sich für eine effektive Öffnungsweite von $s_{\text{eff}} = 0,0061 \text{ m}$ (Versuch 2) mit $\dot{M}_{S,\text{exp.}} = 2,44 \text{ kg/s}$ ein, wobei der experimentell bestimmte Wert um $\sim 1\%$ von dem berechneten Wert abwich (vgl. Tabelle 8-4). Diese Differenz kann jedoch im Hinblick auf die Fertigungsabweichungen der Verschleißmechanismen toleriert werden.

Für die Mittelstellung der Verschleißmechanismen (Hubweg: $h_1 = h_2 = 0,0156 \text{ m}$, $s_{\text{eff}} = 0,0066 \text{ m}$) bestätigte der gemessene Austragsmassenstrom von $\dot{M}_{S,\text{exp.}} = 3,53 \text{ kg/s}$ erneut die Gültigkeit von Gl. 7.3 (siehe Bild 8-8 links). Von Interesse war außerdem die Messung des Auslaufmassenstroms bei noch größerem Hubweg $h_1 > 0,0156 \text{ m}$. Bei weiterer Absenkung der Verschleißmechanismen besteht die Herausforderung, dass sich der Hubweg h_2 auf einen kritischen Abstand verkleinert. Bei diesem Abstand könnte sich ggf. Schüttgut zwischen der oberen und unteren Leitblechreihe zurückstauen (vgl. Bild 6-5, S.64). Dieser Fall tritt dann ein, wenn weniger Material die untere Leitblechreihe durchquert, als von oben durch den größeren Öffnungsquerschnitt nachfließt. Im Versuch 4 wurde der Hubweg auf $h_1 = 0,0173 \text{ m}$ erhöht. Dadurch verringerte sich der Abstand zwischen unterer Leitblechreihe und Verschleißmechanismus auf knapp 6 mm. Das Ergebnis veranschaulicht Bild 8-8 (rechts).

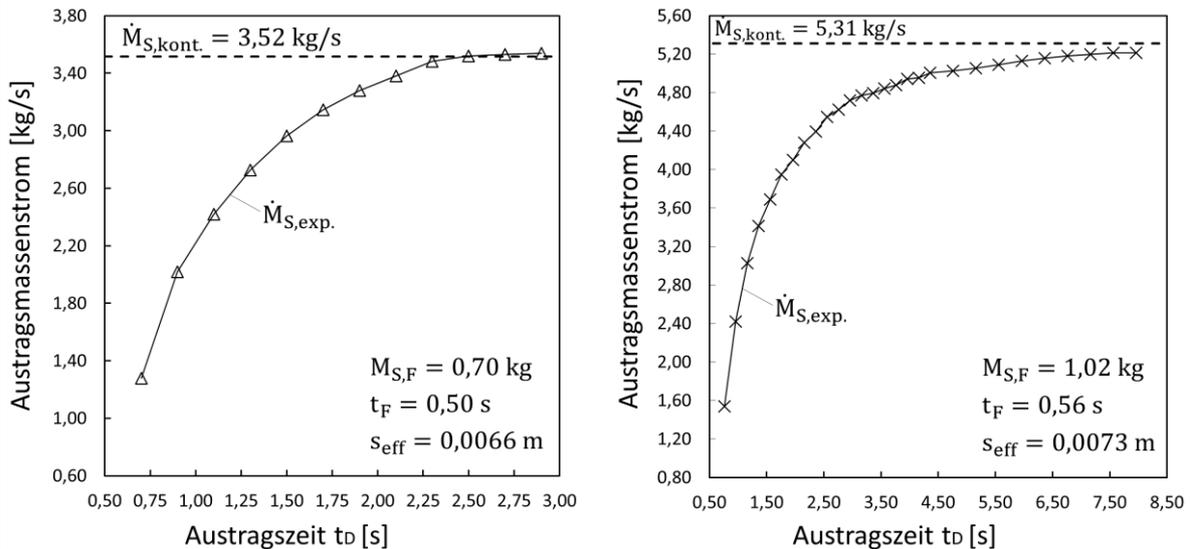


Bild 8-8: Schüttgutmassenstrom für Weizen bei kontinuierlicher Entleerung als Funktion der Öffnungsdauer bei einem Hubweg $h_1=0,0156 \text{ m}$ (links) bzw. $h_1=0,0173 \text{ m}$ (rechts).

Wie die Grafik zeigt, bestätigt sich die Annahme, dass der Austragsmassenstrom bei dieser Versuchseinstellung aufgrund von Materialrückstau reduziert wird. Der berechnete Massenstrom $\dot{M}_{S,\text{kont.}} = 5,31 \text{ kg/s}$ konnte auch nach längerer Öffnungsdauer von 8 Sekunden nicht erreicht werden. Experimentell stellte sich dagegen ein nahezu konstanter Massenstrom von $\dot{M}_{S,\text{exp.}} = 5,21 \text{ kg/s}$ ein. Dies bedeutet, dass Gleichung 8.3 nur für kleine und mittlere Hubwege h_1 anwendbar ist. Tabelle 8-5 fasst noch einmal die gemessenen und berechneten Auslaufmassenströme zusammen. Eine Alternative zur Vermeidung des Materialrückstaus wäre z. B. der Verzicht auf die untere Leitblechreihe. In diesem Fall wäre Gleichung 8.3 weiterhin anwendbar. Bei weiterer Erhöhung des Hubweges h_1 wäre dann zu erwarten, dass mit $s_{\text{eff}} \rightarrow \infty$ der Abstand **B** zwischen den oberen Leitblechen als Öffnungsweite an Bedeutung gewinnt. Damit würde sich die Anzahl der Auslaufschlitze auf $N = 6$ halbieren, und

in Gleichung (7.3) wäre der Vorfaktor $C = 1,03$ zur Berechnung des theoretischen Auslaufmassenstroms einzusetzen.

Tabelle 8-5. Versuche zum Auslaufmassenstrom.

Versuch	Fahrzeit	Korrektur, Gl. (8.4)	Austrags- zeit	Gemessener Auslaufmassenstrom zur Austragszeit t_D	Berechneter Auslaufmassenstrom
	t_F [s]	$M_{S,F}$ [kg]	t_D [s]	$\dot{M}_{S,exp.}$ [kg/s]	$\dot{M}_{S,kont.}$ [kg/s]
1	0,42	0,35	1,8	1,38	1,38
2	0,46	0,50	2,0	2,44	2,41
3	0,50	0,70	2,5	3,53	3,52
4	0,56	1,02	7,5	5,21	5,31

8.3 Beeinflussung der Verweilzeitverteilung

8.3.1 Intermittierende Betriebsweise (konventioneller Betrieb)

Die neuartige Austrageinrichtung wurde zunächst, mit dem vorab untersuchten Versuchsmaterial (getrockneter Weizen), in ihrem *Ausgangszustand* untersucht. Bei dieser Einstellung bewegen sich die Verschleißmechanismen alle synchron zueinander. Oberhalb der Austrageinrichtung wurde (gemäß des unter 5.2 beschriebenen Aufbaus) eine Rechtecksektion aus verzinktem Stahlblech platziert. Die 5 Antriebe (der insgesamt sechs Verschleißmechanismen) erhielten folgende Fahrparameter zugewiesen:

- Hubweg: $h_1 = 0,00156$ m (Mittelstellung)
- Haltezeit: $t_H = 0$
- Austragszeit: $t_D = t_F = 0,5$ s
- Drehzahl: $n = 10725$ Hz

Aus der in Bild 6-7a (S.67) dargestellten Kalibriergeraden ergibt sich (mit der angegebenen Austragszeit t_D) eine Austragsmasse von $M_{S,D} = 0,7$ kg.

Entsprechend der in Kap. 5.4 beschriebenen Untersuchungsmethode wurde rot eingefärbtes Tracermaterial (0,56 kg) oberhalb des ungefärbten Versuchsmaterials ($M_{S,D} = 25$ kg Weizen) in einer Höhe von $L = 0,15$ m eingebracht. Die hydrodynamische Verweilzeit τ (siehe Gleichung 2.31) kann aufgrund der intermittierenden Art der Abspeisung als zeitunabhängig betrachtet werden. Als Massenstrom \dot{M} wird dabei näherungsweise die Austragsmenge $M_{S,D}$ auf die Anzahl ausgeführter Austragungen bezogen ($\dot{M} = 0,7$ kg/ Austragung).

$$\tau = \frac{M_{S,D}}{\dot{M}} = \frac{25 \text{ kg}}{0,7 \text{ kg/Austragung}} \approx 36 \text{ Austragungen}$$

Der Vorstellung eines idealen Strömungsrohrs entsprechend, verlässt mit der 36. Abspeisung sämtliches Tracermaterial die Austrageinrichtung. Im Experiment fanden sich zu diesem Zeitpunkt hingegen nur (örtlich) einige wenige Tracerpartikel innerhalb der Probenschublade. Vereinzelt Tracerpartikel wurden bereits schon zur 35. Abspeisung wiedergefunden. Mit jedem weiteren Entleerungsvorgang wurde das Tracermaterial (entsprechend der in Kapitel 5.4. beschriebenen Methode) auf die Anzahl roter Farbpixel hin abgetastet. Aus der Anzahl

berechneter Pixel und der Anzahl seit Versuchsbeginn durchgeführter Austräge $N_D(t)$ ergab sich die Verweilzeitdichteverteilung in Bild 8-9 (links). Da im *Ausgangszustand* alle Verschleißmechanismen in etwa die gleiche Austragszeit t_D besitzen, lässt sich die Verteilung auch über der verstrichenen Prozesszeit t_p auftragen. Diese kann in diesem Fall als Prozessgröße auf das gesamte System bezogen werden. Aus den dargestellten Verteilungen konnte die mittlere Verweilzeit bezogen auf die Prozesszeit zu $\bar{t}_p = 20,9$ s bestimmt werden. Bezogen auf die Anzahl der Austragungen ergibt sich eine mittlere Verweilzeit von $\bar{t} \approx 42$.

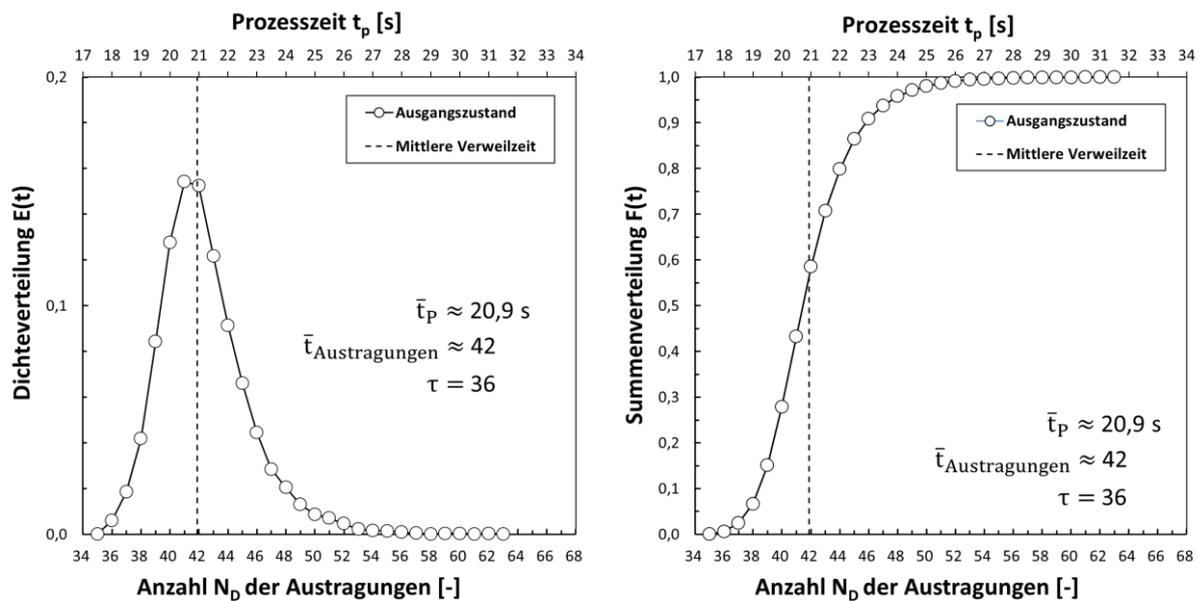


Bild 8-9: Verweilzeitdichteverteilung $E(t)$ (links) und Summenverteilung $F(t)$ (rechts) bei gleichmäßiger Freigabe aller Verschleißmechanismen

Es sollte anschließend überprüft werden, ob sich die gemessene Kurve auch mit Hilfe des Dispersionsmodells (Kapitel 4.1) beschreiben lässt. Die numerischen Voruntersuchungen in Kapitel 7.2 zeigten bereits ein vielversprechendes Ergebnis. Zunächst wurde die gemessene Dichte- und Summenverteilung aus Bild 8-9 in eine normierte Darstellung überführt und die Modellkurve mit Hilfe der Bodensteinzahl angenähert (Bild 8-11). Bei einer Bodensteinzahl $B_0 = 540$ konnte eine relativ gute Übereinstimmung zwischen der berechneten und der gemessenen Verweilzeitverteilung erreicht werden. Hinter dem Zeitpunkt $\theta = 1,1$ verläuft die Modellkurve deutlich schmäler als die Messpunkte. Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass im Experiment über einen längeren Zeitraum noch rote Tracepartikel in den Ecken der Probenschublade wiedergefunden wurden. Die Menge dieser „nacheilenden“ Tracer sorgt gegenüber dem gleichmäßigen Kurvenverlauf des Dispersionsmodells für Abweichungen. Exemplarisch ist im Rahmen eines qualitativen Vorversuchs (siehe **Anlage 16**) dargestellt, wie sich vor allem in den Ecken eines Rechteckbehälters die Schüttgutbewegung verlangsamen kann. Das von einem idealen Strömungsrohr ausgehende Dispersionsmodell berücksichtigt derartige Einflüsse hingegen nicht.

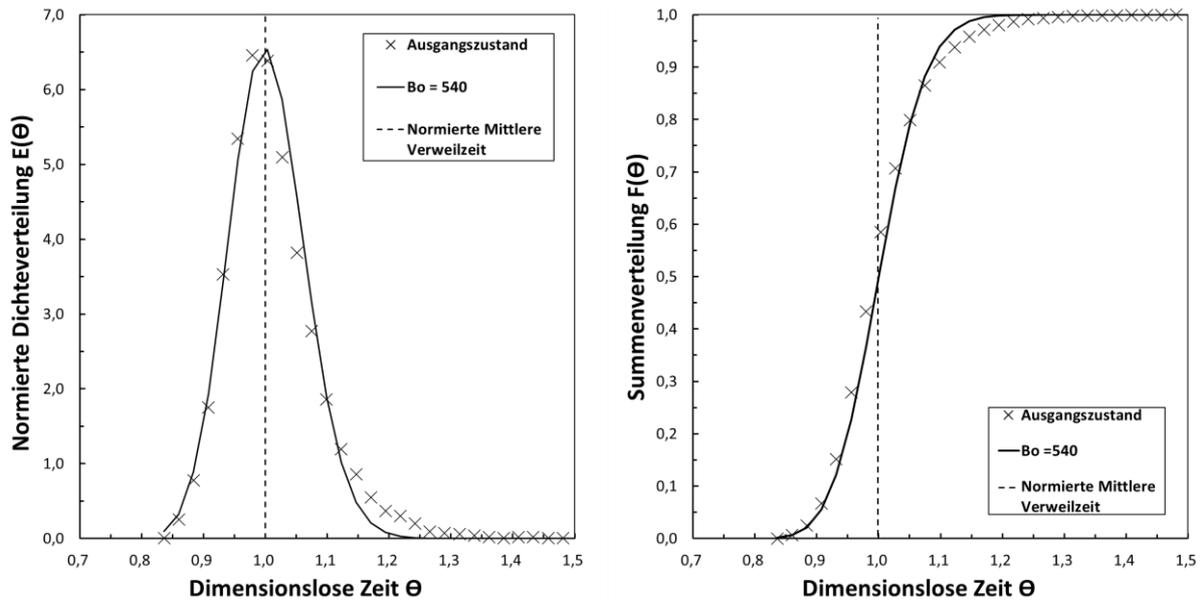


Bild 8-10: Normierte Darstellung der Dichte- und Summenverteilung und berechnete Verweilzeitkurve mit dem Dispersionsmodell

Während des Experiments wurden vom ausgetragenen Material darüber hinaus noch Fotos aufgenommen, um den Versuch im Anschluss qualitativ auswerten zu können. Bei Betrachtung der farblichen Verteilung der Tracerpartikel innerhalb der Probenschublade (Bild 8-11) wurde festgestellt, dass an einigen Stellen mehr Tracer zu sehen waren. Zu einem späteren Zeitpunkt fehlten diese Partikel gegenüber anderen Gebieten in der Probenschublade. Hieraus folgte die Erkenntnis, dass es im Bezug auf den örtlich einzustellenden Austragsmassenstrom und der damit zusammenhängenden Schüttgutbewegung (oberhalb der Austrageinrichtung) noch großes Potential zur Optimierung gibt.

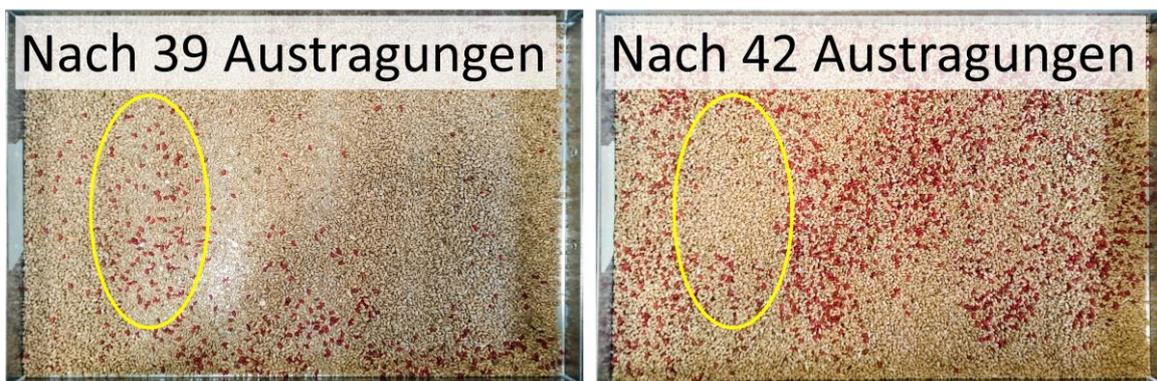


Bild 8-11: Exemplarische Aufnahmen der Probenschublade zu verschiedenen Zeitpunkten: Weizen mit farbigen Tracerpartikeln

8.3.2 Reproduzierbarkeit der Verweilzeitverteilung

In Kapitel 5.4 wurde die Messgenauigkeit der experimentellen Verweilzeitanalyse bereits einmal anhand von Voruntersuchungen diskutiert. Aufgrund des hohen experimentellen Aufwands, das Tracermaterial vom ungefärbten Versuchsmaterial zu trennen und auf dem Scanner zu verteilen, wurde jeder Versuch einschließlich Verweilzeitanalyse nur einmalig

durchgeführt. Im Rahmen der (im vorliegenden Kapitel 7) durchgeführten Experimente stellt sich jedoch die Frage nach der Reproduzierbarkeit bzw. der statistischen Zuverlässigkeit der erzeugten Messergebnisse. Die Erweiterung des hierfür fehlenden Erkenntnisstands sollte durch Wiederholung der Messung im Ausgangszustand erfolgen. Hierzu wurde der Versuch aus 8.3.1 noch 2x unter gleichen Bedingungen durchgeführt und die Verweilzeitverteilungen in einem gemeinsamen Diagramm (Bild 8-12) dargestellt. Wie sich zeigt, liegen die gemessenen Kurven sehr dicht beieinander und weichen nur an einigen Stellen geringfügig voneinander ab. Für die im Weiteren durchgeführten Untersuchungen kann damit mit ausreichender Sicherheit angenommen werden das, auch nach einmaliger Messung einer Verweilzeitverteilung, von einer hohen Zuverlässigkeit der Methodik ausgegangen werden kann.

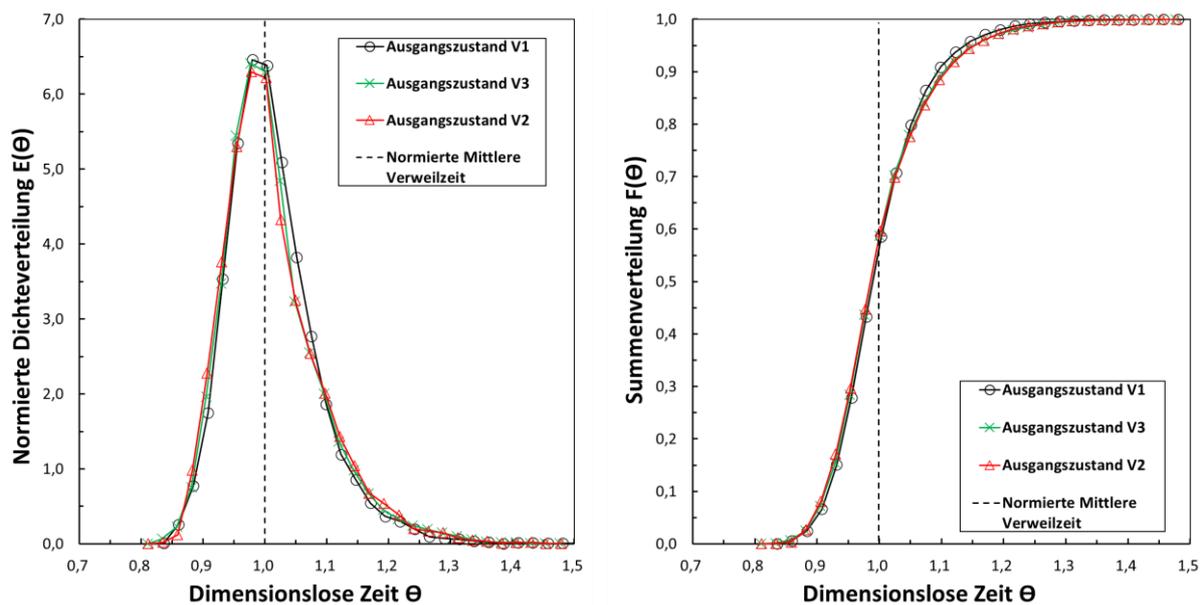


Bild 8-12: Vergleich der Verweilzeitverteilungen bei Wiederholung der Messung im Ausgangszustand der neuartigen Austrageinrichtung

8.3.3 Intermittierende Betriebsweise (asymmetrische Ansteuerung)

Im **Ausgangszustand** (gleichmäßige Freigabe aller Verschleißmechanismen) der neuartigen Austrageinrichtung wurden 28 Abspeisungen benötigt, um sämtliches Tracermaterial wiederzufinden. Nach Gleichung 6.24 (Seite 69) ergibt sich die bis dahin verstrichene Prozesszeit t_p (bei Vernachlässigung der Ruhezeit für die Versuchsauswertung) aus der eingestellten Austragszeit ($t_D = t_F = 0,5s$) zu $t_p = 14 s$. Im Folgenden sollte durch die Belegung einzelner Verschleißmechanismen mit unterschiedlichen Haltezeiten dagegen untersucht werden, in wieweit sich die Verweilzeitverteilung beeinflussen lässt und die Anzahl der notwendigen Austragungen verkürzt werden kann. Für die gleiche Anzahl an Abspeisungen ergibt sich am Beispiel von **Einstellung 1** (Tabelle 8-6) aus der längsten Haltezeit ($t_H = 50 ms$) über Gleichung 6.31 (Seite 71) die Prozesszeit zu $t_p = 15,4 s$. Dies setzt jedoch auch hier voraus, dass die Ruhezeit zwischen den Abspeisungen (im Experiment) vernachlässigt werden kann. Während des Versuchsablaufs wurde die örtliche Verteilung roter Tracer in der Probenschublade auch qualitativ ausgewertet, um hieraus günstigere Einstellungen der Verschleißmechanismen für nachfolgende Versuche abzuleiten. Die Art der Durchführung ist jedoch mit erheblichem experimentellem Aufwand verbunden. Sie stellt eine große Herausforderung an die subjektive Einschätzung und ist so nur im Labormaßstab umsetzbar.

Für Versuchszwecke wurden zunächst die folgenden Grundeinstellungen vorgenommen:

- Hubweg: $h_1 = 0,0156 m$ (Mittelstellung zwischen den Leitblechreihen)
- Austragszeit: $t_D = f(t_H) + t_F$
- Fahrzeit: $t_F = 0,5 s$
- Drehzahl: $n = 10725 Hz$

Wie im Kapitel 6.4 diskutiert, ergibt sich der Gesamtmassenstrom einer diskontinuierlich ausgeführten Abspeisung aus der Summe aller (individuell an den Verschleißmechanismen eingestellten) Teilmassenströme. Diese konnten (durch Anpassung der Haltezeit t_H) örtlich geringfügig erhöht bzw. verringert werden. Über die Anzahl der Austragungen summierte sich dieser Effekt jedoch auf, wodurch die mittlere (örtliche) Strömungsgeschwindigkeit des Schüttguts und die Prozessverweilzeitverteilung der Charakteristik einer idealen Pfropfenströmung angenähert wurde. Der Versuchsablauf erfolgte analog zu Kap. 8.3.1 wobei nachfolgende Tabelle eine Auswahl an Einstellungen zeigt, deren Verweilzeitverteilungen in **Anlage 22** zusammengefasst sind.

Tabelle 8-6: Einstellung der Haltezeiten einzelner Verschleißmechanismen

Verschleißmechanismus	A	B	C	D	E	F
Ausgangszustand t_H [ms]	0	0	0	0	0	0
Einstellung 1 t_H [ms]	0	0	0	0	50	0
Einstellung 2 t_H [ms]	0	0	0	0	20	0
Einstellung 3 t_H [ms]	20	0	0	0	20	0
Einstellung 4 t_H [ms]	10	0	0	0	20	0
Einstellung 5 t_H [ms]	10	10	0	0	20	0
Einstellung 6 t_H [ms]	10	15	0	0	18	0
Einstellung 7 t_H [ms]	10	5	0	0	15	0
Einstellung 8 t_H [ms]	10	5	0	0	10	0

Von allen Einstellungen hat sich *Einstellung 4* als die Günstigste herausgestellt. Bild 8-13 (links) zeigt die Messpunkte als normierte Dichteverteilung (grün) mit dazugehöriger Modellkurve. Für Vergleichszwecke ist darüber hinaus auch die Verweilzeitverteilung des *Ausgangszustands* (schwarz) dargestellt. Durch die selektive Erhöhung des Austragsmassenstroms an den Verschleißmechanismen **A** und **D** wurde die Produktverweilzeit örtlich verkürzt. In *Einstellung 4* sind zum Zeitpunkt $\theta = 0,98$ dadurch deutlich mehr Tracer zeitgleich ausgetragen worden. Aus dieser Konsequenz verschiebt sich das Kurvenmaximum von $E(\theta) = 6,5$ nach $E(\theta) = 7,8$. Weiterhin sorgt die Verkürzung der örtlichen Verweildauer für ein Offset der Messpunkte nach links. Der Verlauf der modellierten Kurve mit $Bo = 770$ deckt dadurch nur ansatzweise den exakten Verlauf der Messpunkte ab. Grundsätzlich kann jedoch von einer Übereinstimmung beider Kurven ausgegangen werden. Im Gegensatz zur Dichteverteilung liegen die Messpunkte der beiden Einstellungen in der Summenverteilung (Bild 8-13, rechts) sehr dicht beieinander.

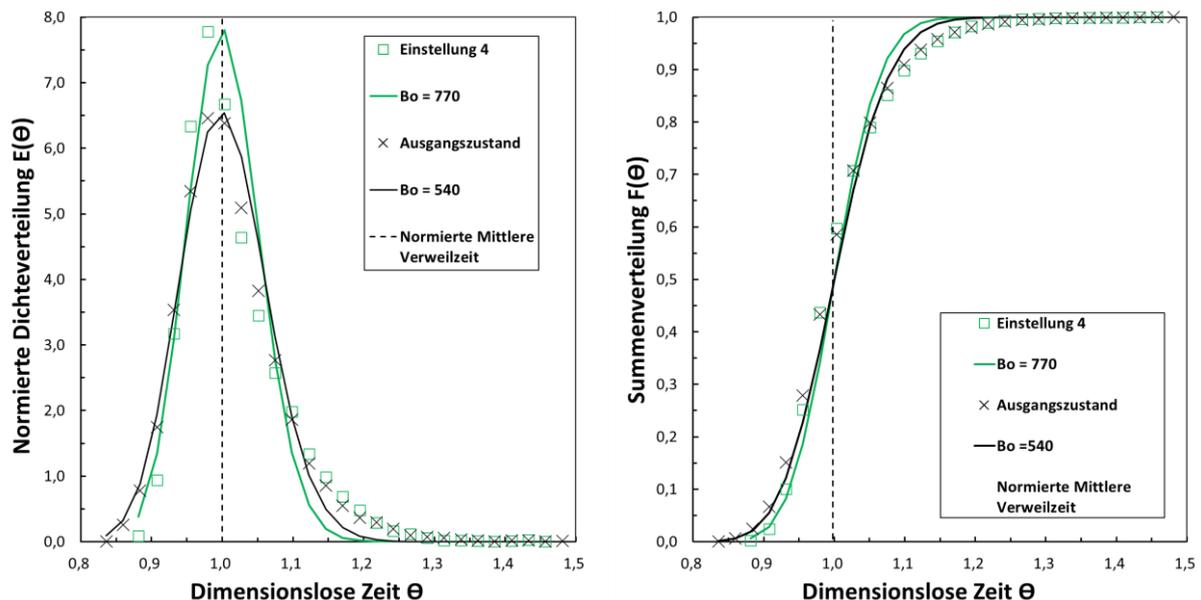


Bild 8-13: Gemessene und berechnete normierte Dichte- und Summenverteilungen bei Variation der Haltezeiten für Einstellung 4 und den Ausgangszustand

Eine Vergleichbarkeit ist hier nur durch die Einführung der dazugehörigen Modellkurven möglich. Diese deuten an, dass sich der Kurvenverlauf in Richtung der normierten mittleren Verweilzeit (ähnlich einer idealen Trennfunktion) verschiebt. Im Vergleich zum *Ausgangszustand* (28 Austragungen) wurden die letzten Tracer bereits zur 24. Abspeisung innerhalb der Probenschublade wiedergefunden. Ein völlig anderes Ergebnis zeigte hingegen *Einstellung 1* (Bild 8-14, blaue Kurve). Durch die dauerhafte Festsetzung einer Haltezeit $t_H = 50$ ms an Verschleißmechanismus **D** ergibt sich nach 10 Austragungen für $t_H = t_F = 0,5$ s. Gegenüber allen anderen Verschleißmechanismen werden dabei ca. 0,7 kg des Versuchsmaterials mehr ausgetragen. Dies hatte zur Folge, dass deutlich mehr Tracer viel früher in der Probenschublade vorzufinden waren und sich das Kurvenmaximum auf $E(\theta) = 5,25$ absenkte. Durch Anpassung der Bodensteinzahl auf $Bo = 350$ konnte die Modellkurve ziemlich genau durch die Messpunkte von *Einstellung 1* gelegt werden. In der

Summenverteilung hat dies zur Folge, dass sich die Kurve deutlich weiter von der normierten mittleren Verweilzeit wegbewegt. Im Direktvergleich zeigt sich, dass das System (Austrageinrichtung + Schüttgut) sehr sensibel auf geringe Anpassungen der örtlichen Haltezeiten reagiert. Im Direktvergleich der modellierten *Einstellung 1* und *4* scheint das einparametrische axiale Dispersionsmodell den qualitativen Kurvenverlauf der normierten Dichteverteilung hinreichend gut abzubilden. Der horizontale Offset in der Dichteverteilung sowie das Auseinanderlaufen der Messpunkte und Kurven hinter der normierten mittleren Verweilzeit zeigen jedoch auch die Grenzen der Modellierbarkeit auf.

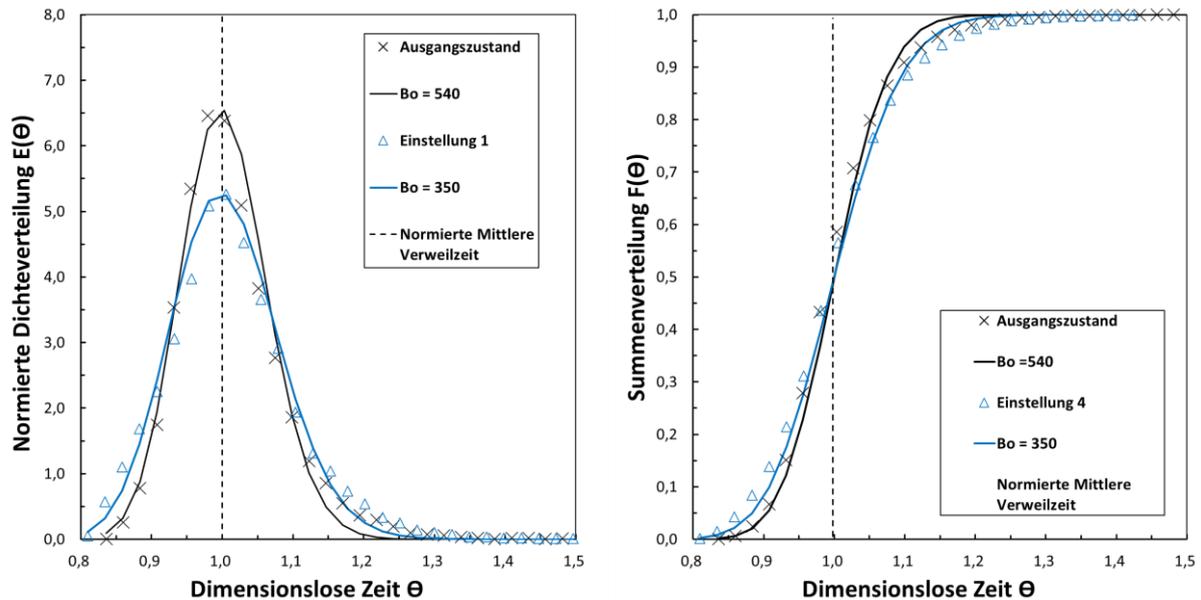


Bild 8-14: Gemessene und berechnete normierte Dichte- und Summenverteilungen bei Variation der Haltezeiten für Einstellung 1 und den Ausgangszustand

Erhöhung der Fahrzeit

Die Fahrzeit der Verschleißmechanismen wurde anschließend bei gleichem o. a. Grundeinstellungen für den *Ausgangszustand* ($t_H = 0$) auf $t_F = 1,0$ s festgelegt, um zu überprüfen, in wieweit ein langsamerer Öffnungsvorgang, die Entleerungsweise ggf. beeinflusst. Hierfür wurde die Drehzahl der Schrittmotoren mit Hilfe der in Bild 6-7b dargestellten Kalibrierkurve auf $n = 5252$ Hz eingestellt. Über die Motorparametriersoftware *MEXE02* und deren Messcursor wurde der zeitliche Verlauf des Öffnungs- und Schließvorgangs (Bild 8-15, blaue Kurve) mit $\Delta T = t_D = 1,0$ s verifiziert. Die Austragsmenge lag bei dieser Austragszeit bei $M_{S,D} \approx 1,1$ kg. Durch die rund 60% höhere Austragsmenge war zu erwarten, dass sich die mittlere Verweilzeit (bezogen auf die Anzahl durchgeführter Entleerungsvorgänge) in einem ähnlichen Verhältnis verschiebt, da mit jedem Entleerungsvorgang auch mehr Schüttgut ausgetragen wird. Gleichzeitig wurde erwartet, dass die Verweilzeitverteilung deutlich schmäler ausfällt, da mit jedem Entleerungsvorgang auch die Wahrscheinlichkeit steigt, dass mehr Tracer die Austrageinrichtung verlassen.

