

**Entwicklung eines Korndummies zur direkten Markierung
von Getreide mittels Radiofrequenzidentifikation (RFID) als
technische Möglichkeit zur Rückverfolgung**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Agrarwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Lutz Beplate-Haarstrich

geboren in Uelzen

Göttingen, im September 2007

D 7

1. Referent: Prof. Dr. W. Lücke

2. Korreferentin: Prof. Dr. E. Pawelzik

Tag der mündlichen Prüfung: 15. November 2007

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	LITERATURÜBERSICHT	2
2.1	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	2
2.2	Verfahren zur Rückverfolgung von Getreide	6
2.2.1	EDV-basiertes Informationssystem QM-G.....	7
2.2.2	Stabilisotopenanalytik.....	10
2.2.3	Getreide-Rückverfolgungs-Kaplette	12
2.2.4	Radiofrequenzidentifikation.....	13
2.2.4.1	Aufbau und Funktionsweise der Radiofrequenz- identifikation	14
2.2.4.2	Einsatz der Radiofrequenzidentifikationstechnologie in der Getreidekette.....	20
2.3	Grundlagen der Entmischung von Schüttgütern	25
2.3.1	Partikeleigenschaften.....	26
2.3.2	Mechanismen und Prozesse.....	28
2.3.2.1	Siebung	29
2.3.2.2	Böschungswinkel.....	30
2.3.2.3	Aufprall	31
2.3.2.4	Perkolation.....	31
2.3.2.5	Flugbahn.....	33
2.3.2.6	Gasströmung.....	35

3	MATERIAL UND METHODEN.....	38
3.1	Korndummies.....	38
3.1.1	Konstruktionsvorgaben.....	38
3.1.2	Herstellung und Eigenschaften	41
3.2	Versuchsaufbau und -durchführung	43
3.3	Versuchsauswertung	47
3.3.1	Vergleich der Dummykonzentrationen in Abhängigkeit von den Ringen und Quadranten.....	48
3.3.2	Vergleich der Dummykonzentrationen in Abhängigkeit von den Dichteklassen und Formen	49
4	ERGEBNISSE.....	50
4.1	Vergleich der Dummykonzentrationen in Abhängigkeit von den Ringen und Quadranten (Modell 1) innerhalb der einzelnen Dummytypen.....	50
4.2	Vergleich der Dummykonzentrationen in Abhängigkeit von den Dichteklassen und Formen (Modell 2) innerhalb der einzelnen Ringe	53
4.3	Vergleich der Dummykonzentrationen in Abhängigkeit von den Dichteklassen und Formen (Modell 2) innerhalb der einzelnen Quadranten.....	56

5	DISKUSSION	59
5.1	Partikeleigenschaften	59
5.2	Entmischungsprozesse.....	62
5.3	Entmischungsmechanismen	64
5.4	Nutzbarkeit der Verfahren zur Rückverfolgung von Getreide in der Praxis.....	67
5.4.1	Analytische Verfahren	67
5.4.2	EDV-basierte Verfahren.....	68
5.4.3	Verfahren zur direkten Markierung von Getreide	69
5.4.3.1	Vergleich der Verfahren zur direkten Markierung von Getreide.....	70
5.4.3.2	Markierungsdichte und Vermischungsproblematik	71
5.4.3.3	Datensicherheit und Lebensmittelechtheit	73
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	76
7	LITERATURVERZEICHNIS	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel für ein Stufen übergreifendes T&T durch QM-G (AS: Ackerschlag; LDW: Landwirt; LH: Landhandel) (Poignée 2006 [39]).....	8
Abbildung 2: Partie-Rückverfolgbarkeit in der Getreidekette (Menzi 2006 [32]).....	9
Abbildung 3: Einflussparameter auf Isotopenverhältnisse (Schmidt 2005 [44]).....	11
Abbildung 4: Grundbausteine eines RFID-Systems, verändert nach (Finkenzeller 2006 [21]).....	15
Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau eines induktiv gekoppelten RFID-Transponders mit Antennenspule, verändert nach (Finkenzeller 2006 [21]).....	16
Abbildung 6: Spannungsversorgung eines induktiv gekoppelten Transponders, verändert nach (Finkenzeller 2006 [21]).....	18
Abbildung 7: Erzeugung der Lastmodulation im Transponder, verändert nach (Finkenzeller 2006 [21]).....	19
Abbildung 8: mic3 [®] 2k TAG im Größenvergleich zu Weizenkörnern (Tovornik und Beplate-Haarstrich 2006 [49]).....	21
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Datenflusses in einer Getreidekette.....	24
Abbildung 10: Entmischung nach der Partikelgröße durch den Siebeffekt (Schulze 2006 [45]).....	29
Abbildung 11: Entmischung durch unterschiedliche Böschungswinkel bedingt durch: a. die Partikelform; b. die Feinheit der Partikel (Schulze 2006 [45]).....	30
Abbildung 12: Entmischung durch Kraterbildung (Schulze 2006 [45]).....	31

Abbildung 13: Entmischung durch Perkolation (Schulze 2006 [45])	32
Abbildung 14: Entmischung in einem Schüttkegel durch Perkolation und Siebeffekt: a. Tannenbaumstruktur des Feingutes durch Lawinenbildung; b. Geschwindigkeitsgradient und Perkolation in der Lawine (Schulze 2006 [45]).....	33
Abbildung 15: Entmischung durch unterschiedliche Flugbahnen: a. Aufschüttung eines Kegels; b. Befüllung eines Silos (Schulze 2006 [45])	34
Abbildung 16: Entmischung durch unterschiedliche Flugbahnen bei der Materialaufgabe (Schulze 2006 [45]).....	35
Abbildung 17: Entmischung durch von Luftströmungen mitgerissenes Feingut (Schulze 2006 [45])	36
Abbildung 18: Entmischung durch eine fluidisierte Schicht des Schüttgutes im oberen Bereich (Schulze 2006 [45])	37
Abbildung 19: Konstruktionszeichnung der Korndummies (alle Maße in mm).....	40
Abbildung 20: Korndummies im Vergleich zu Weizenkörnern	42
Abbildung 21: Konstruktionszeichnung des Probenteilers (alle Maße in mm, R = Radius)	45
Abbildung 22: Sektorenkennzeichnung des Probenteilers	46
Abbildung 23: Eingestochener Probenteiler im Schüttkegel.....	46
Abbildung 24: Mittelwerte und Standardfehler der Konzentrationen des Korndummies der Dichteklasse 1, Form 1 in Abhängigkeit von den Ringen und Quadranten (Säulen mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant)	53

Abbildung 25: Mittelwerte und Standardfehler der Korndummykonzentrationen in Ring D in Abhängigkeit von der Form und der Dichteklasse (Säulen mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant)	56
Abbildung 26: Mittelwerte und Standardfehler der Korndummykonzentrationen in Quadrant 2 in Abhängigkeit von der Form und der Dichteklasse (Säulen mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant)	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Weizenkörnern (Feustel et al. 1984 [20], Tscheuschner 2004 [50], Nelson 2001 [36], Zink 1935 [56])	39
Tabelle 2: Durchschnittliche Abmessungen von Korndummies und Weizenkörnern der Sorte Bommer (n=100).....	39
Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften der Korndummies im Vergleich zu den in den Versuchen eingesetzten Weizenkörnern der Sorte Bommer	42
Tabelle 4: Mittelwerte der Konzentrationen der einzelnen Dummytypen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) in Abhängigkeit von den Ringen.....	51
Tabelle 5: Mittelwerte der Konzentrationen der einzelnen Dummytypen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) in Abhängigkeit von den Quadranten	52
Tabelle 6: Mittelwerte der Dummykonzentrationen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) innerhalb der Ringe in Abhängigkeit von der Dichteklasse.....	54
Tabelle 7: Mittelwerte der Dummykonzentrationen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) innerhalb der Ringe in Abhängigkeit von der Form ..	55
Tabelle 8: Mittelwerte der Dummykonzentrationen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) innerhalb der Quadranten in Abhängigkeit von der Dichteklasse.....	57
Tabelle 9: Mittelwerte der Dummykonzentrationen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) innerhalb der Ringe in Abhängigkeit von der Form ..	57

Abkürzungsverzeichnis

μ :	Mittelwert
Abb.:	Abbildung
Auto-ID:	automatisches Identifikationsverfahren
C_{Dummy} :	Korndummykonzentration, Anzahl der Korndummies pro Kilogramm Weizen [n/kg]
D_i :	fixer Effekt der i-ten Dichteklasse ($i = 1, 2, 3, 4$)
$D_i \cdot F_j$:	Interaktion der i-ten Dichteklasse · der j-ten Form
EDV:	Elektronische Datenverarbeitung
e_{ijk} :	zufallsbedingte Restkomponente von Y_{ijk}
EU:	Europäische Union
F_j :	fixer Effekt der j-ten Form ($j = 1, 2$)
HF:	High Frequency
IRMS:	Multielement-Multikomponenten Isotopenverhältnismassenspektrometrie (englisch: Isotope Ratio Mass Spectrometry)
LF:	Low Frequency
n:	Anzahl
Q_j :	fixer Effekt des j-ten Quadranten ($j = 1, 2, 3, 4$)
QM-G:	QM-G ist eine Produktkennzeichnung und wird deshalb nicht ausgeschrieben
R:	Radius
RF:	Radio Frequency
RFID:	Radiofrequenzidentifikation (englisch: Radio Frequency Identification)
R_i :	fixer Effekt des i-ten Ringes ($i = 1, 2, 3, 4$)

$R_i \cdot Q_j$:	Interaktion des i-ten Ringes · des j-ten Quadranten
T&T:	Vor- und Rückwärtsverfolgung (englisch: Tracking & Tracing)
Tab.:	Tabelle
UHF:	Ultra High Frequency
VO:	Verordnung
VSMOW:	Vienna Standard Mean Ocean Water
Y_{ijk} :	Beobachtungswert

1 Einleitung

Neben der Produktqualität von Lebens- und Futtermitteln hat die Qualität ihres Herstellungsprozesses heutzutage einen vergleichbaren Stellenwert eingenommen. Diese Prozessqualität ist Teil der aktuellen Gesetzgebung in der Europäischen Union geworden zur Erhöhung der Lebens- und Futtermittelsicherheit in den Mitgliedsstaaten.

Insbesondere das Gebot zur Rückverfolgung sämtlicher Lebens- und Futtermittel bis zu ihrem Ursprung hat Diskussionen über Art und Umfang ihrer Durchführung aufgrund unpräziser Begriffsdefinitionen und mangelhafter Effizienz ausgelöst. Dies betrifft in hohem Maße pflanzliche Produkte aus der landwirtschaftlichen Primärproduktion und hier insbesondere Massen- bzw. Schüttgüter wie Getreide.

In der vorliegenden Arbeit wird daher der rechtliche Rahmen bezüglich der Rückverfolgung von Getreide näher erörtert, welches als Lebens- oder Futtermittel Verwendung finden soll. Es werden Verfahren vorgestellt, die sich speziell den Problematiken annehmen, die im Zusammenhang mit der Rückverfolgung von Getreide auftreten. Der Schwerpunkt liegt auf dem Einsatz von Radiofrequenzidentifikationstechnologie (RFID), einem Verfahren, das weltweit in der Industrie und Wirtschaft breite Anwendung gefunden hat und Potenzial für die Rückverfolgbarkeit von Schüttgütern bietet.

Grundlage der Rückverfolgung von Getreide mittels RFID sind die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten sogenannten Korndummies. Diese enthalten mit herkunftsrelevanten Daten programmierbare RFID-Transponder und werden dem Getreide beigemischt, um es schon während der Ernte eindeutig zu markieren.

Es wurden Versuche mit Weizen durchgeführt, um das Verhalten der Korndummies im Getreidestrom zu untersuchen. Denn es muss für eine sichere Markierung gewährleistet sein, dass die Dummies zuverlässig im Getreide verbleiben und sich nicht entmischen.

2 Literaturübersicht

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Das Weißbuch zur Lebensmittelsicherheit der Europäischen Kommission ist der Ausgangspunkt der heute in der Europäischen Union gültigen Rechtsvorschriften bezüglich der Lebens- und Futtermittelproduktion. In diesem Dokument genießt die Forderung nach dem höchsten Standard der Lebensmittelsicherheit für die Europäische Union höchste Priorität [30]. So wird aufgrund der enormen Veränderungen in der Lebens- und Futtermittelproduktion in den letzten Jahrzehnten und der jüngsten Krisen im Lebensmittelsektor die Notwendigkeit nach einer Aktualisierung, Vereinheitlichung und Vereinfachung der bestehenden europäischen Rechtsvorschriften laut. Diese Novellierung soll sämtliche Bereiche der Lebens- und Futtermittelherstellungskette nach dem Grundsatz „... vom Erzeuger zum Verbraucher ... [30]“ erfassen. Die Hauptverantwortung für die Lebensmittelsicherheit tragen demnach explizit die Futtermittelerzeuger, die Landwirte und die Lebensmittelunternehmen. Im Zuge dieser Gesetzreformen wird die Möglichkeit der Rückverfolgung von Lebens- und auch Futtermitteln als einer der wichtigsten Aspekte angesehen [30].

Das Ergebnis der inhaltlichen Umsetzung des Weißbuches zur Lebensmittelsicherheit ist das seit dem 1. Januar 2006 vollständig in Kraft getretene sogenannte EU Lebensmittelhygiene Paket. Dieser Begriff ist in der Literatur nicht genau definiert, angesprochen sind in der Regel die folgenden EU Verordnungen:

- Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der

Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit [3]

- Verordnung (EG) Nr. 852/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Lebensmittelhygiene [4]
- Verordnung (EG) Nr. 853/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 mit spezifischen Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs [5]
- Verordnung (EG) Nr. 183/2005 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Januar 2005 mit Vorschriften für die Futtermittelhygiene [6]

Diese Verordnungen haben in jedem Mitgliedsstaat der Europäischen Union unmittelbare Gültigkeit.