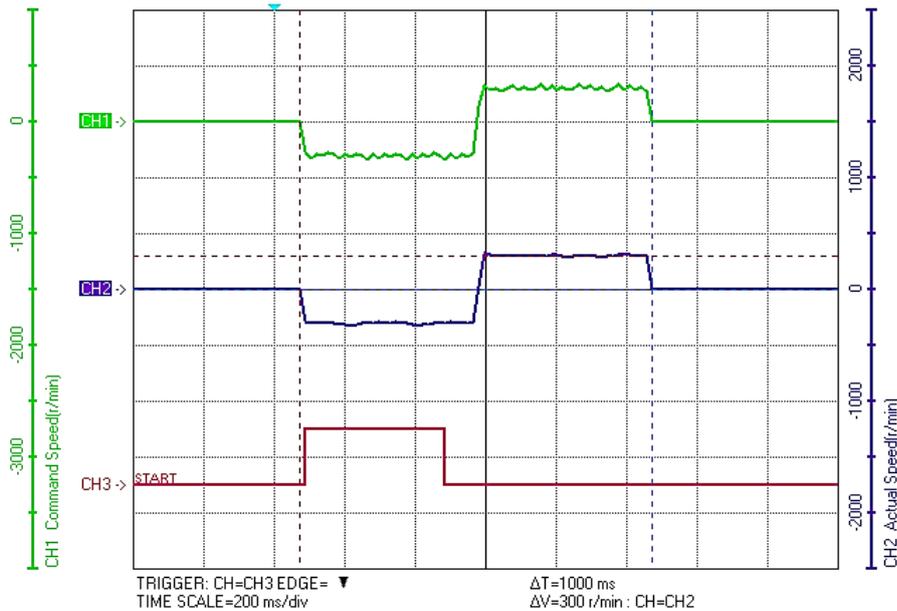


Bild 8-15: Signalverlaufdiagramm der Parametriersoftware *MEXE02* für einen Schrittmotor

Trägt man die Verweilzeitverteilung aus 8.3.1 mit der Dichteverteilung für $t_D = 1,0$ s in einem gemeinsamen Diagramm (Bild 8-16) über der Anzahl der Öffnungszyklen auf, so bestätigt sich die Annahme das sich die mittlere Verweilzeit bei Erhöhung des Auslaufmassenstroms deutlich nach links verschoben hat. Aus der doppelten Austragszeit t_D hat sich die mittlere Verweilzeit nahezu halbiert. Darüber hinaus fällt die Breite der Verteilung deutlich schmaler aus, da mehr Tracermaterial mit jeder Abspeisung ausgetragen wird.

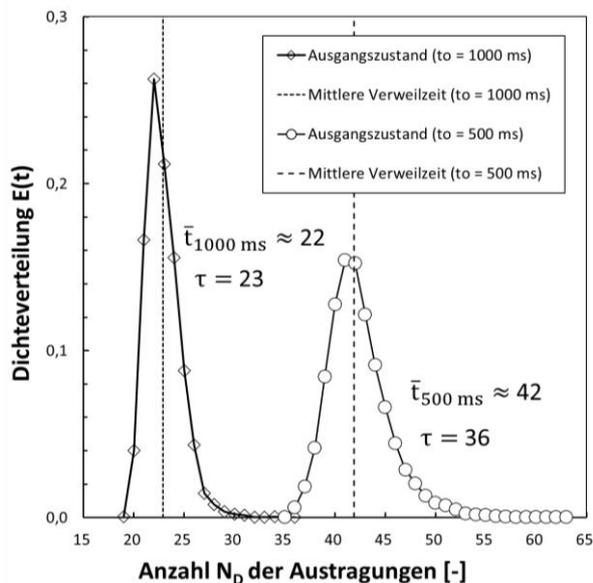


Bild 8-16: Vergleich der Dichteverteilungen $E(t)$ bei unterschiedlichen Austragszeiten

Die direkte Vergleichbarkeit lässt sich nur mittels dimensionsloser Darstellung herstellen. Wie Bild 8-17 zeigt, unterscheiden sich die Summenverteilungen der beiden Verweilzeitmessungen nur marginal voneinander. Die Kurve des (bei einer Austragszeit von $t_D = 0,5$ s gemessenen) Ausgangszustands liegt minimal dichter an der normierten mittleren Verweilzeit.

In der Konsequenz wäre praktisch auf eine deutlich gleichmäßigere Schüttgutbewegung zu schließen. Die Dichteverteilungen zeigen dagegen deutlichere Tendenzen. Hier liegt der Peak der beiden Kurven etwas weiter auseinander und auch die abfallende Flanke beider Kurven strebt unterschiedlich steil gegen Null. Aus dem Ergebnis lässt sich ableiten, dass die längere Austragszeit bzw. die höhere Austragsmenge pro Abspeisung die Gleichmäßigkeit der Schüttgutbewegung kaum beeinflusst. Tendenziell scheinen geringere Abspeisemengen (in Folge geringerer Fahrzeiten) jedoch in einer schmaleren Verteilung zu resultieren.

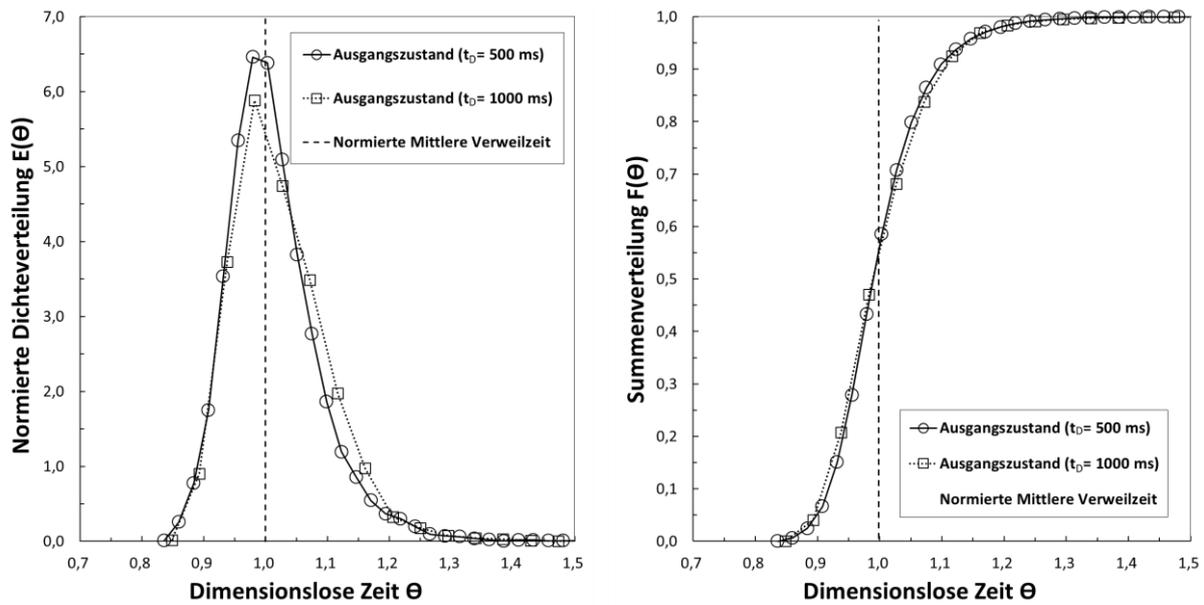


Bild 8-17: Verweilzeitverteilungen bei unterschiedlichen Austragszeiten und gleicher Strömungsweglänge ($L = 0,15 \text{ m}$)

8.3.4 Einfluss der Strömungsweglänge und der Austragszeit

Zuvor wurde bereits festgestellt, dass die örtliche Variation der Entleerungsmengen mit Hilfe der neuartigen Austrageinrichtung zu schmaleren oder auch breiteren Verweilzeitverteilungen führen kann. Die örtliche Variation des Austragsmassenstroms einzelner Verschleißmechanismen nimmt demnach erst einmal grundsätzlich Einfluss auf die Schüttgutbewegung oberhalb der Austrageinrichtung. Der Strömungsweg der Tracer war mit $L = 0,15 \text{ m}$ jedoch relativ kurz. Es wurde vermutet, dass sich das Tracermaterial – bei einem längeren Strömungsweg im Behälter – auch stärker mit ungefärbten Versuchsmaterial vermischt. Dies könnte für die Ansteuerung der Austrageinrichtung eine deutlich größere Herausforderung darstellen. Um dieser Annahme auf den Grund zu gehen, wurde der Versuchsaufbau um 2 Sektionen erweitert, mit $M_S = 145 \text{ kg}$ getrockneten Weizen befüllt und von oben wieder eine glatte Schicht roter Tracer eingebracht. Hieraus resultierte eine Strömungsweglänge von $L = 0,85 \text{ m}$. Für konstante Druckverhältnisse im Behälter erfolgte auch in diesem Versuch eine stetige Wiederbefüllung mit ungefärbten Versuchsmaterial. Weiterhin wurde die Austragszeit, wie im vorhergehenden Kapitel 8.3.3, auf $t_D = t_F = 1,0 \text{ s}$ festgelegt, da dies die Versuchsdauer begrenzt und (wie vorab gezeigt) nur geringen Einfluss auf die Schüttgutbewegung nimmt. Zu erwarten war, dass nach etwa $\tau = 132$ Austragungen die ersten Tracer innerhalb der Probenschublade aufzufinden sind. Entgegen dieser Abschätzung fanden sich die ersten

Tracer im Experiment bereits zur 118. Austragung innerhalb der Probenschublade. Im Allgemeinen zeigte sich, dass das System *Austrageeinrichtung im Ausgangszustand + Rechteckbehälter* (mit $L = 0,85$ m) durch eine – als sehr schmal zu charakterisierende – Verweilzeitverteilung (Bild 8-18) beschrieben werden kann.

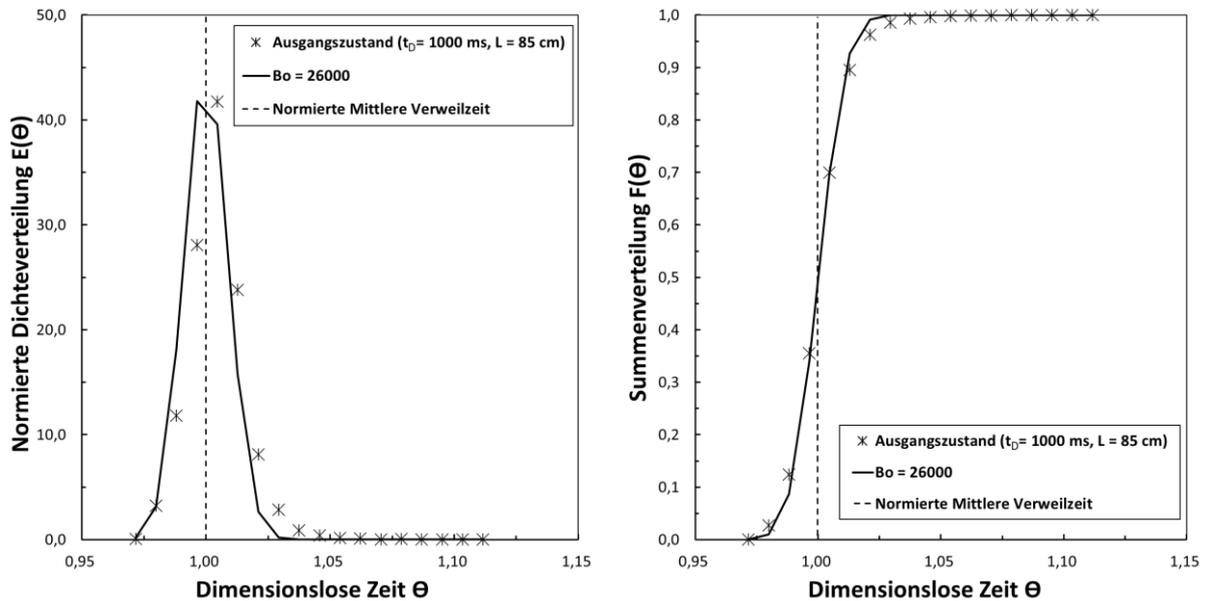


Bild 8-18: Gemessene und berechnete normierte Dichte- und Summenverteilungen bei einer Strömungsweglängen $L = 0,85$ m

Die normierte Verweilzeitdichteverteilung erreicht ihr Maximum bei $E(\theta) \approx 42$ und ließ sich nur durch eine sehr hohe Bodensteinzahl von $Bo = 26.000$ annähern. Dies suggeriert (zusammen mit dem steilen Verlauf der Summenverteilung), dass sich die Tracer bei längerem Strömungsweg ohne signifikant höhere Quervermischung nahezu pfropfenstromartig durch den Behälter bewegt haben müssen. Aus dem Ergebnis kann für den trotz alledem vorliegenden zeitlichen Verzug von Tracern am Prozessausgang nicht direkt abgeleitet werden, ob der Effekt einer geringen Quervermischung bereits im Behälter selbst, oder erst knapp oberhalb der Austrageinrichtung eingetreten ist.

Im Bild 8-19 sind die Dichteverteilungen für die Strömungsweglänge von $L = 0,15$ m und $L = 0,85$ m bei identischer Austragszeit ($t_D = t_F = 1,0$ s) noch einmal über der Anzahl der Austragungen dargestellt. Bei beiden Versuchen sind zwischen dem ersten und letzten Auffinden der Tracer am Prozessausgang 18 Austragungen verstrichen. Die Breite der Verweilzeitverteilung ist damit gleich. Die Peaks und die Kurventaille beider Verweilzeitverteilungen weisen jedoch Unterschiede auf. Vergleicht man die Varianz miteinander, so liegt diese für beide Versuche unweit auseinander. Für die Strömungsweglänge $L = 0,15$ m wurde diese zu $\sigma^2 = 3,1$ Austragungen bestimmt und für $L = 0,85$ m dagegen zu $\sigma^2 = 2,0$ Austragungen. Hieraus leitet sich ab, dass bei längerem Strömungsweg (vermutlich durch die höhere Auflast) von einer gleichmäßigeren Schüttgutbewegung auszugehen ist. Gleichzeitig ist von diesem Ergebnis abzuleiten, dass sich im glattwandigen Rechteckbehälter (trotz eines längeren Strömungsweg) keine signifikant größere Quervermischung eingestellt hat.

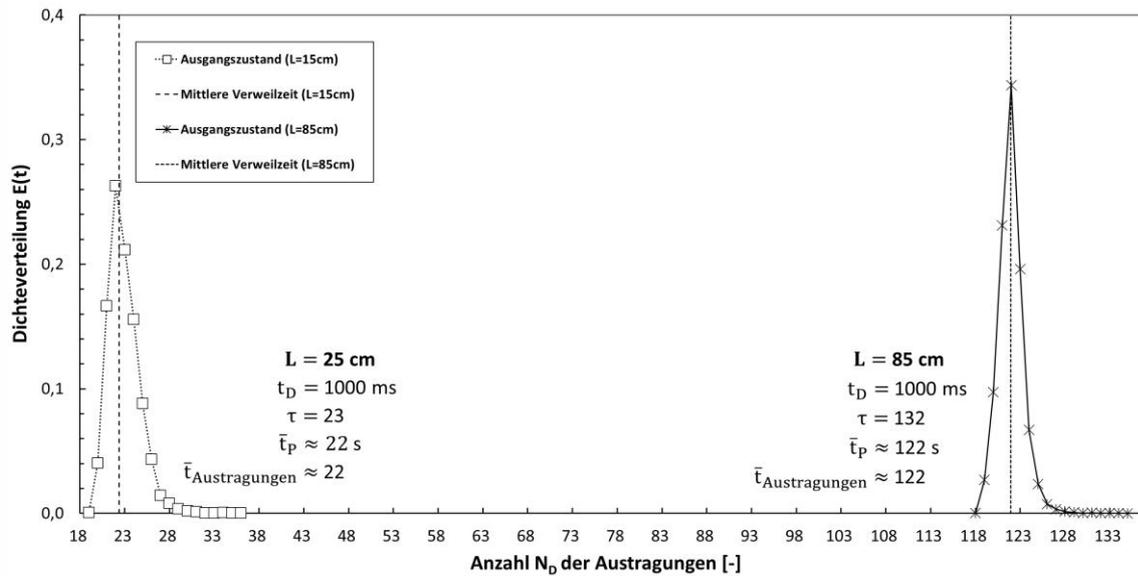


Bild 8-19: Verweilzeitverteilungen bei unterschiedlichen Strömungsweglängen

Die in Kapitel 1.1 der vorliegenden Arbeit zusammengefassten Probleme der Schüttgutaustragung konnten mit diesem Versuch bisher nur unzureichend nachempfunden werden. Das Ausbleiben eines stärker ausgeprägten Fließprofils bei längerem Strömungsweg deckt sich mit der in Kapitel 7.2 angesprochenen Begründung, warum der numerischen Simulation ein Fließprofil in Form der „Startstruktur“ vorgegeben wurde. Es lässt sich zusammenfassend ableiten, dass:

1. das Design der Austrageinrichtung mitsamt dem Rechteckbehälter auf das eingesetzte Versuchsmaterial Weizen bereits so ideal angepasst ist, dass sich der Gesamtprozess bereits von vornherein durch sehr schmale Verweilzeitverteilungen kennzeichnen lässt und sich (bei einer Verlängerung der Strömungsweglänge) keine starke Ausprägung des Fließprofils einstellt,
2. die direkte Vergleichbarkeit unterschiedlicher Strömungsweglängen mittels normierter Verweilzeitverteilungen (Bild 8-20) nicht möglich ist. Grund hierfür bildet das – bei längerem Strömungsweg – größer werdende Verhältnis zwischen der *Anzahl N_D der Austragungen* und der *Anzahl von Austragungen unterhalb der Verweilzeitverteilung*. Entsprechend hoch sind die Bodensteinzahlen zur Modellierung des Verweilzeitverlaufs (siehe Bild 8-18). Der Verlauf der Verweilzeitverteilungen suggeriert in diesem Fall den Trugschluss einer deutlich besseren Schüttgutbewegung.

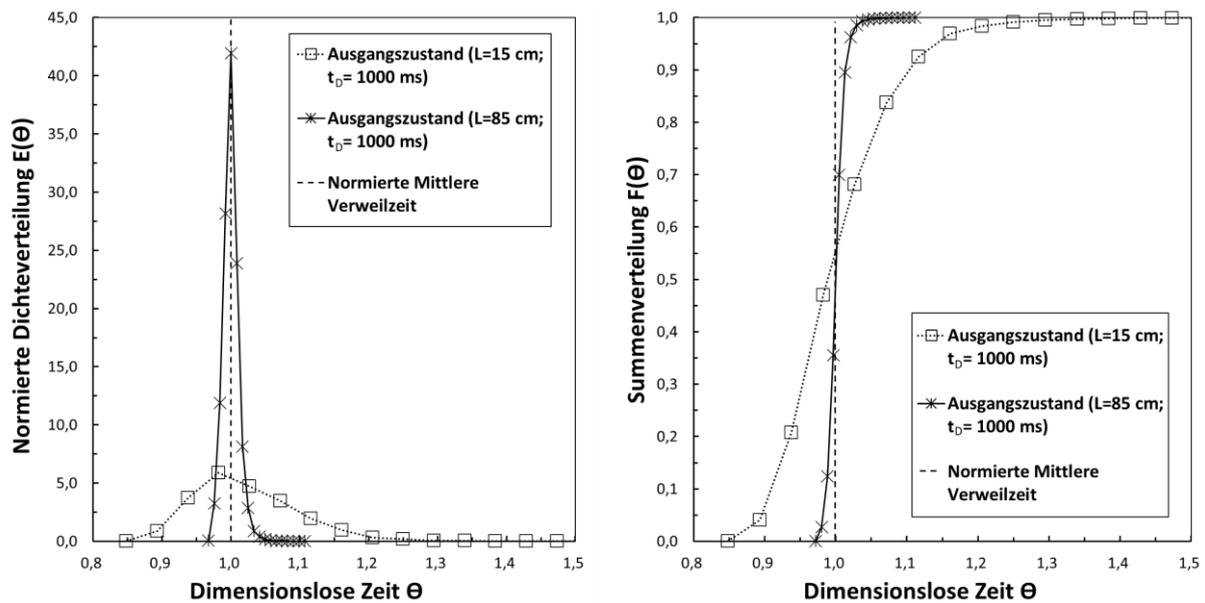


Bild 8-20: Direktvergleich der normierten Verweilzeitverteilungen bei unterschiedlichen Strömungsweglängen

Anschließend sollte für den längeren Strömungsweg noch einmal eine Anpassung örtlicher Haltezeiten erfolgen, die ggf. zu einer noch schmaleren Verteilung für $L = 0,85$ m führt. Die aussagekräftigsten Einstellungen dieses Versuchs können Tabelle 8-7 (Seite 105) entnommen werden und sind nachfolgend dargestellt. Wie Bild 8-21 zeigt, konnte mittels örtlicher Anpassung des Massenstroms durch *Einstellung 1* noch einmal eine marginal schmalere Verteilung mit einem Peak bei $E(\theta) \approx 48$ erreicht werden. Im Vergleich zum Ausgangszustand ($E(\theta) \approx 42$) entspricht dies einer Steigerung des Peaks um 12,5 %. Die Varianz des Ausgangszustands reduzierte sich ebenfalls von $\sigma^2 = 2,0$ auf $\sigma^2 = 1,6$ Austragungen.

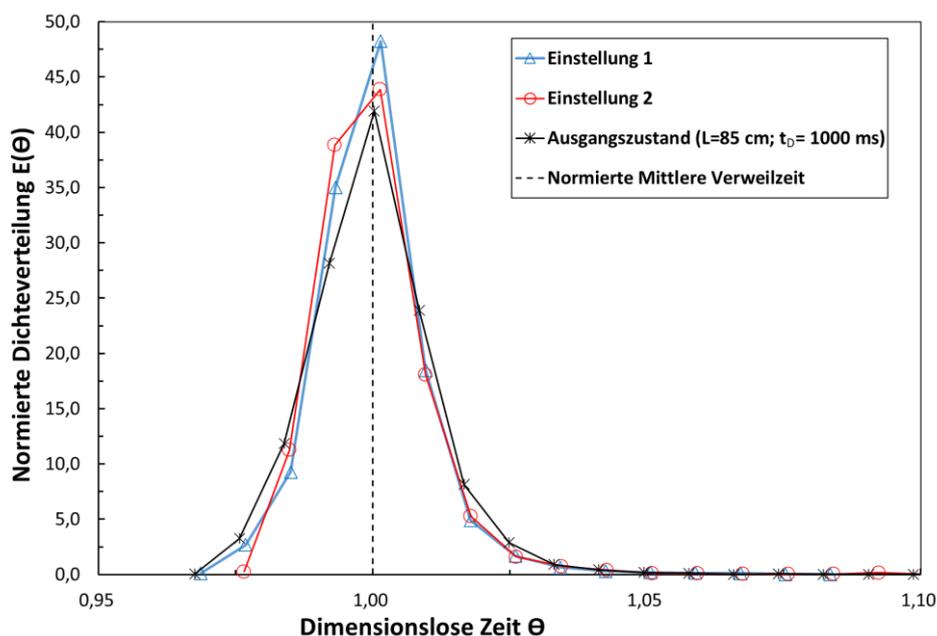


Bild 8-21: Vergleich der gemessenen normierte Dichteverteilungen für Einstellung 1, 2 und den Ausgangszustand (bei $L = 0,85$ m)

Eine deutlich größere Steigerung mittels *Einstellung 2* ließ sich, wie bereits diskutiert, aufgrund der ohnehin guten Anpassung von Austrageinrichtung und Behälter auf das Versuchsmaterial nicht erzielen. Trotz des Peaks bei $E(\theta) \approx 44$ lag die Varianz von *Einstellung 2* etwas höher ($\sigma^2 = 2,9$) als bei den anderen Einstellungen.

Tabelle 8-7: Einstellung der Haltezeiten einzelner Verschleißmechanismen

Verschleißmechanismus	A	B	C	D	E	F
Ausgangszustand t_H [ms]	0	0	0	0	0	0
Einstellung 1 t_H [ms]	0	0	0	0	10	5
Einstellung 2 t_H [ms]	0	0	0	0	15	8

Für das Versuchsmaterial *getrockneter Weizen* und den Aufbau des Rechteckbehälters aus verzinktem Stahlblech zeigen die gewonnenen Erkenntnisse, dass der Bedarf einer örtlichen Ansteuerung der neuartigen Austrageinrichtung eher als gering einzuschätzen ist. Bei vergleichbaren (jedoch komplexeren) Apparaten wie z. B. dem rechteckigen Gegenstromkühler⁶ für Holz- oder Futterpellets könnte die örtliche Ansteuerung zum einen das Fließverhalten auf wechselnde Produktgrößen (Pelletlänge und -durchmesser) einstellen, zum anderen aber auch die Produktbewegung auf eine ungleichmäßige Luftdurchströmung anpassen. Aus ihr resultieren schwankende Produktfeuchtigkeiten über dem Querschnitt, die mit Hilfe einer örtlichen Verkürzung oder Verlängerung der Verweilzeit kompensiert werden könnten. Zu diesem Zweck könnten (gezielt) breitere Verweilzeitverteilungen in Kauf genommen werden. Hierfür bedarf es jedoch noch weiterführender Studien, die aufgrund ihrer Komplexität, im Rahmen der vorliegenden Arbeit, nicht aufgegriffen werden konnten.

8.3.5 Einsatz eines anderen Versuchsmaterials

Bei der Untersuchung des Einflusses der neuartigen Austrageinrichtung auf die Verweilzeitverteilung erfolgten die Untersuchungen bisher ausschließlich mit dem Versuchsmaterial Weizen. Es zeigte sich, dass das Design der Austrageinrichtung zusammen mit dem Rechteckbehälter so gut auf das Versuchsmaterial abgestimmt war, dass die Einflussnahme auf die Schüttgutbewegung z. T. nur bedingt notwendig war.

Im Folgenden wurde daher das Versuchsmaterial Sojabohnen eingesetzt, um bei einer Strömungsweglänge von $L = 0,50$ m das Verweilzeitverhalten zu untersuchen. Hierbei wurde erwartet, dass das Verweilzeitverhalten und die Ausbildung eines Fließprofils mehr oder weniger stark ausgeprägt ist, als es bei Weizen der Fall war. Oberhalb der Strömungsweglänge wurden ca. 0,9 kg rot eingefärbte Sojabohnen gleichmäßig verteilt. Entsprechend der Analysen aus Kapitel 5.1, unterscheiden sich Sojabohnen von Weizenkörnern erheblich in ihrer Form und Größenverteilung (vgl. Bild 8-22). Der berechnete äquivalente Kugeldurchmesser d_v von Sojabohnen ist um ca. 36% größer als der von Weizenkörnern. Mit der neuartigen Austrageinrichtung wurde zunächst wieder der *Ausgangszustand* der neuartigen Austrageinrichtung (intermittierende Betriebsweise bei konventionellem Betrieb) untersucht.

⁶ Der Gegenstromkühler verfügt über einen perforierten, Luft durchströmten Austragsboden und wird i. d. R. zur Kühlung und Trocknung gepresster Pellets in der Holz- und Mischfutterindustrie eingesetzt



Bild 8-22: Vergleich des Inhalts der Probenschublade mit ausgetragenen Versuchsmaterial Weizen (links) und Sojabohnen (rechts)

Hierzu wurde der Behälter mit $M_S = 87$ kg Sojabohnen befüllt und die Austragsszeit auf $t_D = t_F = 1,0$ s eingestellt. Pro Öffnungszyklus wurden $M_{S,D} \approx 0,9$ kg des Versuchsmaterials ausgetragen. Die berechnete hydrodynamische Verweilzeit $\tau = 97$ entsprach in etwa dem Zeitpunkt des Auffindens erster weniger Tracer nach 98 Öffnungszyklen innerhalb der Probenschublade. Für eine Bodensteinzahl von $Bo = 3400$ konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Modellkurve und aufgenommenen Messpunkten erreicht werden (Bild 8-23). Lediglich zur Zeit $\theta \approx 1,04$ kam es zu deutlich sichtbaren Abweichungen. Ab diesem Zeitpunkt wurden noch Tracer ausgetragen, die sich vornehmlich in den Ecken der Probenschublade wiederfanden. Der Effekt, der deutlich langsameren Schüttgutbewegung in den Behälterecken, wurde weder vom Dispersionsmodell berücksichtigt, noch ließ sich hierauf mit der neuartigen Austrageinrichtung Einfluss nehmen. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen die bereits in Kap. 8.3.1 für Weizen gezogen werden konnten.

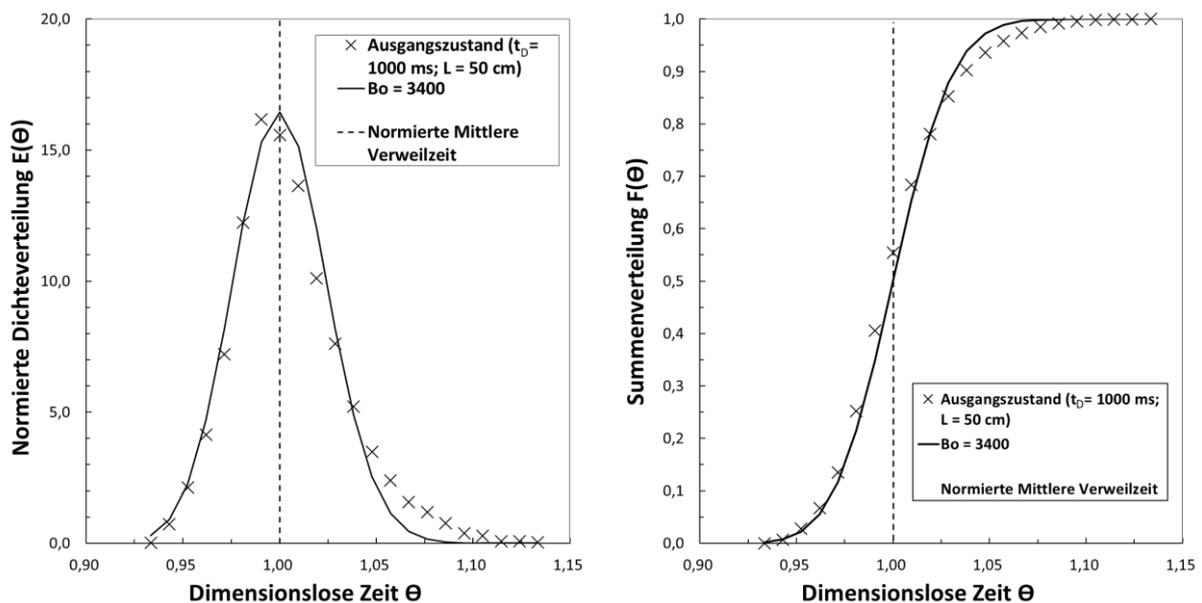


Bild 8-23: Vergleich der gemessenen und berechneten normierten Verweilzeitverteilung für Sojabohnen im Ausgangszustand bei einer Strömungsweglänge von $L = 0,50$ m

Ausgehend von der Verteilung des Tracermaterials innerhalb der Probenschublade (vgl. Bild 8-22, rechts) wurde durch Anpassung der Haltezeiten wieder versucht, die Verweilzeit-

verteilung zu optimieren, um damit die Schüttgutbewegung zu homogenisieren. Hierzu wurden die in Tabelle 8-8 zusammengefassten Haltezeiten festgelegt.

Tabelle 8-8: Einstellung der Haltezeiten einzelner Verschleißmechanismen

Verschleißmechanismus	A	B	C	D	E	F
Ausgangszustand t_H [ms]	0	0	0	0	0	0
Einstellung 1 t_H [ms]	10	5	0	0	10	0
Einstellung 2 t_H [ms]	10	15	0	0	18	0

Bild 8-24 zeigt, dass durch die Möglichkeit der örtlichen Ansteuerung der neuartigen Austrageinrichtung, eine deutliche Verbesserung des Verweilzeitverhaltens von Sojabohnen im Rechteckbehälter mit neuartiger Austrageinrichtung erreicht wurde. Im Gegensatz zu den Untersuchungen mit Weizen liegen die jeweiligen Messpunkte und die berechneten Kurvenverläufe viel klarer voneinander getrennt im Diagramm vor. Insbesondere die Summenverteilungen (Bild 8-24, rechts) zeigen noch einmal sehr deutlich, wie sich die Kurven in Richtung der normierten mittleren Verweilzeit bewegen. Eine, gegenüber dem *Ausgangszustand*, mehr als doppelt so große Bodensteinzahl konnte durch die örtliche Anpassung der Haltezeiten mit *Einstellung 2* (rote Kurve) erreicht werden.

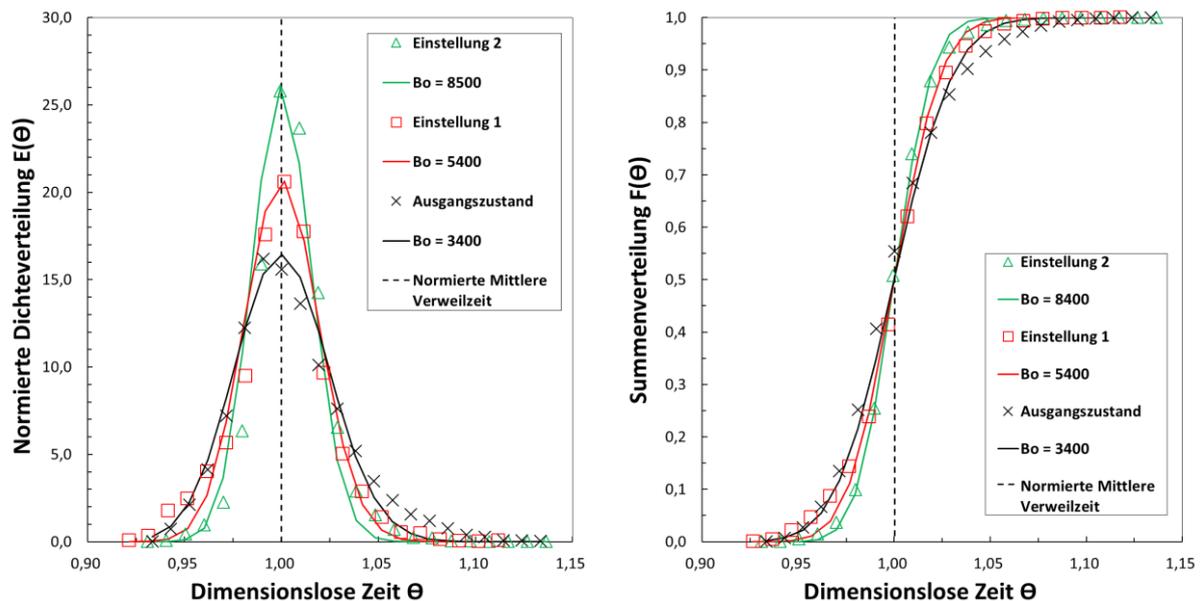


Bild 8-24: Dimensionslose Verweilzeitverteilungen für Sojabohnen

8.3.6 Vergleich mit konventionellen Austragsystemen

In Kapitel 5.2 wurden die konventionellen Systeme:

- **Schieber-Austrageinrichtung** und
- **Dosierkammer-Austrageinrichtung**

im Labor-Maßstab vorgestellt, die (in Kapitel 8.1.1 und **Anlage 18 - Anlage 20**) hinsichtlich ihrer Gleichmäßigkeit untersucht wurden. Derartige Austragsysteme finden bereits ihren

Einsatz in konvektiven Trocknungs- und Kühlprozessen, die in Schachtapparaten mit rechteckiger Querschnittsfläche stattfinden. Eine Studie zum Direktvergleich der Vor- und Nachteile dieser Systeme wurde bislang noch nicht veröffentlicht.

Die **neuartige Austrageinrichtung** wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit bisher nur für sich selbst betrachtet und (anhand der Verweilzeitverteilung) in Verbindung mit einem Rechteckbehälter bewertet. Für einen Direktvergleich wurden alle 3 Austrageinrichtungen nacheinander am Gestell des Versuchsaufbaus (Kapitel 5.2, Bild 5-9) – bestehend aus 2 Befüllsektionen – angebracht. Die Strömungsweglänge wurde für die rot eingefärbten Weizen-Tracer (560 g) zu $L \approx 0,85$ m ($M_S = 145$ kg) festgelegt. Jedes der Austragssysteme verfügt über eine Austragswanne (600 mm x 400 mm) mit Leitblechen, zwischen denen sich längliche Auslaufschlitze ergeben. Die Austragsmasse $M_{S,D}$, die von der **Dosierkammer-Austrageinrichtung** mit einem einfachen, horizontalen Hub ausgetragen wird, liegt bei $M_{S,D} \approx 1,1$ kg. Im Gegensatz zu den anderen beiden Austrageinrichtungen ist ein kontinuierliches Ausfließen nicht ohne die periodische vor- und zurück Bewegung der Dosierkammern möglich. Die Austragsmasse von 1,1 kg diente daher als festgelegte Bezugsgröße zur Einstellung der Austragsmasse für die *Schieber-Austrageinrichtung* und die *neuartige Austrageinrichtung*. Weiterhin verfügt die *Dosierkammer-Austrageinrichtung* über eine konstruktive Besonderheit an den Stirnwänden (Bild 8-25, links). Hier befinden sich anstelle einer steilen Behälterwand zusätzlich um $\theta_{eb} = 22^\circ$ geneigte Leitbleche, die als Schutz der verbauten Rollenlager verbaut sind. Da diese Leitbleche den Behälterquerschnitt in Richtung der Dosierkammern verjüngen und dem Schüttgut eine zusätzliche Fläche bieten, um Schüttgutspannungen aufzunehmen, wird dies auch Einfluss auf die Schüttgutbewegung oberhalb der Austrageinrichtung nehmen.

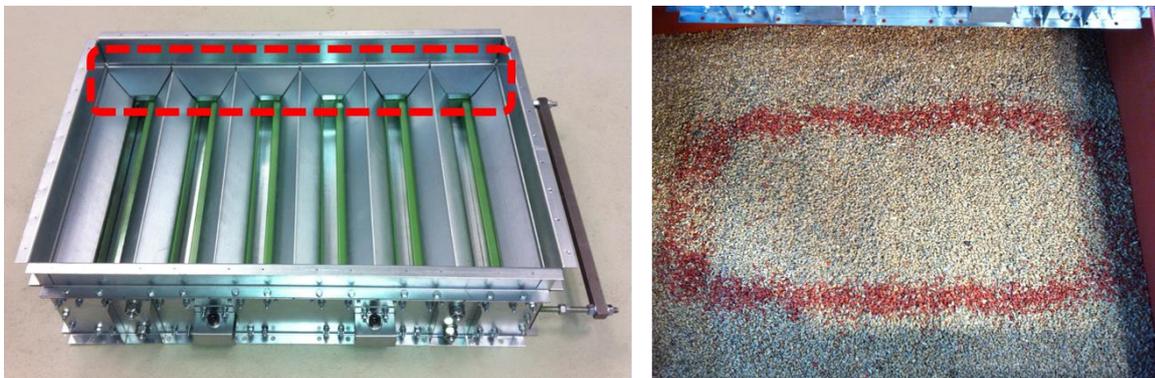


Bild 8-25: Einbauten an den Stirnwänden der Dosierkammer-Austrageinrichtung (links) und Verteilung der Weizen-Tracer innerhalb der Probenschublade bei $\theta = 1,1$ (rechts)

Das Verweilzeitexperiment wurde zunächst für die Dosierkammeraustrageinrichtung durchgeführt. Innerhalb der Probenschublade fanden sich nach Ablauf der Tracerdurchbruchzeit ($N_D = 142$ Austragungen) während des Experiments zunächst nur im mittleren Bereich rote Tracer. Nach hinreichender Anzahl weiterer Austragungen fanden sich diese nur noch in den Randbereichen (Bild 8-25, rechts) wieder, bis dort nur noch ungefärbtes Versuchsmaterial ausgetragen wurde. Mittels Dispersionsmodell ($Bo = 10.800$) konnten die Messpunkte der Normierte Dichteverteilung sehr genau beschrieben werden (Bild 8-26).

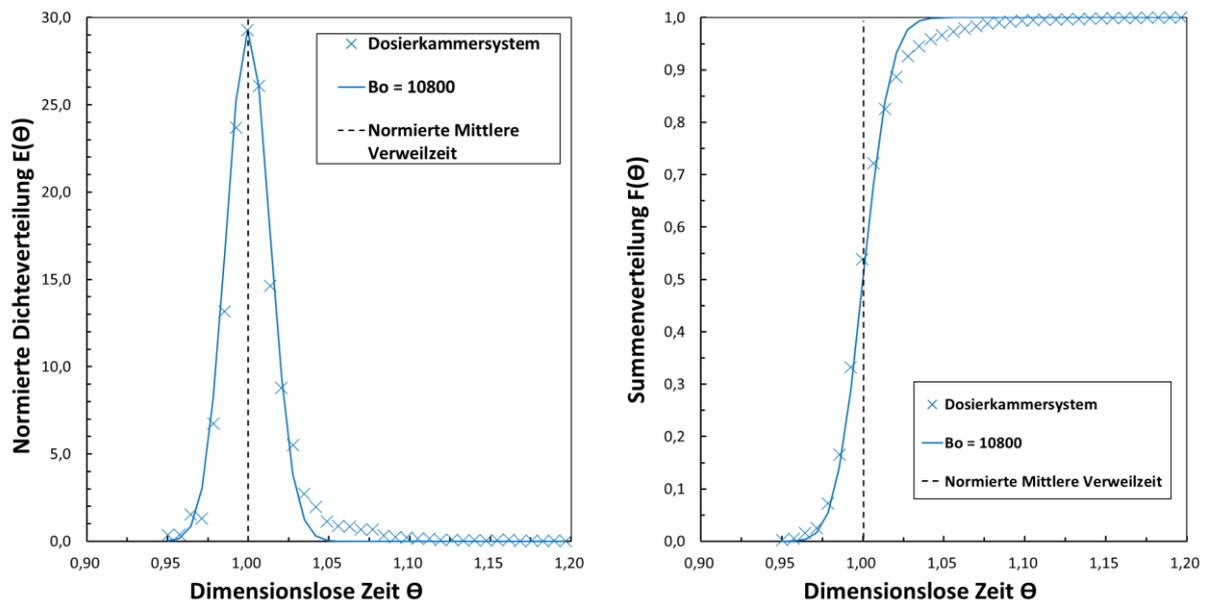


Bild 8-26: Dimensionslose Verweilzeitverteilungen der Dosierkammer-Austrageinrichtung

Die Grenzen des Modells zeigen sich dagegen erneut darin, dass das „Nachlaufen“ von Tracermaterial – dessen Geschwindigkeit (den Beobachtungen nach) in den Ecken des Behälters stark ausgebremst wurde – zu einem sehr langsamen Auslaufen der gemessenen Verweilzeitverteilung ab $\theta = 1,03$ führte. Hier stimmen Modellkurve und gemessene Verteilung nicht mehr überein. Nahezu gleiches Ergebnis, bei fast identischer Bodensteinzahl ($Bo = 10.500$), zeigte die Testung der Schieberaustrageinrichtung (Bild 8-27).

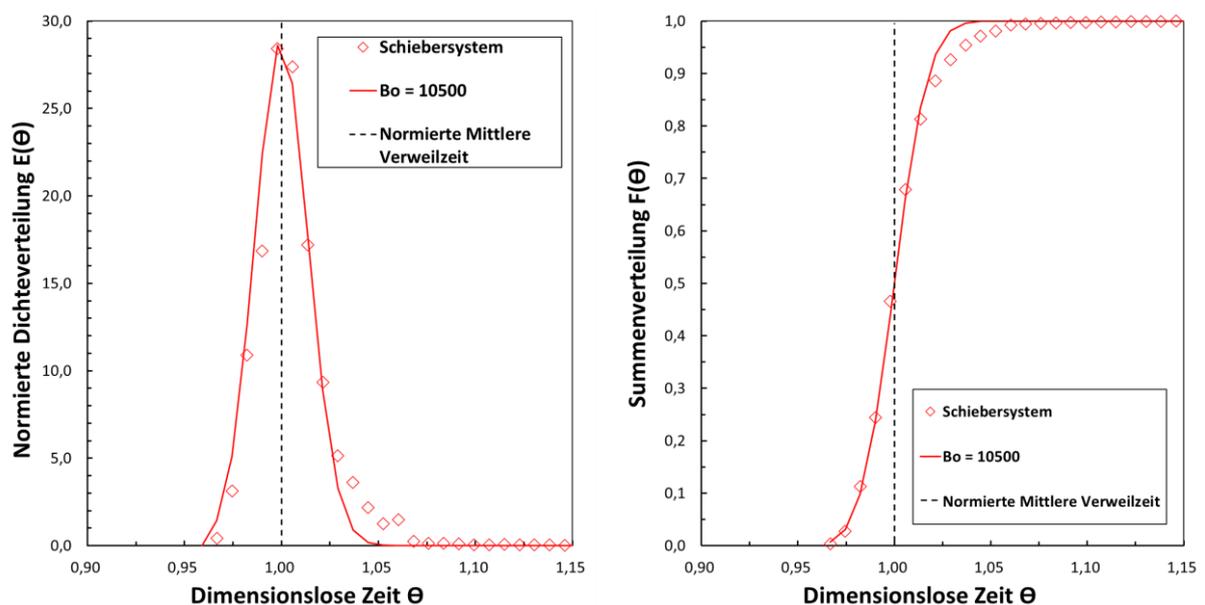


Bild 8-27: Dimensionslose Verweilzeitverteilungen der Schieber-Austrageinrichtung

Das Verweilzeitverhalten der **Dosierkammer-Austrageinrichtung** und der **Schieber-Austrageinrichtung** stellte sich als sehr ähnlich heraus. Experimentelle Beobachtungen bestätigten die Erwartung, dass die Leitbleche an den Stirnwänden der Dosierkammer-Austrageinrichtung zu einer deutlichen Verlangsamung der Schüttgutbewegung führen.

Gegenüber der Schieber-Austrageinrichtung waren jedoch nur unwesentlich mehr Entleerungsvorgänge (+10 Austragungen) notwendig, um sämtliches Tracermaterial in der Probenschublade wiederzufinden. Die Varianz wurde demnach für das Schiebersystem zu $\sigma^2 = 6,1$ und für das Dosierkammersystem zu $\sigma^2 = 9,9$ Austragungen bestimmt.

Die Arbeits- und Gestaltungsweise der **neuartigen Austrageinrichtung** erwies sich – im direkten Vergleich – als weitaus günstiger, um eine möglichst schmale Verweilzeitverteilung ($Bo = 24.000$) mit kurzem Nachlaufen von Tracermaterial zu erreichen (Bild 8-28). Zur besseren Vergleichbarkeit sind nur die, mittels Dispersionsmodell berechneten, Verweilzeitverteilungen der jeweiligen Austrageinrichtung dargestellt. Aus der Gegenüberstellung mit den anderen Austrageinrichtungen lässt sich ableiten, dass allein durch die konstruktive Gestaltung der neuartigen Austrageinrichtung eine verbesserte Schüttgutbewegung erreicht werden konnte ohne, dass die Funktion einer örtlichen Variation der Haltezeit in Anspruch genommen worden ist. Für den Praxiseinsatz und das Ziel einer gleichmäßigeren Austragung ist die neuartige Austrageinrichtung damit als die geeignetste zu bewerten.

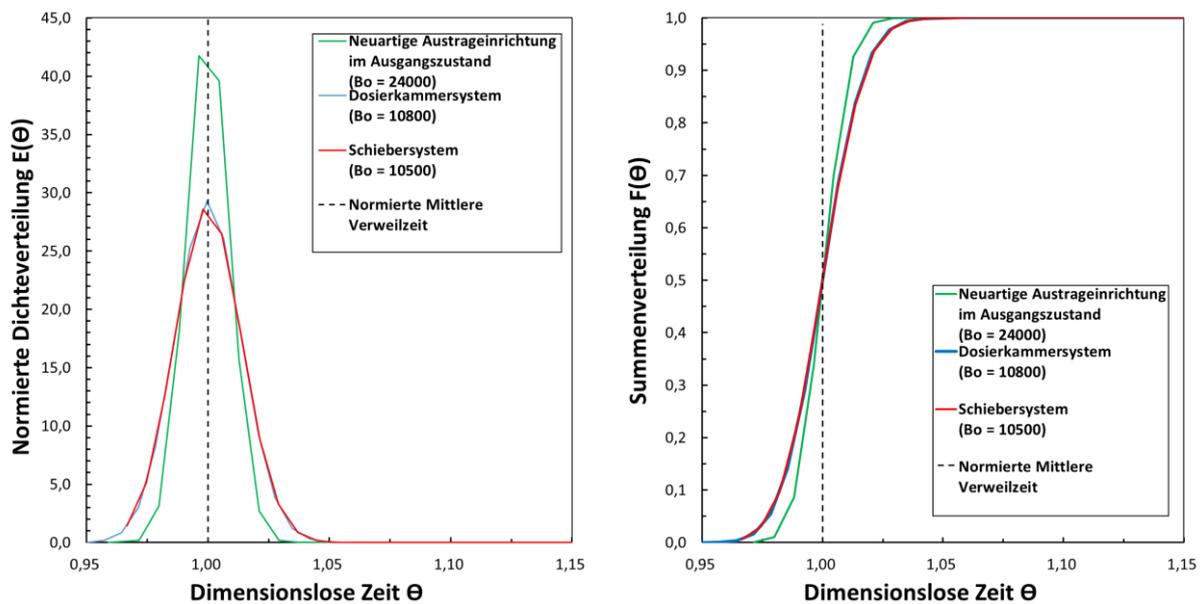


Bild 8-28: Vergleich konventioneller Austragsysteme im Labormaßstab bei $L=85\text{cm}$ und vergleichbar eingestellter Austragsmasse $M_{S,D} \approx 1,1 \text{ kg}$

8.3.7 Untersuchungen an einem Trocknerschacht im Labormaßstab

In den Kapiteln zuvor wurde die neuartige Austrageinrichtung bereits bei unterschiedlichen Einstellungen, Schüttgütern und Prozessbedingungen an einem einfachen Rechteckbehälter untersucht. Wie sich zeigte, hielt sich die Ausbildung eines Fließprofils im Rechteckbehälter bisher in Grenzen. Die Vorteile, die innovative Funktionsweise der neuartigen Austrageinrichtung zur Vergleichmäßigung der Schüttgutbewegung einzusetzen, konnten bisher nur in einem geringen Umfang eingesetzt werden, da das an die Versuchsmaterialien angepasste Design der Austrageinrichtung bereits positive Wirkung erzielt. Bei Trocknungs- und Kühlprozessen, die in Apparaten mit vertikalem Schacht stattfinden, können ungünstig gestaltete Einbauten (oberhalb der Austrageinrichtung) mitunter zu breiteren Verweilzeitverteilungen führen. Einbauten können z. B. Luftkanäle sein, die für einen effektiven Wärme- und Stofftransport sorgen sollen. Nachfolgend sollte die neuartige Austrageinrichtung dem Extremfall einer Vielzahl von Luftkanälen ausgesetzt werden, die die Schüttgutbewegung beeinflussen.

Voruntersuchungen

Über die Vielzahl von Luftkanälen eines Getreideschachttrockners ist bekannt, dass diese der Schüttgutbewegung eine deutlich größere Quervermischung aufzwingen können. Vor dem Einsatz der neuartigen Austrageinrichtung unterhalb eines solchen Trockners im Labormaßstab und der Analyse von Verweilzeitverteilungen wurden in einem Vorversuch zunächst qualitative Experimente zum Schüttgutfließverhalten von Weizen durchgeführt. Die in Kapitel 5.2 vorgestellten Trocknerdesigns (**Typ I** und **Typ II**) wurden hierfür mit einer transparenten Frontwand und der (in der Praxis zumeist etablierten) Schieber-Austrageinrichtung ausgestattet. Durch Einbringung einer horizontalen Schicht roter Tracer wurde zum Versuchsbeginn am Prozesseingang (oberste Trocknungssektion) eine ideale Kolbenströmung aufgezwungen. In Bild 8-29a ist dies für die Trocknungssektion vom **Typ I** exemplarisch als „Tracerschicht“ dargestellt. Mit dem Versuchsbeginn wurde die Austrageinrichtung intervallweise zum Öffnen und Schließen (intermittierend bei konv. Betrieb) angesteuert, während getrockneter Weizen von oben stetig nachgefüllt wurde.

Von der transparenten Frontwand des jeweiligen Versuchsaufbaus wurden nach einigen intermittierenden Austragungen Fotos gemacht, um die Bewegungshistorie der Schüttgutbewegung auswerten zu können. Nach hinreichender Anzahl von Austragungen stellte sich für die jeweilige Trocknersektion an der Wand ein Fließprofil ein. Für den **Typ I** war dieses besonders ausgeprägt von Sektion 3 nach 2 (Bild 8-29b). An der „Strähnen-Bildung“ in den Randbereichen der Trocknungssektion kann gegenüber der Kernzone ein deutlich langsames Fließverhalten festgestellt werden. Das Fließprofil als solches lässt sich weder eindeutig dem Massenfluss, noch dem Kernfluss zuordnen. Da zum Zeitpunkt der Entleerung sämtliches Schüttgut in Bewegung war, charakterisiert Massenfluss mit ausgeprägter Geschwindigkeitsverteilung oder Massenfluss mit überlagertem Kernfluss das Fließverhalten am besten.

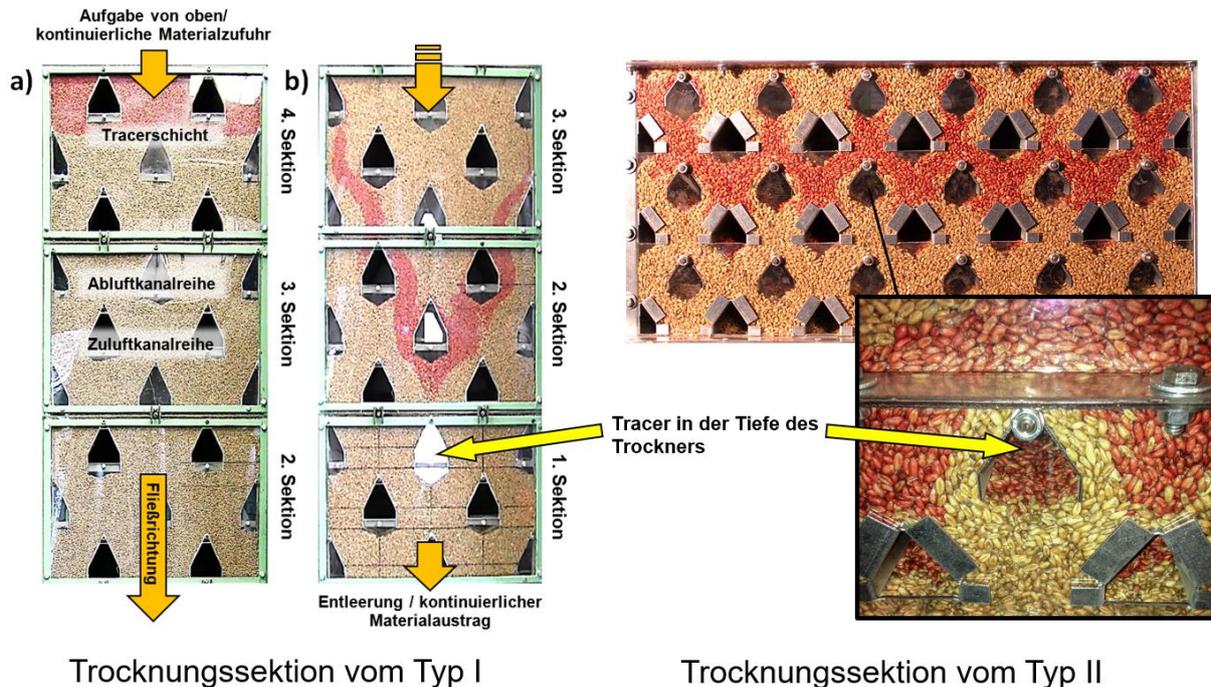


Bild 8-29: Qualitative Untersuchung der Schüttgutbewegung von Weizen an einer transparenten (Makrolon®) Frontwand unterschiedlicher Labortrocknerdesigns

Es wird davon ausgegangen, dass:

1. zwischen jedem Paar benachbarter Luftkanäle Schüttgutspannungen auftreten, die mit denen in einem Silotrichter vergleichbar sind (siehe Kapitel 2.2.2)
2. über dem gesamten Behälterquerschnitt (trotz Einbauten) ein sich überlagernder Spannungszustand existiert, der zur Ausbildung des Trichterförmigen Fließverhaltens beigetragen hat
3. sich die Arbeits- und Gestaltungsweise der Austrageinrichtung auf das Fließverhalten im Trockner auswirkt.

Im Direktvergleich beider Trocknungssektion erscheint die Schüttgutbewegung über der gesamten Breite des **Typs II** (Bild 8-29 rechts) nahezu gleichmäßig. Nimmt man sich jedoch einen Teilbereich von umliegenden Luftkanälen raus, so findet sich das Fließprofil von **Typ I** auch hier in der Tiefe der Trocknungssektion wieder. Bei ganzheitlicher Betrachtung der **Typ II** Sektion lässt sich zudem noch eine verlangsamte Schüttgutbewegung im Randbereich beobachten, die auf die 2. oben getroffene Annahme zurückführbar sein könnte. In der Praxis lassen sich ähnliche Fließprofile auch bei einer Vielzahl nebeneinander liegender Luftkanäle feststellen. Aufschluss darüber geben Gutfeuchteverteilungen über der Apparatebreite- und Tiefe [146].

Die qualitativen Voruntersuchungen zeigen, wie komplex die Schüttgutbewegung in Schachtapparaten trotz gleichmäßiger Verteilung von Einbauten sein kann. Die Trocknungssektion vom **Typ I** stellt nur den Ausschnitt eines realen Trockners dar und wurde daher für weiterführende Untersuchungen nicht verwendet. Die **Typ II** Trocknungssektion empfindet das Design eines allgemeinen Getreideschachttrockners im Maßstab 1:5 vollständig nach. Im

Grunde genommen müsste hier jedoch auch das Versuchsmaterial herabskaliert werden. Ein geeignetes Modellgut, das sich wie das praktisch in Getreideschachttrocknern eingesetzte Produkt Weizen verhält, konnte bisher jedoch nicht gefunden werden. In den nachfolgenden Untersuchungen werden die Verweilzeitverteilungen für die **Typ II** Sektion in Abhängigkeit der Austrageinrichtung ausgewertet. Ziel ist es, ohne die Schüttgutbewegung und deren Geschwindigkeitsverteilung genau zu kennen, mit Hilfe der neuartigen Austrageinrichtung, eine deutliche Verbesserung der Verweilzeitverteilung zu bewirken.

Untersuchung der Verweilzeitverteilung

Zur Untersuchung des Verweilzeitverhaltens von Austrageinrichtung + Trocknerschacht wurden 3 Sektionen vom **Typ II** und eine Befüllsektion oberhalb des Gestells aufgebaut (Bild 8-30a). Die Tracerschicht (0,56 kg) wurde homogen über der Fläche und direkt oberhalb der letzten Trocknungssektion verteilt. Zur Fixierung dieses Zustands wurde wieder getrockneter Weizen (vorsichtig und ohne bereits eine Quervermischung der glatten Tracerschicht zu bewirken) von oben nachgefüllt. Zudem wurden – mit Wänden aus verzinktem Stahlblech anstelle des transparenten Wandmaterials – vorab gleiche Voraussetzungen für das Schüttgutfließverhalten (im Hinblick auf die Wandreibung) geschaffen. In Bild 8-30b sei noch einmal exemplarisch dargestellt wie sich die Luftkanäle, als Einbauten im Inneren der Sektion, verteilen.

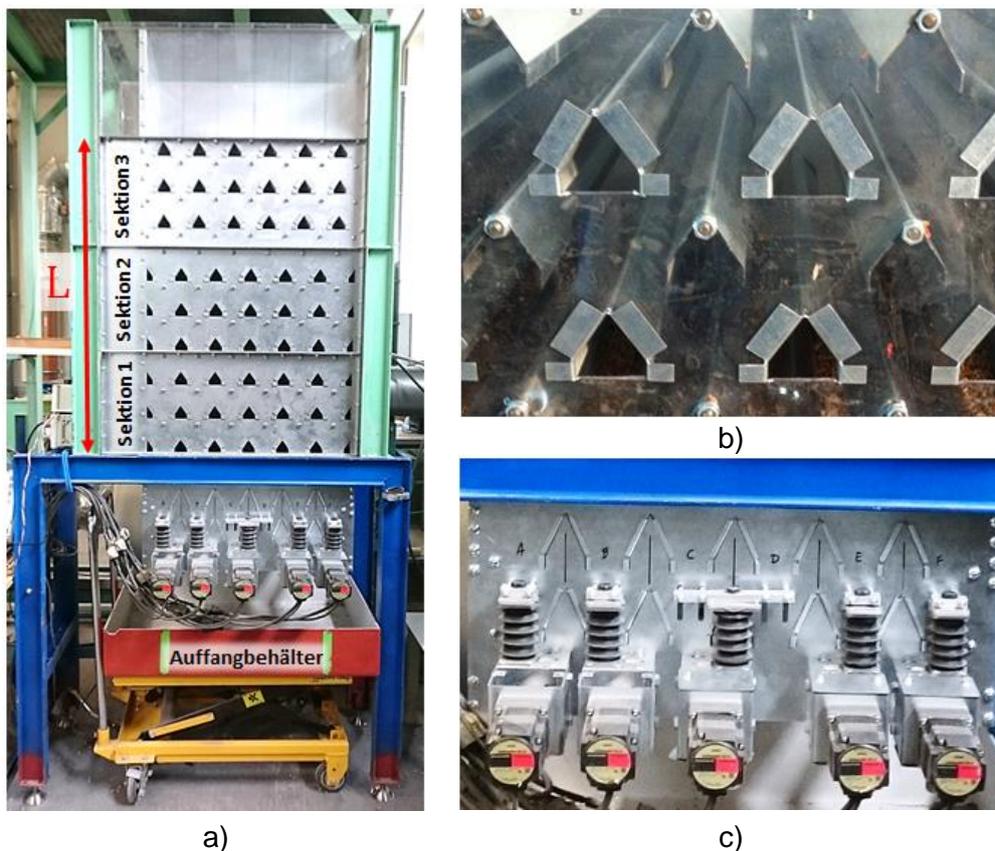


Bild 8-30: Versuchsaufbau an einer Trocknersäule a) Trocknersäule mit neuartigen Austrageinrichtung, b) Gestaltung der Luftkanäle im Inneren einer Trocknersäule mit transparenter Frontwand und c) Frontansicht der neuartigen Austrageinrichtung

Darüber hinaus zeigt Bild 8-30c die reale neuartige Austrageinrichtung am Versuchsstand. Die Füllmenge einer einzelnen Trocknungssektion mit Weizen wurde vorab experimentell auf $M_S = 45 \text{ kg}$ bestimmt. Damit befanden sich insgesamt 135 kg Weizen in den 3 übereinander verschraubten Trocknungssektionen und zusätzlich $\sim 10 \text{ kg}$ Weizen zwischen Austrageinrichtung und unterer Trocknungssektion. Die Strömungsweglänge (in Bild 8-30a rot dargestellt) bis zum Erreichen der Gestell-Oberkante betrug $L = 1,30 \text{ m}$. Zur Gegenüberstellung unterschiedlicher Austrageinrichtungen ist sowohl die Füllmenge, als auch die Austragsmenge (wie in Kapitel 8.3.6) wieder auf $M_{S,D} \approx 1,1 \text{ kg}$ festgelegt worden. Die hydrodynamische Verweilzeit τ betrug bei allen Versuchsaufbauten in etwa $\tau \approx 132$ Austragungen. Aufgrund des sehr hohen Versuchsaufwands und der als zuverlässig einzuschätzenden Messmethode (siehe Kapitel 8.3.2) wurden die Verweilzeitmessungen für jeden Trockner-Versuchsstand nur einmalig durchgeführt.

Zunächst werden die Ergebnisse der beiden konventionellen Austrageinrichtungen unterhalb der Trocknungssektionen ausgewertet (Bild 8-31). Diese weisen in ihrer normierten Dichteverteilungen einen deutlich anderen Kurvenverlauf auf, als alle bisherigen Verweilzeitverteilungen unter Einsatz des Rechteckbehälters.

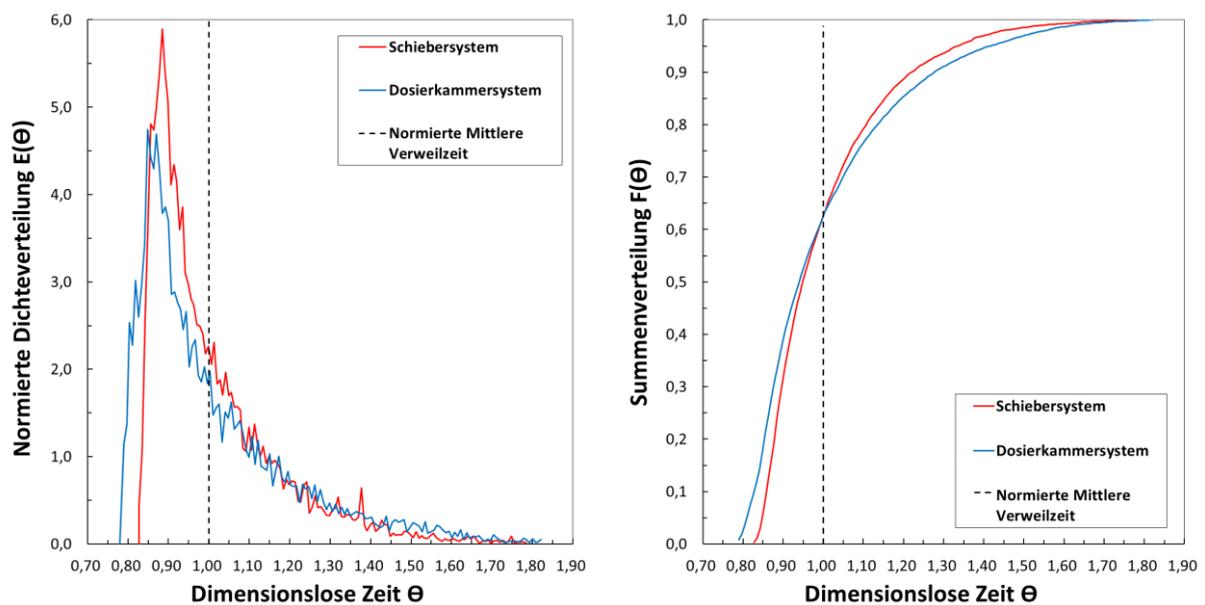


Bild 8-31: Normierte Verweilzeitverteilungen unterschiedlicher Austrageinrichtungen unterhalb eines Labor-Getreideschachttrockners

Grundsätzlich scheint es (wie in den Voruntersuchungen dieses Kapitels beobachtet) innerhalb der Trocknungssektionen einen Hauptproduktstrom der Tracer zu geben, der sich mehr oder weniger trichterförmig (sowohl bei Einsatz der Schieber-, als auch bei Einsatz der Dosierkammer-Austrageinrichtung) durch die Trocknungssektionen bewegt und zu breiten Maxima zwischen $\theta = 0,80$ und $\theta = 0,95$ führt. Solch ein Maximum lässt sich exemplarisch dem in Bild 8-32a dargestellten Muster an Tracermaterial im Auffangbehälter zuweisen. Zunächst war im Auffangbehälter nur in der Mitte ein Teilbereich rot gefärbt. Dieser Bereich wurde zunehmend größer, bis er mittig von ungefärbten Versuchsmaterial abgelöst wurde. Tracermaterial kommt fortan nur noch in den Randbereichen des Auffangbehälters

wiedergefunden werden. Der abfallende Kurvenverlauf ab $\theta = 0,95$ entspricht in etwa Bild 8-32b zurzeit, als nur noch in den äußeren Randbereichen Tracer zu finden waren.

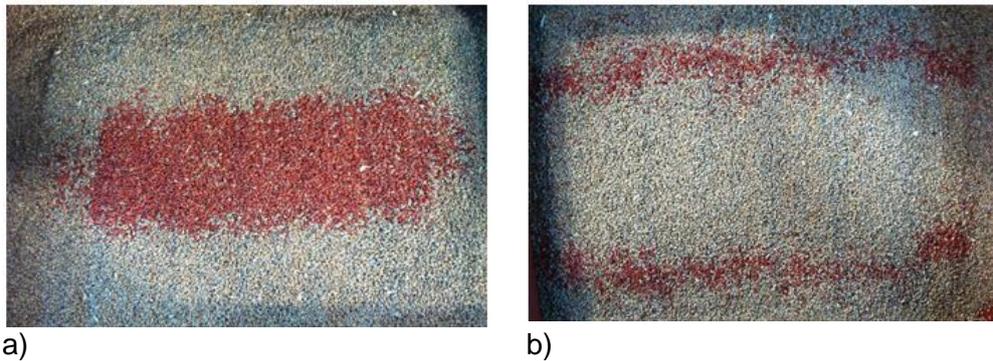


Bild 8-32: Verteilung des Tracermaterials innerhalb des Auffangbehälters a) entspricht dem Hauptproduktstrom b) entspricht der verlangsamten Schüttgutbewegung im Wandbereich

Der relative breite Verlauf der Verweilzeitverteilung des jeweiligen Versuchsaufbaus kann dem trichterförmigen Hauptproduktstrom zugeordnet werden, der sich über der Höhe und Breite der gesamten Trocknersäule einstellt. Besonders auffällig in den Kurvenverläufen von Bild 8-31 sind die unregelmäßigen Sprünge, die vergleichsweise wie die Überlagerung eines Störsignals auftreten. Es ist davon auszugehen, dass sich dieses „Störsignal“ aus einer Verkettung des trichterförmigen Hauptproduktstroms (im Inneren des Trockners) mit ungleichmäßigen Teilproduktströmen zwischen den Luftkanälen einstellt. Als Teilproduktströme werden alle Fließprofile innerhalb der Trocknungssektion betrachtet, die sich unabhängig vom Hauptproduktstrom nur zwischen benachbarten Luftkanälen ausbilden (Bild 8-35).

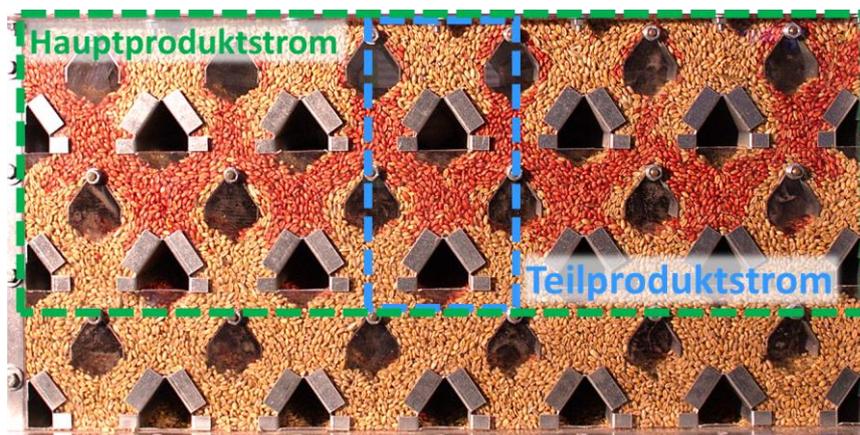


Bild 8-33: Darstellung des angenommenen Haupt- und Teilproduktstroms innerhalb einer Trocknungssektion (Aufgenommen an einer transparenten Wand in den Voruntersuchungen)

Innerhalb der Summenverteilungen von Bild 8-31 wird die Überlagerung kompensiert, wodurch sich diese Form der Darstellung für eine direkte Bewertung beider Prozesse besser eignet. Aufgrund der Lage beider Summenverteilungen um die normierte mittlere Verweilzeitverteilung lässt sich feststellen, dass der Versuch mit *Schieber-Austrageinrichtung* deutlich dichter an einer gedachten, idealen „Tracer-Durchbruchkurve“ liegt und somit – bezogen auf den

Gesamtprozess – von einem gleichmäßigeren Fließverhalten der Tracerschicht auszugehen ist. Weiterhin ist davon auszugehen, dass das (bereits in Kapitel 8.3.6 diskutierte) „Nachlaufen“ von Tracern (beim Versuchsaufbau mit Dosierkammer-Austrageeinrichtung) mehr Einfluss auf die Verweilzeitverteilung nimmt, als bisher angenommen. Zur Einschätzung, in welcher Größenordnung sich das Fließprofil im Inneren der Trocknersäule beider Versuche real unterscheidet nützt diese Erkenntnis jedoch nur bedingt. Einen Hinweis darauf könnte in Zukunft die verstärkte Einbindung von dreidimensionalen Simulationen mittels Diskreter Elemente Methode geben, um z. B. das Trichterprofil im Inneren des Trockners sichtbar zu machen und auszumessen.