Zusätzlich wurde in Deutschland zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 178/2002 und zur Umsetzung und Durchführung weiterer Rechtsakte der Europäischen Gemeinschaft bezüglich Lebens- und Futtermitteln sowie Bedarfsgegenständen folgendes Gesetz erlassen:

- Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch (Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch - LFGB) [15]

Im EU Lebensmittelhygiene Paket stellt die Verordnung (EG) Nr. 178/2002 die Grundlage der Lebensmittelsicherheit für das angestrebte höchste Schutzniveau für die Gesundheit des Verbrauchers in der Europäischen Union dar. Diese Verordnung sieht die Lebensmittelherstellungskette als ein Kontinuum, „... und zwar von – einschließlich – der Primärproduktion und der Futtermittelproduktion bis hin – einschließlich – zum Verkauf bzw. zur Abgabe der Lebensmittel an den Verbraucher, da jedes Glied dieser Kette eine potenzielle Auswirkung auf die Lebensmittelsicherheit haben kann [3].“ Deshalb beinhaltet sie neben dem allgemeinen Lebensmittelrecht zusätzlich futtermittelrechtliche Belange und wird aus diesem Grund auch Basisverordnung genannt. Alle weiteren genannten Verordnungen und Gesetze sind spezialisierte Vorschriften, um den Anforderungen in sämtlichen Bereichen

der Lebens- und Futtermittelproduktion gerecht werden zu können [3, 4, 5, 6, 15].

Die Basisverordnung definiert Lebensmittel als „... alle Stoffe oder Erzeugnisse, die dazu bestimmt sind oder von denen nach vernünftigem Ermessen erwartet werden kann, dass sie in verarbeitetem, teilweise verarbeitetem oder unverarbeitetem Zustand von Menschen aufgenommen werden [3].“ Futtermittel sind „... Erzeugnisse, ... die zur oralen Tierfütterung bestimmt sind ... [3]“.

Ausdrücklich nicht zu den Lebensmitteln gehören Futtermittel und Pflanzen vor dem Ernten [3]. Dies impliziert, dass Pflanzen bereits mit Beginn der Ernte zum Lebensmittel werden, wenn sie nicht als Futtermittel oder anderweitig Verwendung finden sollen.

Der Begriff Ernte ist in der Basisverordnung nicht definiert. Auch in weiterführender Literatur bezüglich dieser Gesetzgebung findet sich kein Hinweis darauf, wann die Ernte im Sinne der Basisverordnung beginnt [3, 17, 47, 51]. Nach [14] ist die Ernte „... das Einbringen von Feld- und Gartenfrüchten sowie anderen verwertbaren Pflanzenprodukten ...“.

Das Einbringen bzw. die Ernte des in der vorliegenden Arbeit relevanten pflanzlichen Produkts Getreide beginnt nach allgemeinem Verständnis mit dem Abschneiden der Halme durch das Schneidwerk des Mähdeschers. Folgerichtig wird das Getreide zu diesem Zeitpunkt im Sinne der Basisverordnung zum Lebensmittel, sofern es nicht schon ein Futtermittel ist.

Gestützt wird diese Aussage durch den Anhang I, Teil A der Verordnungen (EG) Nr. 852/2004 und Nr. 183/2005. Nach diesen Verordnungen dürfen pflanzliche Erzeugnisse nur mit hygienisch einwandfreien Anlagen, Ausrüstungen, Behältern, Transportkisten und Fahrzeugen in Kontakt kommen, wenn sie als Lebens- oder Futtermittel genutzt werden sollen [4, 6].

Eindeutig unterliegt Getreide damit ab Beginn des Mähdruschs dem gültigen Lebensmittelrecht [3, 4, 15] oder zusätzlich zum Lebensmittelrecht auch

dem Futtermittelrecht [3, 6, 15] in Abhängigkeit von der Nutzung als Lebens- oder Futtermittel.

Artikel 18 der Basisverordnung beinhaltet den schon im Weißbuch zur Lebensmittelsicherheit als sehr wichtig angesehenen Aspekt der Rückverfolgbarkeit. Die Rückverfolgbarkeit ist definiert als „... die Möglichkeit, ein Lebensmittel oder Futtermittel ... durch alle Produktions-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen zu verfolgen ... [3]“. So ist die „... Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln und Futtermitteln, von der Lebensmittelgewinnung dienenden Tieren und allen sonstigen Stoffen, die dazu bestimmt sind oder von denen erwartet werden kann, dass sie in einem Lebensmittel oder Futtermittel verarbeitet werden, ... in allen Produktions-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen sicherzustellen [3].“

Diesbezüglich schreibt die Basisverordnung den Lebens- und Futtermittelunternehmen, zu denen auch landwirtschaftliche Betriebe zählen, nur die Dokumentation der Wareneingänge und -ausgänge vor. Es wird keine unternehmensinterne Chargenrückverfolgbarkeit gefordert [3, 51]. Bei dieser Vorgehensweise kann jedoch keine eindeutige Verknüpfung zwischen angelieferten Waren auf der einen und ausgelieferten Erzeugnissen auf der anderen Seite hergestellt werden. Dies hat zur Folge, dass in Schadensfällen die Eingrenzung fehlerhafter Chargen auf möglichst wenige Lieferanten oder Herkunft plus der dazugehörigen Rückstellproben problematisch ist, wenn die Schadensursache nicht im eigenen Unternehmen zu suchen ist [39, 42, 51]. Das hat u. a. auch der ständige Ausschuss für die Lebensmittelkette und Tiergesundheit der Europäischen Union erkannt und es wird dringend empfohlen, Systeme für die interne Rückverfolgbarkeit im eigenen Interesse der Wirtschaft einzurichten [37, 47, 51]. Nur so können im Schadensfall Kosten und Imageverluste minimiert und auch den geänderten Vorschriften zur Produkthaftung begegnet werden. Die interne Rückverfolgbarkeit ist das entscheidende Effizienzkriterium, auch wenn sie mit einem höheren Aufwand verbunden ist [37, 39, 42]. Hinzu kommt, dass ein absolut transparenter Produktionsprozess durch eine Reihe von in der Praxis weit-

verbreiteten Qualitätssicherungssystemen und -standards bzw. der Lebens- und Futtermittelindustrie ganz einfach gefordert wird [13, 26, 37].

Die Konsequenz für Getreide als Lebens- oder Futtermittel ist, dass es ausgehend vom Verbraucher bis zu seinem Ursprung in der landwirtschaftlichen Primärproduktion absolut lückenlos und damit auch unternehmensintern rückverfolgbar sein muss [3, 37, 39, 42, 47, 51]. Da Getreide, wie dargelegt, ab dem Beginn des Mähdruschs ein Lebens- oder Futtermittel ist, kann der aufgezeichnete Ursprung nur der Ackerschlag sein, auf dem das Getreide gewachsen ist. Im folgenden Abschnitt sollen daher Verfahren betrachtet werden, die in der Lage sind, Getreide bis zu seinem Ursprung in der Landwirtschaft rückverfolgen zu können.

2.2 Verfahren zur Rückverfolgung von Getreide

Die Rückverfolgung von Getreide ist ein schwieriger, aufwendiger Prozess. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass es sich bei Getreide um ein Massen- bzw. Schüttgut handelt, welches bis zu seiner Verarbeitung vielen Vermischungsprozessen unterliegt. Die ersten Vermischungen treten in der Regel schon beim Landwirt durch die Einlagerung der Ernte von mehreren Ackerschlägen in ein einzelnes Lager oder Silo auf. Dies setzt sich fort während der Erfassung von Getreide mehrerer Landwirte durch den Landhandel oder die Mühlen und die anschließende Einlagerung in nicht voneinander getrennte Silos. Zu diesen Vermischungsprozessen, bedingt durch die Silotechnik und traditionelle Ein-, Um- und Zulagerungstaktiken, kommen noch gezielte Vermischungen zur Erreichung bestimmter Qualitäten hinzu [35, 37, 38, 39].

So kann bezüglich der internen Rückverfolgbarkeit versucht werden, über Simulationsprogramme mit enormem Programmier- und Betreuungsaufwand das Fließverhalten von Getreide in einem Silo darzustellen [35]. Denkbar ist auch eine Abgrenzung der Getreideflüsse in einem Unternehmen

mithilfe von Mengen- oder Zeitfenstern [23]. Trotzdem ist die chargen- genaue, eindeutige Bestimmung der Herkunft einer entnommenen Menge des Getreides nicht exakt möglich, wenn ein Lager oder Silo durch unterschiedliche Landwirte bzw. Anlieferer gefüllt wurde [13].

Um diesem Problem der Rückverfolgbarkeit von Getreide zu begegnen, sind deshalb neue Verfahren entwickelt worden bzw. befinden sich zurzeit in der Entwicklung. Sie beruhen entweder auf der EDV gekoppelt mit Datenbanken, analytischen Verfahren oder der direkten Markierung von Getreide.

2.2.1 EDV-basiertes Informationssystem QM-G

Beispielhaft für EDV-basierte Rückverfolgungssysteme soll hier das sogenannte Modul für Vor- und Rückwärtsverfolgbarkeit des Informationssystems QM-G erläutert werden (QM-G ist keine Abkürzung sondern eine Produktkennzeichnung und wird deshalb nicht ausgeschrieben). Es wurde am Lehrstuhl für Unternehmensführung, Organisation und Informationsmanagement, Institut für landwirtschaftliche Betriebslehre, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn entwickelt und wird bereits in der Praxis beispielsweise im Qualitätsprogramm Eifelähre eingesetzt [42].

Ein wesentliches Merkmal dieses Systems ist, dass es Stufen übergreifend zur Rückverfolgung in der Getreidekette eingesetzt werden kann, also Landwirte, Landhandel, Verarbeiter (Mühlen) und Kunden (Bäcker, Futtermittelindustrie) flexibel mit einbezieht (Abb. 1). Auch die unternehmensinterne Rückverfolgbarkeit kann mit QM-G gewährleistet werden. Alle hierzu notwendigen Daten werden in einer zentralen Datenbank gespeichert, die über das Internet den Systemteilnehmern zugänglich ist [42].

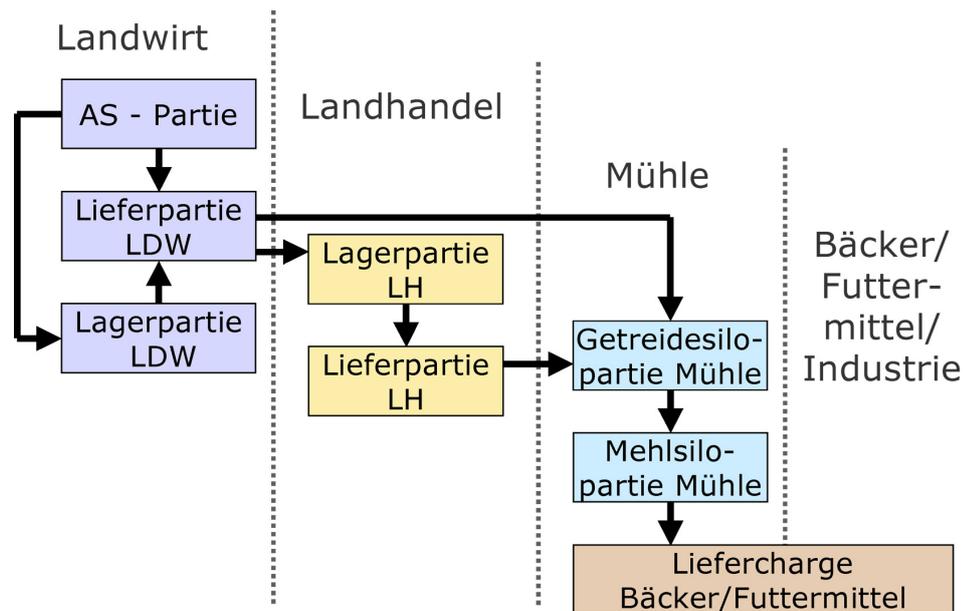


Abbildung 1: Beispiel für ein Stufen übergreifendes T&T durch QM-G (AS: Ackerschlag; LDW: Landwirt; LH: Landhandel) (Poignée 2006 [39])

Zur Erfassung von Getreidepartien und Vermischungsprozessen, z. B. durch Ein- und Umlagerungen, wurde ein flexibles Nummernsystem entwickelt. Es basiert auf der Verknüpfung von Parteien als zeitlich und räumlich unterscheidbare Mengen Getreide durch die Zuweisung von eindeutigen Codes, wodurch die Rückverfolgbarkeit gewährleistet wird (Abb. 1, 2). Gemeint ist damit beispielsweise das Getreide auf einem Ackerschlag oder der Inhalt eines Lagers zwischen zwei Leerstellungen. Eine Partie behält ihre Codierung, solange sie sich auf ihrem Feld oder in ihrem Lager befindet. Wird sie z. B. aufgeteilt, umgelagert oder anderem Getreide zugelagert, erhalten die resultierenden neuen Parteien auch neue Codes (Abb. 2). Dementsprechend existiert eine Partie mit ihrem Code nur so lange, bis sie entweder vollständig auf andere Parteien verteilt oder verarbeitet wurde [23]. QM-G verwaltet also keine Silos oder Lager, sondern Parteien bzw. Chargen [42].