In Bild 8-34 sind noch einmal für beide Austrageinrichtungen die Dichteverteilungen $E(t)$ über der Anzahl von Austragungen dargestellt. Interessant erscheint hier die Beobachtung, dass seit dem Verlassen der ersten und der letzten Tracer im Versuch mit Dosierkammersystem 140 Austragungen ($\dot{M}_{S,D} \approx 1,1 \text{ kg}$) liegen.

Dies ist bezeichnend für die Problematik einer gleichmäßigen Trocknung in der Praxis, da die verwendete Menge von Tracern gerade einmal 0,56 kg (in Form einer glatten Schicht am Prozesseingang) betrug.

Für das Schiebersystem lag die Anzahl der benötigten Austragungen nicht unweit bei 134. Im Vergleich zur hydrodynamischen Verweilzeit liegt die mittlere Verweilzeit (für die jeweilige Verweilzeitverteilung) weiter rechts. Die Kurvenmaxima dagegen links von der hydrodynamischen Verweilzeit.

Es ist davon auszugehen, dass die starke Profilbildung im Inneren des Trockners einer der Hauptgründe ist, warum die Regelung und Automatisierung solcher Prozesse gegenwärtig eine immense Herausforderung darstellen.

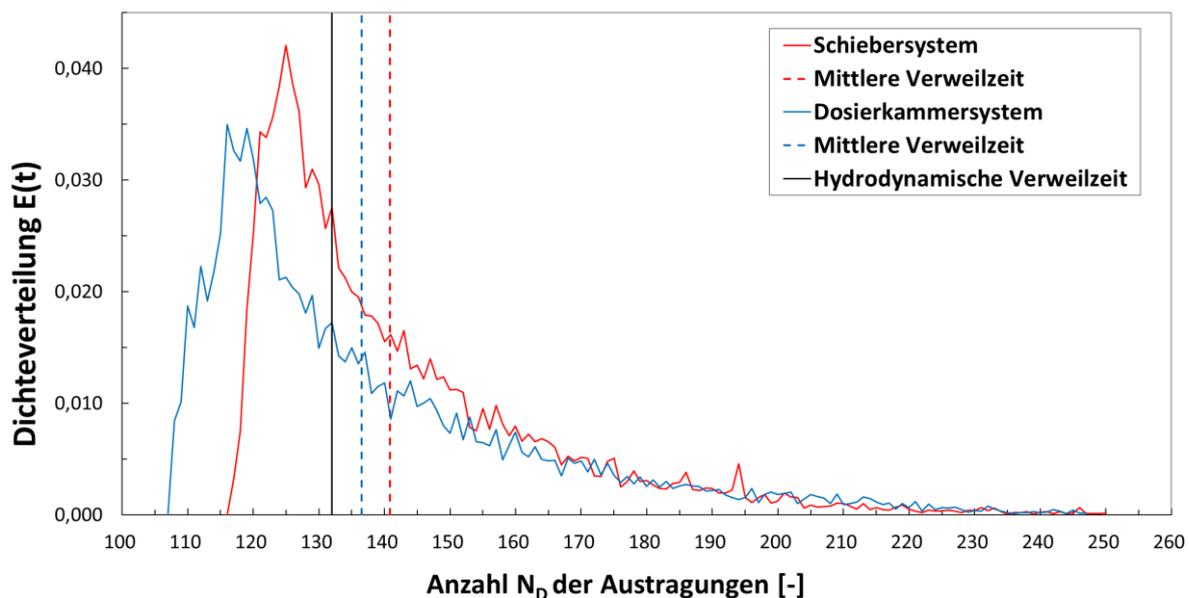


Bild 8-34: Dichteverteilungen $E(t)$ unterschiedlicher Austrageinrichtungen unterhalb des Labortrockners

Von großem Interesse war es herauszufinden, wie die neuartige Austrageinrichtung im Direktvergleich zu beiden anderen Systemen unterhalb des Labortrockners abschneidet. Es wurde zunächst kritisch angenommen, dass sich der positive Einfluss der neuartigen Austrageinrichtung aufgrund der Vielzahl von eng beieinanderliegenden Luftkanalreihen innerhalb der Trocknungssektionen möglicherweise aufheben wird und somit eine kaum erkennbare Verbesserung eintritt. Der Versuchsablauf erfolgte analog zu den vorhergehenden Untersuchungen in Kapitel 8.3.3 durch Anpassung der örtlichen Haltezeiten (Tabelle 8-9) an der neuartigen Austrageinrichtung, wobei zu Beginn wieder der *Ausgangszustand* (siehe Kap. 6.4.1, ohne örtliche Parametrierung) eingestellt wurde.

Tabelle 8-9: Einstellung der Haltezeiten einzelner Verschließmechanismen

Verschließmechanismus	A	B	C	D	E	F
Ausgangszustand t_H [ms]	0	0	0	0	0	0
Einstellung 1 t_H [ms]	8	12	5	5	0	5
Einstellung 2 t_H [ms]	8	15	5	5	0	12
Einstellung 3 t_H [ms]	8	17	5	5	10	17

In Bild 8-35 ist die Verweilzeitverteilung für den *Ausgangszustand* der neuartigen Austrageinrichtung als grüne Kurve dargestellt. Deren schmaler Peak stellt deutlich dar, dass mehr Tracer gleichzeitig ausgetragen wurden und sich diese somit auch gleichmäßiger durch den Labor-Trockner bewegt haben. Darüber hinaus verzeichnen sich weniger Sprünge im Kurvenverlauf, die dafür jedoch ausgeprägter sind. Anzunehmen ist, dass die Gestaltung und Arbeitsweise der neuartigen Austrageinrichtung sowohl auf den Hauptproduktstrom, als auch auf sämtliche Teilproduktströme innerhalb benachbarter Luftkanäle einen mehr oder weniger vergleichmäßigen Einfluss besitzt. Dies könnte jedoch auch an der vorteilhaften Gestaltung der Verschließmechanismen liegen, die bei jedem Öffnungsvorgang immer beidseitig zwei Öffnungsschlitze freigeben (vgl. Bild 6-5, S.64), wodurch einseitiger Schüttgutabzug vermieden wird. Weiterhin fanden sich die letzten Tracer bereits bei $\theta = 1,60$ wieder. Bezogen auf die Anzahl von Öffnungsvorgängen, die seit dem ersten Erscheinen von Tracern verstrichen ist, entspricht dies einer Laufzeit von 111 Austragungen.

Zum Vergleich: Für die Schieber-Austrageinrichtung lag die Anzahl bei 134 Austragungen und für die Dosierkammer-Austrageinrichtung bei 140 Austragungen.

Vergleicht man wieder die Summenverteilungen miteinander, so äußert sich das verbesserte Fließverhalten – unter Einsatz der neuartigen Austrageinrichtung im *Ausgangszustand* – in einer deutlich engeren Lage der Kurve, an der normierten mittleren Verweilzeit.

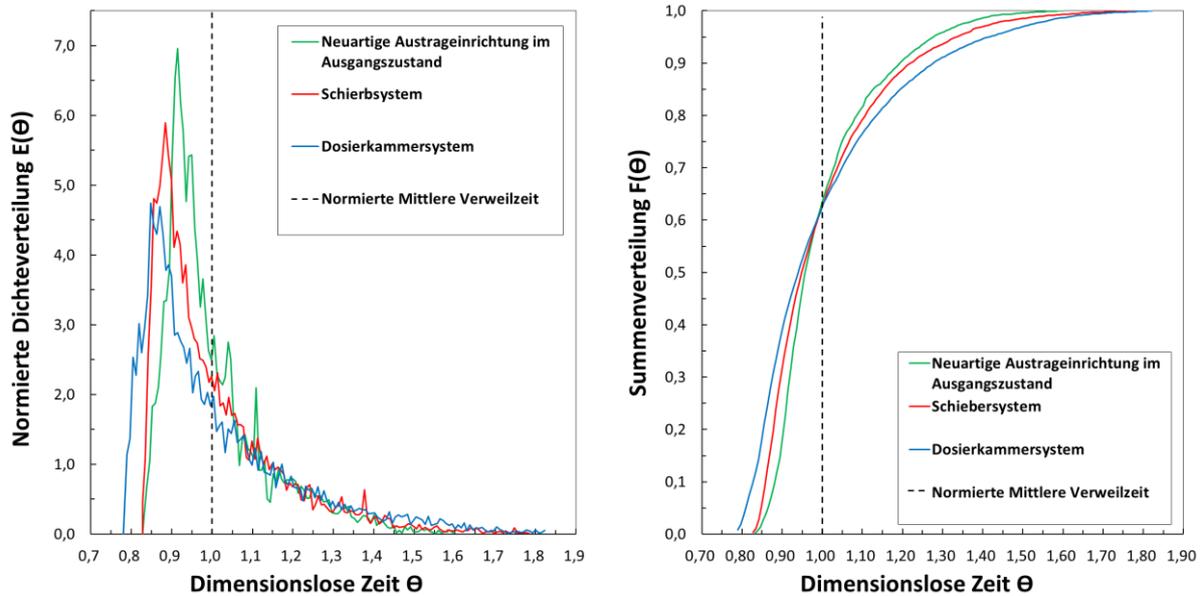


Bild 8-35: Normierte Verweilzeitverteilung für die neuartige Austrageinrichtungen im Ausgangszustand sowie unterschiedliche Austrageinrichtungen unterhalb eines Labor-Getreideschachttrockners

In **Anlage 23** sind die Verweilzeitverteilungen bei Verwendung unterschiedlicher Einstellungen an der neuartigen Austrageinrichtung dargestellt. Im vorliegenden Kapitel wurde nur die günstigste Einstellung (*Einstellung 3*) in die Auswertung einbezogen (Bild 8-36).

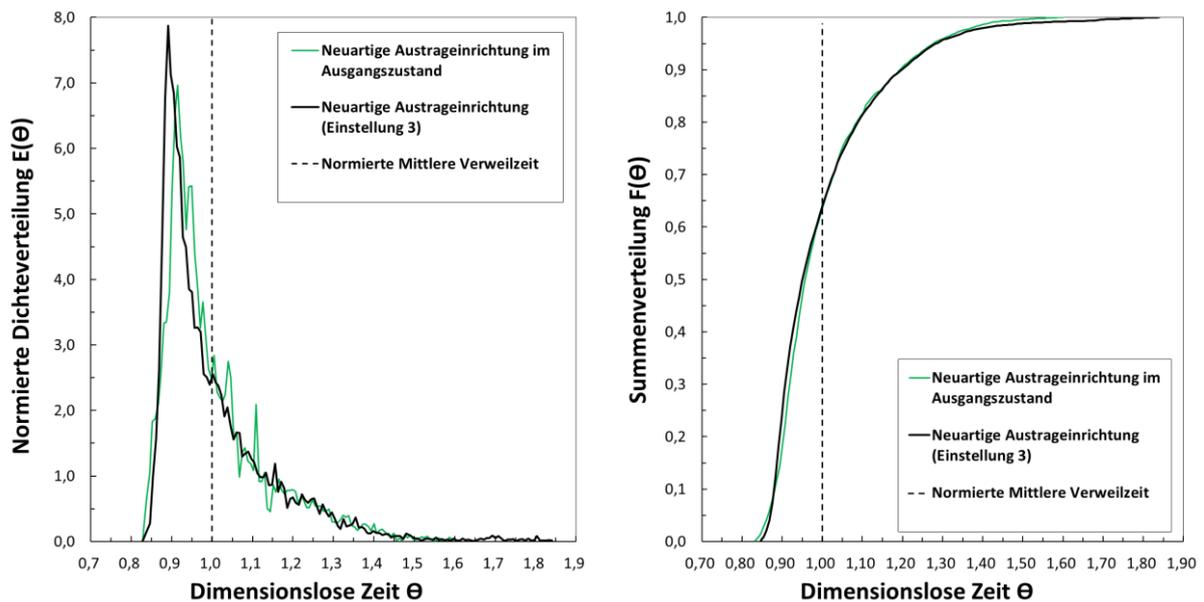


Bild 8-36: Normierte Verweilzeitverteilungen für die neuartige Austrageinrichtungen unterhalb eines Labor-Getreideschachttrockners unter Einbindung von Einstellung 3

Entgegen der Erwartung, dass die Parametrierung der neuartigen Austrageinrichtung nur marginalen Einfluss auf die Verweilzeitverteilung des komplexen Trockneraufbaus hat, zeigt sich ein deutlicher Unterschied zum *Ausgangszustand*. Zunächst fällt der sehr steile Anstieg bei $\theta = 0,85$ auf, was dafürspricht, dass nur wenige Tracer dem Hauptproduktstrom

voraneilten. Das Kurvenmaxima liegt mit $E(\theta) = 7,89$ ca. 13% höher gegenüber dem Maximum des *Ausgangszustands* ($E(\theta) = 6,96$). Eine deutliche Verbesserung zeigte sich in der Reduzierung der Vielzahl von Sprüngen im Kurvenverlauf. Dies lässt darauf schließen, dass mir Hilfe der örtlichen Ansteuerung nicht nur der trichterförmige Hauptproduktstrom (über dem gesamten Apparatequerschnitt) eine Vergleichmäßigung erfahren hat, sondern gleichzeitig damit auch der ungleichmäßigen Bewegung von Teilproduktströmen entgegen gewirkt wurde. Gegenüber dem *Ausgangszustand* wirkte der Kurvenverlauf wie geglättet. Die Anpassung durch unterschiedliche Haltezeiten hatte jedoch auch zur Folge, dass sich das Kurvenmaximum in Richtung kürzerer Verweilzeiten verschiebt.

Bild 8-37 stellt abschließend noch einmal die örtliche Parametrierung von *Einstellung 3* aus Tabelle 8-9 grafisch dar. Bereits in den Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass das Fließprofil an der transparenten Frontwand nicht unbedingt das widerspiegelt, was sich in der Apparattiefe abspielt (Trichterprofil). Um der ungleichmäßigen Schüttgutbewegung entgegenzuwirken machte es Sinn, die Haltezeit des Schrittmotors M3 kürzer zu wählen, um in der Mitte des Labortrockners einen geringeren Austragsmassenstrom einzustellen. In der Praxis könnte diese örtliche Anpassung zukünftig vollautomatisch über die Messung charakteristischer Produkteigenschaften (wie z. B. der Produkttemperatur- oder der Produktfeuchtigkeit über dem Apparatequerschnitt) erfolgen. Es wird davon ausgegangen, dass dies zum einen den hohen produkt- und apparatespezifischen Versuchsaufwand erheblich reduziert und zum anderen einen wesentlichen Beitrag leistet, solche Prozesse effizient und produktschonend zu regeln.

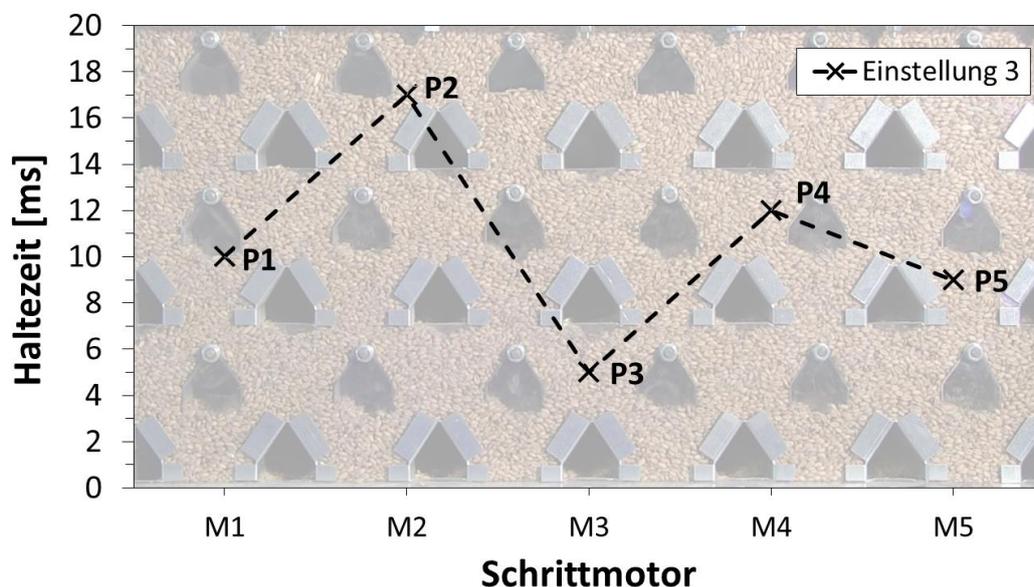


Bild 8-37: Örtliche Verteilung von unterschiedlichen Öffnungszeiten an den Schrittmotoren und verschiedenen Verschleißmechanismen der neuartigen Austrageinrichtung über der Breite des Labortrockners

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung einer neuartigen Austrageinrichtung zur Steuerung der Verweilzeitverteilung in rechteckigen Schüttgutapparaten. Die Arbeitsweise des verfolgten Lösungsansatzes hebt sich vom bisherigen Stand der Technik ab, da über dem Querschnitt des darüber befindlichen Schüttgutapparates örtlich unterschiedliche Austragsmassen eingestellt werden können. Auf diese Weise – und durch das bislang einzigartige Design der ganzflächigen Austrageinrichtung – soll es zukünftig in schüttgutbehandelnden Verfahren möglich sein, die Produktverweilzeitverteilung auf schwankende Prozessbedingungen einzustellen oder für eine gleichmäßigere Schüttgutbewegung zu sorgen. Der gleichmäßige Schüttguttransport und eine schmale Verweilzeitverteilung ist insbesondere bei der thermischen Behandlung und Aufbereitung – zur Erreichung einer hohen Prozess- und Produktqualität – oftmals unerlässlich. Zu den wichtigsten Untersuchungsmethoden, die dem umfangreichen Entwicklungsprozess dieser Arbeit zu Grunde liegen, zählen:

1. die (diskrete) mathematische Beschreibung der Partikelbewegung im Schüttgutapparat bei unterschiedlicher Arbeitsweise der neuartigen Austrageinrichtung unter Verwendung validierter Simulationsparameter aus Vorarbeiten, sowie die Modellierung der berechneten Verweilzeitverteilungen mittels Verweilzeitmodell
2. die Anwendung der experimentellen Verweilzeitanalyse bei der Testung der neuartigen Austrageinrichtung für unterschiedlichen Versuchsbedingungen und Versuchsmaterialien, sowie die Modellierung der Verweilzeitverteilungen.

Bis heute hat sich eine große Vielfalt an Austrags- und Entleerungsvorrichtungen im Bereich des Schüttguthandlings etabliert. Zur Abgrenzung des neuartigen Systems erfolgt im ersten Teil dieser Arbeit eine systematische Einordnung in den Stand der Technik. Die bestehenden Herausforderungen in der industriellen Getreidetrocknung und Koks-Trockenkühlung machen diese Felder zu bedeutenden Zielanwendungen der neuartigen Austrageinrichtung. Die konstruktive Gestaltung des neuartigen Lösungsansatzes stellt zunächst einen Prototypen dar und erfolgt produktspezifisch unter Einbeziehung der schüttgutmechanischen Eigenschaften des Versuchsmaterials. Die Auslegung der Neigungswinkel feststehender und bewegter Elemente sowie die Dimensionierung der Öffnungsquerschnitte, ist exemplarisch zu sehen und in Zukunft als Leitfaden zur Auslegung des Systems auf andere Schüttgüter geeignet.

Zur Ansteuerung der Verschleißmechanismen sind im Technikumsmaßstab elektrische Schrittmotoren eingesetzt worden, die einzeln parametrierbar sind. Über Lineargetriebe wird deren rotatorische Bewegung in eine vertikale Bewegung des keilförmigen Verschleißmechanismus übersetzt. Im großtechnischen Maßstab sind indessen auch andere Antriebsarten und Verschleißmechanismen einsetzbar. Im Kapitel 6.3 wird beschrieben, wie die Parametrierung des Verschleißmechanismus in der vorliegenden Arbeit realisiert wurde. Mit der Art der Parametrierung wird auch die Art der Betriebsweise festgelegt, mit der der Schüttgutmassenstrom und auch die Verweilzeitverteilung gesteuert wird. Vor der Testung und Inbetriebnahme der neuartigen Austrageinrichtung wurde das Zusammenspiel zwischen der örtlichen Variation des Austragsmassenstroms und der Partikelbewegung im Rechteckbehälter mit Hilfe der zweidimensionalen Diskrete Elemente Methode untersucht. Zur

Einsparung von Rechenzeit mussten jedoch Vereinfachungen getroffen werden, die im Kapitel 4.1 zusammengefasst sind. Anhand der Bewegungshistorie einer erzeugten Tracerschicht konnten für jede weitere Simulation günstigere Parameter für die Ansteuerung der Verschleißmechanismen gefunden werden, die zu einer Vergleichmäßigung der Tracerschicht beigetragen haben. Die quantitative Auswertung und der Vergleich der Simulationen erfolgten durch Auswertung der berechneten Verweilzeitverteilung und deren mathematische Beschreibung. Die neuartige Austrageinrichtung und der 2-dimensionale Rechteckbehälter wurden hierbei (im Rahmen des Dispersionsmodells) als „ideales Strömungsrohr“ betrachtet. Auch die experimentelle Testung zeigte, dass diese Betrachtungsweise zu einer guten Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Verweilzeitverteilungen führt. Die Bodensteinzahl, die das Verhältnis von Partikelkonvektion zu -dispersion (Rückvermischung) beschreibt, diente als Bezugsgröße zum Vergleich der Simulationen untereinander, sowie der Experimente. Dieses Vorgehen lieferte vielversprechende Ergebnisse, dass es mit Hilfe der neuartigen Austrageinrichtung möglich ist, die Verweilzeitverteilung im Schüttgutapparat gezielt zu steuern.

Zu Beginn der experimentellen Testung der neuartigen Austrageinrichtung wurden Versuche zur Gleichmäßigkeit und Dosiergenauigkeit durchgeführt. Diese bestätigen die Eignung des (auf die Versuchsmaterialien optimierten) Designs. Anschließend wurde ein theoretischer Ansatz zur Vorausberechnung des kontinuierlichen Austragsmassenstroms auf das neuartige System angepasst und im Rahmen von Schüttgutexperimenten mit Weizen validiert. Die Vorhersage des kontinuierlichen Austragsmassenstroms ist insbesondere für die volumetrische Dosierung von großer Bedeutung. Zur Verifizierung der Zielstellung dieser Arbeit und der angestrebten Funktionsweise der neuartigen Austrageinrichtung sind im Kapitel 8 die Ergebnisse von umfangreichen Verweilzeitexperimenten zusammengefasst. Diese bestätigen die bereits durch 2D-Simulationen erreichte Steuerung der Verweilzeitverteilung durch örtliche Variation der Austragsmasse. Festgestellt wurde jedoch, dass ein einfacher Rechteckbehälter und das (ohne schon auf das eingesetzte Versuchsmaterial) optimierte Design der neuartigen Austrageinrichtung so gut miteinander harmonieren, dass der Bedarf nach einer gezielten örtlichen Ansteuerung der Verschleißmechanismen als gering zu bewerten ist. Bei der Testung der neuartigen Austrageinrichtung an einem Getreideschacht-trockner im Technikumsmaßstab zeigte die örtliche Ansteuerung hingegen erstmals größere Wirkung. Hier sind jedoch noch weitere Untersuchungen (z. B. Trocknungsexperimente) und weiterführende Forschungsarbeiten notwendig, um den Einfluss des Lösungsansatzes besser bewerten zu können. Weiterhin erfolgte die Parametrierung der Ansteuerung bislang nur einmalig vor jedem Versuch. Für die Praxis wäre ein Regelungsmodell sinnvoll, das auf schwankende Produkteigenschaften im Schüttgutapparat reagiert und die örtlichen Austragsmassen zur Prozesszeit variiert. Diese Erweiterung der Betriebsweise der neuartigen Austrageinrichtung hätte den Vorteil, direkt auf schwankende Produkteigenschaften (z. B. Produkttemperatur- und Produktfeuchteverteilungen) reagieren zu können. Im Direktvergleich mit (vergleichbaren) konventionellen Austrageinrichtungen im Technikumsmaßstab schnitt der neuartige Lösungsansatz mit Abstand am besten ab. Mit diesem System wird eine gleichmäßigere Schüttgutbewegung erzielt, wodurch zukünftig der Prozessablauf in Schüttgut-behandelnden Apparaten optimiert werden kann.

10 Symbolverzeichnis

a	[m]	längste Halbachse
A	[m ²]	Fläche
A _M	[m ²]	Mantelfläche
b	[m]	kürzeste Halbachse, Partikelbreite
B	[m]	Breite, Öffnungsweite
Bo	[–]	Bodensteinzahl
c	[m ⁻³]	Konzentration
C	[–]	Empirische Konstante, die die Gestaltung des Trichterauslaufs berücksichtigt
d _o	[m]	Oberer Partikeldurchmesser (d _o ≈ d ₉₅)
d _v	[m]	Volumen-äquivalenter Durchmesser
D	[m]	Durchmesser
D _{a,ij}	[m]	Abstand zweier Partikelmittelpunkte
D _{ax}	[m ² · s ⁻¹]	Dispersionskoeffizient
ff	[–]	Fließfaktor
ff _c	[–]	Fließfähigkeit
F	N	Kraft
F _c	N	Beim Partikelkontakt wirkende Kraft
F _n	N	Kraftanteil in Normalrichtung
F _t	N	Kraftanteil in Scherrichtung
g	[m · s ⁻²]	Fallbeschleunigung
h	[m]	Höhe in Konstruktionszeichnungen
h ₀	[m]	Trichterhöhe
H	[m]	Höhe, Trichterformfaktor
i	[–]	Index
i _G	[–]	Getriebeübersetzung
j	[–]	Index
J	[kg · m ²]	Trägheitsmoment
k	[–]	Partikelformfaktor, Index des statistischen Moments
k _n	[N · m ⁻¹]	Kontaktsteifigkeit in Normalrichtung
k _s	[N · m ⁻¹]	Kontaktsteifigkeit in Scherrichtung
K	[–]	Parameter zur Berechnung von Trichterspannungen
l	[m]	Partikellänge
L	[m]	Länge, Strömungsweglänge
m	[kg], [–]	Masse, Trichterformfaktor
M _{S,D}	[kg]	Masse eines Austrags
M _{S,F}	[kg]	zur Fahrzeit ausgetragene Masse
M _S	[kg]	Schüttgutmasse im Behälter (Hold-Up)
M	[Nm]	Drehmoment
M _k	[Nm]	statistisches Moment
\dot{M}	[kg · s ⁻¹]	Massenstrom
n	[–], [Hz; min ⁻¹]	Anzahl, Parameter zur Berechnung von

		Trichterspannungen, Motordrehzahl
n_0	[–]	Stoffmenge am Eingang
N	[–]	Anzahl der Öffnungsschlitze
N_D	[–]	Anzahl der Austragungen/ Öffnungszyklen
N_P	[–]	Anzahl der Pixel
N_S	[–]	Anzahl der Motorschritte
N_T	[–]	Anzahl der Tracer
p	[–]	Konstante zur Berechnung der Oberfläche einer Ellipse
R	[m]	Kugel- und Partikelradius
s	[m]	Weg
s_{eff}	[m]	Effektive Öffnungsweite
t	[s]	Zeit
t_B	[s]	Betriebszeit des Trockners
t_F	[s]	Fahrzeit
t_D	[s]	Austragszeit
t_H	[s]	Haltezeit
t_P	[s]	Prozesszeit
t_R	[s]	Ruhezeit
t_S	[s]	Standzeit des Trockners
\bar{t}	[s; –]	Mittlere Verweilzeit
T	[s]	Zeit in der Parametriersoftware "MEXE02"
u	[m · s ⁻¹]	Strömungsgeschwindigkeit
U	[m]	Umfang
v	[m · s ⁻¹]	Geschwindigkeit der Verschleißmechanismen
V	[m ³]	Volumen
\dot{V}	[m ³ · s ⁻¹]	Volumenstrom
w	[m]	Siebmaschenweite
W	[m]	Weite an einer beliebigen Stelle des konischen Trichters
W_0	[m]	Öffnungsweite des konischen Auslaufs
x	[m]	Partikelposition, Weg, Partikeldurchmesser
x_D	[m]	äquivalenter Kreisdurchmesser
x_F	[m]	FERET Durchmesser
x_M	[m]	MARTIN Durchmesser
x_S	[m]	maximale Sehnenlänge
z	[m]	Stelle im Rohr bzw. Trichter; Behälterfüllhöhe, Anfang des Strömungswegs
Z	[–]	normierte Länge
δ	[m]	Partikeldurchmesser beim Durchlaufen der Auslauföffnung, Partikelüberlappung
θ	[–], [°]	dimensionslose Zeit, (Trichter-)Neigungswinkel
θ_{eb}	[°]	Neigungswinkel des keilförmigen Trichters
θ_F	[°]	Grenzwinkel für Gleitbruch
λ	[–]	Horizontallastverhältnis

λ_F	[-]	dimensionsloses Spannungsverhältnis von Motzkus
λ_{iF}	[-]	dimensionsloses Spannungsverhältnis von Motzkus
λ_n	[-]	Dämpfungskonstante in Normalrichtung
λ_t	[-]	Dämpfungskonstante in Scherrichtung
μ	[-]	Reibwiderstand bei Kontakten; arithm. Mittelwert
μ_F	[-]	dimensionsloses Spannungsverhältnis von Motzkus
μ_{iF}	[-]	dimensionsloses Spannungsverhältnis von Motzkus
μ_P	[-]	Partikel Reibungskoeffizient
μ_W	[-]	Wand Reibungskoeffizient
u	$[m \cdot s^{-1}]$	Ausfließgeschwindigkeit, Strömungsgeschwindigkeit
π	[-]	Kreiszahl PI
ρ_F	$[kg \cdot m^{-3}]$	Fluiddichte
ρ_P	$[kg \cdot m^{-3}]$	Partikeldichte
ρ_S	$[kg \cdot m^{-3}]$	Schüttdichte
σ	$[kg], [-]$	Standardabweichung
σ_1	[Pa]	größte Hauptspannung
σ'_1	[Pa]	Auflagerspannung
σ_c	[Pa]	Einaxiale Druckfestigkeit
σ_h	[Pa]	Horizontalspannung
σ_v	[Pa]	Vertikalspannung
$\sigma_{v,0}$	[Pa]	(Auflast-) Spannung
σ_w	[Pa]	Normalspannung auf die Wand
σ^2	[s], [-]	Varianz um die Mittlere Verweilzeit
σ_θ^2	[-]	Dimensionslose Varianz
τ	[s], [-]	Hydrodynamische Verweilzeit
τ_w	[Pa]	Wandschubspannung
φ_e	[°]	Effektiver Reibungswinkel
φ_i	[°]	Innerer Reibungswinkel
φ_x	[°]	Wandreibungswinkel
ψ_{Wa}	[-]	Sphärizität nach <i>Wadell</i>
ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	Winkelgeschwindigkeit
Ω	[°]	Drehwinkel

Indizes

ax	axialsymmetrischer Fließzustand
Aus	Ausgang
Ein	Eingang
h	horizontal
Kammer	Dosierkammer
keil	keilförmig
krit.	kritisch
Max	Maximum
Min	Minimum
v	vertikal

11 Literaturverzeichnis

- [1] H. Uhlemann und L. Mörl, „Regelung von Granulatgröße und -feuchte“, in *Wirbelschicht Sprühgranulation*, Berlin - Heidelberg - New York: Springer Verlag, 2000, S. 229–243.
- [2] G. Strohrmann, „Regelung chemietypischer Anlagenteile“, in *Automatisierung verfahrenstechnischer Prozesse: Eine Einführung für Techniker und Ingenieure*, Deutscher Industrie-Verlag, 2002, S. 561.
- [3] D. Schulze, „Untersuchungen zur gegenseitigen Beeinflussung von Silo und Austragorgan“, Dissertation, Braunschweig, 1991.
- [4] W. Dötsch, „Dosierdifferentialwaagen“, in *Handbuch Dosieren*, 2. Aufl., G. Vetter, Hrsg. Essen: Vulkan-Verlag, 2001, S. 347.
- [5] U. Zafar, V. Vivacqua, G. Calvert, M. Ghadiri, und J. A. S. Cleaver, „A review of bulk powder caking“, *Powder Technology*, Bd. 313. S. 389–401, 2017.
- [6] D. Schulze, *Pulver und Schüttgüter*, 3. Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag, 2014.
- [7] U. Motzkus, „Belastung von Siloböden und Auslauftrichtern durch körnige Schüttgüter“, Dissertation. Technische Universität Braunschweig, 1974.
- [8] W. Mühlbauer, H. Kuppinger, und G. W. Isaacs, „Entwicklung eines Gleichstrom/Gegenstromdurchlauf Trockners für Getreide und Mais“, *Grundlagen der Landtechnik*, Bd. 29, Nr. 4, S. 131–140, 1979.
- [9] G. G. Schouten, „Counterflow cooler for pellets“, US 4869162 A, 1989.
- [10] R. L. Woolsey, „Method and apparatus for discharging material from a cooler“, US 5522152 A, 1996.
- [11] G. D. Giesler, „Counterflow air cooler for granular materials“, US5375342 A, 1994.
- [12] R. Pass und R. Weber, „Bulk materials reactor with roof-shaped bulk materials distributor at the lower part thereof and with adjustable outlet device“, EP0577118A1, 1994.
- [13] F. Weigler, H. Scaar, G. Franke, und J. Mellmann, „Optimization of mixed flow dryers to increase energy efficiency“, *Dry. Technol.*, Bd. 35, Nr. 8, S. 985–993, 2017.
- [14] K. L. Iroba, F. Weigler, J. Mellmann, und E. Tsotsas, „Residence Time Distribution in Mixed-Flow Grain Dryers“, *Dry. Technol.*, Bd. 29, Nr. 11, S. 1252–1266, 2011.
- [15] H. Scaar, „Numerische Modellierung des Getreide-Schachttrockners“, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2016.
- [16] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, „Verordnung (EG) Nr. 178/2002“, *Bullet.*, 2002. [Online]. Verfügbar unter: http://www.bfr.bund.de/cm/343/2002_178_de_efs.pdf.
- [17] W. Fröhlich, „Lebensmittel“, in *Beilage in DIE WELT und DIE WELT KOMPAKT*, Reflex Verlag, 2016, S. 5.
- [18] G. Franke, F. Weigler, T. Teodorov, und J. Mellmann, „Austragen über die ganze Fläche“, *Schüttgut*, Bd. 21, Nr. 4, S. 52–56, 2015.
- [19] H. Schubert, „Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik“, D. Schulze und J. Schwedes, Hrsg. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, S. 1214.
- [20] W. Stahl und R. Stadler, „Systeme zum Ein- und Austrag von Schüttgütern in oder aus Druckräumen“, *Chemie Ing. Tech.*, Bd. 56, Nr. 10, S. 755–768, 1984.
- [21] C. R. Establishment, „Methods of improving coal discharge from hoppers and bunkers by mechanical and chemical means“, Stoke Orchard, 1993.
- [22] H. Franken u. a., *Silo-Handbuch*. Ernst & Sohn Verlag, 1988.
- [23] J. Tomas, „Partikelmechanik und Schüttguttechnik“, *Vorlesungsskript*, 2012.
- [24] D. Uhlhorn, „Shaft Drier for Corn with Automatically Regulated Discharge of the Dried Material“, GB000190920758A, 1910.
- [25] O. Randolph, „Improvements in or relating to Apparatus for Drying Granular Material“, S. 10, 1923.
- [26] H. S. Limited, J. F. Lockwood, und G. Watts, „Improvements in or relating to the Conditioning of Grain“, GB000000469019A, 1936.
- [27] G. Bühler, „Austrageinrichtung für mehligere Produkte enthaltende Silozellen“, AT000000199126B, 1958.

- [28] W. Mühlbauer, „Austrageinrichtungen“, in *Handbuch der Getreidetrocknung*, 2. Aufl., Clenze: Agrimedia GmbH & Co. KG., 2009, S. 382–386.
- [29] B. Sandmeier und A. Balsmeier, J. Burmeister, „Austragvorrichtung für Getreidetrockner“, DE19822011C1, 1998.
- [30] K. L. Iroba, J. Mellmann, F. Weigler, T. Metzger, und E. Tsotsas, „Particle velocity profiles and residence time distribution in mixed-flow grain dryers“, *Granul. Matter*, Bd. 13, Nr. 2, S. 159–168, 2011.
- [31] J. Mellmann, K. L. Iroba, T. Metzger, E. Tsotsas, C. Mészáros, und I. Farkas, „Moisture content and residence time distributions in mixed-flow grain dryers“, *Biosyst. Eng.*, Bd. 109, Nr. 4, S. 297–307, 2011.
- [32] F. Weigler, H. Scaar, und J. Mellmann, „Investigation of Particle and Air Flows in a Mixed-Flow Dryer“, *Dry. Technol.*, Bd. 30, S. 1730–1741, 2012.
- [33] F. Weigler, G. Franke, H. Scaar, und J. Mellmann, „Experimente zum Partikelfluss an einer neu entwickelten Geometrie für Dächerschachttrockner“, *Landtechnik*, Bd. 69, Nr. 1, S. 30–34, 2014.
- [34] F. Weigler, J. Mellmann, G. Franke, und H. Scaar, „Experimental Studies on a Newly Developed Mixed-Flow Dryer“, *Dry. Technol.*, Bd. 31, S. 1736–1743, 2013.
- [35] T. Wehry und M. H. Pahl, „Beeinflussung des Fließverhaltens von scharfkantigem Schüttgut in Bunkern mit mehreren keilförmigen Auslässen“, *Aufbereit. Tech.*, Bd. 46, Nr. 10, S. 44–51, 2005.
- [36] *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter*. Deutsches Institut für Normung DIN, 2010, S. 251–252.
- [37] M. Koenen, „Berechnung des Seiten- und Bodendrucks in Silozellen“, *Cent. der Bauverwaltung*, Nr. 16, S. 446–449, 1896.
- [38] H. A. Janssen, „Versuche über Getreidedruck in Silozellen“, *Zeitschr. d. Vereines Dtsch. Ingenieure*, Bd. 39, Nr. 35, S. 1045–1049, 1895.
- [39] J. Tomas, „Partikelmechanik und Schüttguttechnik“, *Vorlesung*, 2015.
- [40] *Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter (DIN EN 1991-4:2010-12)*. Deutsches Institut für Normung DIN, 2012.
- [41] P. C. Arnold und A. G. McLean, „Improved analytical flowfactors for mass-flow hoppers“, *Powder Technol.*, 1976.
- [42] D. Schulze und J. Schwedes, „Experimental Investigation of Silo Stresses under Consideration of the Influence of Hopper / Feeder Interface“, *KONA Powder Part. J.*, Nr. 8, S. 134–144, 1990.
- [43] C. R. Woodcock und J. S. Mason, *Bulk Solids Handling: An Introduction to the Practice and Technology*, Bd. 237. Springer Netherlands, 1987.
- [44] M. Hager, „Untersuchungen zur Befüllung und zum Gutaustrag von Bunkern mit Abzugsbändern“, TH Hannover, 1965.
- [45] J. Strusch, „Wandnormalspannungen in einem Silo mit Einbau und Kräfte auf Einbauten“, TU Braunschweig, 1996.
- [46] G. G. Enstad, „A novel theory on the arching and doming in mass flow hoppers“, The Chr. Michelsen Inst., Bergen, Norwegen, 1981.
- [47] E. J. Benink, „Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes“, University of Twente, 1989.
- [48] A. W. Jenike, „Storage and Flow of Solids“, Salt Lake City, Bulletin No. 123, 1970.
- [49] A. W. Jenike, „Gravity flow of bulk solids“, *Bull. no. 108*, Bd. 52, Nr. 29, University of Utah, Salt Lake City, 1961.
- [50] K. Borho, R. Polke, K. Wintermantel, H. Schubert, und K. Sommer, „Produkteigenschaften und Verfahrenstechnik“, *Chemie Ing. Tech.*, Bd. 63, Nr. 8, S. 792–808, 1991.
- [51] M. Wójcik, M. Sondej, K. Rejowski, und J. Tejchman, „Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and columns“, *Powder Technol.*, Bd. 311, S. 537–555, 2017.
- [52] G. A. Rombach, „Schüttguteinwirkungen auf Silozellen“, in *Schüttguteinwirkungen auf Silozellen*, 2003, S. 191–200.

- [53] M. E. Myers und M. Sellers, „Chemical Engineering, tripos part 2. Research Project Report“, University of Cambridge., 1971.
- [54] R. L. Brown und J. C. Richards, „Profile of flow of granules through apertures“, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, Bd. 38, S. 243–250, 1960.
- [55] A. Janda, I. Zuriguel, und D. Maza, „Flow Rate of Particles through Apertures Obtained from Self-Similar Density and Velocity Profiles“, *Phys. Rev. Lett.*, Bd. 108, Nr. 24, S. 248001-1-248001–5, 2012.
- [56] H. E. Rose und T. Tanaka, „Rate of discharge of granular materials from bins and hoppers“, *Engineer*, Bd. 208, S. 465–469, 1959.
- [57] S. Humby, U. Tüzün, und A. B. Yu, „Prediction of hopper discharge rates of binary granular mixtures“, *Chem. Eng. Sci.*, Bd. 53, Nr. 3, S. 483–494, 1998.
- [58] W. A. Beverloo, H. A. Leniger, und J. Van der Felde, „The flow of granular solids through orifices“, *Chem. Eng. Sci.*, Bd. 15, S. 260–269, 1961.
- [59] J. R. Johanson, „Method of calculating rate of discharge from hoppers and bins“, *Trans. Min. Engrs.*, Bd. 232, S. 69–80, 1965.
- [60] M. Oertel, „Herleitungen aus der Bernoulli-Gleichung“, Skript zur Hydromechanik, Bergische Universität Wuppertal, 2008.
- [61] J. Mellmann und T. Teodorov, „Solids transport in mixed-flow dryers“, *Powder Technol.*, Bd. 205, Nr. 1–3, S. 117–125, 2011.
- [62] British Materials Handling Board, „Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers“, B. M. H. Board, Hrsg. 1985.
- [63] K. Dialer und A. Löwe, *Chemische Reaktionstechnik*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 1975.
- [64] K. Schwister und V. Leven, *Verfahrenstechnik für Ingenieure - Lehr- und Übungsbuch*. München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [65] M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik - Grundlagen und apparative Umsetzungen*, 2. Aufl. Berlin - Heidelberg - New York: Springer Verlag, 2012.
- [66] P. Eichler und G. Dau, „Verweilzeitverteilung von Schwerkraftmischern“, *Chemie Ing. Tech.*, Bd. 70, Nr. 12, S. 1545–1548, 1998.
- [67] G. Dau, „Untersuchungen zur Auslegung von Mischsilos“, *Bornimer Agrartech. Berichte*, Bd. 65, S. 82–94, 2009.
- [68] G. S. Tucker und P. M. Withers, „Determination of residence time distribution of nonsettling food particles in viscous food carrier fluids using hall effect sensors“, *J. Food Process Eng.*, Bd. 17, Nr. 4, S. 401–422, 1994.
- [69] R. B. MacMullin und M. Weber, „The theory of short-circuiting in continuous-flow mixing vessels in series and kinetics of chemical reactions in such systems“, *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, Bd. 31, Nr. 2, S. 409–458, 1935.
- [70] P. Danckwerts, „Continuous flow systems: Distribution of residence times“, *Chem. Eng. Sci.*, Bd. 2, Nr. 1, S. 1–13, 1953.
- [71] H. M. Hiersig, Hrsg., *Lexikon Produktionstechnik Verfahrenstechnik*, 2. Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag, 1995.
- [72] R. Weinkötter und H. Gericke, *Mischen von Feststoffen*. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag, 1995.
- [73] W. Reschetilowski, *Technisch-Chemisches Praktikum*. Weinheim: Wiley-VCH, 2002.
- [74] P. A. Cundall und O. D. Strack, „A discrete element model for granular assemblies“, *Géotechnique*, Bd. 29, Nr. 1, S. 47–65, 1979.
- [75] F. Weigler und J. Mellmann, „Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer“, *Particuology*, Bd. 12, Nr. 1, S. 33–39, 2014.
- [76] P. Müller, W. Schubert, M. Khanal, und J. Tomas, „Einführung in die Diskrete Elemente Methode“, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2017.
- [77] F. Weigler, „Diskrete Untersuchung des Aufheizverhaltens von Partikelschüttungen“, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2012.
- [78] C. Jakob, „Numerische Modellierung des Verflüssigungsverhaltens von Kippen des Braunkohlenbergbaus beim und nach dem Wiederaufgang von Grundwasser“, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2016.

- [79] C. Jakob und H. Konietzky, „Handbuch Partikelmethode - Eine Übersicht“, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2012.
- [80] H. P. Zhu, Z. Y. Zhou, und A. B. Y. Yang, „Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments“, *Chem. Eng. Sci.*, Bd. 62, Nr. 13, S. 3378–3396, 2007.
- [81] C. Richter, A. Katterfeld, und M. Pusch, „Multilevel DEM - Simulation des Bewegungsverhaltens von Getränkeflaschen im Pulk“, *Logist. J. nicht-referierte Veröffentlichung*, S. 9, 2018.
- [82] M. Rackl, „Verifikation eines methodischen Kalibrierungsverfahrens für Diskrete-Elemente-Methode-Parameter unter Einbeziehung des Rayleigh-Zeitschritts“, Technischen Universität München, 2018.
- [83] J. Horabik und M. Molenda, „Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review“, *Biosyst. Eng.*, Bd. 147, S. 206–225, 2016.
- [84] J. M. Boac, R. P. K. Ambrose, M. E. Casada, R. G. Maghirang, und D. E. Maier, „Applications of Discrete Element Method in Modeling of Grain Postharvest Operations“, *Food Eng. Rev.*, Bd. 6, Nr. 4, S. 128–149, 2014.
- [85] E. M. B. Campello, „International Journal of Non-Linear Mechanics A computational model for the simulation of dry granular materials“, *Int. J. Non. Linear. Mech.*, Bd. 106, S. 89–107, 2018.
- [86] C. J. Coetzee, „Review: Calibration of the discrete element method“, *Powder Technol.*, Bd. 310, S. 104–142, 2017.
- [87] S. Kamath, A. Kunte, P. Doshi, und A. V. Orpe, „Flow of granular matter in a silo with multiple exit orifices: Jamming to mixing“, *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, Bd. 90, Nr. 6, 2014.
- [88] T. Wehry, „3D-Simulationsmodell für bewegte Schüttgüter mit unregelmäßig geformten Partikeln“, Universität Paderborn, 2008.
- [89] C. González-Montellano, F. Ayuga, und J. Y. Ooi, „Discrete element modelling of grain flow in a planar silo: influence of simulation parameters“, *Granul. Matter*, Bd. 13, S. 149–158, 2011.
- [90] P. W. Cleary und M. L. Sawley, „DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge“, *Appl. Math. Model.*, Bd. 26, Nr. 2, S. 89–111, 2002.
- [91] Y. Yu und H. Saxén, „Discrete element method simulation of properties of a 3D conical hopper with mono-sized spheres“, *Adv. Powder Technol.*, Bd. 22, S. 324–331, 2011.
- [92] R. Weiler, G. Dau, und S. Ripperger, „Simulation von Impulsversuchen mit BINSERT-Mischern mittels Diskrete-Elemente-Methode“, *Chemie Ing. Tech.*, Bd. 81, Nr. 12, S. 1983–1989, 2009.
- [93] A. Anand, J. S. Curtis, C. R. Wassgren, B. C. Hancock, und W. R. Ketterhagen, „Predicting discharge dynamics of wet cohesive particles from a rectangular hopper using the discrete element method (DEM)“, *Chem. Eng. Sci.*, Bd. 64, Nr. 24, S. 5268–5275, 2009.
- [94] A. Anand, J. S. Curtis, C. R. Wassgren, B. C. Hancock, und W. R. Ketterhagen, „Predicting discharge dynamics from a rectangular hopper using the discrete element method (DEM)“, *Chemie Eng. Sci.*, Bd. 63, Nr. 24, S. 5821–5830, 2008.
- [95] Q. J. Zheng, B. S. Xia, R. H. Pan, und A. B. Yu, „Prediction of mass discharge rate in conical hoppers using elastoplastic model“, *Powder Technol.*, Bd. 307, S. 63–72, 2017.
- [96] W. R. Ketterhagen, J. S. Curtis, C. R. Wassgren, und B. C. Hancock, „Predicting the flow mode from hoppers using the discrete element method“, *Powder Technol.*, Bd. 195, Nr. 1, S. 1–10, 2009.
- [97] P. Parafiniuk, M. Molenda, und J. Horabik, „Discharge of rapeseeds from a model silo: Physical testing and discrete element method simulations“, *Comput. Electron. Agric.*, Bd. 97, S. 40–46, 2013.
- [98] G. H. Ristow, „Outflow rate and wall stress for two-dimensional hoppers“, *Phys. A*, Bd. 235, S. 319–326, 1997.
- [99] C. González-Montellano, A. Ramirez, J. M. Fuentes, und F. Ayuga, „Numerical effects

- derived from en masse filling of agricultural silos in DEM simulations“, *Comput. Electron. Agric.*, Bd. 81, S. 113–123, 2012.
- [100] R. Balevičius, I. Sielamowicz, Z. Mróz, und R. Kačianauskas, „Investigation of wall stress and outflow rate in a flat-bottomed bin: A comparison of the DEM model results with the experimental measurements“, *Powder Technol.*, Bd. 214, S. 322–336, 2011.
- [101] J. Wu, J. Binbo, J. Chen, und Y. Yang, „Multi-scale study of particle flow in silos“, *Adv. Powder Technol.*, Bd. 20, S. 62–73, 2009.
- [102] X. Ding, L. Zhang, H. Zhu, und Q. Zhang, „Effect of Model Scale and Particle Size Distribution on PFC3D Simulation Results“, *Rock Mech. Rock Eng.*, Bd. 47, Nr. 6, S. 2139–2156, 2014.
- [103] L. Kondic, „Simulations of two dimensional hopper flow“, *Granul. Matter*, Bd. 16, S. 235–242, 2014.
- [104] J. Horabik, P. Parafiniuk, und M. Molenda, „Stress profile in bulk of seeds in a shallow model silo as influenced by mobilisation of particle-particle and particle-wall friction: Experiments and DEM simulations“, *Powder Technol.*, 2018.
- [105] N. Dallinger und T. Risch, „Die Diskrete Elemente Methode in der Flaschenförderung“, *Logist. J. Proc.*, S. 8, 2017.
- [106] S. Sokhansanj und W. Lang, „Prediction of Kernel and Bulk Volume of Wheat and Canola during Adsorption and Desorption“, *J. Agric. Eng. Res.*, Bd. 63, S. 129–136, 1996.
- [107] S. Griebe, „Modellierung der Verbrennung von Braunkohle in einer Zykloidföhrung unter Berücksichtigung der Schadstoffemissionen CO, NOX und SO₂“, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2008.
- [108] J.-H. Ham, „Zur Berechnung der Verweilzeitverteilung von Partikeln“, TU Chemnitz, 2003.
- [109] S. Zürcher, „Keramische Schwämme als Trägerstruktur zur katalytischen Gasumsetzung in Gas-Partikel-Filtern“, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011.
- [110] E. Müller-Erlwein, *Chemische Reaktionstechnik*, 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Spektrum, 2015.
- [111] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering*, 3. Aufl. New York Chichester Weinheim: John Wiley & Sons, 1999.
- [112] W. Storhas, *Bioverfahrensentwicklung*, 2. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
- [113] O. Levenspiel und W. K. Smith, „Notes on the diffusion-type model for the longitudinal mixing of fluids in flow“, *Chem. Eng. Sci.*, Bd. 6, S. 227–233, 1957.
- [114] G. Emig und E. Klemm, *Chemische Reaktionstechnik*, 6. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 2017.
- [115] R. Brand, U. Walsemann, T. Blumöhr, K. Kott, und A. Stuckemeier, „Erzeugung und Verbrauch von Nahrungsmitteln“, Wiesbaden, 2006.
- [116] „Erntbericht 2019 - Mengen und Preise“, Bonn, 2019.
- [117] J. Mellmann, „Getreide trocknen energieeffizient und schonend“, Potsdam, 2015.
- [118] N. N. Mohsenin, *Physical Properties of Plant and Animal Materials: Structure, Physical Characteristics, and Mechanical Properties*, 2. Aufl. Gordon & Breach Science Publishers Ltd, 1986.
- [119] J. Kersten, H.-R. Rohde, und E. Nef, *Mischfutter Herstellung*, 3. Aufl. Clenze: Agrimedia GmbH, 2010.
- [120] J. M. Boac, M. E. Casada, und R. G. Maghirang, „Material and Interaction Properties of selected Grains and Oilseeds for modeling Discrete Particles“, *Trans. ASABE*, Bd. 53, Nr. 4, S. 1201–1216, 2010.
- [121] Microtrac-GmbH, „Microtrac dynamische Bildanalyse PartAn Produktfamilie“, 2015.
- [122] P. Müller, A. Omarev, A. Schlinkert, B. Ebenau, und J. Thomas, „Zwischenbericht zum Forschungs- und Entwicklungsauftrag, Messung und Bewertung der mechanischen Partikel- und Schüttguteigenschaften von Weizen und Hanf-Samen“, 2012.
- [123] C. Erdmann und B. C. Schäfer, „Untersuchungen zur Bestimmung von Qualitätseigenschaften bei Weizen durch Wiederbefeuchtung trockener Kornproben“,

- in *DLG-Technikertagung - 3. Fachtagung des DLG-Ausschusses „Versuchswesen in der Pflanzenproduktion“*, 2012, S. 106–113.
- [124] H. Kibar und T. Öztürk, „Physical and mechanical properties of soybean“, *Int. Agrophysics*, Bd. 22, S. 239–244, 2008.
- [125] M. Stieß, „Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1“, *Springer*, S. 503, 2009.
- [126] J. R. Nunhez, *Advances in Industrial Mixing - A Companion To The Handbook Of Industrial Mixing*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [127] S. Gupta, „INFLUENCE OF PARTICLE SIZE ON FLOW PROPERTIES OF BULK SOLIDS TESTED VIA A SCALED-UP JENIKE SHEAR CELL“, University of Florida, 2009.
- [128] T. Hesse und O.-H. Hoffmann, „Scherverhalten körniger landwirtschaftlicher Haufwerke“, *Grundlagen der Landtechnik*, Bd. 27, Nr. 6, S. 205–213, 1977.
- [129] C. Onu John, „Selected Physical Properties of Soybean In Relation To Storage Design“, *Int. J. Eng. Res. Appl.*, Bd. 6, Nr. 2, S. 71–75, 2016.
- [130] T. Teodorov, „Optimierung und Erprobung der Schüttgut- Austragsvorrichtung an einem Getreide- Schachttrockner“, Technische Universität Sofia, 2006.
- [131] L. Kocsis, T. Teodorov, J. Mellmann, K. Gottschalk, C. Mészáros, und I. Farkas, „Analis of grain mass flow experiments in a mixed-flow dryer“, in *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, 2008, S. 1608–1612.
- [132] J. Ravenet, „Silo Problems“, *Bulk Solids Handl.*, Bd. 1, Nr. 4, S. 667–679, 1981.
- [133] J. Schwedes und D. Schulze, „Measurement of flow properties of bulk solids“, *Powder Technol.*, Bd. 61, Nr. 1, S. 59–68, 1990.
- [134] *Lastannahmen für Bauten; Lasten in Silozellen (DIN 1055-6)*. Deutsches Institut für Normung DIN, 1987.
- [135] H. Pasternak, H.-U. Hoch, und D. Füg, „Stahltragwerke im Industriebau“, in *Stahltragwerke im Industriebau*, 1. Aufl., Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2010, S. 297.
- [136] L. ter Borg, „Einfluß des Wandmaterials auf das Auslaufverhalten von Schüttgütern aus Silos“, *Chemie Ing. Tech.*, Bd. 58, S. 588–590, 1986.
- [137] H. Wilms, „No Title“, in *Lagern, Fördern, und Dosieren von Schüttgütern*, 2. Aufl., M. H. Pahl, R. Ernst, und H. Wilm, Hrsg. Fachbuchverlag Leipzig/ Verlag TÜV Rheinland, 1993, S. 87.
- [138] J. Schwedes, „Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern“, Weinheim, 1968.
- [139] D. M. Walker, „An approximate theory for pressures and arching in hoppers“, *Chem. Eng. Sci.*, Bd. 21, Nr. 11, S. 975–997, 1966.
- [140] P. C. Arnold und A. G. Mclean, „An analytical solution for the stress function at the wall of converging channel“, *Powder Technol.*, Bd. 13, Nr. 2, S. 255–260, 1976.
- [141] G. G. Enstad, „On the theory of arching in mass-flow hoppers“, *Chem. Eng. Sci.*, Bd. 30, Nr. 10, S. 1273–1283, 1975.
- [142] M. Wischniewski, „Entwicklung und Optimierung einer neuartigen Austrageinrichtung für Schüttgüter“, Bachelorarbeit, TU Brandenburg, 2017.
- [143] G. Franke, J. Mellmann, H. Scaar, und F. Weigler, „Austragsvorrichtung für Schüttgut“, DE 10 2016 101 508 B3, 2016.
- [144] L. Sachs, *Statistische Auswertungsmethoden*, 2. Aufl. Berlin - Heidelberg - New York: Springer Verlag, 1969.
- [145] T. Teodorov, H. Scaar, F. Weigler, und J. Mellmann, „Berechnung des Schüttgutmassenstroms in Dächerschachttrocknern“, *Landtechnik*, Bd. 66, Nr. 6, S. 410–413, 2011.
- [146] F. Weigler, H. Scaar, G. Franke, und J. Mellmann, „Optimization of Mixed Flow Dryers to Increase Energy Efficiency“, *Drying Technol.*, 2016.
- [147] Y. Gao, F. J. Muzzio, und M. G. Ierapetritou, „A review of the Residence Time Distribution (RTD) applications in solid unit operations“, *Powder Technol.*, Bd. 228, S. 416–423, 2012.

12 Verzeichnis der Bilder und Tabellen

Bild 1-1:	Schematische Darstellung eines Silos mit Auslauftrichter und nachgeschalteter Zellenradschleuse (links) und eines Durchlauf-trockners mit einer über dem gesamten Apparatequerschnitt abziehenden Drehwalzen-Austrageinrichtung (rechts)	Seite 6
Bild 1-2:	Ganzflächige Austrageinrichtung mit mehreren feststehenden Leitblechen (rot dargestellt)	Seite 8
Bild 1-3:	Beispielhafte Darstellung für die Ansteuerung der neuartigen Austrageinrichtung mit unabhängiger Freigabe (grün) der Verschleißmechanismen in a) den Randbereichen und b) der Mitte	Seite 8
Bild 2-1:	Einteilung gängiger Austrageinrichtungen nach der Behältergestaltung	Seite 10
Bild 2-2:	Prinzip-Skizze ganzflächig arbeitender Austrageinrichtungen mit a) Kippbalken-boden, b) Schneckenboden, c) rotierenden Schneckenwellen und d) rotierender Räumvorrichtung	Seite 11
Bild 2-3:	Beispiele für Verschleißmöglichkeiten von ganzflächigen Austrageinrichtungen mit einer Vielzahl keilförmiger Auslauftrichter a) Schieber bzw. Schlitzboden, b) Drehflügel, c) Drehwalze, d) Pendelschieber, e) Muschelschieber, f) Pendel, g) Dosierkammerschieber	Seite 12
Bild 2-4:	Kräftegleichgewicht am Scheibenelement im Behälterschafft (basierend auf Schulze in [6, S. 278])	Seite 13
Bild 2-5:	Spannungsverläufe in einem Massenflusssilo a) im aktiven Spannungszustand und b) im passiven Spannungszustand (basierend auf [22], [41])	Seite 16
Bild 2-6:	Kräftegleichgewicht am Scheibenelement im Trichter und schematische Darstellung der anzunehmenden Höhen des Trichters (basierend auf Schulze in [6, S. 291])	Seite 16
Bild 2-7:	„Effektive Öffnungsweite“ beim Passieren der Partikel (basierend auf Janda in [55])	Seite 19
Bild 2-8:	Eingangssignale (oben) und Antwortsignale als Verweilzeitverteilungen (unten)	Seite 20
Bild 2-9:	Messung der Konzentration schwarzer Kunststofftracer (Quelle: Dau [67])	Seite 21
Bild 2-10:	Schema des Kontaktmodells mit viskoser Dämpfung λ_n und Federdämpfung k_n in Normalrichtung (links) sowie in Scherrichtung (rechts) mit Reibwiderstand μ	Seite 24
Bild 2-11:	Partikelüberlappung bei Kontakt (basierend auf Jakob in [79])	Seite 24
Bild 2-12:	Beispiel für zusammengesetzte (runde) Partikel zu einem elliptischen „Clump“ in Form eines Weizenkorns (Quelle: Weigler und Mellmann [75])	Seite 27
Bild 4-1:	Exemplarischer Ausschnitt einer in 2D berechneten Schüttung runder Partikel mit Darstellung der am Kontakt wirkenden Normalkräfte (a) und Scherkräfte (b)	Seite 30
Bild 4-2:	In PFC2D erstellte Behälter- und Austragsgeometrie mit roter	Seite 31

	Startstruktur (unter Angabe der realen Höhe [cm]) und implementierter Partikel-Zählfunktion unterhalb der Auffangbehälter	
Bild 4-3:	Schüttgutbehälter mit Traceraufgabe und qualitativ dargestelltem Fließprofil (links) sowie schematische Darstellung eines offenen, geschlossenen und halboffenen Systems (rechts)	Seite 33
Bild 5-1:	Aufbau des PartAn3D Messgerätes (Quelle: Fa. Microtrac Produktbeschreibung)	Seite 37
Bild 5-2:	Beschreibung der Partikelgröße; unregelmäßige Partikelform (links), äquivalente Kreisfläche (rechts)	Seite 37
Bild 5-3:	Gemessene Partikelgrößenverteilung für getrocknete Weizenkörner (vgl. rechts)	Seite 37
Bild 5-4:	Gemessene Partikelgrößenverteilung für befeuchtete Weizenkörner	Seite 38
Bild 5-5:	Gemessene Partikelgrößenverteilung für Weizenschrot	Seite 39
Bild 5-6:	Gemessene Partikelgrößenverteilung für Sojabohnen (vgl. rechts)	Seite 39
Bild 5-7:	Partikelform eines Weizenkorns: a) Darstellung als Rotationsellipsoid, b) Schattenbild eines Weizenkorns und c) volumenäquivalente Kugel	Seite 40
Bild 5-8:	Grundlegender Aufbau des Labor-Getreideschachttrockners (a) und Trocknungssektion vom Typ I (b), sowie Trocknungssektion vom Typ II (c)	Seite 45
Bild 5-9:	Versuchsanlage mit modular aufgebautem Rechteckbehälter	Seite 46
Bild 5-10:	Schrägbild und Seitenansicht der Schieber-Austrageinrichtung	Seite 47
Bild 5-11:	Schrägbild und Seitenansicht der Austrageinrichtung mit Dosierkammern	Seite 48
Bild 5-12:	3D-Zeichnung der Probenschublade (L600 x B400 mm) mit herausnehmbaren Behältern (L99 x B97 x H36 mm)	Seite 49
Bild 5-13:	Aufgabe eines Dirac-Impulses (a) durch Tracerinjektion in den Zulaufstrom eines Silos oder (b, c) durch Einbringung einer horizontalen Tracerschicht in die Schüttung unterhalb des Zulaufs. Qualitative Verläufe der zu erwartenden Verweilzeitverteilungen am Austrag (unten) sowie der vertikalen Partikelgeschwindigkeitsverteilungen in der Schüttung (gestrichelte, rote Linien)	Seite 50
Bild 5-14:	Einbringen gefärbter Weizen Tracerpartikel (Draufsicht)	Seite 51
Bild 5-15:	Aufbau des Messplatzes zur Bestimmung der Verweilzeitverteilung (links) und Darstellung des Farbwinkels der Tracerpartikel (rechts)	Seite 52
Bild 5-16:	Vergleich zwischen der berechneten Farbpixel-Anzahl und der gemessenen (gezählten) Anzahl an Tracerpartikeln	Seite 52
Bild 5-17:	Angenommene Spannungsverläufe in einem Behälter mit ganzflächiger Austrag-Einrichtung und Schlitzboden (Schieber) im a) Befüllzustand und b) Entleerungszustand	Seite 53
Bild 5-18:	Bestimmung der Vertikalspannung in einem Behälter a) ohne	Seite 55

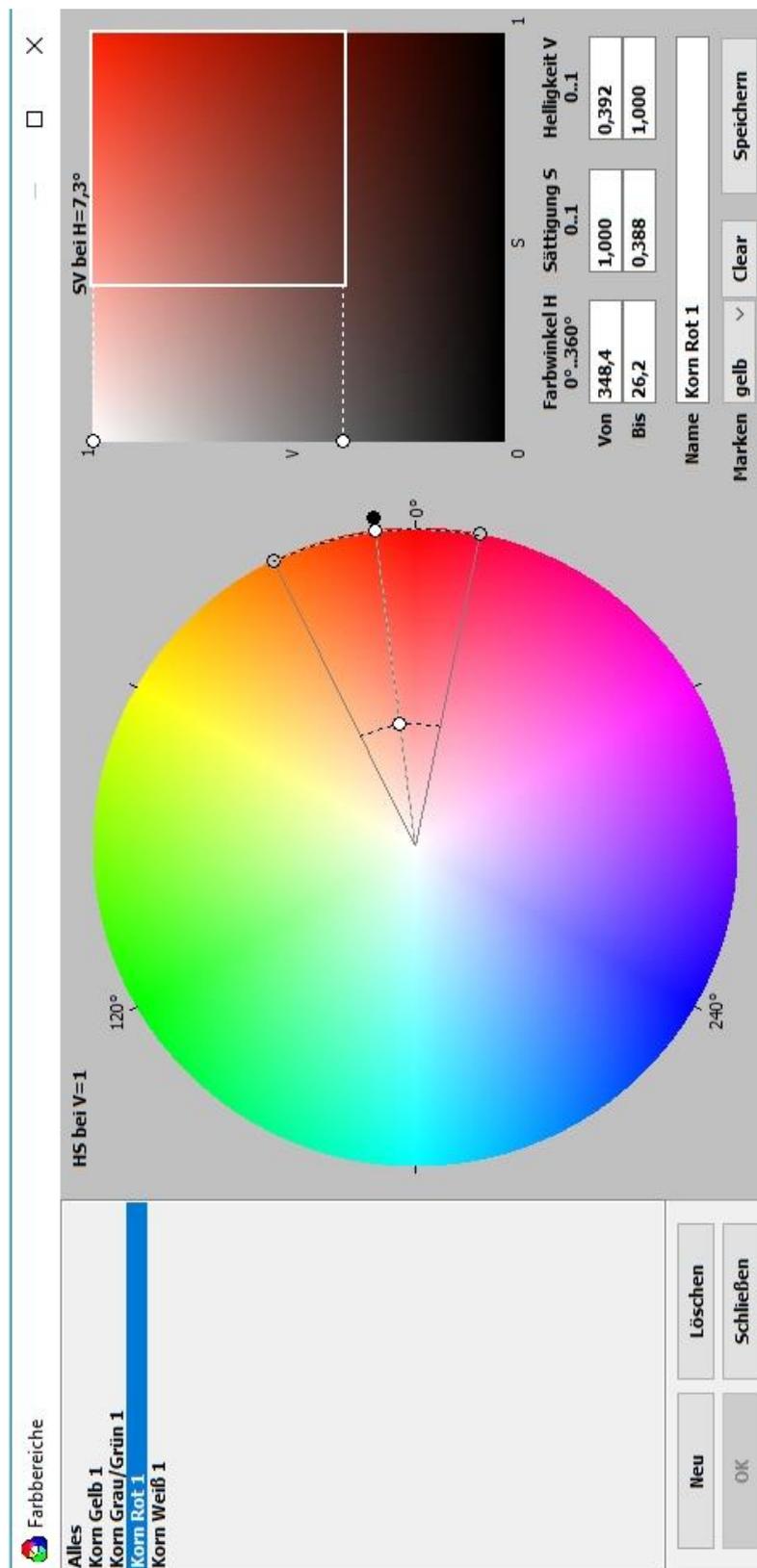
	Auslauftrichter und b) mit Auslauftrichtern	
Bild 6-1:	Jenike-Diagramm zur Auslegung des Trichterneigungswinkels für keilförmige Trichter, mit $L > 3B$ (frei nach [6])	Seite 56
Bild 6-2:	Dimensionierung der Öffnungsweite anhand der Verfestigungsfunktion	Seite 60
Bild 6-3:	CAD-Konstruktion (SolidWorks 2014) der neuartigen Austrageinrichtung mit Beschriftung wesentlicher Bauteile und transparent dargestellter Frontwand	Seite 62
Bild 6-4:	Darstellung unterschiedlicher Fahrweisen a) gleichzeitige Freigabe, b) zeitlich und örtlich unabhängige Freigabe c) Entleerung über das Füllvolumen	Seite 63
Bild 6-5:	Auslauföffnung der neuartigen Austrageinrichtung	Seite 64
Bild 6-6:	Qualitativer Verlauf der Fahrkurve des Verschleißmechanismus (Öffnungszyklus)	Seite 65
Bild 6-7:	Darstellung der Kalibrierkurven zur a) Einstellung der Austragsmasse ($t_H = 0$ ms) und b) Parametrierung der Motordrehzahl bei entsprechender Austragszeit	Seite 67
Bild 6-8:	Fahrzeit für einen gesamten Öffnungs- und Schließvorgang (Hub) als Funktion des eingestellten Hubweges	Seite 67
Bild 6-9:	Resultierender Massenstrom bei gleichmäßiger Ansteuerung der Verschleißmechanismen	Seite 72
Bild 6-10:	Resultierender Massenstrom bei asymmetrischer Ansteuerung der Verschleißmechanismen	Seite 72
Bild 7-1:	Gegenüberstellung der qualitativen Spannungsverläufe im aktiven (a) und passiven (b) Spannungszustand eines Silos [22], [41] mit 2D-DEM-Simulationen und Darstellung der Normalkräfte beim Partikelkontakt	Seite 74
Bild 7-2:	Aktiver Spannungsverlauf im Schüttgutbehälter mit ganzflächig wirkender Austrageinrichtung: (a) angenommener, qualitativer Verlauf und (b) berechneter Spannungsverlauf (2D DEM-Simulation) mit Darstellung der Kontaktkräfte in Scherrichtung	Seite 75
Bild 7-3:	Aktiver Spannungsverlauf im Schüttgutbehälter mit ganzflächig wirkender Austrageinrichtung: (a) angenommener, qualitativer Verlauf und (b) berechneter Spannungsverlauf (2D DEM-Simulation) mit Darstellung der Kontaktkräfte in Scherrichtung	Seite 76
Bild 7-4:	DEM-Simulation der Partikelbewegung im Modellbehälter mit neuartiger Austrag-einrichtung: a) im Befüllzustand mit leeren Auffangbehältern und b) während der Entleerung.	Seite 77
Bild 7-5:	Exemplarisch dargestellte Parametrierung eines Verschleißmechanismus mit Warte- und Haltezeiten	Seite 78
Bild 7-6:	2D DEM-Simulation der Verweilzeitverteilung (Simulation 1): a) normierte Dichteverteilung und b) Summenverteilung bei synchroner Freigabe der Verschleißmechanismen.	Seite 79
Bild 7-7:	2D DEM-Simulation der Verweilzeitverteilung (Simulationen 1-8): a) normierte Dichteverteilung und b) Summenverteilung bei gesteuerter Freigabe der simulierten Verschleißmechanismen.	Seite 80