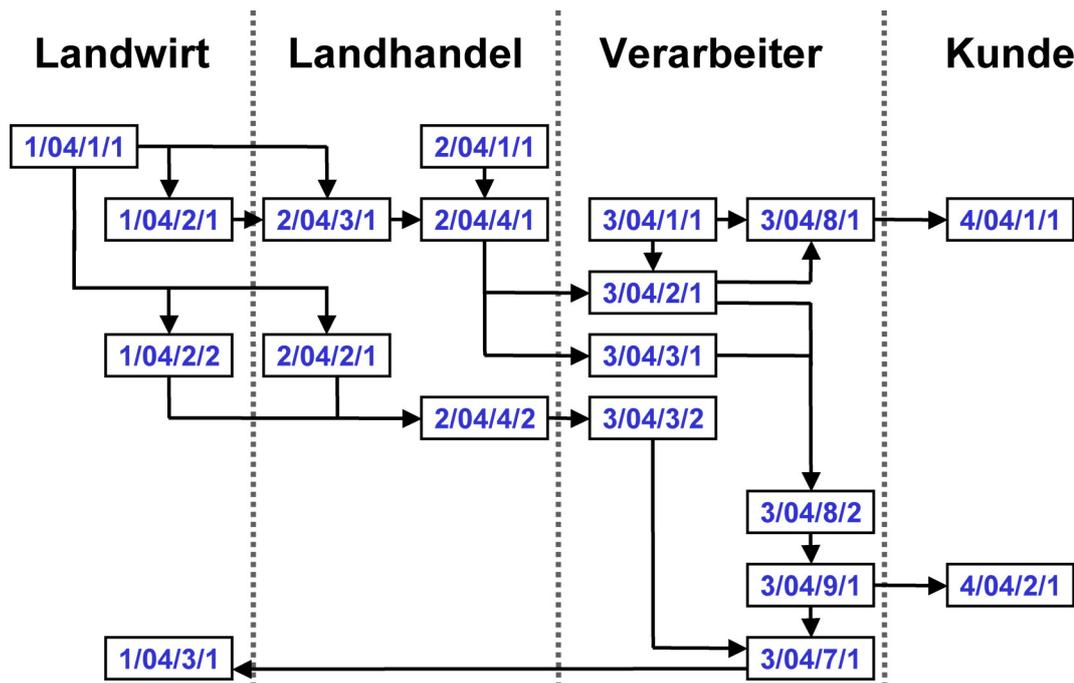


Abbildung 2: Partie-Rückverfolgbarkeit in der Getreidekette (Menzl 2006 [32])

Zusätzlich können den so abgegrenzten Partien über ihre Produktcodes weitere Informationen zugeordnet werden, wie beispielsweise Qualitätsparameter oder beliebige Daten aus Ackerschlagdateien. Diese Daten können auf unterschiedliche Arten in das System eingespeist werden:

- Manuelle Eingabe mittels eines Computers über standardisierte Masken
- Einscannen von handschriftlichen Dokumenten und Aufzeichnungen
- Automatisierter Datenimport aus unternehmensinternen Dokumentationsprogrammen

Die so erfassten Daten werden in einer zentralen QM-G Datenbank gespeichert und über das Internet weitergeleitet. Dementsprechend wird von den Systemteilnehmern zur Nutzung von QM-G nur ein PC, ein Webbrowser und ein Internetanschluss benötigt [42].

2.2.2 Stabilisotopenanalytik

Zur Prüfung der Herkunft und Authentizität von Lebens- und Futtermitteln pflanzlicher oder tierischer Herkunft in der amtlichen Lebensmittelüberwachung kommt in jüngerer Vergangenheit zunehmend die Stabilisotopenanalytik zum Einsatz. Sie nutzt die Tatsache, dass die sogenannten Bioelemente (Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Schwefel), aus denen sich die Biomasse der Lebens- und Futtermittel hauptsächlich zusammensetzt, Mischelemente sind. Neben einem stabilen, leichten Hauptisotop enthalten diese Elemente auch geringe Mengen stabiler, schwerer Nebenisotope. Die Konzentrationen dieser Isotope werden als relative Differenzen zu international festgelegten und anerkannten Standards als Delta-Werte in Promille angegeben. Beispielsweise ist der Isotopenstandard für Wasserstoff und Sauerstoff das Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW) [44].

Das Verhältnis eines Neben- zu dem Hauptisotop eines Elements in der Biomasse wird primär durch die bei ihrer Entstehung herrschenden geografischen, klimatischen, botanischen und (bio)chemischen Bedingungen beeinflusst (Abb. 3). Das so entstandene Isotopenmuster der Bioelemente eines Lebens- oder Futtermittels ist damit ein vor Manipulationen geschütztes Kennzeichen seiner geografischen Herkunft [43, 44].

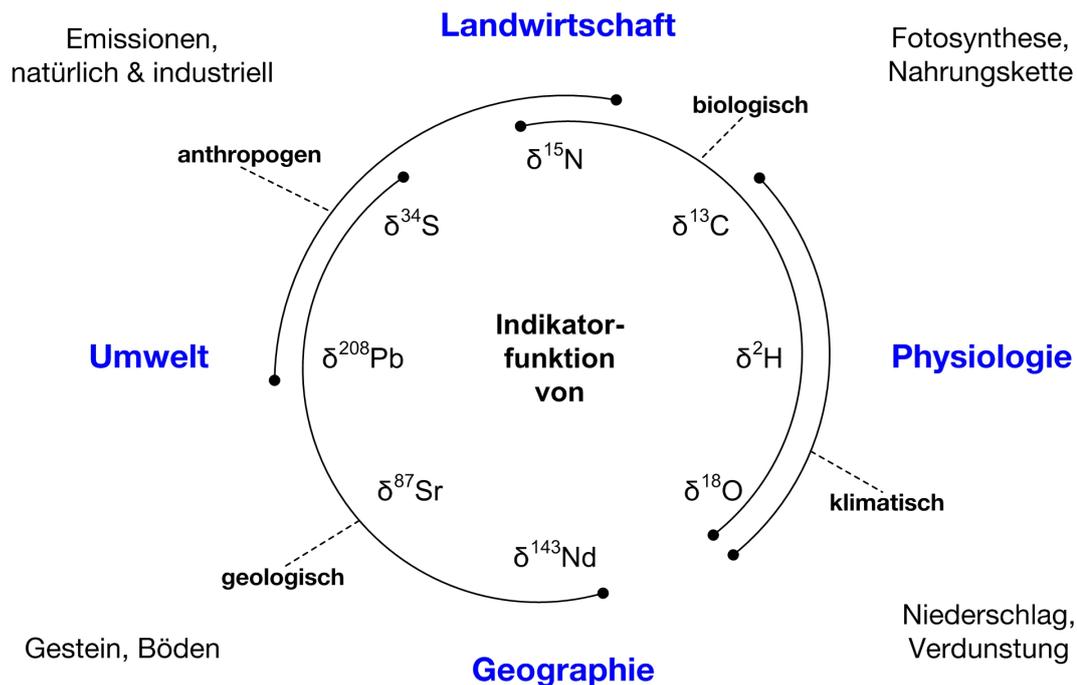


Abbildung 3: Einflussparameter auf Isotopenverhältnisse (Schmidt 2005 [44])

Zur Bestimmung der Isotopenverhältnisse wird die Multielement-Multikomponenten Isotopenverhältnismassenspektrometrie (IRMS, englisch: Isotope Ratio Mass Spectrometry) eingesetzt. Aus der Bezeichnung geht hervor, dass dabei die Isotopenverhältnisse mehrerer Elemente (z. B. C, H, O) in verschiedenen Inhaltsstoffen (z. B. Kohlenhydrate, Proteine) analysiert werden. Grundvoraussetzung für eine geografische Zuordnung der Herkunft eines fragwürdigen Produkts ist im Anschluss eine Datenbank, die Informationen zu Isotopenverhältnissen authentischer Proben einer Region enthält, um einen Abgleich vornehmen zu können. Beispiele für diese Datenbanken sind die EU-Weindatenbank und die Spargel-Datenbank des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Diese Datenbanken werden ständig erweitert und es kommen neue Datenbanken für weitere Lebens- bzw. Futtermittel hinzu [43, 44].

Diese Methode ist so leistungsfähig, dass feststellbar ist, ob beispielsweise eine Partie Spargel in Bayern angebaut wurde oder nicht. Teilweise ist sogar eine Unterscheidung zwischen den Anbaugebieten Bayerns möglich [43].

Andere Quellen berichten, dass Nachweise geführt werden konnten, erfolgreich zwei Ackerschlägen zwei Getreideproben richtig zuzuordnen, deren Entnahmepunkte nur zweihundert Meter voneinander entfernt waren [1].

Neben der geografischen Herkunftsbestimmung mittels Isotopenverhältnisanalysen von natürlich in Lebens- oder Futtermitteln vorkommenden Komponenten ist auch eine gezielte Markierung von Produkten möglich. Zu diesem Zweck stellt beispielsweise die Firma Agrosolab für ihr Markierungssystem ISO-ID Wasser mit einem speziellen Isotopenverhältnis her, welches auf das zu markierende Produkt gesprüht wird. Bei einer späteren Analyse kann dann gezielt nach dem Isotopenmuster des Markers gesucht werden [2, 7].

Eine Analyse mittels IRMS kann je nach zu untersuchender Art und Anzahl der Elemente bis zu zehn Stunden reine Messzeit in Anspruch nehmen, die Dauer der Probenaufbereitung nicht mit eingerechnet [44]. Die Nettokosten für die Untersuchung einer Probe betragen abhängig von der Probenart und -anzahl sowie der notwendigen Elemente 250 bis 400 Euro [7].

2.2.3 Getreide-Rückverfolgungs-Kaplette

Die Getreide-Rückverfolgungs-Kaplette (Grain Tracing Caplet) wird zur Zeit innerhalb eines Projekts zur Rückverfolgbarkeit von Getreide im Department of Biological and Agricultural Engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas entwickelt. Mit ihrer Hilfe soll Weizen zum Zeitpunkt des Überladens vom Mähdrescher auf ein Transportfahrzeug markiert werden, um eine Rückverfolgbarkeit sicherzustellen, auch wenn das Getreide Vermischungsprozessen unterliegt [24, 25].

Die Kapletten bestehen aus gepresstem Hartweizengries in Lebensmittelqualität mit natürlichen Pflanzenproteinen, um Probleme mit Allergien zu verhindern. Sie sind 3-7 mm lang, haben einen Durchmesser von ca. 4 mm,

eine Masse von ca. 87 mg und weisen eine spezifische Dichte von etwa $1,38 \text{ g/cm}^3$ auf. Damit wird ein einfaches Herausreinigen mit einem Sieb gewährleistet, um in der Getreidekette auf jeder Stufe Zugriff auf die Kapletten zu haben. Sie werden mit Barcodes bedruckt, die an jeder Getreideannahmestelle (Händler, Häfen) auslesbar sein sollen und mit Informationen in einer Datenbank verknüpft sind [25].

Die Kapletten werden mit einem Saatgutdosierer durch ein Plastikrohr beim Entladevorgang des Mähdreschers dem Weizenstrom dicht am Übergang von der Korntankschnecke zur Entladeschnecke des Überladerohrs zugeführt. Die dosierte Menge soll fünf Kapletten/kg Getreide betragen [25].

Versuche zur Gleichverteilung der Kapletten ergaben, dass zu Beginn und zum Ende des Entladevorgangs des Mähdreschers aufgrund des technisch bedingten geringeren Massenflusses des Weizens und der konstanten Dosierate der Kapletten zu hohe Kaplettenkonzentrationen auftraten. In der Mitte des Entladevorgangs konnten befriedigende Ergebnisse erzielt werden [24, 25].

Im Rahmen des amerikanischen Forschungsprojekts werden zukünftig neben der Dosiertechnik auch geeignete Scannertechnologien, Datenmanagementsysteme und die Frage nach der notwendigen Anzahl von Getreide-Rückverfolgungs-Kapletten pro Volumeneinheit Getreide erforscht [25].

2.2.4 Radiofrequenzidentifikation

Die Radiofrequenzidentifikation (RFID, englisch: Radio Frequency Identification) ist ein automatisches Identifikationsverfahren (Auto-ID), dessen Aufgabe und Ziel die Bereitstellung von Informationen zu Personen, Tieren, Gütern und Waren ist. RFID-Systeme sind eng mit den allgemein bekannten Chipkarten (z. B. Telefonkarten) verwandt. Bei beiden Verfahren

sind die Informationen auf einem Siliziumchip gespeichert. In einem RFID-System werden die Daten aber im Gegensatz zu Chipkarten nicht durch galvanisches Kontaktieren, sondern durch magnetische oder elektromagnetische Felder kontaktlos zwischen dem Datenträger und einem zugehörigen Lesegerät übertragen. Der Name Radiofrequenzidentifikation leitet sich aus der Tatsache ab, dass die notwendige Technologie von der Funk- und Radartechnik übernommen wurde [21, 29].

Bevor die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von RFID-Systemen zur Rückverfolgung von Getreide dargestellt werden, folgt die grundlegende Funktionsweise der Radiofrequenzidentifikation.

2.2.4.1 Aufbau und Funktionsweise der Radiofrequenzidentifikation

Die Grundbestandteile eines RFID-Systems sind immer ein kontaktloser Datenträger, der sogenannte Transponder, der an den zu identifizierenden Objekten befestigt wird und ein Erfassungs- bzw. Lesegerät (Abb. 4). Das Lesegerät kann je nach technologischer Ausführung eine reine Lese-Einheit oder aber eine Schreib-/ Lese-Einheit darstellen [21]. Unabhängig von der Fähigkeit, Daten nur lesen oder auch schreiben zu können, wird im Folgenden gleichbedeutend für ein Schreib- oder Lesegerät die Bezeichnung Lesegerät verwendet.