Bild 7-8:	2D DEM-Simulation der Verweilzeitverteilung (Simulationen 8): a) normierte Dichteverteilung und b) Summenverteilung bei gesteuerter Freigabe der simulierten Verschleißmechanismen.	Seite 81
Bild 7-9:	2D DEM-Simulation der Verweilzeitverteilung (Simulationen 7): a) normierte Dichteverteilung und b) Summenverteilung bei gesteuerter Freigabe der simulierten Verschleißmechanismen.	Seite 82
Bild 8-1:	Austragscharakteristik der neuartigen Austrageinrichtung: a) 3D Massenverteilung und b) Austragsmassen über der Breite der Austrageinrichtung. Versuchsmaterial Weizen.	Seite 84
Bild 8-2:	Austragscharakteristik der neuartigen Austrageinrichtung nach Justierung der Verschleißmechanismen: a) 3D Massenverteilung und b) Austragsmassen über der Breite der Austrageinrichtung. Versuchsmaterial Weizen.	Seite 85
Bild 8-3:	Häufigkeitsverteilung der Austragsmassen für eine Austragszeit $t_D = 0,5$ s.	Seite 87
Bild 8-4:	Summenhäufigkeitsverteilung der Austragsmassen im Wahrscheinlichkeitsnetz für eine Austragszeit $t_D = 0,5$ s.	Seite 87
Bild 8-5:	Häufigkeitsverteilung für eine Austragszeit $t_D = 1,0$ s der neuartigen Austrageinrichtung.	Seite 88
Bild 8-6:	Austragscharakteristik bei unterschiedlichen effektiven Öffnungsweiten unter Verwendung des Versuchsmaterials Weizen (Ausschnitt des gesamten Messbereichs $0,42 \text{ s} \leq t_D \leq$ $7,96 \text{ s}$).	Seite 89
Bild 8-7:	Schüttgutmassenstrom für Weizen bei kontinuierlicher Entleerung als Funktion der Öffnungsdauer bei einem Hubweg $h_1=0,0131$ m (links) bzw. $h_1=0,0144$ m (rechts).	Seite 91
Bild 8-8:	Schüttgutmassenstrom für Weizen bei kontinuierlicher Entleerung als Funktion der Öffnungsdauer bei einem Hubweg $h_1=0,0156$ m (links) bzw. $h_1=0,0173$ m (rechts).	Seite 92
Bild 8-9:	Verweilzeitdichteverteilung $E(t)$ (links) und Summenverteilung $F(t)$ (rechts) bei gleichmäßiger Freigabe aller Verschleißmechanismen.	Seite 94
Bild 8-10:	Normierte Darstellung der Dichte- und Summenverteilung und berechnete Verweilzeitkurve mit dem Dispersionsmodell.	Seite 95
Bild 8-11:	Exemplarische Aufnahmen der Probenschublade zu verschiedenen Zeitpunkten: Weizen mit farbigen Tracerpartikeln.	Seite 95
Bild 8-12:	Vergleich der Verweilzeitverteilungen bei Wiederholung der Messung im Ausgangszustand der neuartigen Austrageinrichtung.	Seite 96
Bild 8-13:	Gemessene und berechnete normierte Dichte- und Summenverteilungen bei Variation der Haltezeiten für Einstellung 4 und den Ausgangszustand.	Seite 98
Bild 8-14:	Gemessene und berechnete normierte Dichte- und Summenverteilungen bei Variation der Haltezeiten für Einstellung 1 und den Ausgangszustand.	Seite 99
Bild 8-15:	Signalverlaufdiagramm der Parametriersoftware MEXE02 für einen Schrittmotor.	Seite 100

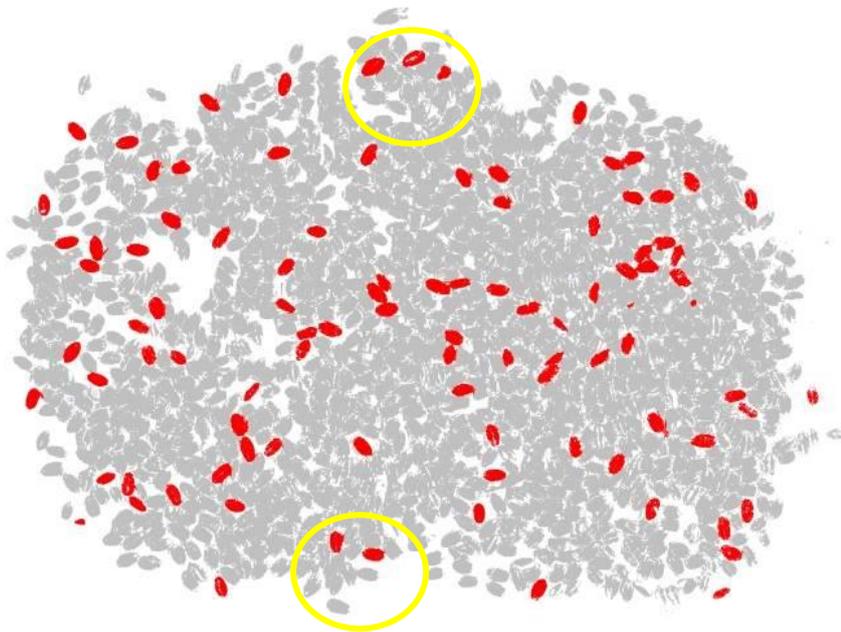
Bild 8-16:	Vergleich der Dichteverteilungen $E(t)$ bei unterschiedlichen Austragszeiten.	Seite 100
Bild 8-17:	Verweilzeitverteilungen bei unterschiedlichen Austragszeiten und gleicher Strömungsweglänge ($L=0,15$ m).	Seite 101
Bild 8-18:	Gemessene und berechnete normierte Dichte- und Summenverteilungen bei einer Strömungsweglängen $L = 0,85$ m.	Seite 102
Bild 8-19:	Verweilzeitverteilungen bei unterschiedlichen Strömungsweglängen.	Seite 103
Bild 8-20:	Direktvergleich der normierten Verweilzeitverteilungen bei unterschiedlichen Strömungsweglängen.	Seite 104
Bild 8-21:	Vergleich der gemessenen normierte Dichteverteilungen für Einstellung 1, 2 und den Ausgangszustand (bei $L = 0,85$ m).	Seite 104
Bild 8-22:	Vergleich des Inhalts der Probenschublade mit ausgetragendem Versuchsmaterial Weizen (links) und Sojabohnen (rechts).	Seite 106
Bild 8-23:	Vergleich der gemessenen und berechneten normierten Verweilzeitverteilung für Sojabohnen im Ausgangszustand bei einer Strömungsweglänge von $L = 0,50$ m.	Seite 106
Bild 8-24:	Dimensionslose Verweilzeitverteilungen für Sojabohnen.	Seite 107
Bild 8-25:	Einbauten an den Stirnwänden der Dosierkammer-Austrageinrichtung (links) und Verteilung der Weizen-Tracer innerhalb der Probenschublade bei $\theta = 1,1$ (rechts).	Seite 108
Bild 8-26:	Dimensionslose Verweilzeitverteilungen der Dosierkammer-Austrageinrichtung.	Seite 109
Bild 8-27:	Dimensionslose Verweilzeitverteilungen der Schieber-Austrageinrichtung	Seite 109
Bild 8-28:	Vergleich konventioneller Austragsysteme im Labormaßstab bei $L=85$ cm und vergleichbar eingestellter Austragsmasse $MS, D \approx 1,1$ kg.	Seite 110
Bild 8-29:	Qualitative Untersuchung der Schüttgutbewegung von Weizen an einer transparenten (Makrolon®) Frontwand unterschiedlicher Labortrocknerdesigns.	Seite 112
Bild 8-30:	Versuchsaufbau an einer Trocknersäule a) Trocknersäule mit neuartigen Austrageinrichtung, b) Gestaltung der Luftkanäle im Inneren einer Trocknersäule mit transparenter Frontwand und c) Frontansicht der neuartigen Austrageinrichtung.	Seite 113
Bild 8-31:	Normierte Verweilzeitverteilungen unterschiedlicher Austrageinrichtungen unterhalb eines Labor-Getreideschachttrockners.	Seite 114
Bild 8-32:	Verteilung des Tracermaterials innerhalb des Auffangbehälters a) entspricht dem Hauptproduktstrom b) entspricht der verlangsamten Schüttgutbewegung im Wandbereich.	Seite 115
Bild 8-33:	Darstellung des angenommenen Haupt- und Teilproduktstroms innerhalb einer Trocknungssektion (Aufgenommen an einer transparenten Wand in den Voruntersuchungen).	Seite 115
Bild 8-34:	Dichteverteilungen $E(t)$ unterschiedlicher Austrageinrichtungen unterhalb des Labortrockners.	Seite 116

Bild 8-35:	Normierte Verweilzeitverteilung für die neuartige Austrageinrichtungen im Ausgangszustand sowie unterschiedliche Austrageinrichtungen unterhalb eines Labor-Getreideschachttrockners.	Seite 118
Bild 8-36:	Normierte Verweilzeitverteilungen für die neuartige Austrageinrichtungen unterhalb eines Labor-Getreideschachttrockners unter Einbindung von Einstellung 3.	Seite 118
Bild 8-37:	Örtliche Verteilung von unterschiedlichen Öffnungszeiten an den Schrittmotoren und verschiedenen Verschleißmechanismen der neuartigen Austrageinrichtung über der Breite des Labortrockners.	Seite 119
Tabelle 4-1:	Modellparameter für Weizen [74].	Seite 29
Tabelle 5-1:	Versuchsmaterialien.	Seite 34
Tabelle 5-2:	Charakteristische Formfaktoren der Versuchsmaterialien.	Seite 41
Tabelle 5-3:	Gemessene Schüttdichten der Versuchsmaterialien (mit Einlaufgerät nach Böhme).	Seite 42
Tabelle 5-4:	An- und Abscherlasten zur Bestimmung der Fließorte (FO).	Seite 43
Tabelle 5-5:	Gemessene Fließeigenschaften der Versuchsmaterialien und Einordnung der Bereiche unterschiedlicher Fließfähigkeit.	Seite 43
Tabelle 6-1:	Minimale Trichterneigungswinkel für Massenfluss verschiedener Versuchsmaterialien.	Seite 57
Tabelle 6-2:	Berechnete Öffnungsweiten der Auslauföffnung für das Versuchsmaterial.	Seite 58
Tabelle 6-3:	Berechnete Öffnungsweiten aus Schüttgut-Fließeigenschaften	Seite 61
Tabelle 7-1:	Übersicht über die simulierten Haltezeiten der Verschleißmechanismen.	Seite 79
Tabelle 8-1:	Austragsversuche zur Dosiergenauigkeit.	Seite 86
Tabelle 8-2:	Versuche zum Auslaufmassenstrom.	Seite 88
Tabelle 8-3:	Ermittelter Auslaufmassenstrom in Abhängigkeit der eff. Öffnungsweite.	Seite 90
Tabelle 8-4:	Berechneter kontinuierlicher Austragsmassenstrom.	Seite 90
Tabelle 8-5:	Versuche zum Auslaufmassenstrom.	Seite 93
Tabelle 8-6:	Einstellung der Haltezeiten einzelner Verschleißmechanismen	Seite 97
Tabelle 8-7:	Einstellung der Haltezeiten einzelner Verschleißmechanismen	Seite 105
Tabelle 8-8:	Einstellung der Haltezeiten einzelner Verschleißmechanismen	Seite 108
Tabelle 8-9:	Einstellung der Haltezeiten einzelner Verschleißmechanismen	Seite 117

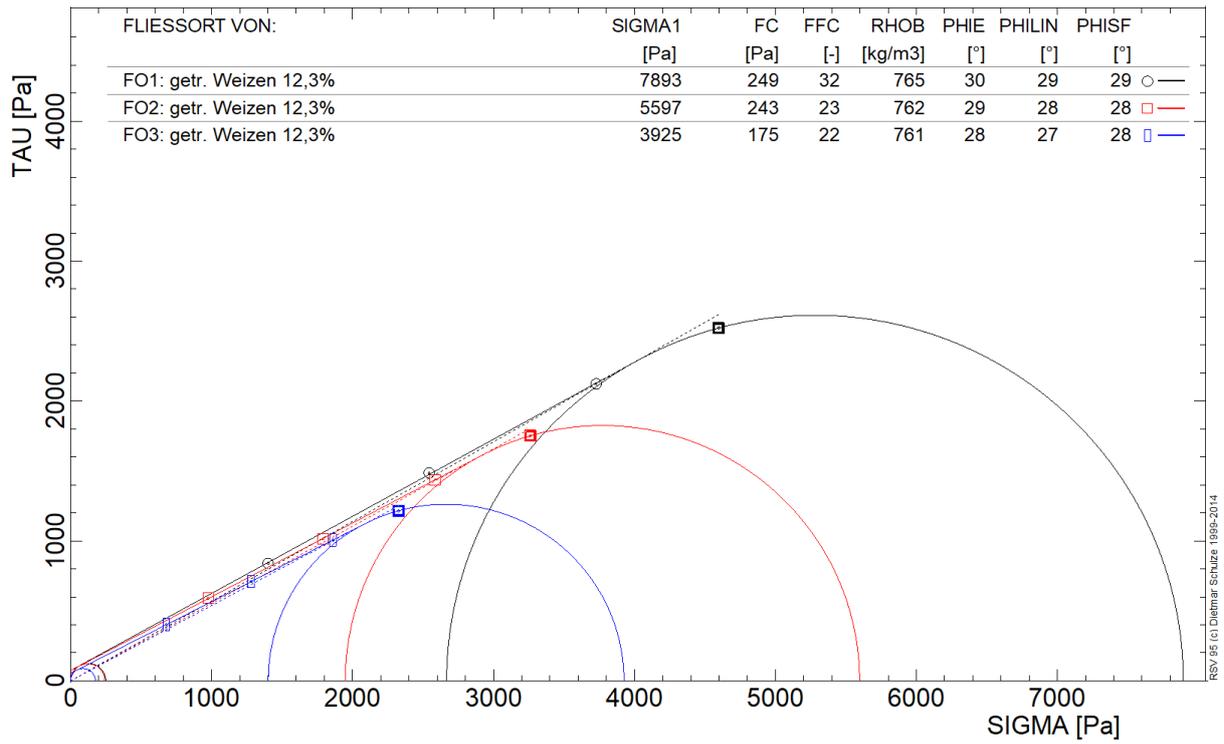
13 Anlagen



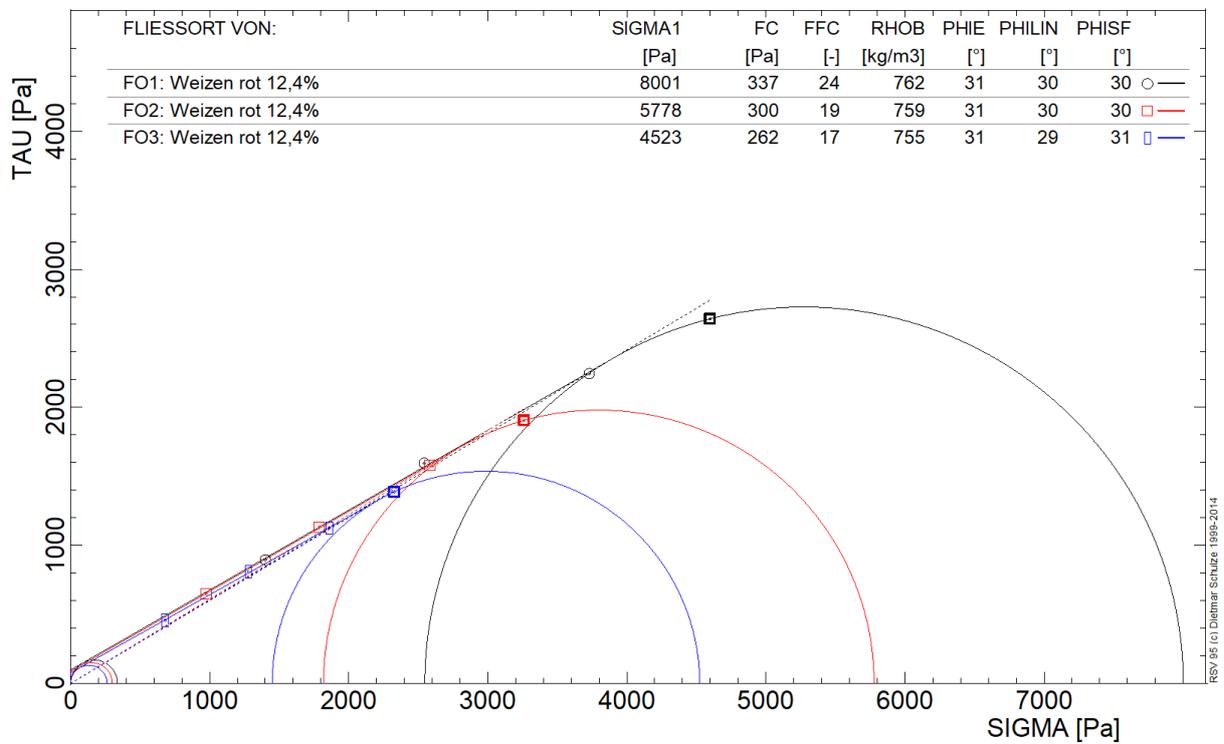
Anlage 1: Anhand von rot eingefärbten Weizenkörnern kalibrierter Farbkreis in der Software *Farbanalyse.exe* (ATB©)



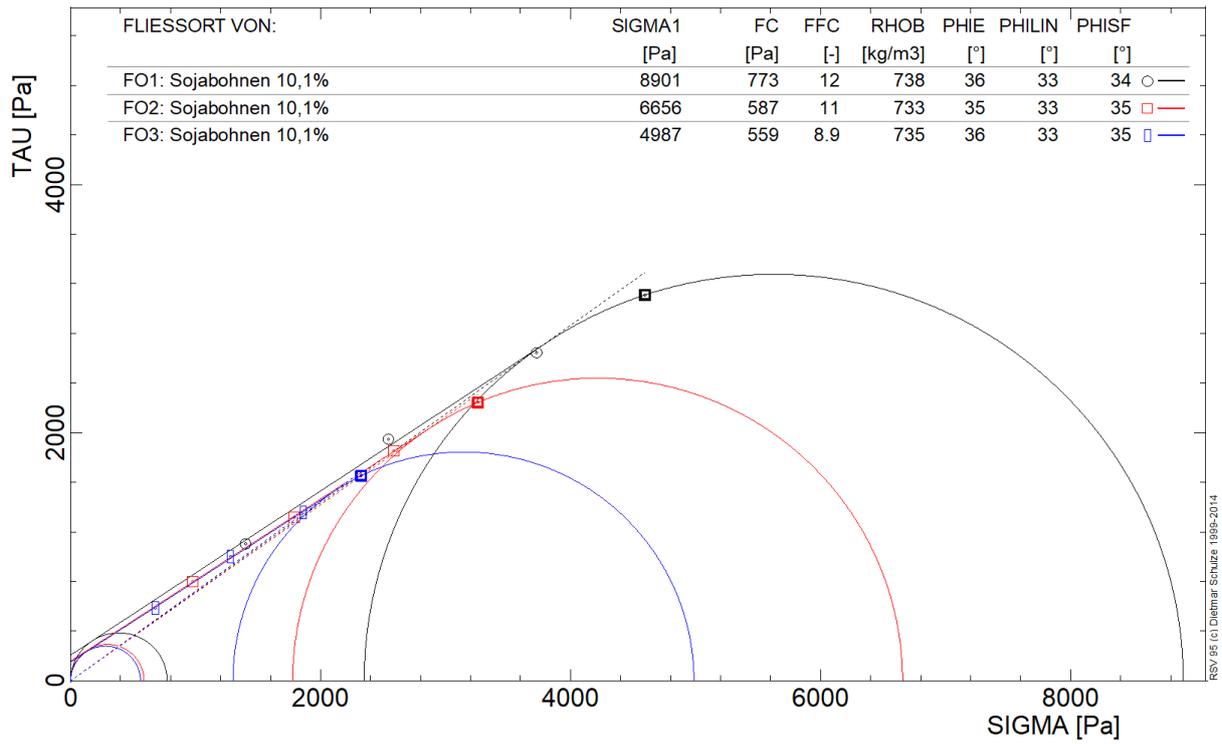
Anlage 2: Abtastung von Farbpixeln in einem eingescannten Bild ausgetragener Tracerpartikel (Originalbild oben, Auswertung mit *Farbanalyse.exe* unten)



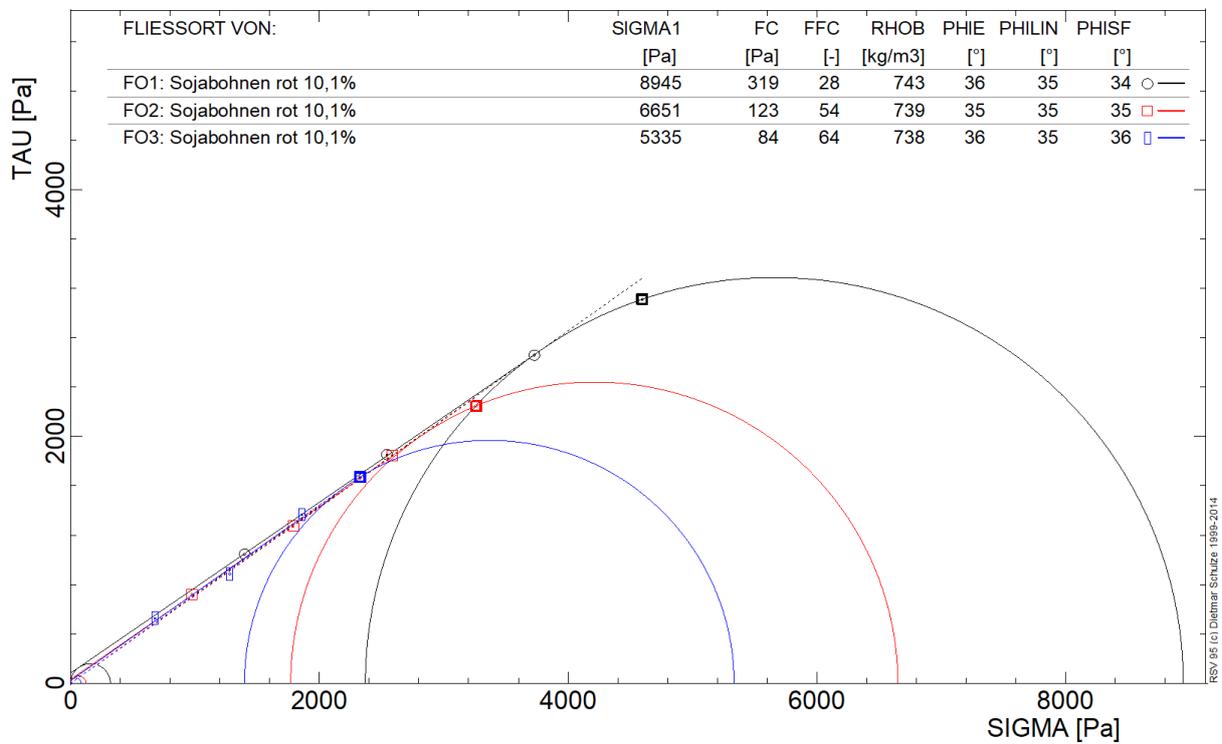
Anlage 3: Fließortbestimmung von getrocknetem Weizen (12,3%)



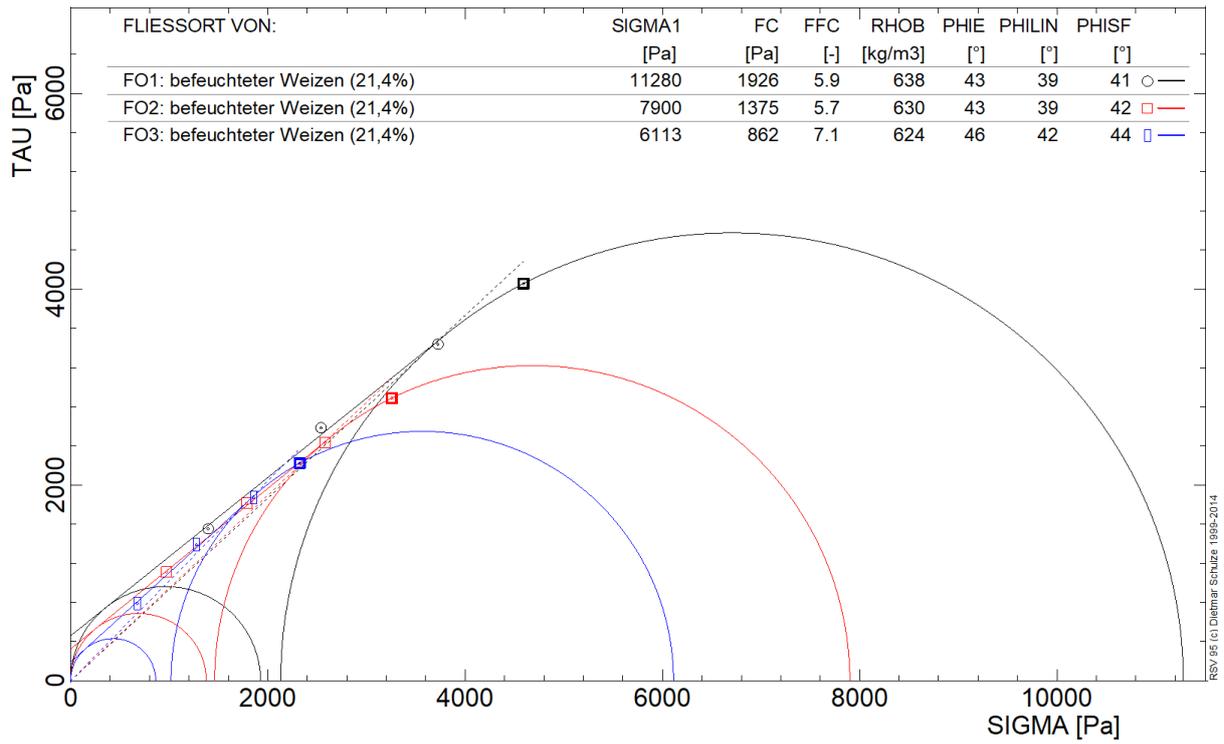
Anlage 4: Fließortbestimmung von rot eingefärbten Weizen (12,4%)



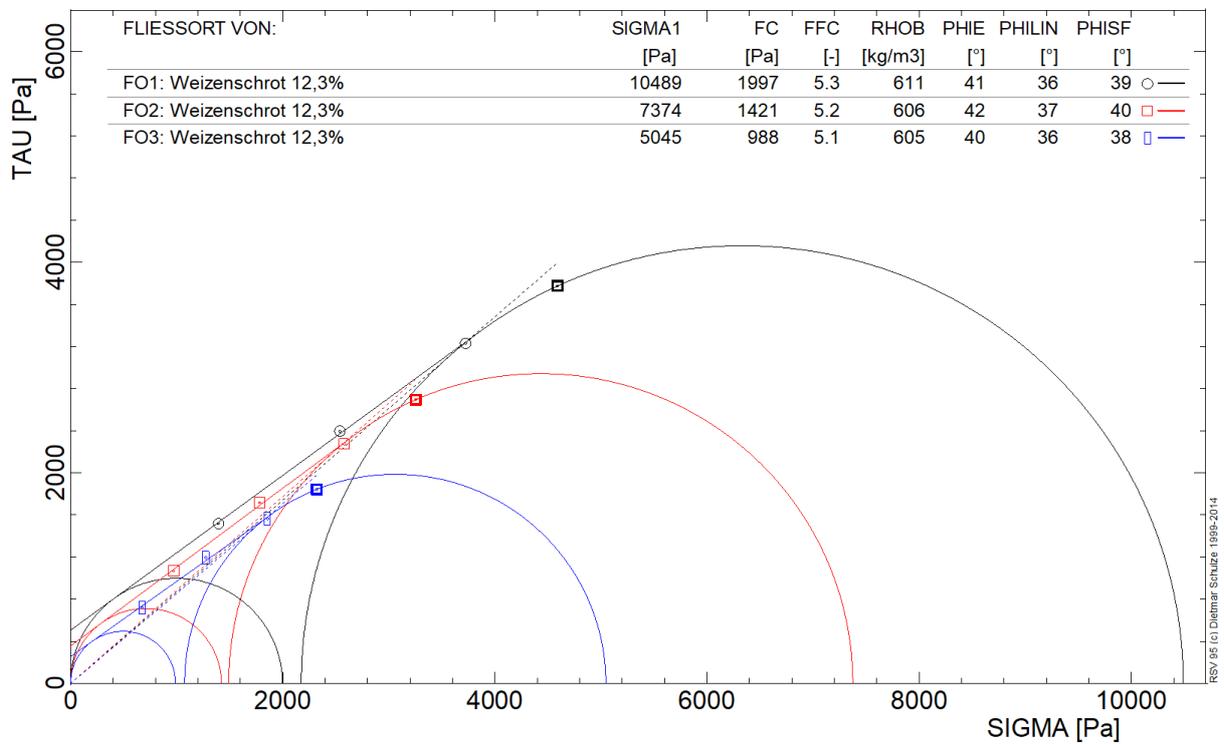
Anlage 5: Fließortbestimmung von getrockneten Sojabohnen (10,1%)



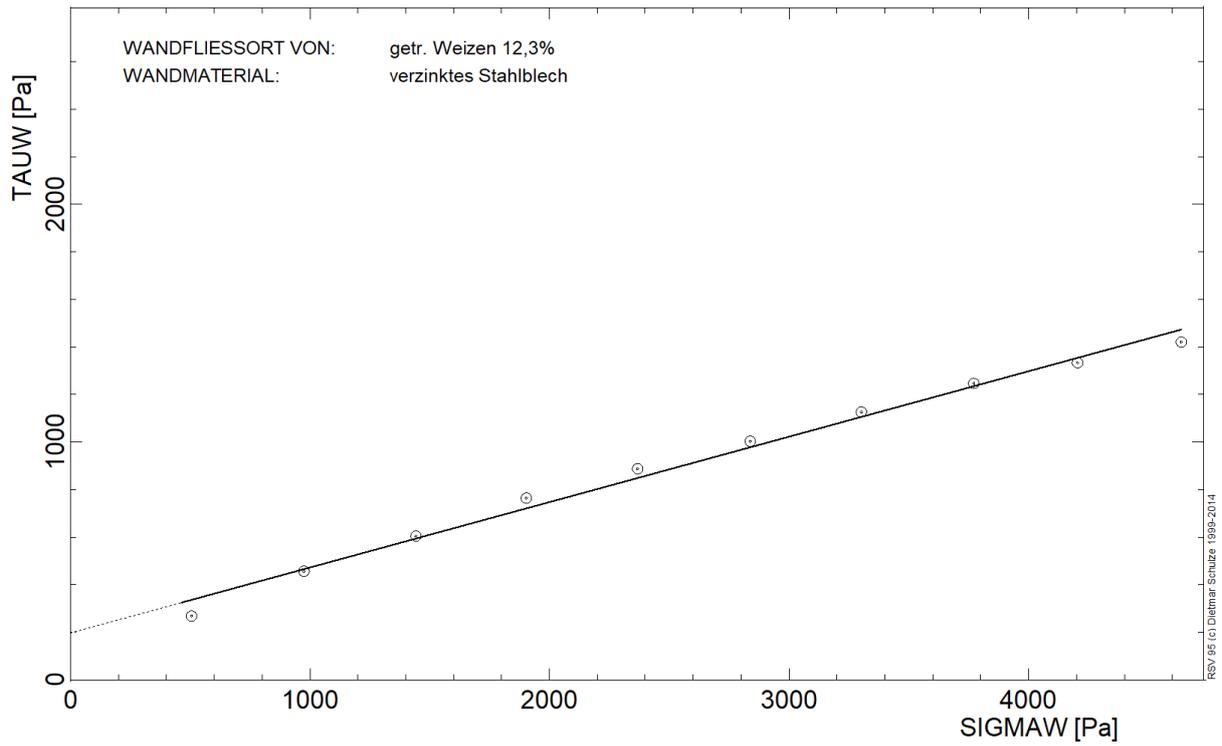
Anlage 6: Fließortbestimmung von rot eingefärbten Sojabohnen (10,1%)



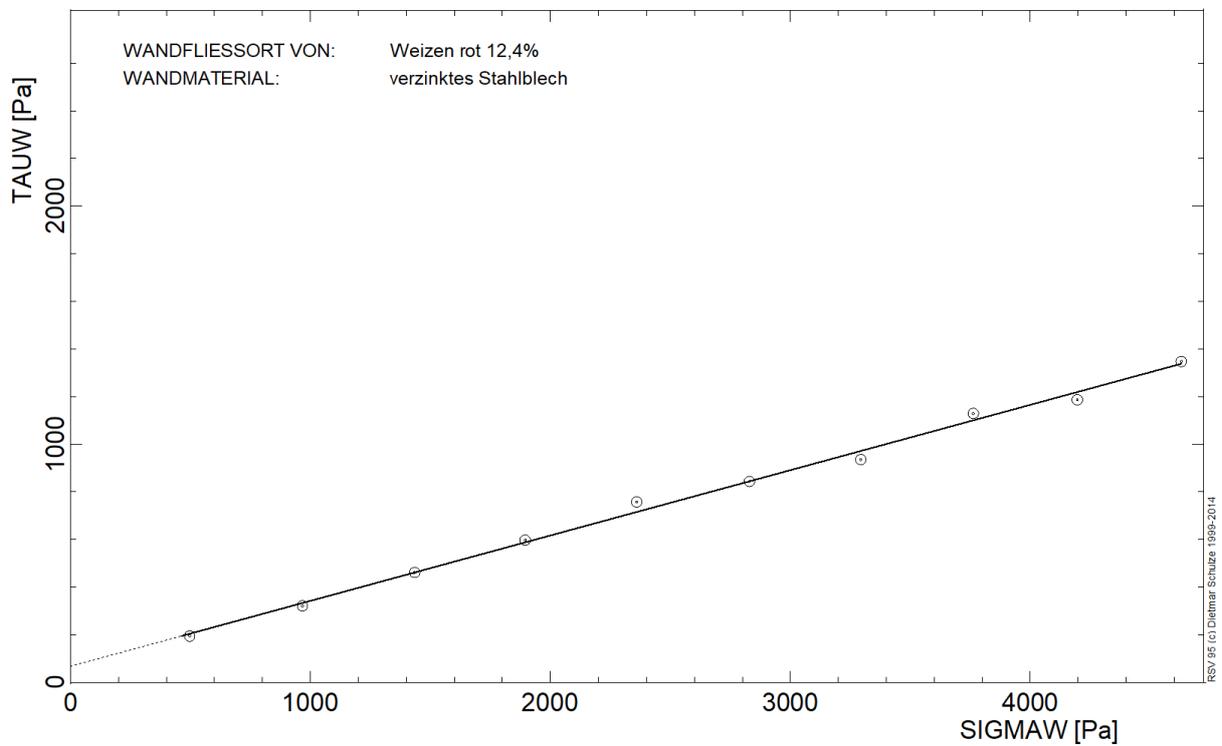
Anlage 7: Fließortbestimmung von befeuchtetem Weizen (21,4%)