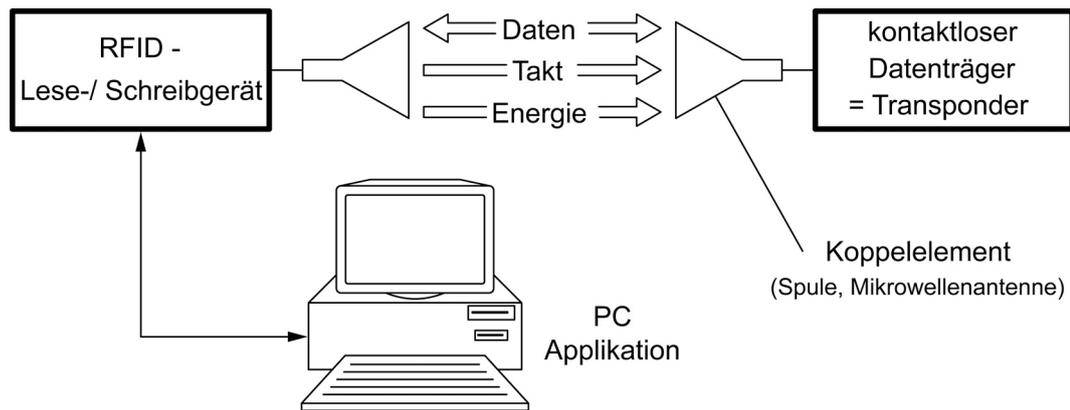


Abbildung 4: Grundbausteine eines RFID-Systems, verändert nach (Finken-zeller 2006 [21])

Ein Lesegerät setzt sich in der Regel aus einem Sender und Empfänger (Hochfrequenzmodul), einer Kontrolleinheit und einer Antenne (Koppel-element zum Transponder) zusammen. Zusätzlich ist in den meisten Fällen auch eine Schnittstelle integriert, um einen Datenaustausch z. B. mit einem Computer zu ermöglichen [21].

Der Transponder eines RFID-Systems beinhaltet typischerweise einen elektronischen Mikrochip und eine Antenne (Koppelement zum Lesegerät) (Abb. 5). Der Großteil aller Transponder enthält keine Batterie zur Stromversorgung. Der Transponder verhält sich deshalb so lange vollkommen passiv, bis er innerhalb der Reichweite eines Lesegeräts aktiviert wird. Die dazu notwendige Energie und das Taktsignal für den Datenaustausch werden kontaktlos durch eine Antenne zum Transponder übertragen. Damit wird ein Datenaustausch zwischen dem Lesegerät und dem Transponder ermöglicht, der je nach eingesetztem RFID-System und verwendeter Frequenz Entfernungen von bis zu 15 Metern und mehr überbrücken kann [21].

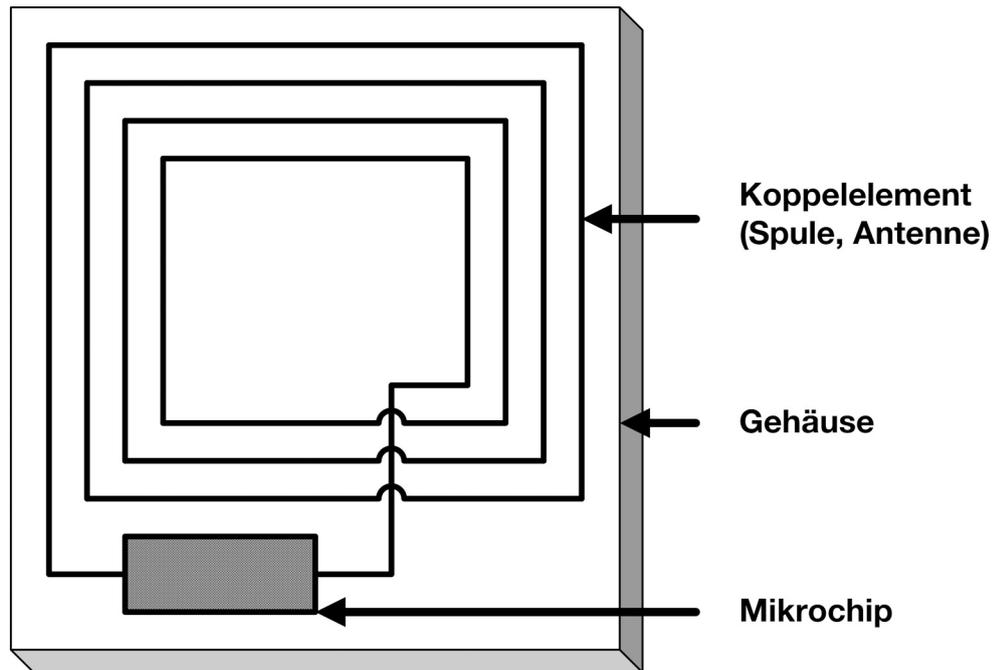


Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau eines induktiv gekoppelten RFID-Transponders mit Antennenspule, verändert nach (Finkenzeller 2006 [21])

Da RFID-Systeme in unzähligen Varianten auf dem Markt erhältlich sind, werden sie u. a. nach folgenden Kriterien unterschieden [21]:

- Betriebsfrequenz des RFID-Systems
- Energieversorgung des Transponders
- Beschreibbarkeit des Transponders mit Daten
- Datenmenge des Transponders

Die Frequenz, auf der das Lesegerät sendet, wird als Betriebsfrequenz des RFID-Systems bezeichnet. Die Sendefrequenz des Transponders entspricht in der Regel der des Lesegerätes. Die Sendeleistung des Transponders ist dabei immer um mehrere Zehnerpotenzen niedriger anzusetzen als die des Lesegerätes [21].

Genutzt werden Frequenzen in den Bereichen LF (Low Frequency, 30 kHz bis 300 kHz), HF (High Frequency) bzw. RF (Radio Frequency, 3 MHz bis

30 MHz), UHF (Ultra High Frequency, 300 MHz bis 3 GHz) und Mikrowelle (> 3 GHz) [21].

Die Energieversorgung des Transponders kann durch eine integrierte Batterie erfolgen, die den Mikrochip mit Energie versorgt. Diese Transponder werden als aktive Transponder bezeichnet. Passive Transponder dagegen enthalten keine eigene Energieversorgung. Sie entnehmen die für den Betrieb notwendige Energie dem magnetischen oder elektromagnetischen Feld des Lesegerätes [21].

Sehr einfache Transponder sind nicht mit Daten beschreibbar und werden read-only Transponder genannt. Ihr auslesbarer Datensatz enthält nur eine mehrstellige Seriennummer, die bei der Chipherstellung fest einprogrammiert wird. Read-write Transponder können hingegen fast beliebig oft mit Daten beschrieben werden. Die Datenkapazität reicht dabei von wenigen Bytes bis zu mehreren Kilobytes unabhängig vom Transpondertyp [21].

RFID-Transponder können nach Kundenwunsch in fast jede beliebige Bauform in Größen von wenigen Millimetern bis zu mehreren Zentimetern gebracht werden. Zum Einsatz kommen häufig sogenannte Disks (Münzen), Glastransponder, die unter die Haut von Tieren und Menschen injiziert werden, kontaktlose Chipkarten, Etiketten und Plastikgehäuse für Anwendungen unter hohen mechanischen Belastungen [21].

Die weltweit kleinsten Transponder werden mit der Coil-on-Chip Technologie hergestellt. Dabei wird der Transponderchip nicht auf konventionelle Weise mit der separaten Transponderspule (Antenne) verbunden. Die Spule wird durch einen Mikrogalvanikprozess direkt auf dem Mikrochip platziert. Damit sind Baugrößen von 1,0 mm x 1,6 mm x 0,5 mm inklusive der Antenne möglich [21, 33].

Die physikalische Kopplung von Lesegerät und Transponder erfolgt in über 90 % aller genutzten RFID-Systeme induktiv, d. h. über ein magnetisches Feld (Abb. 6). Es kommen hier fast ausschließlich passive Transponder zum

Einsatz. Dabei können Lese- und Schreibreichweiten bis zu einem Meter erzielt werden [21].

Die restlichen Systeme werden kapazitiv (Reichweite bis zu einem Zentimeter) oder mit elektromagnetischen Wellen im UHF- und Mikrowellenbereich (Reichweite von 15 Metern und mehr) gekoppelt [21]. Sie sollen an dieser Stelle nicht näher erläutert werden.

Als Sendefrequenzen für induktiv gekoppelte RFID-Systeme werden Frequenzen unter 135 kHz, die Frequenz 13,56 MHz oder in seltenen Fällen auch 27,125 MHz genutzt. Im einfachsten Fall erzeugt die Antennenspule des Lesegerätes ein hochfrequentes magnetisches Wechselfeld, von dem ein geringer Teil die Antennenspule des Transponders durchdringt, wenn er sich in Reichweite befindet (Abb. 6). Das magnetische Wechselfeld induziert eine elektrische Spannung an der Antennenspule des Transponders, der auf diese Weise mit Energie versorgt wird. Dabei ist der Wirkungsgrad der Leistungsübertragung zwischen Lesegerät und Transponder proportional zur Betriebsfrequenz, Windungszahl der Transponderspule, der umschlossenen Fläche der Transponderspule, dem Winkel der beiden Spulen zueinander und der Entfernung zwischen den Spulen [21].

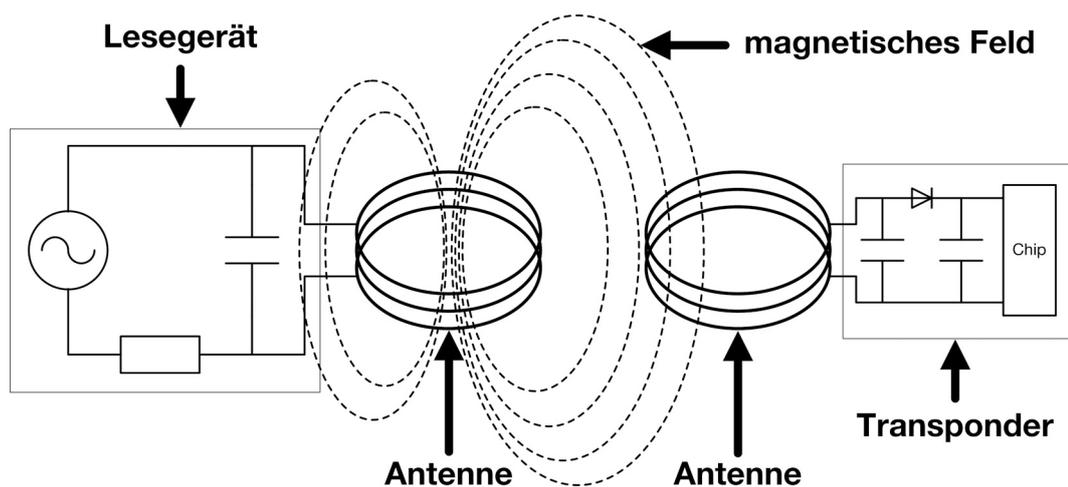


Abbildung 6: Spannungsversorgung eines induktiv gekoppelten Transponders, verändert nach (Finkenzeller 2006 [21])

Der Transponder entzieht dem magnetischen Feld der Antenne des Lesegerätes Energie. Dadurch wird eine Rückwirkung auf die Antenne des Lesegerätes verursacht, die transformierte Impedanz genannt wird. Durch Ein- und Ausschalten eines Lastwiderstandes an der Transponderantenne kann die Impedanz verändert und damit Spannungsänderungen an der Lesegerätantenne hervorgerufen werden. Steuern Daten das An- und Ausschalten des Lastwiderstandes, können sie auf diese Weise vom Transponder zum Lesegerät übertragen werden (Abb. 7). Man nennt diese Form der Datenübertragung Lastmodulation. Die Demodulation im Lesegerät zur Rückgewinnung der Daten erfolgt durch eine abgegriffene Spannung an der Lesegerätantenne, die gleichgerichtet wird [21].

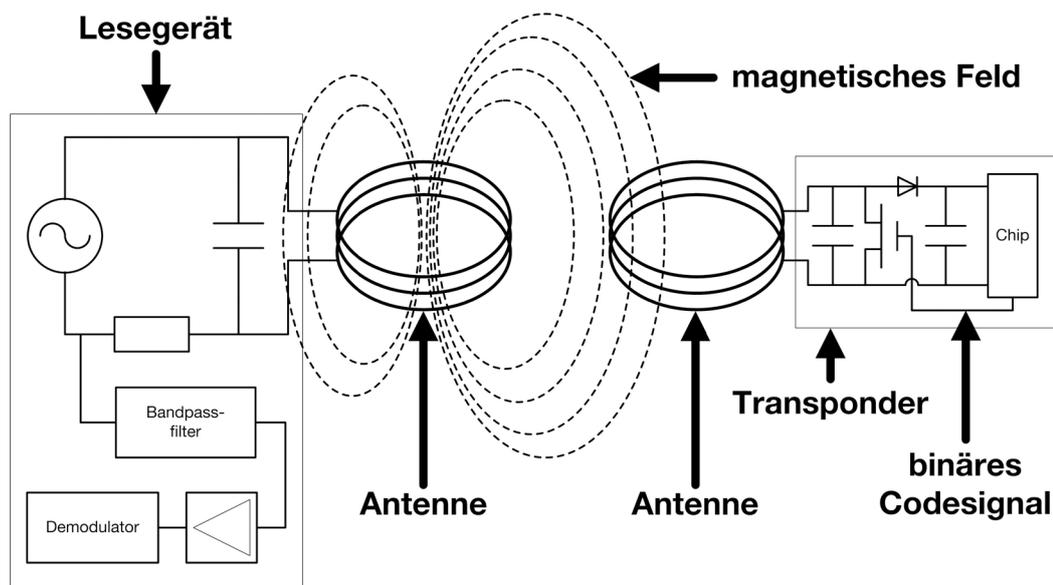


Abbildung 7: Erzeugung der Lastmodulation im Transponder, verändert nach (Finkenzeller 2006 [21])

Die Datenübertragung vom Lesegerät zum Transponder erfolgt in den meisten Fällen durch die sogenannte Amplitudenumtastung (englisch: Amplitude Shift Keying). Dieses Verfahren ändert die Amplitude des Trägersignals, um Daten zu übertragen [21].

Die maximale Distanz, die mit induktiv gekoppelten Systeme überbrückt werden kann, wird durch den Beginn des elektromagnetischen Fernfeldes

festgelegt. Dies ist der Bereich um die Lesegerätantenne, in dem sich aus dem ursprünglich magnetischen Feld eine elektromagnetische Welle vollständig ausgebildet hat und sich von der Antenne löst. Denn eine abgelöste elektromagnetische Welle kann nicht mehr durch Induktion auf die Antenne ihres Ursprungs zurückwirken. Damit ist der Beginn des Fernfeldes mit einem Radius von $0,16 \lambda$ um die Lesegerätantenne herum die absolute Reichweitengrenze für induktiv gekoppelte Systeme. Sie beträgt für die Frequenz 13,56 MHz in etwa 3,5 m [21].

2.2.4.2 Einsatz der Radiofrequenzidentifikationstechnologie in der Getreidekette

In der Abteilung Agrartechnik des Departments für Nutzpflanzenwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen wurde ein Projekt entwickelt, RFID-Technologie zur Rückverfolgung von Getreide einzusetzen [57]. Das Ziel ist die Verwirklichung eines Rückverfolgungssystems in der Getreidekette, welches kostengünstig und weitestgehend automatisiert im Hintergrund des Tagesgeschäfts der Betriebe abläuft. Dabei soll der Bereich von der landwirtschaftlichen Primärproduktion bis zur Verarbeitung des Getreides in der Lebens- oder Futtermittelindustrie erfasst werden [10, 12].

Das Projekt sieht vor, Getreide schon zum Zeitpunkt der Ernte eindeutig mit herkunftsrelevanten Daten zu markieren. Dies wird mithilfe von RFID-Transpondern geschehen, die dem Getreidestrom zugefügt werden. Diese mit herkunftsrelevanten Daten beschriebenen Transponder werden über alle Glieder der Getreidekette hinweg im Getreide verbleiben und erst kurz vor der Verarbeitung wieder vom Getreide getrennt um anschließend ausgelesen zu werden [11].

Zu diesem Zweck sind Transponder notwendig, die mit Daten beschreibbar und nicht größer als ein Getreidekorn sind. Diese beiden Eigenschaften sind äußerst wichtig, denn alle relevanten Daten sollen automatisiert direkt auf

dem Transponder gespeichert und nicht mittels einer auslesbaren Identifikationsnummer des Transponders mit einer Datenbank verknüpft werden. Zusätzlich muss ein versehentliches Herausreinigen der Transponder in den der Ernte nachgelagerten Aufbereitungsprozessen bis zur Verarbeitung verhindert werden. Gleichzeitig dürfen diese Prozessabläufe auf keinen Fall Störungen durch die RFID-Technologie erfahren [9, 10, 11].

Die gestellten Anforderungen an die Beschreibbarkeit mit Daten und die äußeren Abmessungen erfüllt auf dem Markt zurzeit allein der induktiv gekoppelte mic3[®]2k TAG der Firma microsensys aus Erfurt (Abb. 8). Er weist folgende technischen Daten auf [33]:

- Abmessungen: 2,0 mm x 2,0 mm x 0,5 mm
- Datenkapazität: 2 kbit read/ write (entspricht ca. 250 Zeichen)
- Lese-/ Schreibentfernung: 0 - 5 mm
- Preis: ca. 1,20 €

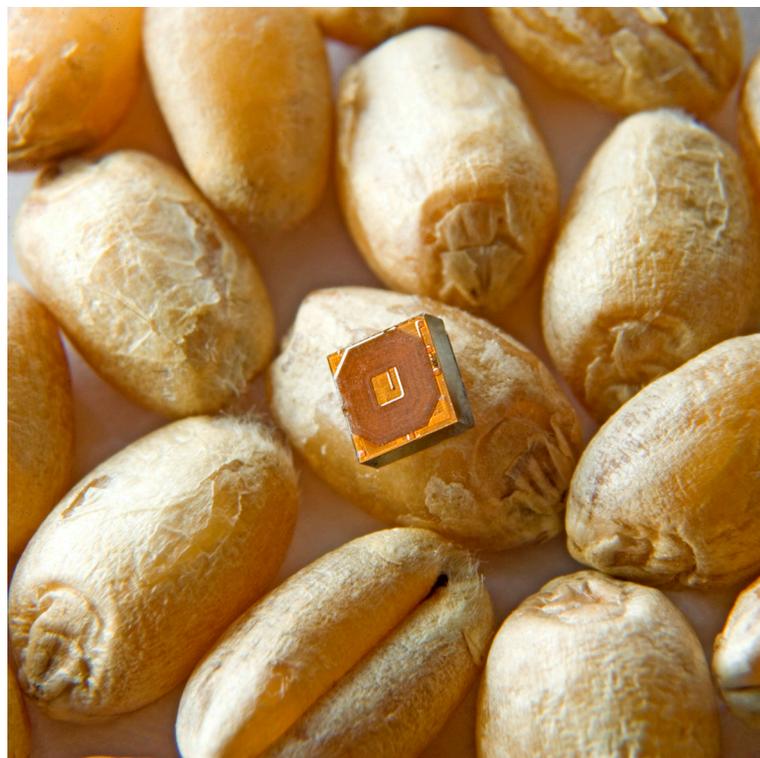


Abbildung 8: mic3[®]2k TAG im Größenvergleich zu Weizenkörnern (Tovornik und Beplate-Haarstrich 2006 [49])

Natürlich kann der mic3®2k TAG nicht ohne Weiteres wie in Abb. 8 gezeigt dem Getreide beigemischt werden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit kann der Transponder den mechanischen Belastungen im Getreide nicht standhalten und zusätzlich würde er sich durch sein spezifisches Schüttverhalten vom Getreide mehr oder weniger separieren. Der mic3®2k TAG muss deshalb in geeigneter Weise eingekapselt werden, um die beiden genannten Probleme auf jeden Fall zu umgehen. Andernfalls ist eine sichere Markierung von Getreide mit RFID-Transpondern in der hier beschriebenen Weise grundsätzlich nicht möglich. Zusätzlich muss der eingekapselte mic3®2k TAG physikalische Eigenschaften aufweisen, die als Trennmerkmale dienen, um ein gezieltes Abtrennen der Transponder vom Getreidestrom zu ermöglichen [9, 10, 11].

Da die Ausführung der Kapselung des Transponders wie beschrieben von äußerster Wichtigkeit ist, wird auf diese Frage weiter unten detailliert eingegangen werden. In diesem Zusammenhang wird im Folgenden ein für den Zweck der Getreiderückverfolgung eingekapselter RFID-Transponder als Korndummy bezeichnet.

In der Praxis soll der Korndummy am Anfang der Getreidekette während der Ernte auf dem Mähdrescher automatisch mit herkunftsrelevanten Daten beschrieben werden (Abb. 9). Dazu zählen in erster Linie der Name des landwirtschaftlichen Betriebes, die Bezeichnung des Ackerschläges, das Datum und die GPS-Koordinaten. Dies sind Daten, die von einem modernen Mähdrescher ohnehin erfasst werden und damit auch mittels eines RFID-Schreibgerätes auf dem Korndummy abgespeichert werden können. Danach werden die beschriebenen Dummies in einer definierten Anzahl pro Einheit Getreide an einer geeigneten Stelle im Mähdrescher, z. B. mit einer Zellenradschleuse im Körnerellevator, dem Getreidestrom zugeführt (Abb. 9). Damit ist das Getreide zum Zeitpunkt der Ernte eindeutig mit herkunftsrelevanten Daten markiert [11].

Es besteht allerdings das Problem der geringen Reichweite von maximal 5 mm des mic3®2k TAGs. Die Folge ist, dass auf die Daten der

Korndummies erst wieder zugegriffen werden kann, wenn die Dummies vom Getreide getrennt und dicht an einem Lesegerät vorbei geführt werden [9, 11].

Mittelfristig können aber RFID-Transponder mit den notwendigen technischen Spezifikationen und einer erhöhten Schreib-/ Lesereichweite zur Verfügung stehen [22].

Diese werden es ermöglichen, auch zwischen dem Einbringen und Aus-sortieren der Korndummies auf ihre Daten zuzugreifen (grau unterlegte Fläche in Abb. 9). In diesem Fall sollen in den beteiligten Betrieben (Landwirtschaft, Landhandel, Lebens-/ Futtermittelunternehmen) an Elevatoren und Förderbändern Lesegeräte installiert werden. Denn an diesen Positionen bewegt sich Getreide in der Regel in Form eines relativ gering dimensionierten Gutstromes, sodass Reichweiten von einigen Zentimetern für einen Zugriff ausreichend sind. So könnte bei Ein-, Um- und Auslagerungsprozessen der Datensatz der Korndummies nicht nur ausgelesen sondern auch ggf. mit weiteren Daten (z. B. Qualitätsparameter, Daten aus Ackerschlagdateien, etc.) aktualisiert werden (grau unterlegte Fläche in Abb. 9) [9, 11, 12].

Kurz vor der Verarbeitung des Getreides in der Lebens-/ Futtermittelindustrie müssen die Korndummies wieder vollständig aus dem Getreide entfernt werden (Abb. 9). Zu diesem Zweck werden Verfahren zum Einsatz kommen, die in der Industrie weit verbreitet sind. Es bieten sich die Magnetabscheidung und die optoelektronische Aussortierung an. Die notwendigen Trennmerkmale (Magnetismus und Farbe) müssen dementsprechend bei der Entwicklung der Kapselung des Korndummies Berücksichtigung finden [9, 11, 12].

Es schließt sich das Auslesen des Datensatzes der Transponder an, nach dessen Auswertung die Herkunft und weitere Prozessdaten der Getreidepartie, aus der die Korndummies stammen, darstellbar werden. Diese Informationen können dann in einem weiteren Schritt, beispielsweise in ent-

sprechenden Qualitätsmanagementsystemen der beteiligten Betriebe, genutzt werden [9, 12, 57].

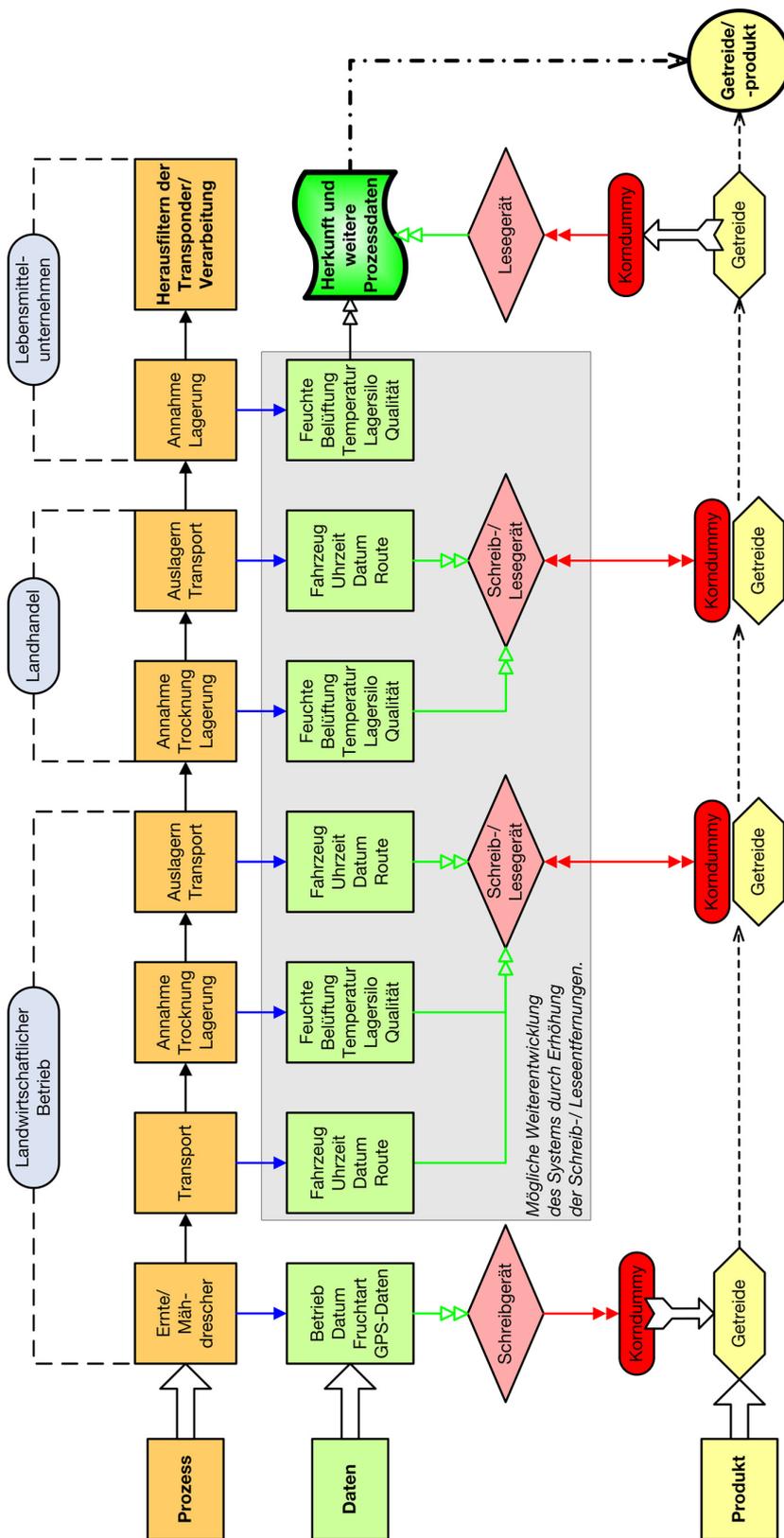


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Datenflusses in einer Getreidekette

Bevor der Einsatz der RFID-Technologie zur Rückverfolgung in der Getreidekette erfolgen kann, sind neben den bereits angesprochenen äußerst wichtigen Punkten der Kapselung und der möglichen Entmischung der RFID-Transponder noch weitere grundlegende Fragestellungen zu beantworten. Hier sind beispielsweise die unvermeidbaren Vermischungen unterschiedlicher Getreidepartien und die benötigte Menge Korndummies pro Einheit Getreide sowie die daraus resultierenden Verfahrenskosten zu nennen. Nach ersten Schätzungen werden sie bei einer angestrebten Menge von einem Korndummy pro Tonne Getreide weniger als zwei Prozent des Weizenpreises betragen. Dabei ist zukünftig von deutlich sinkenden Preisen für RFID-Technologien auszugehen [9, 10, 12].