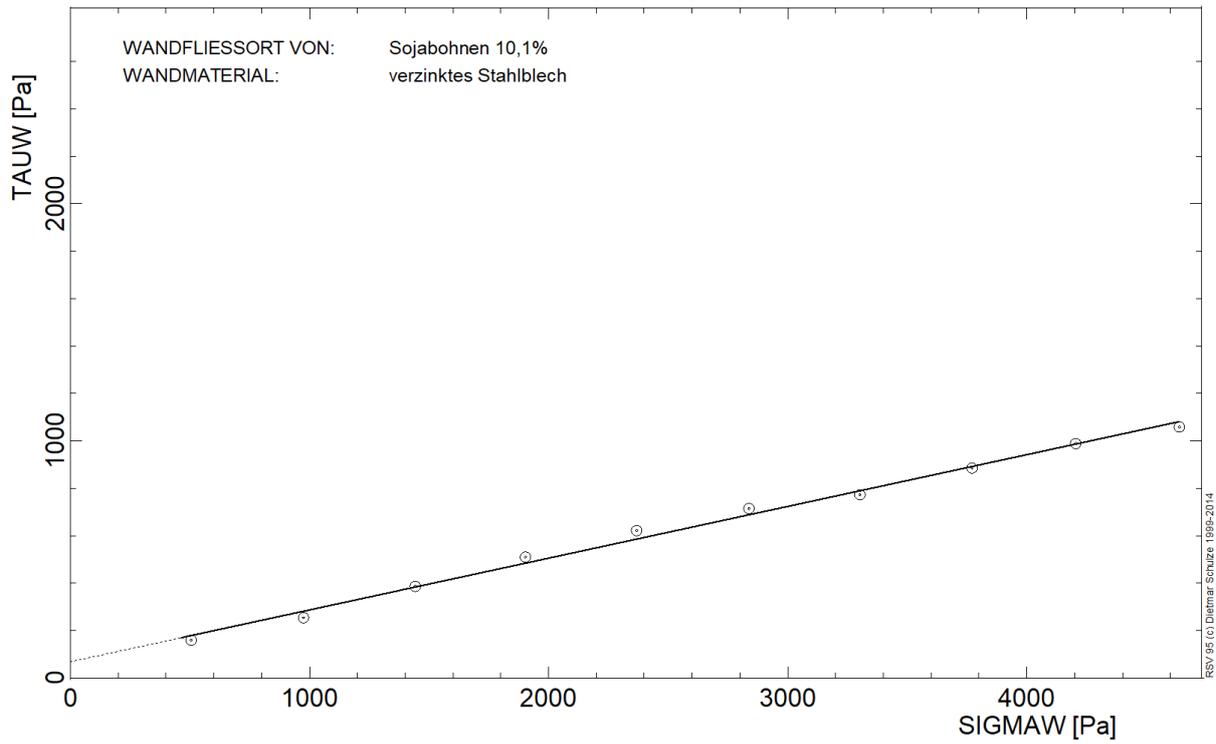
Anlage 8: Fließortbestimmung von Weizenschrot (12,3%)



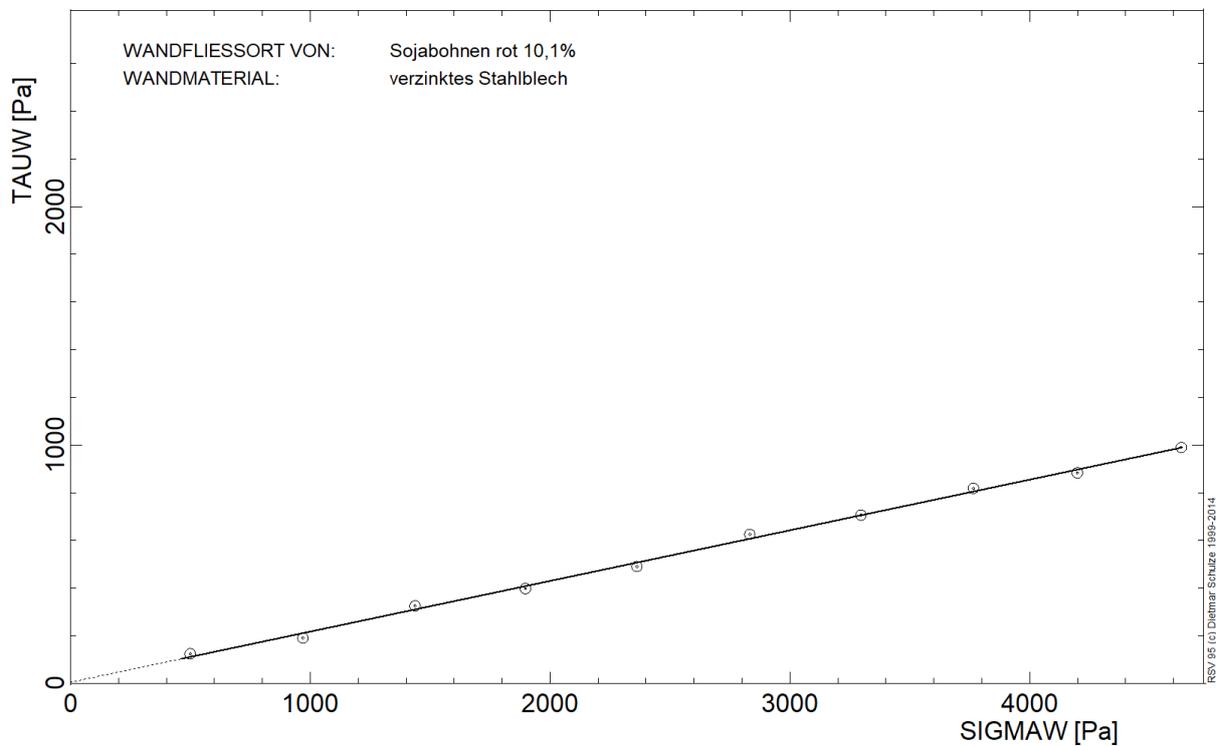
Anlage 9: Wandfließort von getrocknetem Weizen (12,3%)



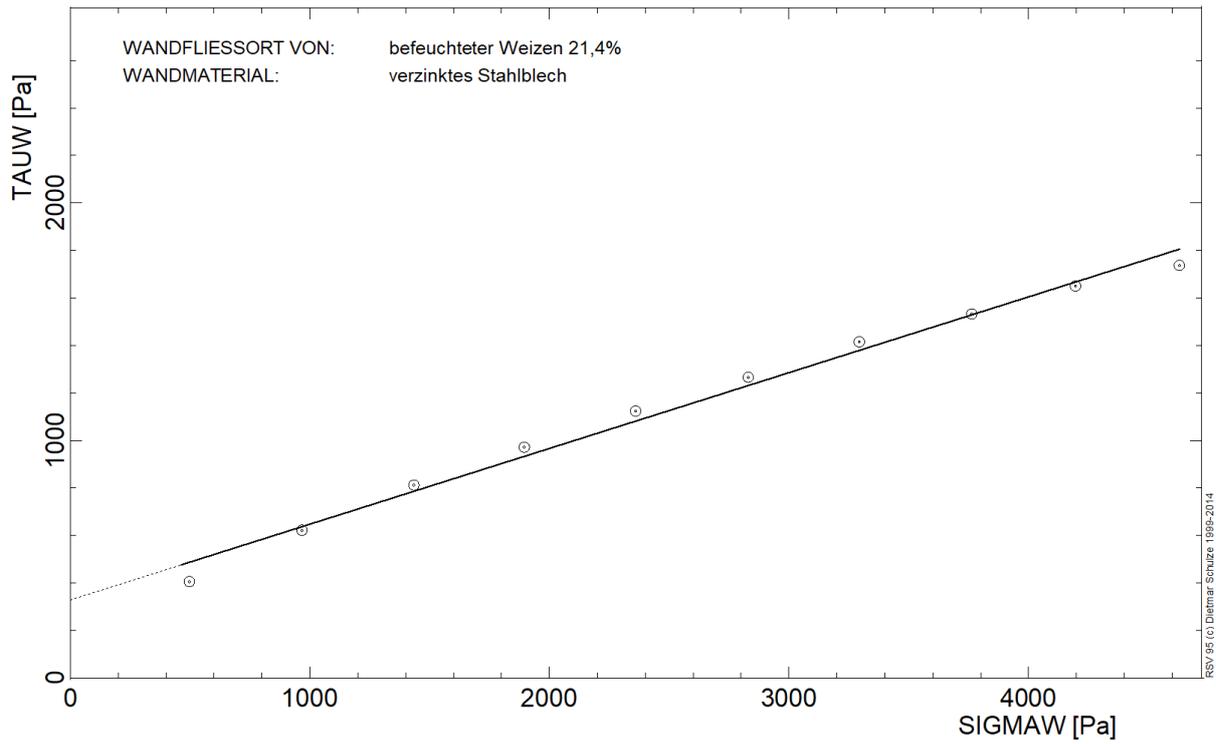
Anlage 10: Wandfließort von rot eingefärbten Weizen (12,4%)



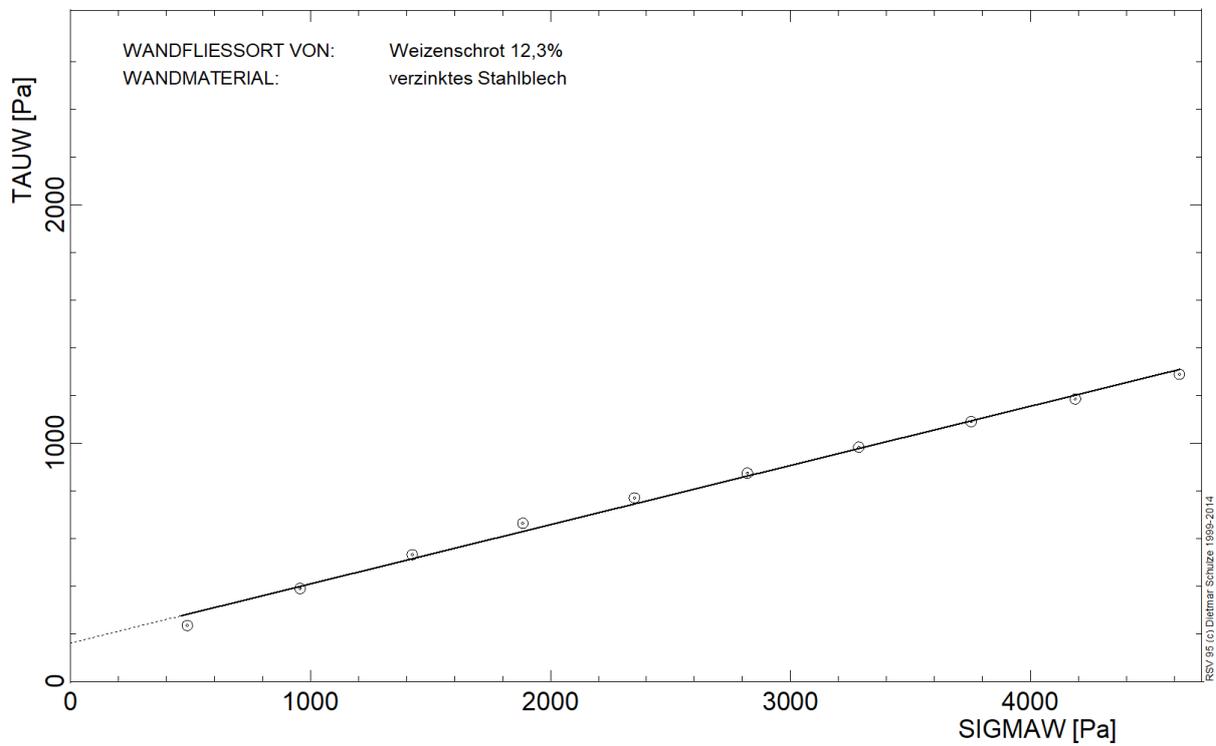
Anlage 11: Wandfließort von getrockneten Sojabohnen (10,1%)



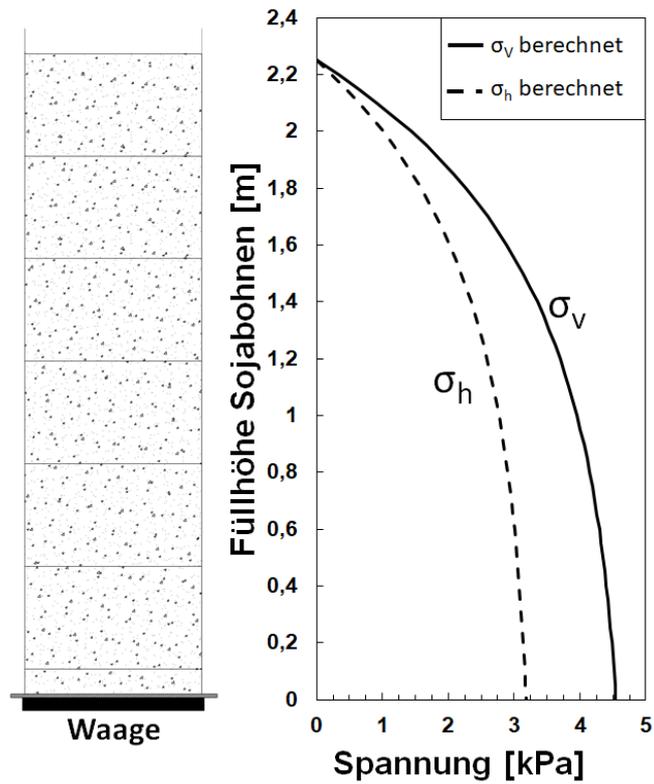
Anlage 12: Wandfließort von rot eingefärbten Sojabohnen (10,1%)



Anlage 13: Wandfließort von befeuchtetem Weizen (21,4%)



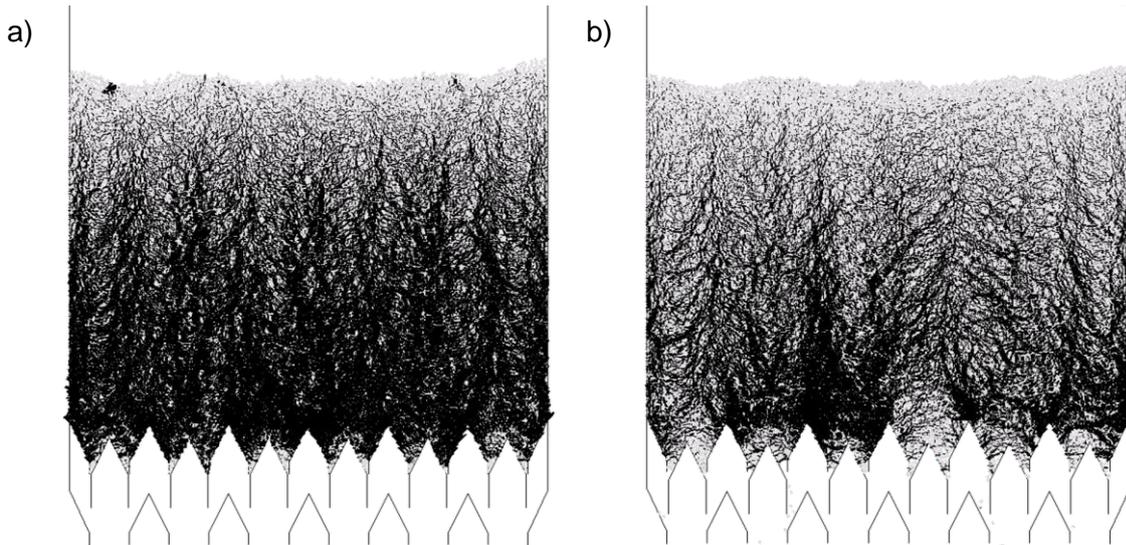
Anlage 14: Wandfließort von Weizenschrot (12,3%)



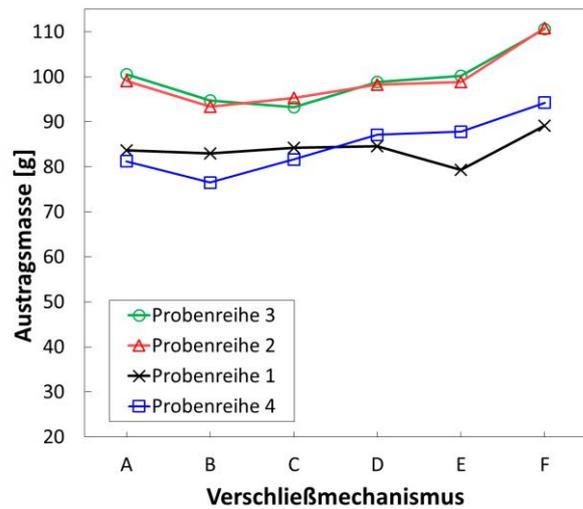
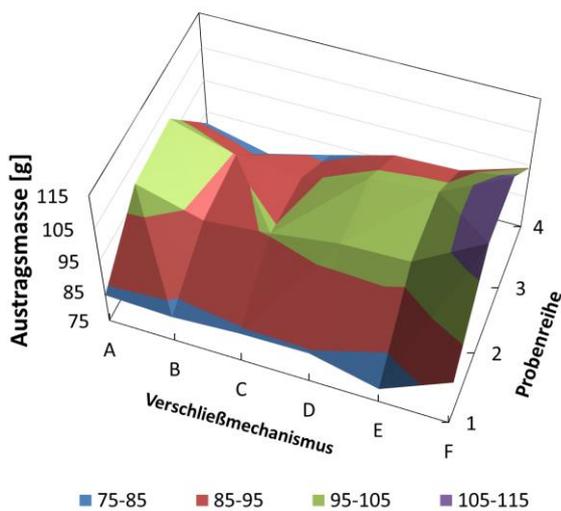
Anlage 15: Berechnete Spannungen in einem Rechtecksilo mit Sojabohnen (10,1%)



Anlage 16: Voruntersuchung von Fließprofilen oberhalb der neuartigen Austrageinrichtung

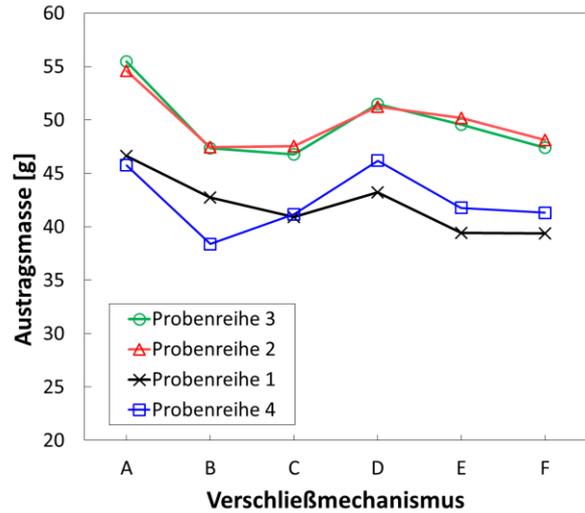
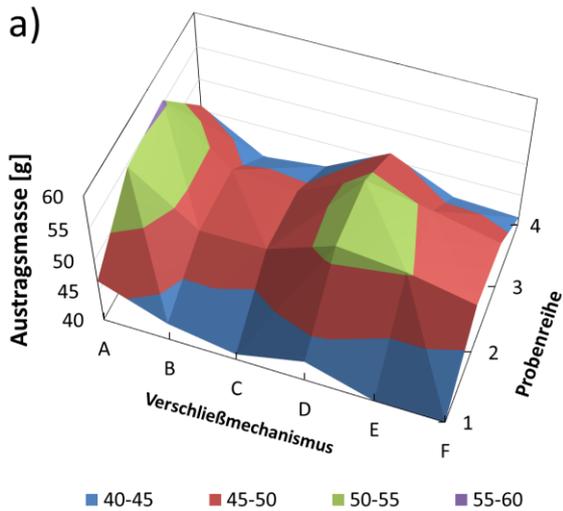


Anlage 17: 2D simulierter aktiver (a) und passiver (b) Spannungszustand im Bunker mit neuartiger Austrageinrichtung durch Darstellung der Scherkräfte beim Partikelkontakt

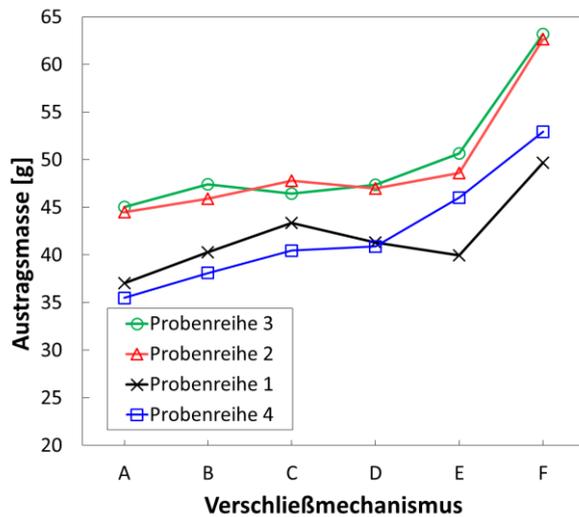
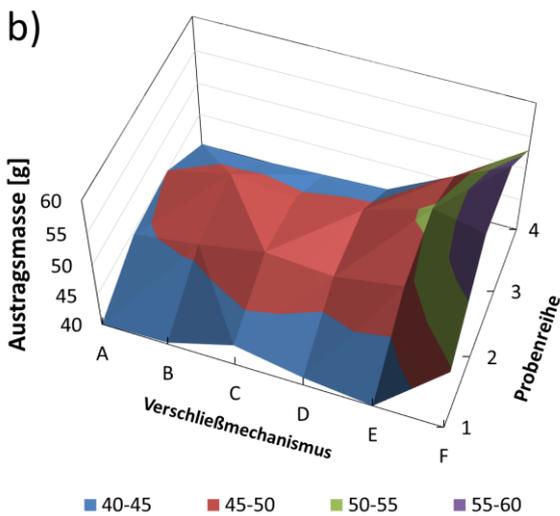


Doppelhub	A	B	C	D	E	F
1	83,7	83,0	84,3	84,5	79,4	89,1
2	99,1	93,4	95,3	98,2	98,8	110,8
3	100,5	94,8	93,2	98,9	100,2	110,6
4	81,2	76,5	81,6	87,1	87,8	94,3
Σ	2206,3 Gramm					

Anlage 18: Austragscharakteristik des Systems mit Dosierkammern: a) 3D Massenverteilung und b) Austragsmassen über der Breite der Austrageinrichtung. Doppelhub (links-rechts Bewegung), Versuchsmaterial Weizen.

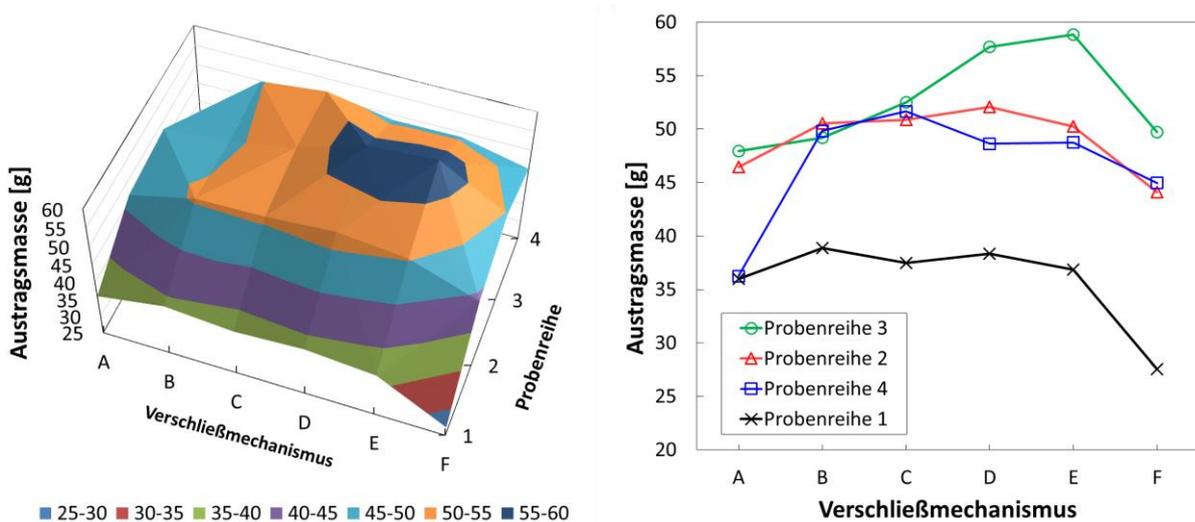


a) Links-Hub	A	B	C	D	E	F
1	46,6	42,7	40,9	43,2	39,4	39,4
2	54,6	47,5	47,5	51,2	50,2	48,1
3	55,5	47,4	46,8	51,5	49,6	47,4
4	45,8	38,4	41,2	46,2	41,8	41,3
Σ	1104,2 Gramm					



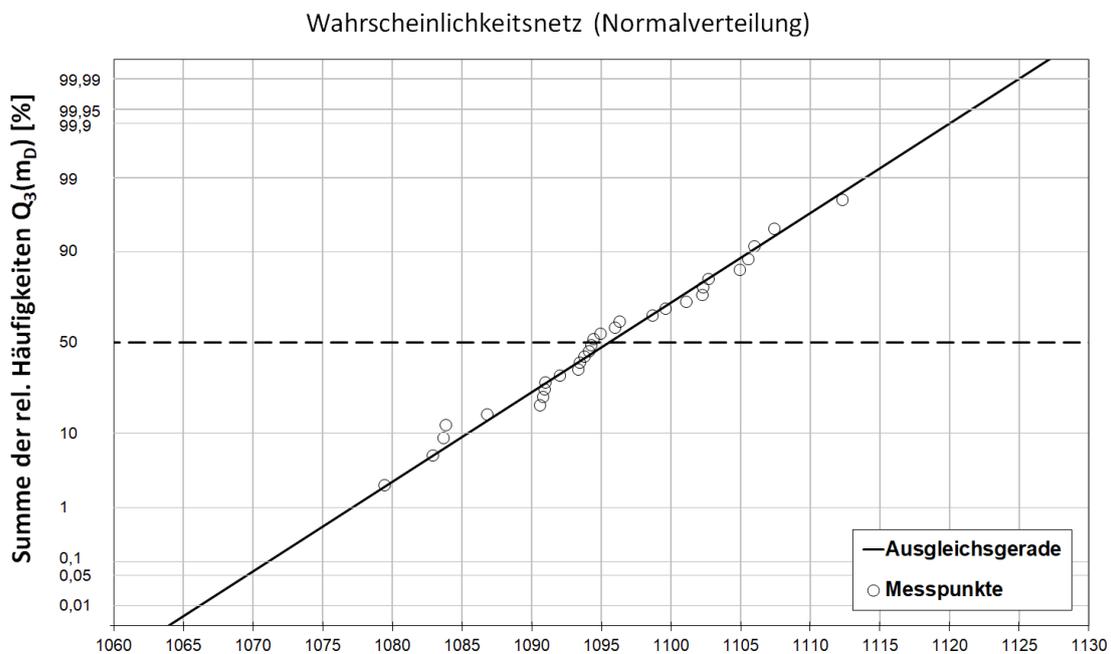
b) Rechts-Hub	A	B	C	D	E	F
1	37,1	40,3	43,3	41,3	39,9	49,7
2	44,5	45,9	47,8	47,8	48,6	62,7
3	45,0	47,4	46,4	47,4	50,6	63,2
4	35,5	38,1	40,5	40,9	46,0	53,0
Σ	1102,1 Gramm					

Anlage 19: Austragscharakteristik des Systems mit Dosierkammern, oben: einfacher Hub links, unten: einfacher Hub rechts. a) 3D Massenverteilung und b) Austragsmassen über der Breite der Austrageinrichtung. Versuchsmaterial Weizen.

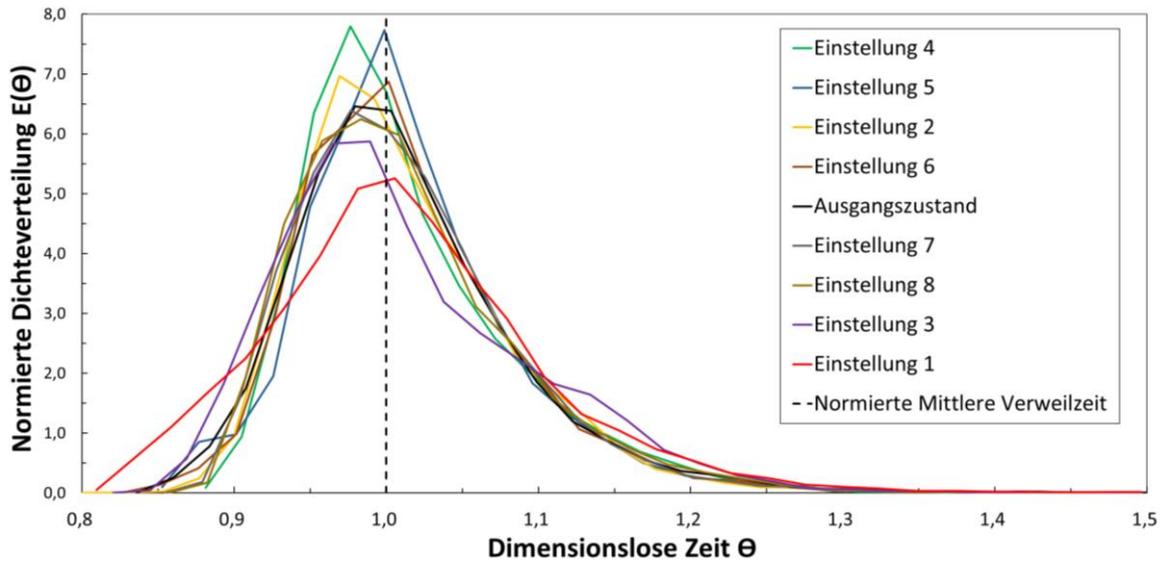


	A	B	C	D	E	F
1	36,0	38,9	37,5	37,5	38,4	36,9
2	46,5	50,5	50,9	50,9	52,1	50,2
3	48,0	49,2	52,5	52,5	57,7	58,8
4	36,3	49,8	51,7	51,7	48,6	48,8
Σ	1105,4 Gramm					

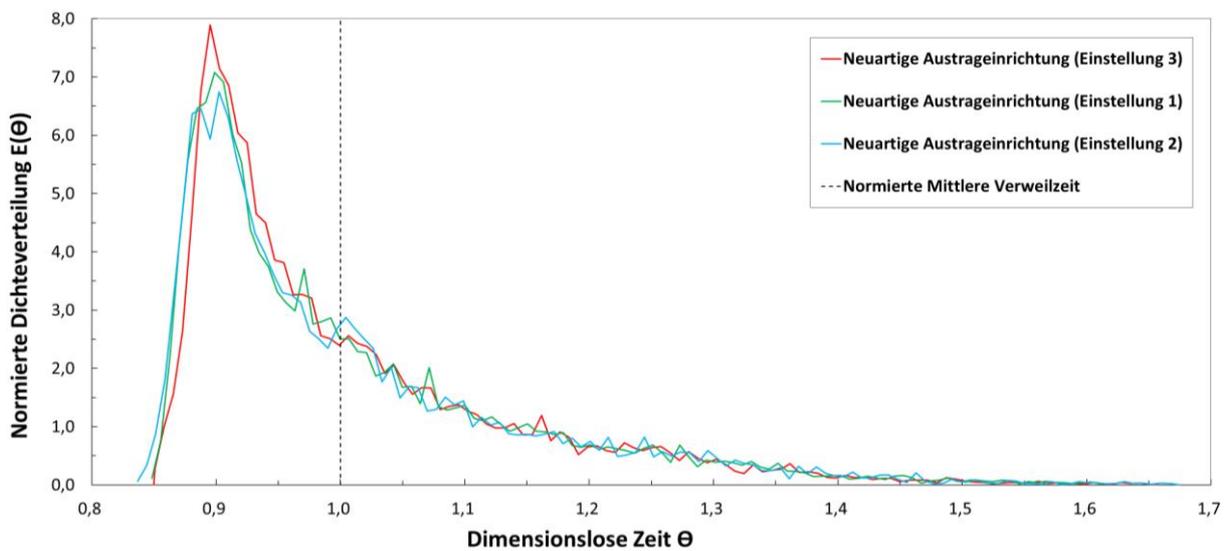
Anlage 20: Austragscharakteristik der Schieber-Austrageinrichtung: a) 3D Massenverteilung und b) Austragsmassen über der Breite der Austrageinrichtung. Austragszeit $t_G=0,1s$, Versuchsmaterial Weizen.