In den folgenden Abschnitten soll daher detailliert auf die Fragen der Entmischung und der Kapselung der Transponder eingegangen werden. Es ist zu klären, wie ein Korndummy zur Markierung von Getreide beschaffen sein muss, um einen RFID-Transponder vor potenziellen Entmischungseffekten und mechanischen Einflüssen zu schützen und um eine vollständige Abtrennung vom Getreide vor der Verarbeitung zu gewährleisten.

2.3 Grundlagen der Entmischung von Schüttgütern

Die Entmischung von Schüttgütern ist ein Prozess der unfreiwilligen Absonderung von Fraktionen eines Schüttgutes, die vorher gleichmäßiger verteilt waren. Sie ist immer eine Konsequenz von Bewegungen im Schüttgut, durch die sich einige Bestandteile bevorzugt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten oder in unterschiedliche Richtungen im Vergleich zu anderen Partikeln im Schüttgut verlagern. Dazu sind Unterschiede zwischen den physikalischen Eigenschaften der Partikel eines Schüttgutes notwendig, die es einem Entmischungsmechanismus erlauben, ihre Absonderung auszulösen. Die Entmischung wird also betrachtet als die Tendenz partikulärer

Materialien, sich in unterschiedliche Zonen in Abhängigkeit von ihren verschiedenen physikalischen Charakteristika abzusondern [8, 34].

Die Tendenz zur Entmischung ist bei frei fließenden Schüttgütern größer als bei besonders feinkörnigen oder auch feuchten und damit schlecht fließenden Gütern. Denn bei Letzteren ist die zur Entmischung notwendige Beweglichkeit der einzelnen Partikel durch die zwischen ihnen wirkenden Haftkräfte eingeschränkt. Grundsätzlich sind die Vorgänge bei einer Entmischung komplex, quantitativ nicht vorausberechenbar und stets von den spezifischen Umständen unter denen sie entstehen abhängig [8, 18, 45].

2.3.1 Partikeleigenschaften

Von folgenden Partikeleigenschaften, Effekten und Kräften ist bekannt, dass sie die Entmischung von Schüttgütern beeinflussen können, wenn zwischen ihnen Differenzen auftreten [8]:

- Partikelgröße und Partikelgrößenverteilung
- Partikeldichte
- Partikelform
- Partikeloberflächenbeschaffenheit
- Reibungskoeffizienten der Partikel
- Plastizität und Elastizität der Partikel
- Elektrostatische Effekte
- Van der Waals Kräfte
- Magnetische Eigenschaften
- Chemische Affinität und Stabilität
- Thermische Stabilität
- Feuchtigkeitsabsorption und -gehalt

Insbesondere Unterschiede zwischen den Partikeln eines Schüttgutes bezüglich der drei erstgenannten physikalischen Eigenschaften sind die wesentlichen Faktoren, die eine Entmischung bei der Bewegung des Materials auslösen können [8, 31, 34, 45, 48, 52, 53, 54, 55].

Den Unterschieden in der Partikelgröße wird bei Entmischungen die bei Weitem größte Bedeutung beigemessen [41, 45, 46, 52, 53, 54, 55]. So kann bereits bei geringeren Partikelgrößenverhältnissen als 1,2:1 innerhalb eines Schüttgutes von einsetzenden Entmischungseffekten ausgegangen werden. Diese Effekte steigern sich bis zu einem Größenverhältnis von 4,3:1, darüber hinaus sind keine Veränderungen mehr feststellbar [52]. Andere Quellen berichten von signifikanten Entmischungseffekten ab Größenverhältnissen von 1,5:1 [19] oder 3:1 [48]. Es ist anzumerken, dass aus den zitierten Quellen nicht immer genau hervorgeht, wie die Partikelgröße in den durchgeführten Versuchen definiert ist. Vermutlich handelt es sich in den meisten Fällen bei der Partikelgröße um Siebgrößenklassen.

Im Gegensatz zur allgemeinen Erwartung ist der Einfluss einer unterschiedlichen Partikeldichte vergleichsweise gering [31, 46, 55]. Er tritt nur in wenigen Situationen in den Vordergrund, beispielsweise im Fall der Entmischung in einer fluidisierten Oberschicht eines Schüttgutes [55]. Dennoch können Dichteunterschiede einen signifikanten Beitrag zu Entmischungen leisten [19, 48].

Ähnlich gering werden Entmischungseffekte verursacht durch unterschiedliche Partikelformen eingestuft [19, 31, 46]. Dies gilt, solange keine extremen Verhältnisse angenommen werden, z. B. eine Mischung aus kugel- und scheibenförmigen Objekten [19]. Trotzdem führen auch schon geringere Partikelformenunterschiede zu erkennbaren bzw. messbaren Entmischungen [16, 45, 48].

2.3.2 Mechanismen und Prozesse

Die Begriffe Entmischungsmechanismus und -prozess sind wie folgt zu unterscheiden: Ein Entmischungsmechanismus ist ein örtlich begrenztes Ereignis, welches zur Absonderung der unterschiedlichen Partikelklassen führt. Ein Entmischungsprozess dagegen ist eine Situation, in der die Entmischungsmechanismen aktiv werden können. Dies sind beispielsweise die Schüttung eines Haufens bzw. eines Kegels, die Befüllung oder Entleerung eines Silos, der Materialtransport auf einem Gurtförderer, einer Schurre oder mithilfe eines Luftstroms [18].

Folgende Mechanismen und Effekte können zu Entmischungen führen [8, 16, 18, 27, 28, 34, 45, 54, 55]:

- Siebung
- Böschungswinkel
- Aufprall
- Perkolation
- Flugbahn
- Gasströmung
- Fluidisierung
- Rollen
- Fortstoßung
- Verdrängung
- Agglomeration

Die Benennung und Einordnung der aufgezählten und im Folgenden näher erläuterten Mechanismen und Effekte erfolgt in der Literatur teilweise sehr unterschiedlich. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass oft mehrere

dieser Vorgänge gleichzeitig auftreten und nicht immer exakt voneinander zu trennen sind [45].

2.3.2.1 Siebung

Der Siebeffekt tritt immer dann auf, wenn Partikel unterschiedlicher Größe auf einer Schüttgutböschung bzw. einem Schüttkegel herabrutschen. Denn kleinere Partikel finden mit höherer Wahrscheinlichkeit im Vergleich zu größeren Partikeln auf ihrem Weg ausreichend große Hohlräume zwischen den auf der Oberfläche des Kegels liegenden Partikeln, in die sie hineinpassen. Sie bleiben in ihnen liegen, während die größeren Partikel den Schüttkegel weiter herabrutschen oder -rollen (Abb. 10). Der Name Siebeffekt leitet sich daher von der Tatsache ab, dass die Oberfläche des Schüttkegels gewissermaßen ein Sieb bildet, durch das die kleineren Partikel hindurchfallen oder aufgehalten werden [8, 16, 19, 28, 34, 45].

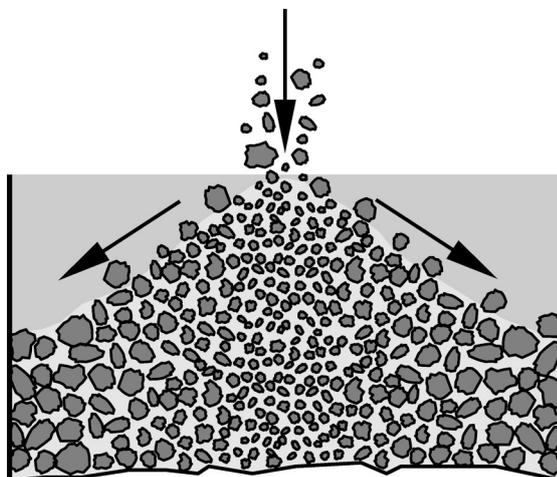


Abbildung 10: Entmischung nach der Partikelgröße durch den Siebeffekt (Schulze 2006 [45])

Die Folge des Siebeffektes ist die Ansammlung kleinerer Partikel im Zentrum und größerer Partikel am Fuß eines Schüttkegels (Abb. 10). Je größer der

Unterschied zwischen den Partikelgrößen ist, umso stärker macht sich dieser Effekt bemerkbar [45].

2.3.2.2 Böschungswinkel

Partikel können aufgrund ihrer Größe und Form in einer Schüttung unterschiedliche Böschungswinkel bilden. Steile bzw. große Böschungswinkel werden bevorzugt von scharfkantigen oder sehr feinen Gütern ausgebildet. Runde oder grobe Partikel bauen dagegen flache bzw. kleine Böschungswinkel auf. Eine Mischung solcher Partikel erzeugt auf einer Schüttgutböschung im oberen Bereich einen steilen und im unteren Bereich einen flachen Böschungswinkel (Abb. 11). Dementsprechend lagern im oberen Bereich der Böschung bevorzugt scharfkantige oder feine Partikel und weiter unten runde oder grobe Partikel (Abb. 11) [8, 27, 28, 34, 45].

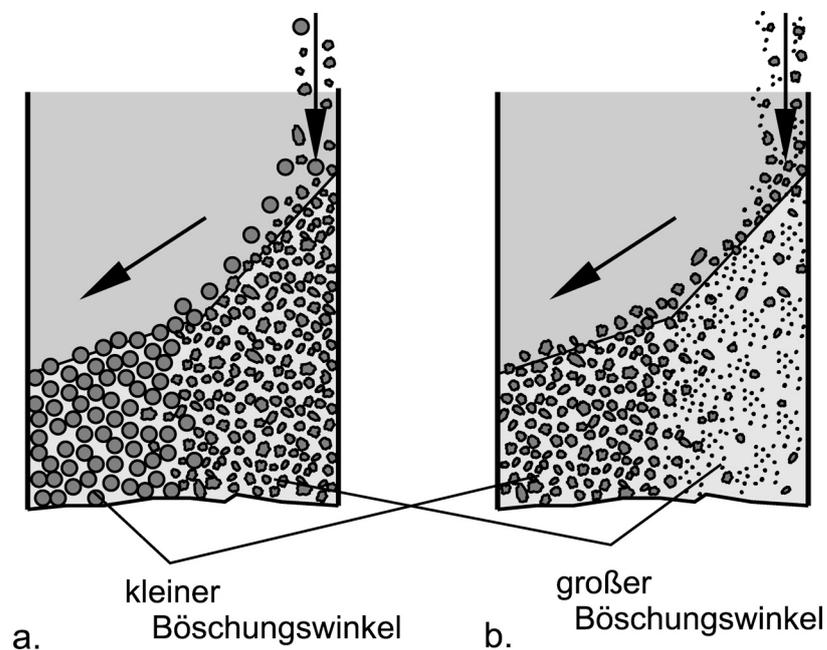


Abbildung 11: Entmischung durch unterschiedliche Böschungswinkel bedingt durch:
a. die Partikelform; b. die Feinheit der Partikel (Schulze 2006 [45])

2.3.2.3 Aufprall

Befinden sich in einem Schüttgut unter vielen feinen Partikeln wenige große Partikel, erzeugen Letztere bei der Schüttung eines Kegels – vergleichbar mit einem Meteoriten – durch ihren Aufprall einen Krater (Abb. 12). Bleiben diese großen Partikel im Krater liegen, führt dies zu ihrer Ansammlung im Zentrum des Schüttkegels. Weisen sie aber eine gewisse Elastizität auf, können sie wieder aus dem Krater herausspringen und sich im unteren Bereich des Schüttkegels ansammeln [16, 27 45].

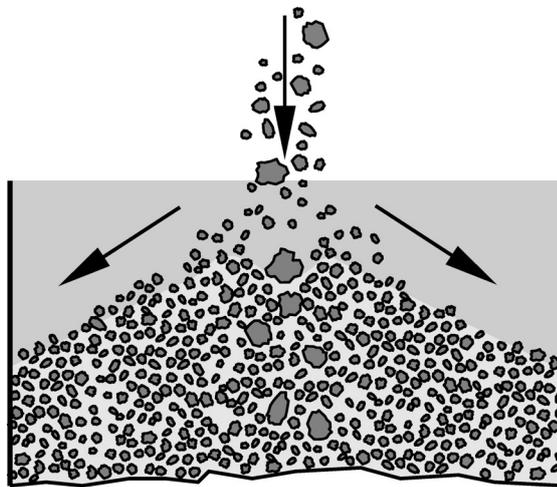


Abbildung 12: Entmischung durch Kraterbildung (Schulze 2006 [45])

2.3.2.4 Perkolation

Für die Perkolation ist eine interpartikuläre Bewegung in einem Schüttgut, beispielsweise durch Schütteln oder Vibration, notwendig, durch die sich Hohlräume zwischen den Partikeln ausbilden, in die bevorzugt kleinere Partikel eindringen. Die Konsequenz ist, dass feine Partikel nach unten und grobe Partikel nach oben wandern (Abb. 13) [8, 34, 45, 46, 48].