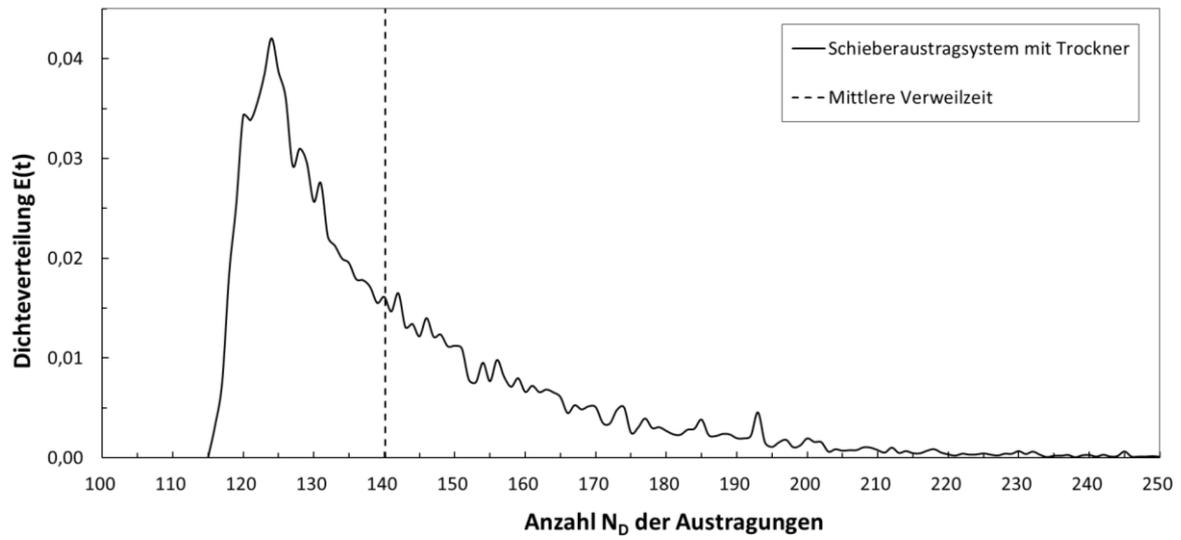
Anlage 21: Summenhäufigkeitsverteilung der Austragsmassen im Wahrscheinlichkeitsnetz für eine Austragszeit $t_D = 1,0 s$ (Versuchsreihe 2, Tabelle 7-1)



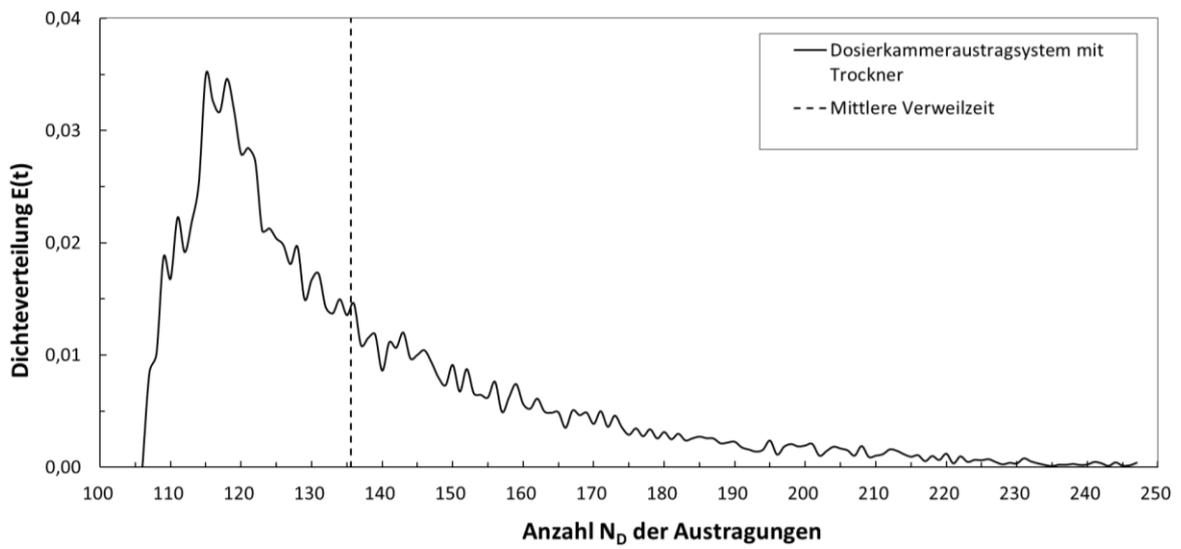
Anlage 22: Verweilzeitdichteverteilungen für Weizen bei unterschiedlichen Einstellungen und einer Strömungsweglänge $L = 0,15$ m sowie einer Austragszeit von $0,5$ s



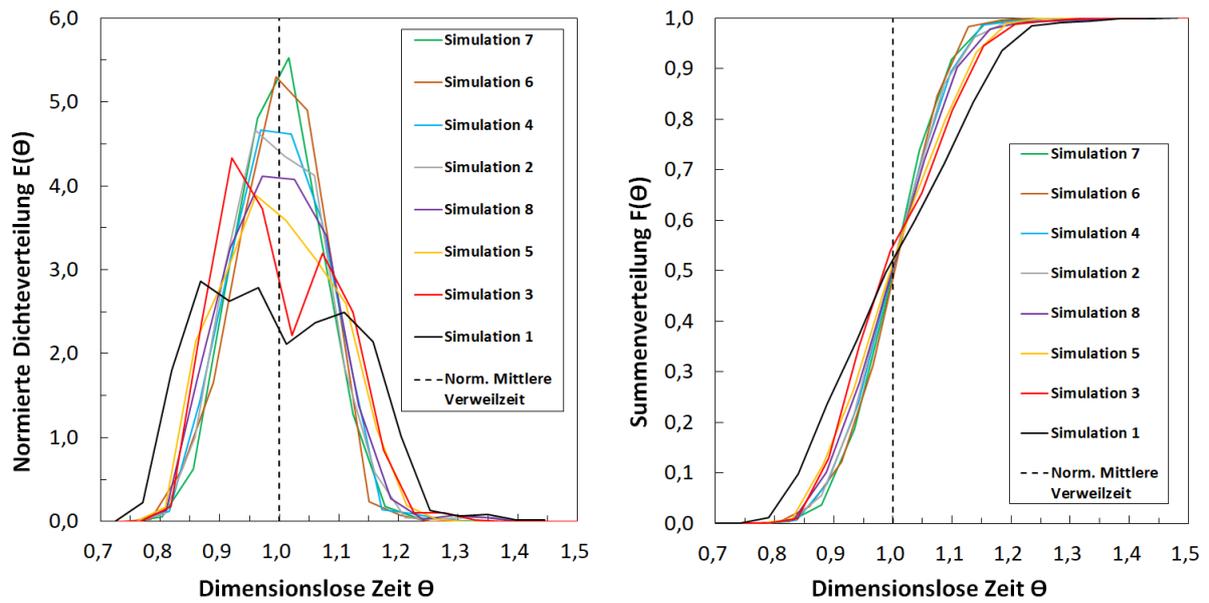
Anlage 23: Normierte Dichteverteilung bei Verwendung unterschiedlicher Einstellungen an der neuartigen Austrageinrichtung unterhalb des Labor-Trockners



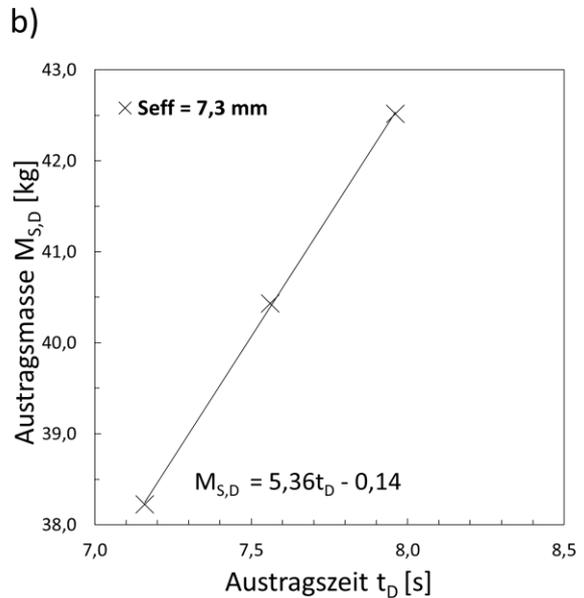
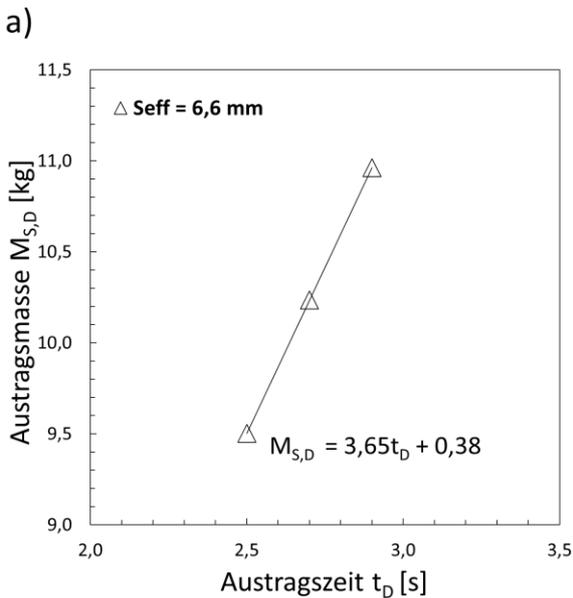
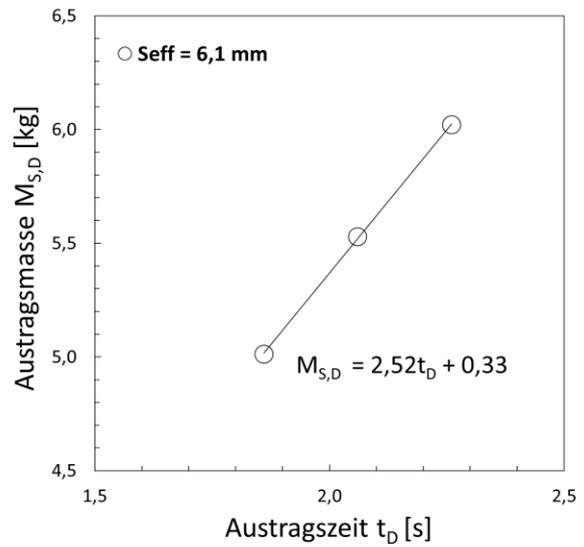
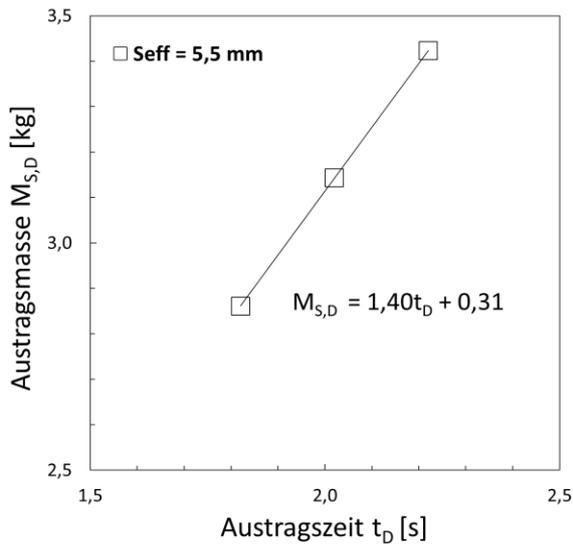
Anlage 24: Dichteverteilung $E(t)$ des Schieberaustragsystems und Trocknersäule



Anlage 25: Dichteverteilung $E(t)$ des Dosierkammeraustragsystems und Trocknersäule



Anlage 26: 2D DEM-Simulation der Verweilzeitverteilung (Simulationen 1-8): a) normierte Dichteverteilung und b) Summenverteilung bei gesteuerter Freigabe der simulierten Verschleißmechanismen



Anlage 27: Austragscharakteristik bei unterschiedlichen effektiven Öffnungsweiten unter Verwendung des Versuchsmaterials Weizen (Regressionsgeraden zwischen den letzten 3 Messpunkten)

Anlage 28: Quellcode der simulierten Austrageinrichtung

```
new
damp local 0.0
damp viscous normal 0.7
damp viscous shear 0.7
set hist_rep 1000
set pinterval 1000
set gen_error off

plot create NeuartigeAustrageinrichtung
plot set size -0.1 0.7 -2.6 -1.6
plot set window position=(0.5,0) size=(0.5,0.5)
plot set caption off
plot wall
plot add ball blue outline off
plot add axes brown
plot show NeuartigeAustrageinrichtung
```

; Erzeugung der Geometrie

; Behälter Wände

;rechts

```
wall id 1 nodes (0.6 -2.365) (0.6 -1.65)
```

```
wall id 2 nodes (0.6 -1.65) (0.6 -2.365)
```

;links

```
wall id 3 nodes (0 -1.65) (0 -2.365)
```

```
wall id 4 nodes (0 -2.365) (0 -1.65)
```

; Auffangbehälter

; Box 1

```
wall id 7 nodes (0.005 -2.45581) (0.005 -2.53000)
```

```
wall id 8 nodes (0.005 -2.53000) (0.005 -2.45581)
```

```
wall id 9 nodes (0.005 -2.53000) (0.095 -2.53000)
```

```
wall id 10 nodes (0.095 -2.53000) (0.005 -2.53000)
```

```
wall id 11 nodes (0.095 -2.53000) (0.095 -2.45581)
```

```
wall id 12 nodes (0.095 -2.45581) (0.095 -2.53000)
```

; Box 2

```
wall id 13 nodes (0.105 -2.45581) (0.105 -2.53000)
```

```
wall id 14 nodes (0.105 -2.53000) (0.105 -2.45581)
```

```
wall id 15 nodes (0.105 -2.53000) (0.195 -2.53000)
```

```
wall id 16 nodes (0.195 -2.53000) (0.105 -2.53000)
```

```
wall id 17 nodes (0.195 -2.53000) (0.195 -2.45581)
```

```
wall id 18 nodes (0.195 -2.45581) (0.195 -2.53000)
```

; Box 3

```
wall id 19 nodes (0.205 -2.45581) (0.205 -2.53000)
```

```
wall id 20 nodes (0.205 -2.53000) (0.205 -2.45581)
```

```
wall id 21 nodes (0.205 -2.53000) (0.295 -2.53000)
```

```
wall id 22 nodes (0.295 -2.53000) (0.205 -2.53000)
```

```
wall id 23 nodes (0.295 -2.53000) (0.295 -2.45581)
```

```
wall id 24 nodes (0.295 -2.45581) (0.295 -2.53000)
```

; Box 4

wall id 25 nodes (0.305 -2.45581) (0.305 -2.53000)
 wall id 26 nodes (0.305 -2.53000) (0.305 -2.45581)
 wall id 27 nodes (0.305 -2.53000) (0.395 -2.53000)
 wall id 28 nodes (0.395 -2.53000) (0.305 -2.53000)
 wall id 29 nodes (0.395 -2.53000) (0.395 -2.45581)
 wall id 30 nodes (0.395 -2.45581) (0.395 -2.53000)

; Box 5

wall id 31 nodes (0.405 -2.45581) (0.405 -2.53000)
 wall id 32 nodes (0.405 -2.53000) (0.405 -2.45581)
 wall id 33 nodes (0.405 -2.53000) (0.495 -2.53000)
 wall id 44 nodes (0.495 -2.53000) (0.405 -2.53000)
 wall id 45 nodes (0.495 -2.53000) (0.495 -2.45581)
 wall id 46 nodes (0.495 -2.45581) (0.495 -2.53000)

; Box 6

wall id 47 nodes (0.505 -2.45581) (0.505 -2.53000)
 wall id 48 nodes (0.505 -2.53000) (0.505 -2.45581)
 wall id 49 nodes (0.505 -2.53000) (0.595 -2.53000)
 wall id 50 nodes (0.595 -2.53000) (0.505 -2.53000)
 wall id 51 nodes (0.595 -2.53000) (0.595 -2.45581)
 wall id 52 nodes (0.595 -2.45581) (0.595 -2.53000)

; Neuartige Austrageinrichtung

; Leitblechreihe oben

;(halbes) feststehendes Leitblech 1 links

wall id 55 nodes (0.025 -2.36500) (0.025 -2.35000)
 wall id 56 nodes (0.025 -2.35000) (0.0 -2.29650)
 wall id 57 nodes (0.0 -2.29650) (0.025 -2.35000)
 wall id 58 nodes (0.025 -2.35000) (0.025 -2.36500)

; feststehendes Leitblech 2

wall id 59 nodes (0.075 -2.36500) (0.075 -2.35000)
 wall id 60 nodes (0.075 -2.35000) (0.100 -2.30000)
 wall id 61 nodes (0.100 -2.30000) (0.125 -2.35000)
 wall id 62 nodes (0.125 -2.35000) (0.125 -2.36500)
 wall id 63 nodes (0.125 -2.36500) (0.125 -2.35000)
 wall id 64 nodes (0.125 -2.35000) (0.100 -2.30000)
 wall id 65 nodes (0.100 -2.30000) (0.075 -2.35000)
 wall id 66 nodes (0.075 -2.35000) (0.075 -2.36500)

; feststehendes Leitblech 3

wall id 67 nodes (0.175 -2.36500) (0.175 -2.35000)
 wall id 68 nodes (0.175 -2.35000) (0.200 -2.30000)
 wall id 69 nodes (0.200 -2.30000) (0.225 -2.35000)
 wall id 70 nodes (0.225 -2.35000) (0.225 -2.36500)
 wall id 71 nodes (0.225 -2.36500) (0.225 -2.35000)
 wall id 72 nodes (0.225 -2.35000) (0.200 -2.30000)
 wall id 73 nodes (0.200 -2.30000) (0.175 -2.35000)
 wall id 74 nodes (0.175 -2.35000) (0.175 -2.36500)

; feststehendes Leitblech 4

wall id 75 nodes (0.275 -2.36500) (0.275 -2.35000)
 wall id 76 nodes (0.275 -2.35000) (0.300 -2.30000)
 wall id 77 nodes (0.300 -2.30000) (0.325 -2.35000)
 wall id 78 nodes (0.325 -2.35000) (0.325 -2.36500)
 wall id 79 nodes (0.325 -2.36500) (0.325 -2.35000)
 wall id 80 nodes (0.325 -2.35000) (0.300 -2.30000)
 wall id 81 nodes (0.300 -2.30000) (0.275 -2.35000)
 wall id 82 nodes (0.275 -2.35000) (0.275 -2.36500)

; feststehendes Leitblech 5

wall id 83 nodes (0.375 -2.36500) (0.375 -2.35000)
wall id 84 nodes (0.375 -2.35000) (0.400 -2.30000)
wall id 85 nodes (0.400 -2.30000) (0.425 -2.35000)
wall id 86 nodes (0.425 -2.35000) (0.425 -2.36500)
wall id 87 nodes (0.425 -2.36500) (0.425 -2.35000)
wall id 88 nodes (0.425 -2.35000) (0.400 -2.30000)
wall id 89 nodes (0.400 -2.30000) (0.375 -2.35000)
wall id 90 nodes (0.375 -2.35000) (0.375 -2.36500)

; feststehendes Leitblech 6

wall id 91 nodes (0.475 -2.36500) (0.475 -2.35000)
wall id 92 nodes (0.475 -2.35000) (0.500 -2.30000)
wall id 93 nodes (0.500 -2.30000) (0.525 -2.35000)
wall id 94 nodes (0.525 -2.35000) (0.525 -2.36500)
wall id 95 nodes (0.525 -2.36500) (0.525 -2.35000)
wall id 96 nodes (0.525 -2.35000) (0.500 -2.30000)
wall id 97 nodes (0.500 -2.30000) (0.475 -2.35000)
wall id 98 nodes (0.475 -2.35000) (0.475 -2.36500)

;(halbes) feststehendes Leitblech 7 rechts

wall id 99 nodes (0.575 -2.36500) (0.575 -2.35000)
wall id 100 nodes (0.575 -2.35000) (0.6 -2.29650)
wall id 101 nodes (0.6 -2.29650) (0.575 -2.35000)
wall id 102 nodes (0.575 -2.35000) (0.575 -2.36500)

;Leitblechreihe unten

;(halbes) feststehendes Leitblech 1 links

wall id 103 nodes (0.000 -2.36500) (0.000 -2.38612)
wall id 104 nodes (0.000 -2.38612) (0.025 -2.44044)
wall id 105 nodes (0.025 -2.44044) (0.025 -2.45544)
wall id 106 nodes (0.025 -2.45544) (0.025 -2.44044)
wall id 107 nodes (0.025 -2.44044) (0.000 -2.38612)
wall id 108 nodes (0.000 -2.38612) (0.000 -2.36500)

; feststehendes Leitblech 2

wall id 109 nodes (0.075 -2.45500) (0.075 -2.44000)
wall id 110 nodes (0.075 -2.44000) (0.100 -2.39000)
wall id 111 nodes (0.100 -2.39000) (0.125 -2.44000)
wall id 112 nodes (0.125 -2.44000) (0.125 -2.45500)
wall id 113 nodes (0.125 -2.45500) (0.125 -2.44000)
wall id 114 nodes (0.125 -2.44000) (0.100 -2.39000)
wall id 115 nodes (0.100 -2.39000) (0.075 -2.44000)
wall id 116 nodes (0.075 -2.44000) (0.075 -2.45500)

; feststehendes Leitblech 3

wall id 117 nodes (0.175 -2.45500) (0.175 -2.44000)
wall id 118 nodes (0.175 -2.44000) (0.200 -2.39000)
wall id 119 nodes (0.200 -2.39000) (0.225 -2.44000)
wall id 120 nodes (0.225 -2.44000) (0.225 -2.45500)
wall id 121 nodes (0.225 -2.45500) (0.225 -2.44000)
wall id 122 nodes (0.225 -2.44000) (0.200 -2.39000)
wall id 123 nodes (0.200 -2.39000) (0.175 -2.44000)
wall id 124 nodes (0.175 -2.44000) (0.175 -2.45500)

; feststehendes Leitblech 4

wall id 125 nodes (0.275 -2.45500) (0.275 -2.44000)
wall id 126 nodes (0.275 -2.44000) (0.300 -2.39000)
wall id 127 nodes (0.300 -2.39000) (0.325 -2.44000)
wall id 128 nodes (0.325 -2.44000) (0.325 -2.45500)

wall id 129 nodes (0.325 -2.45500) (0.325 -2.44000)
wall id 130 nodes (0.325 -2.44000) (0.300 -2.39000)
wall id 131 nodes (0.300 -2.39000) (0.275 -2.44000)
wall id 132 nodes (0.275 -2.44000) (0.275 -2.45500)

; feststehendes Leitblech 5

wall id 133 nodes (0.375 -2.45500) (0.375 -2.44000)
wall id 134 nodes (0.375 -2.44000) (0.400 -2.39000)
wall id 135 nodes (0.400 -2.39000) (0.425 -2.44000)
wall id 136 nodes (0.425 -2.44000) (0.425 -2.45500)
wall id 137 nodes (0.425 -2.45500) (0.425 -2.44000)
wall id 138 nodes (0.425 -2.44000) (0.400 -2.39000)
wall id 139 nodes (0.400 -2.39000) (0.375 -2.44000)
wall id 140 nodes (0.375 -2.44000) (0.375 -2.45500)

; feststehendes Leitblech 6

wall id 141 nodes (0.475 -2.45500) (0.475 -2.44000)
wall id 142 nodes (0.475 -2.44000) (0.500 -2.39000)
wall id 143 nodes (0.500 -2.39000) (0.525 -2.44000)
wall id 144 nodes (0.525 -2.44000) (0.525 -2.45500)
wall id 145 nodes (0.525 -2.45500) (0.525 -2.44000)
wall id 146 nodes (0.525 -2.44000) (0.500 -2.39000)
wall id 147 nodes (0.500 -2.39000) (0.475 -2.44000)
wall id 148 nodes (0.475 -2.44000) (0.475 -2.45500)

;(halbes) feststehendes Leitblech 7 rechts

wall id 149 nodes (0.600 -2.36500) (0.600 -2.38612)
wall id 150 nodes (0.600 -2.38612) (0.575 -2.44044)
wall id 151 nodes (0.575 -2.44044) (0.575 -2.45544)
wall id 152 nodes (0.575 -2.45544) (0.575 -2.44044)
wall id 153 nodes (0.575 -2.44044) (0.600 -2.38612)
wall id 154 nodes (0.600 -2.38612) (0.600 -2.36500)

;Verschließmechanismen

; Mechanismus 1

wall id 183 nodes (0.0265 -2.40656) (0.0265 -2.36500)
wall id 184 nodes (0.0265 -2.36500) (0.0500 -2.31689)
wall id 185 nodes (0.0500 -2.31689) (0.0735 -2.36500)
wall id 186 nodes (0.0735 -2.36500) (0.0735 -2.40656)
wall id 187 nodes (0.0735 -2.40656) (0.0735 -2.36500)
wall id 188 nodes (0.0735 -2.36500) (0.0500 -2.31689)
wall id 189 nodes (0.0500 -2.31689) (0.0265 -2.36500)
wall id 190 nodes (0.0265 -2.36500) (0.0265 -2.40656)

; Mechanismus 2

wall id 191 nodes (0.1265 -2.40656) (0.1265 -2.36500)
wall id 192 nodes (0.1265 -2.36500) (0.1500 -2.31689)
wall id 193 nodes (0.1500 -2.31689) (0.1735 -2.36500)
wall id 194 nodes (0.1735 -2.36500) (0.1735 -2.40656)
wall id 195 nodes (0.1735 -2.40656) (0.1735 -2.36500)
wall id 196 nodes (0.1735 -2.36500) (0.1500 -2.31689)
wall id 197 nodes (0.1500 -2.31689) (0.1265 -2.36500)
wall id 198 nodes (0.1265 -2.36500) (0.1265 -2.40656)

; Mechanismus 3

wall id 199 nodes (0.2265 -2.40656) (0.2265 -2.36500)
wall id 200 nodes (0.2265 -2.36500) (0.2500 -2.31689)
wall id 201 nodes (0.2500 -2.31689) (0.2735 -2.36500)
wall id 202 nodes (0.2735 -2.36500) (0.2735 -2.40656)
wall id 203 nodes (0.2735 -2.40656) (0.2735 -2.36500)

```

wall id 204 nodes (0.2735 -2.36500) (0.2500 -2.31689)
wall id 205 nodes (0.2500 -2.31689) (0.2265 -2.36500)
wall id 206 nodes (0.2265 -2.36500) (0.2265 -2.40656)
; Mechanismus 4
wall id 207 nodes (0.3265 -2.40656) (0.3265 -2.36500)
wall id 208 nodes (0.3265 -2.36500) (0.3500 -2.31689)
wall id 209 nodes (0.3500 -2.31689) (0.3735 -2.36500)
wall id 210 nodes (0.3735 -2.36500) (0.3735 -2.40656)
wall id 211 nodes (0.3735 -2.40656) (0.3735 -2.36500)
wall id 212 nodes (0.3735 -2.36500) (0.3500 -2.31689)
wall id 213 nodes (0.3500 -2.31689) (0.3265 -2.36500)
wall id 214 nodes (0.3265 -2.36500) (0.3265 -2.40656)
; Mechanismus 5
wall id 215 nodes (0.4265 -2.40656) (0.4265 -2.36500)
wall id 216 nodes (0.4265 -2.36500) (0.4500 -2.31689)
wall id 217 nodes (0.4500 -2.31689) (0.4735 -2.36500)
wall id 218 nodes (0.4735 -2.36500) (0.4735 -2.40656)
wall id 219 nodes (0.4735 -2.40656) (0.4735 -2.36500)
wall id 220 nodes (0.4735 -2.36500) (0.4500 -2.31689)
wall id 221 nodes (0.4500 -2.31689) (0.4265 -2.36500)
; Mechanismus 6
wall id 222 nodes (0.5265 -2.40656) (0.5265 -2.36500)
wall id 223 nodes (0.5265 -2.36500) (0.5500 -2.31689)
wall id 224 nodes (0.5500 -2.31689) (0.5735 -2.36500)
wall id 225 nodes (0.5735 -2.36500) (0.5735 -2.40656)
wall id 226 nodes (0.5735 -2.40656) (0.5735 -2.36500)
wall id 227 nodes (0.5735 -2.36500) (0.5500 -2.31689)
wall id 228 nodes (0.5500 -2.31689) (0.5265 -2.36500)
wall id 229 nodes (0.5265 -2.36500) (0.5265 -2.40656)

```

;Modellparameter der Wände

```

wall prop friction=0.35 kn=6.8e6 ks=6.8e6

```

;Erzeugung der Partikel in einem Bereich (hier exemplarisch dargestellt)

```

gen id 1, 100 rad 0.002 0.002 x=0 0.6 y=-2.28 -1.8

```

```

; generiere 100 Partikel mit einem Radius von 0.002m und den IDs von 1 bis 100
innerhalb eines Bereichs

```

;Modellparameter der Partikel

```

prop density 1300 kn=1.83e5 ks=1.83e5 friction=0.35
set grav 0 -9.81

```

; Einfärbung der Partikel (hier exemplarisch dargestellt)

```
def mark_ball
  bp = ball_head
  loop while bp # null
    loop i(1, 100)
      if b_id(bp) = i then
        b_color(bp) = 1
      end_if
    end_loop
    bp=b_next(bp)
  end_loop
end
mark_ball
```

; Löschen von Partikeln, um eine glatte Schicht innerhalb der Startstruktur zu erzeugen (hier exemplarisch dargestellt)

```
range name=glatt y=-1.996 -1.8
delete balls range glatt
```

; ruft den Quellcode der Datei „auslesen.txt“ auf

```
call auslesen.txt
```

; Quellcode der Datei „auslesen.txt“ zählt die Anzahl aller Partikel und roter Partikel

```
def count1
  Whilestepping
  box1=0 ;Counter für alle Partikel in einer Box
  color1=0 ;Counter für alle roten Partikel in einer Box
  bp=ball_head
  loop while bp # NULL
    if b_y(bp) < -2.45581
      if b_x(bp) > 0.005
        if b_x(bp) < 0.095
          Box1=Box1+1
          if b_color(bp) = 1
            color1=color1+1
          end_if
        end_if
      end_if
    end_if
  end_loop
  bp=b_next(bp)
endloop
;ii=out(' Box1 = '+string(Box1))
end
count1
```

```
def count2
  whilestepping
  box2=0
  color2=0
  bp=ball_head
```

```

loop while bp # NULL
  if b_y(bp) < -2.45581
    if b_x(bp) > 0.105
      if b_x(bp) < 0.195
        Box2=Box2+1
        if b_color(bp) = 1
          color2=color2+1
        end_if
      end_if
    end_if
  end_if
bp=b_next(bp)
endloop
;ii=out(' Box2          = '+string(Box2))
end
count2

```

def count3

```

whilestepping
box3=0
color3=0
bp=ball_head
loop while bp # NULL
  if b_y(bp) < -2.45581
    if b_x(bp) > 0.205
      if b_x(bp) < 0.295
        Box3=Box3+1
        if b_color(bp) = 1
          color3=color3+1
        end_if
      end_if
    end_if
  end_if
bp=b_next(bp)
endloop
;ii=out(' Box3          = '+string(Box3))
end
count3

```

def count4

```

whilestepping
box4=0
color4=0
bp=ball_head
loop while bp # NULL
  if b_y(bp) < -2.45581
    if b_x(bp) > 0.305
      if b_x(bp) < 0.395
        Box4=Box4+1
        if b_color(bp) = 1
          color4=color4+1
        end_if
      end_if
    end_if
  end_if
endloop

```

```

bp=b_next(bp)
endloop
;ii=out(' Box4                = '+string(Box4))
end
count4

```

```

def count5
whilestepping
box5=0
color5=0
bp=ball_head
  loop while bp # NULL
    if b_y(bp) < -2.45581
      if b_x(bp) > 0.405
        if b_x(bp) < 0.495
          Box5=Box5+1
          if b_color(bp) = 1
            color5=color5+1
          end_if
        end_if
      end_if
    end_if
  end_if
bp=b_next(bp)
endloop
;ii=out(' Box5                = '+string(Box5))
end
count5

```

```

def count6
whilestepping
box6=0
color6=0
bp=ball_head
  loop while bp # NULL
    if b_y(bp) < -2.45581
      if b_x(bp) > 0.505
        if b_x(bp) < 0.595
          Box6=Box6+1
          if b_color(bp) = 1
            color6=color6+1
          end_if
        end_if
      end_if
    end_if
  end_if
bp=b_next(bp)
endloop
;ii=out(' Box6                = '+string(Box6))
end
count6

```

; ruft den Quellcode der Datei „plot_austragsmenge.txt“ auf
call plot_austragsmenge.txt

; Quellcode der Datei „plot_austragsmenge.txt“ schreibt die Anzahl
aller Partikel und roter Partikel unter die Auffangbehälter

```

def Variables_
  array vec1_(2)
  vec1_(1)=0.
  vec1_(2)=-2.55519

  array vec7_(2)
  vec7_(1)=0.005
  vec7_(2)=-2.57519

  array vec2_(2)
  vec2_(1)=0.105
  vec2_(2)=-2.55519

  array vec8_(2)
  vec8_(1)=0.105
  vec8_(2)=-2.57519

  array vec3_(2)
  vec3_(1)=0.205
  vec3_(2)=-2.55519

  array vec9_(2)
  vec9_(1)=0.205
  vec9_(2)=-2.57519

  array vec4_(2)
  vec4_(1)=0.305
  vec4_(2)=-2.55519

  array vec10_(2)
  vec10_(1)=0.305
  vec10_(2)=-2.57519

  array vec5_(2)
  vec5_(1)=0.405
  vec5_(2)=-2.55519

  array vec11_(2)
  vec11_(1)=0.405
  vec11_(2)=-2.57519

  array vec6_(2)
  vec6_(1)=0.505
  vec6_(2)=-2.55519

  array vec12_(2)
  vec12_(1)=0.505
  vec12_(2)=-2.57519
end
Variables_

def Box1plot
  plot_item
  ii=set_font(0.5)

```

```

    ii=draw_string(vec1_,string(box1))
end
plot add fish Box1plot=black

def Box7plot
  plot_item
  ii=set_font(0.5)
  ii=draw_string(vec7_,string(color1))
end
plot add fish Box7plot=red

def Box2plot
  plot_item
  ii=set_font(0.5)
  ii=draw_string(vec2_,string(box2))
end
plot add fish Box2plot=black

def Box8plot
  plot_item
  ii=set_font(0.5)
  ii=draw_string(vec8_,string(color2))
end
plot add fish Box8plot=red

def Box3plot
  plot_item
  ii=set_font(0.5)
  ii=draw_string(vec3_,string(box3))
end
plot add fish Box3plot=black

def Box9plot
  plot_item
  ii=set_font(0.5)
  ii=draw_string(vec9_,string(color3))
end
plot add fish Box9plot=red

def Box4plot
  plot_item
  ii=set_font(0.5)
  ii=draw_string(vec4_,string(box4))
end
plot add fish Box4plot=black

def Box10plot
  plot_item
  ii=set_font(0.5)
  ii=draw_string(vec10_,string(color4))
end
plot add fish Box10plot=red

def Box5plot
  plot_item

```

```

ii=set_font(0.5)
ii=draw_string(vec5_,string(box5))
end
plot add fish Box5plot=black

def Box11plot
  plot_item
  ii=set_font(0.5)
  ii=draw_string(vec11_,string(color5))
end
plot add fish Box11plot=red

def Box6plot
  plot_item
  ii=set_font(0.5)
  ii=draw_string(vec6_,string(box6))
end
plot add fish Box6plot=black

def Box12plot
  plot_item
  ii=set_font(0.5)
  ii=draw_string(vec12_,string(color6))
end
plot add fish Box12plot=red

```

; ruft den Quellcode der Datei „Bewegung_Ausgangszustand.txt“ auf
call Bewegung_Ausgangszustand.txt

; Quellcode der Datei „Bewegung_Ausgangszustand.txt“ zur
Programmierung der gleichmäßigen Fahrweise aller
Verschleißmechanismen

```
range name=boxen y=-2.53000 -2.45581
```

```

SET extra wall 1
def fill
  x_=0
  wp=wall_head
  loop i(183,229)
    w_extra(wp,1)=x_
    wp=w_next(wp)
  endloop
end
fill

```

```

def movingroofs
  whilestepping
    wp=wall_head
    v1=0.0335
    v2=0.0005
  loop while wp # null
    loop i(183,229)
      if w_id(wp)=i

```

```

if w_extra(wp,1) = 1
  if w_y(wp) >= 0.000
    w_yvel(wp) = v2
  else
    if w_y(wp) <= -0,016
      w_yvel(wp) = v1
    else
      w_yvel(wp) = v1
    end_if
  end_if
  if w_y(wp) > 0.0001
w_yvel(wp) = -v1

    COMMAND
      delete balls range boxen
    ENDCOMMAND
    w_extra(wp,1) = 0
  end_if
end_if

if w_extra(wp,1) = 0
  if w_y(wp) <= -0.017
    w_yvel(wp) = -v1
  else
    w_yvel(wp) = -v1
  end_if
  if w_y(wp) < -0.017
w_yvel(wp) = v1
    w_extra(wp,1) = 1
  end_if
end_if
end_if
endloop
wp=w_next(wp)
endloop
end

movingroofs

```

```
; ruft den Quellcode der Datei „Bewegung_einzeln.txt“ auf  
call Bewegung_einzeln.txt
```

```
; Quellcode der Datei „Bewegung_einzeln.txt“ zur individuellen  
Programmierung der Fahrweise eines einzelnen  
Verschleißmechanismus
```

```
range name=boxen y=-2.53000 -2.45581
```

```
; Verschleißmechanismus rechts außen
```

```
SET extra wall 1
```

```
def fill
```

```
x_=0
```

```
wp=wall_head
```

```
loop i(222,229)
```

```
  w_extra(wp,1)=x_
```

```
  wp=w_next(wp)
```

```
endloop
```

```
end
```

```
fill
```

```
def movingroofoausenrechts
```

```
  whilestepping
```

```
    wp=wall_head
```

```
    v1=0.0335
```

```
    v2=0.0005
```

```
    v3=0.00225
```

```
loop while wp # null
```

```
loop i(222,229)
```

```
if w_id(wp)=i
```

```
  if w_extra(wp,1) = 1
```

```
    if w_y(wp) >= 0.000
```

```
      w_yvel(wp) = v2
```

```
    else
```

```
      if w_y(wp) <= -0,016
```

```
        w_yvel(wp) = v1
```

```
      else
```

```
        w_yvel(wp) = v1
```

```
      end_if
```

```
    end_if
```

```
    if w_y(wp) > 0.0001
```

```
      w_yvel(wp) = -v1
```

```
      COMMAND
```

```
        delete balls range boxen
```

```
      ENDCOMMAND
```

```
      w_extra(wp,1) = 0
```

```
    end_if
```

```
  end_if
```

```
if w_extra(wp,1) = 0
  if w_y(wp) <= -0.01675
    w_yvel(wp) = -V3
  else
    w_yvel(wp) = -v1
  end_if

  if w_y(wp) < -0.01685
    w_yvel(wp) = v1
    w_extra(wp,1) = 1
  end_if
end_if
endloop

wp=w_next(wp)

endloop
end
```

movingroofausssenrechts