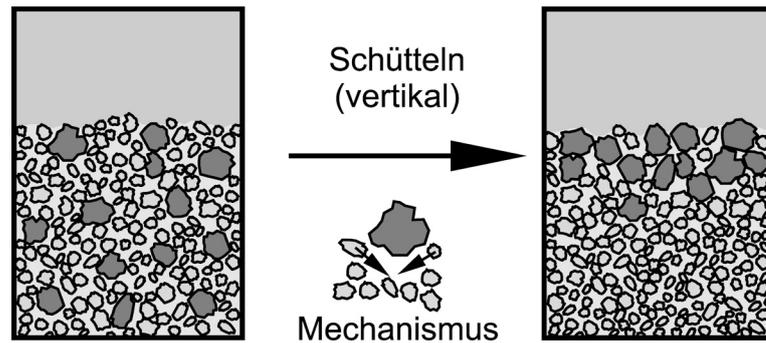


Abbildung 13: Entmischung durch Perkolation (Schulze 2006 [45])

Eine weitere Möglichkeit einer Bewegung innerhalb eines Schüttgutes zur Induzierung der Perkolation ist die Lawinenbildung während der Aufschüttung eines Schüttkegels. Dabei bildet sich in der Mitte des Kegels eine Schüttgutmasse aus, welche dann die Böschung herabrutscht (Abb. 14 a). Dieser Vorgang kann sich mehrfach wiederholen. Innerhalb der Lawine entstehen beim Abrutschen durch Geschwindigkeitsgradienten Scherverformungen, die eine Perkolation ermöglichen. Dadurch sammeln sich die kleineren Partikel im unteren Bereich der Lawine (Abb. 14 b). Das Endergebnis ist ein schichtweiser Aufbau des Schüttkegels, da jede Lawine eine Feingutschicht mit darüber liegender Grobgutschicht erzeugt. Hinzu kommt noch der Siebeffekt mit einer Anreicherung feiner Partikel im Zentrum des Schüttkegels, sodass sich im vertikalen Schnittbild die Struktur eines Tannenbaums zeigt (Abb. 14 a) [45].

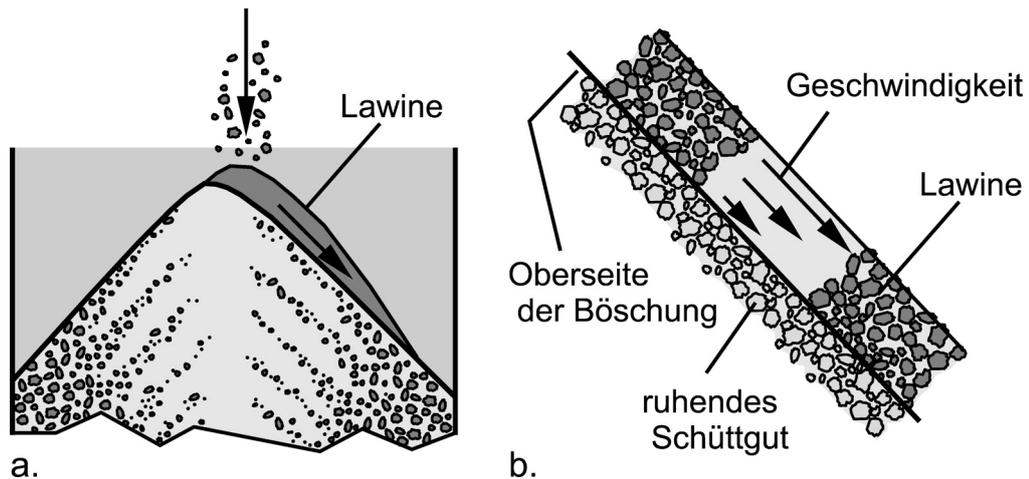


Abbildung 14: Entmischung in einem Schüttkegel durch Perkolation und Siebeffekt:
 a. Tannenbaumstruktur des Feingutes durch Lawinenbildung;
 b. Geschwindigkeitsgradient und Perkolation in der Lawine (Schulze 2006 [45])

Grundsätzlich macht sich eine Entmischung durch Perkolation immer dann besonders stark bemerkbar, wenn in einem Schüttgut der Anteil der kleineren Partikel gering ist [45].

2.3.2.5 Flugbahn

Der Strömungswiderstand von Partikeln beeinflusst entscheidend ihre Geschwindigkeit in einem Gas. Der Strömungswiderstand steigt im Verhältnis zur Gewichtskraft der Partikel mit abnehmender Partikelgröße stark an. Die Konsequenz für einen Schüttgutstrom mit einer horizontalen Geschwindigkeitskomponente, z. B. bei der Befüllung eines Silos, ist eine Entmischung durch unterschiedliche Flugbahnen (Abb. 15 a, b). Dabei werden große, schwere Partikel im Vergleich zu kleinen, leichten Partikeln weniger stark durch die Luft abgebremst und weisen dementsprechend eine größere Flugdistanz auf [8, 27, 45, 54, 55].

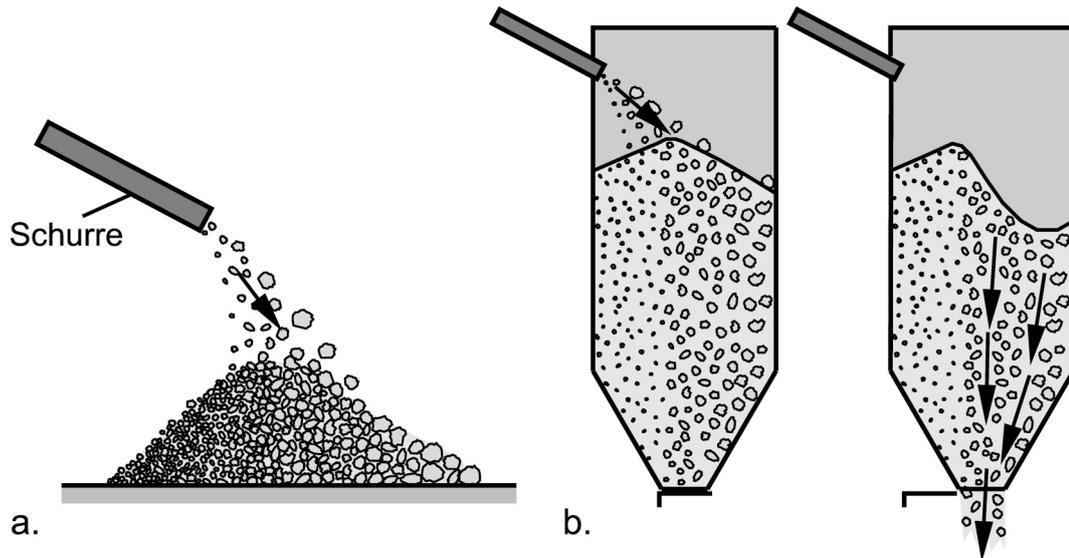


Abbildung 15: Entmischung durch unterschiedliche Flugbahnen: a. Aufschüttung eines Kegels; b. Befüllung eines Silos (Schulze 2006 [45])

Das Grobgut ist somit überwiegend auf der abgewandten Seite des Befüllungsorgans auf dem Schüttkegel wiederzufinden, wobei der Flugbahneffekt dann zusätzlich durch den Siebeffekt verstärkt werden kann (Abb. 15 a) [45].

Als Faustzahl gilt, dass eine Verdoppelung des Partikeldurchmessers eine Vervierfachung der Flugdistanz bewirkt [54, 55].

Durch seitliche Befüllung eines Silos kann sich durch den Flugbahneffekt im gesamten Silo eine einseitige Verteilung der größeren Partikel ausbilden. Weist das Grobgut zusätzlich noch bessere Fließeigenschaften als das Feingut auf, kann sich bei der Entleerung des Silos ein einseitiger Gutfluss ausbilden, sodass bevorzugt grobe Partikel aus dem Silo fließen (Abb. 15 b) [8, 45].

Rutscht ein Schüttgut über eine Schurre o. ä. abwärts, sind die Partikel unten im Gutstrom durch die Oberfläche der Schurre einer höheren Reibung ausgesetzt als die anderen Partikel. Es bilden sich Geschwindigkeitsgradienten aus, die eine Perkolation ermöglichen. Die feinen Partikel sammeln sich unten im Gutstrom und weisen zusätzlich eine geringere Ge-

schwindigkeit auf als die größeren Partikel oben im Gutstrom. Dieses kann den Flugbahneffekt sehr verstärken und beispielsweise zu einer ungleichmäßigen Beladung eines Gurtförderers durch Entmischung führen (Abb. 16) [8, 16, 28].

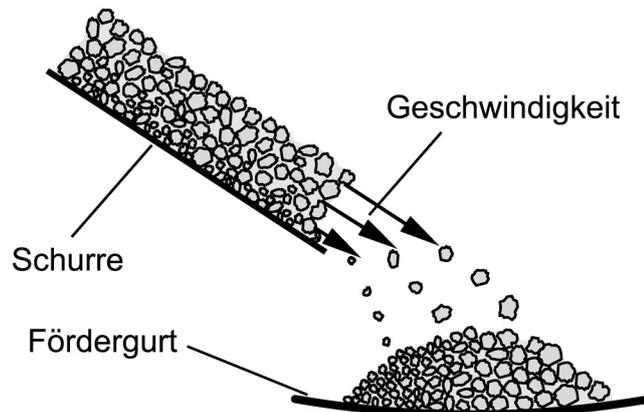


Abbildung 16: Entmischung durch unterschiedliche Flugbahnen bei der Materialabgabe (Schulze 2006 [45])

2.3.2.6 Gasströmung

Partikel mit einer Größe $<100\ \mu\text{m}$ weisen geringe stationäre Sinkgeschwindigkeiten im Schwerfeld auf. Diese Partikel bewegen sich nur langsam relativ zu Gas- bzw. Luftströmungen und können deshalb gut von der Luft transportiert werden. Wird ein Schüttgut von oben in ein Silo mit Luft eingeblasen, folgen größere Partikel dem Luftstrom bis zur Schüttgutoberfläche und bleiben dort liegen. Die feinen Partikel werden hingegen durch den an der Schüttgutoberfläche umgelenkten Luftstrom davongetragen (Abb. 17). In der Nähe der Silowand können sich diese Partikel dann bevorzugt ablagern, denn hier wird die Luftgeschwindigkeit geringer durch den größeren zu durchströmenden Querschnitt [45].

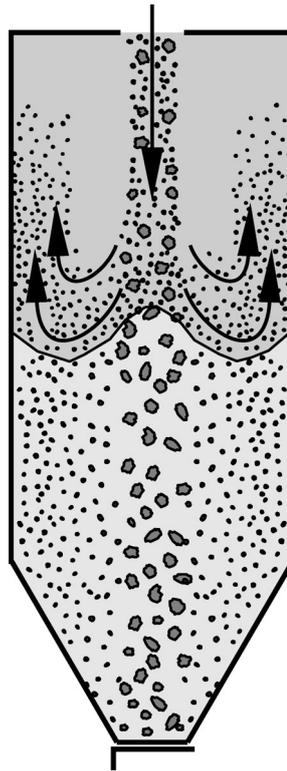


Abbildung 17: Entmischung durch von Luftströmungen mitgerissenes Feingut (Schulze 2006 [45])

Doch selbst wenn das Schüttgut nicht in das Silo eingeblasen wird, sondern nur im Silo herabfällt, kann die mitgerissene Luft ausreichend sein, um die beschriebene Entmischung durch Gasströmung zu verursachen [45].

Im Schüttgutstrom enthaltene Luft kann aber auch eine Fluidisierung der oberen Schüttgutschicht eines Silos verursachen, sofern große Mengen leicht fluidisierbaren Feingutes enthalten sind. Diese Luft entweicht nach dem Auftreffen des Schüttgutes nach oben. Zusätzlich entlüftet das schon eingefüllte Material durch den steigenden Druck bedingt durch die Füllhöhe. Die oberflächliche Schüttgutschicht ähnelt dadurch in ihren Eigenschaften einer Wirbelschicht, sodass größere Partikel durch sie hindurch nach unten sinken. An der Oberfläche des Schüttgutes bildet sich dementsprechend eine Feingutschicht aus (Abb. 18) [8, 45].

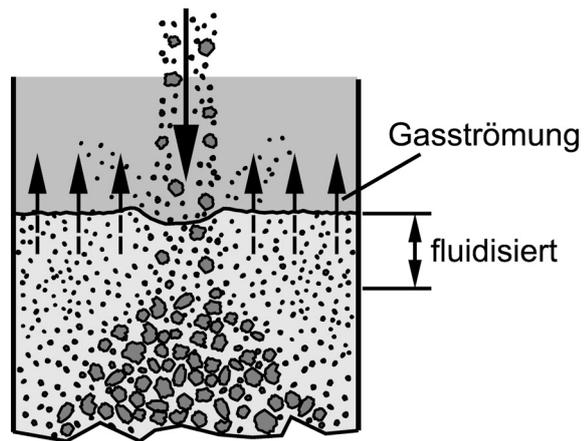


Abbildung 18: Entmischung durch eine fluidisierte Schicht des Schüttgutes im oberen Bereich (Schulze 2006 [45])

Abschließend sei noch einmal darauf hingewiesen, dass oft mehrere der erläuterten Entmischungsmechanismen und -effekte gleichzeitig auftreten und aus diesem Grund nicht immer exakt voneinander zu trennen sind [45].

3 Material und Methoden

3.1 Korndummies

Im letzten Kapitel ist aufgezeigt worden, dass unterschiedliche Partikel in einem Schüttgut nicht zur Entmischung neigen, wenn sie sich in den genannten physikalischen Eigenschaften möglichst stark ähneln. Der Korndummy ist unter den Gesichtspunkten entwickelt worden, eine Entmischung der Dummies und die Beschädigung der RFID-Transponder im Getreide zu verhindern, sowie Trennmerkmale aufzuweisen, die eine sichere Abtrennung vom Getreide gewährleisten.

3.1.1 Konstruktionsvorgaben

Für den Korndummy ist vorläufig nur der Einsatz im Weichweizen (*Triticum aestivum* L.) vorgesehen. Dementsprechend muss er weitestgehend den physikalischen Eigenschaften von Weichweizenkörnern (Tab. 1) entsprechen, um sicher im Weizen zu verbleiben und sich nicht zu entmischen.

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Weizenkörnern (Feustel et al. 1984 [20], Tscheuschner 2004 [50], Nelson 2001 [36], Zink 1935 [56])

	Feustel et al. [20]	Tscheuschner [50]	Nelson [36]	Zink [56]
Höhe [mm]	1,75 - 3,25	1,50 - 3,80	2,40 - 2,90	
Breite [mm]	2,50 - 4,50	1,60 - 4,00	2,60 - 3,40	
Länge [mm]	5,25 - 7,25	4,20 - 8,60	5,60 - 6,40	
Volumen [mm ³]		19,00 - 42,00	18,50 - 28,60	
Kornmasse [mg]		12,00 - 75,00	26,00 - 39,70	
spez. Dichte [g/cm ³]			1,35 - 1,41	1,29 - 1,32

Den Abmessungen des Korndummies sind nach oben und unten klare Grenzen nicht nur durch die in Tab. 1 genannten Werte bezogen auf die Entmischungsfahrer gesetzt. Auch die Abmessungen des zu verwendenden RFID-Transponders mic3[®]2k TAG bestimmen die minimale Größe. Weiterhin muss beachtet werden, dass durch zu kleine oder große Abmessungen des Korndummies die Gefahr steigt, ihn bei Reinigungsprozessen, z. B. Aspiration oder Siebung, versehentlich vom Getreide zu trennen. In Abwägung dieser genannten Faktoren wurden die in Tab. 2 aufgeführten Abmessungen für den Korndummy gewählt. Zum Vergleich sind in Tab. 2 auch die Abmessungen der Weizenkörner der Sorte Bommer (Ernte 2006) aufgelistet, der in den Entmischungsversuchen zum Einsatz gekommen ist.

Tabelle 2: Durchschnittliche Abmessungen von Korndummies und Weizenkörnern der Sorte Bommer (n=100)

	Korndummy	Weizen Bommer
Höhe [mm]	3,00	3,14
Breite [mm]	4,00	3,60
Länge [mm]	6,00	6,57

Die Form des Korndummies wurde ebenfalls einem Getreidekorn nachempfunden. Die Formgebung wurde zusätzlich durch das für den Gussformenbau genutzte Werkzeug, einem Radienfräser, beeinflusst. Ferner sollte die Form der Korndummies aus fertigungstechnischer Sicht einfach handhabbar sein. Um einen möglichen Effekt unterschiedlicher Formen auf das Entmischungsverhalten untersuchen zu können, wurden zwei unterschiedliche Formen entworfen (Abb. 19).

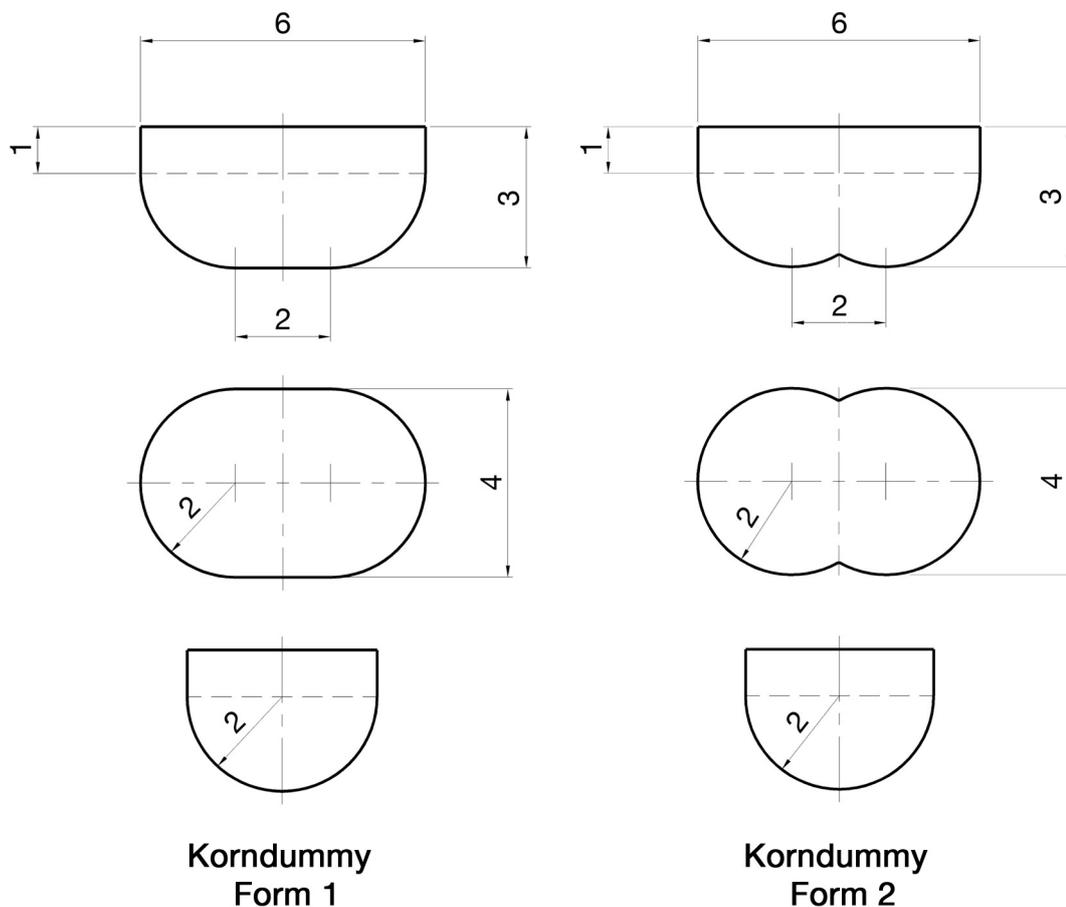


Abbildung 19: Konstruktionszeichnung der Korndummies (alle Maße in mm)

3.1.2 Herstellung und Eigenschaften

Für den Gussformenbau wurden mittels eines Radienfräasers (2 mm Radius) Negativformen aus Aluminium mit einer Genauigkeit von $\pm^2/_{100}$ mm gefräst. Von diesen Negativformen wurden durch einen Abguss mit dem Silikonkautschuk Elastosil M4601 der Firma R&G, Waldenbuch Positivformen angefertigt. Durch einen Abguss dieser Positivformen, ebenfalls mit Silikonkautschuk, wurden schließlich die fertigen Negativgussformen für die Herstellung der Korndummies angefertigt. Silikonkautschuk fand als Material für den Formenbau Verwendung, weil es eine leichte Entformbarkeit der fertig gegossenen Korndummies gewährleistete.

Die Korndummies bestehen aus Epoxid-Laminierharz, es wurde das Epoxidharz L und der Härter S der Firma R&G verwendet. Dieses Epoxid-Laminierharz ist nicht lebensmittelecht. Es wurde für die Versuchsdummies aus technischen Gründen genutzt, da es leicht zu verarbeiten war. Im Handel sind aber lebensmittelechte Gießmassen erhältlich, die beispielsweise den Normserien EN 1186, EN 13130 und prCEN/TS 14234 „Werkstoffe und Gegenstände in Kontakt mit Lebensmitteln – Kunststoffe“ entsprechen [40].

Um die spezifische Dichte der Korndummies der Dichte von Weizenkörnern anzupassen, wurde im Zentrum der Korndummies jeweils eine kleine Stahlkugel eingegossen. Die Kugeln wiesen einen Durchmesser von 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm auf. Damit konnte die spezifische Dichte der Dummies nicht nur angepasst, sondern auch variiert werden (Tab. 3), um ihren potenziellen Einfluss auf die Entmischung zu untersuchen. Zur Vereinfachung wurden die Korndummies und der Weizen Bommer in vier Dichteklassen eingeteilt (Tab. 3). Es wurden aus Kostengründen keine mic3®2k TAGs in die Korndummies für die Entmischungsversuche eingegossen, was keinen Einfluss auf die physikalischen Parameter der Dummies hatte.

Das Epoxid-Laminierharz wurde zusätzlich mit Epoxid-Farbpasten der Firma R&G in den Farben Rot, Grün, Blau und Schwarz eingefärbt (Abb. 20). Dies diente zur Unterscheidbarkeit der Korndummies unterschiedlicher Dichteklassen (Tab. 3).

Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften der Korndummies im Vergleich zu den in den Versuchen eingesetzten Weizenkörnern der Sorte Bommer

	Physikalische Eigenschaften					
	Volumen [mm ³]	Masse [mg]	spez. Dichte [g/cm ³]	Dichte- klasse	Form	Farbe
Dummytyp 1	51,05	54,32	1,064	1	1	Rot
Dummytyp 2	50,20	53,16	1,059	1	2	Rot
Dummytyp 3	51,07	61,13	1,197	2	1	Grün
Dummytyp 4	49,86	60,53	1,214	2	2	Grün
Dummytyp 5	50,46	69,53	1,378	3	1	Blau
Dummytyp 6	51,00	69,26	1,358	3	2	Blau
Dummytyp 7	51,97	85,80	1,651	4	1	Schwarz
Dummytyp 8	50,66	85,41	1,686	4	2	Schwarz
Weizen Bommer	40,35	55,77	1,382	3	-	-

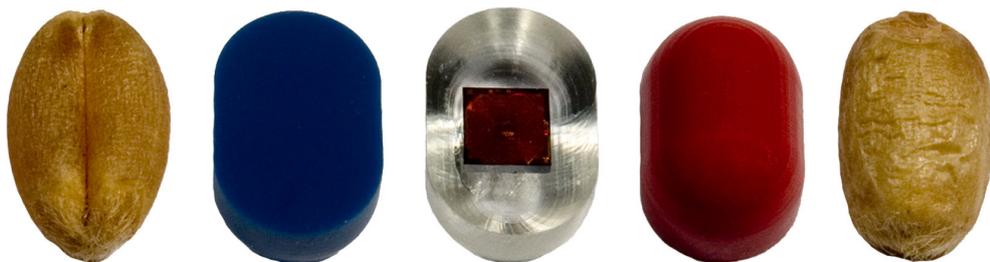


Abbildung 20: Korndummies im Vergleich zu Weizenkörnern

Insgesamt standen also für die Versuche acht unterschiedliche Dummytypen zur Verfügung (Tab. 3). Diese unterschieden sich zum Teil wesentlich vom Versuchswelzen Bommer bezüglich ihrer Dichte und Form als potenzielle Partikeleigenschaften, die Entmischungseffekte hervorrufen können.

In Kapitel 2.2.4.2 wurde bereits auf eine Nutzung von Magnetabscheidern oder optoelektronischer Sortieranlagen zur Abtrennung der Korndummies hingewiesen. Die notwendigen Trennmerkmale Magnetismus (Magnetabscheidung) und Farbe (optoelektronische Aussortierung) werden durch das Eingießen von Stahlkugeln in die Dummies und das Einfärben der Dummies zur Verfügung gestellt. Sie finden aber in den folgenden Versuchen keine Berücksichtigung.

3.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Versuche zum Verhalten der Korndummies im Weizen wurden im Forschungsinstitut Futtermitteltechnik der Internationalen Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik e. V. in Braunschweig durchgeführt. Das Ziel war es festzustellen, ob die Parameter Dichte und Form die Entmischung der Korndummies beeinflussen und ob die Dummies eine ausreichende mechanische Stabilität aufweisen.

Dazu wurde in einem Einwellen-Paddelmischer der Marke Lödige nach betriebsüblicher Praxis (Mischzeit: drei Minuten) eine homogene Mischung aus 42,65 kg Weizen der Sorte Bommer (Tab. 2, S. 39) und jeweils 100 Korndummies eines jeden der acht Dummytypen hergestellt. Dies entsprach einer Korndummykonzentration im Getreide für jeden einzelnen Dummytyp von 2,35 Korndummies pro Kilogramm Weizen.

Nach dem Mischvorgang wurde das Gemisch durch den Auslaufstutzen des Mixers in einen Papiersack gefüllt und anschließend in den Einfülltrichter eines Becherelevators hineingeschüttet. Der Becherelevator transportierte

die Mischung 14 m senkrecht nach oben, wo der Inhalt der Elevatorbecher in eine Körnerschnecke entleert wurde. Diese förderte das Gemisch waagerecht über eine Strecke von 2,5 m in ein Rohr, welches senkrecht 3,5 m tiefer in einem Redler endete. Der Redler transportierte die Mischung waagerecht über eine Distanz von 10 m wiederum in ein Rohr, in welchem sie erst über eine Strecke von einem Meter in einem Winkel von 45° rutschte, dann einen weiteren Meter senkrecht im freien Fall im Rohr nach unten fiel. Das Rohr endete 0,75 m über dem Boden. Diese restliche Distanz überwand das Gemisch ebenfalls im freien Fall und bildete schließlich einen gleichmäßigen Schüttkegel aus. Dadurch wurde sichergestellt, dass die in Kapitel 2.3.2 aufgeführten Mechanismen und Prozesse sich entfalten bzw. auf das Gemisch aus Weizen und Korndummies einwirken konnten. Bei allen genutzten Förderaggregaten handelte es sich um Standardfördertechnik, die in der Praxis weit verbreitet ist.

Der Schüttkegel wurde anschließend mit einem speziell für diesen Versuch angefertigten Probenteiler (Abb. 21) in 13 Sektoren aufgeteilt (Abb. 22), um die Verteilung der Korndummies im Getreide analysieren zu können. Zu diesem Zweck wurde der Probenteiler in den Schüttkegel hineingestochen (Abb. 23). Der Probenteiler weist zusätzlich eine Funktion auf, mit der die 13 Sektoren mittels Einschubblechen auch horizontal unterteilt werden können (Abb. 21). Diese Funktion wurde aus versuchstechnischen Gründen nicht genutzt.

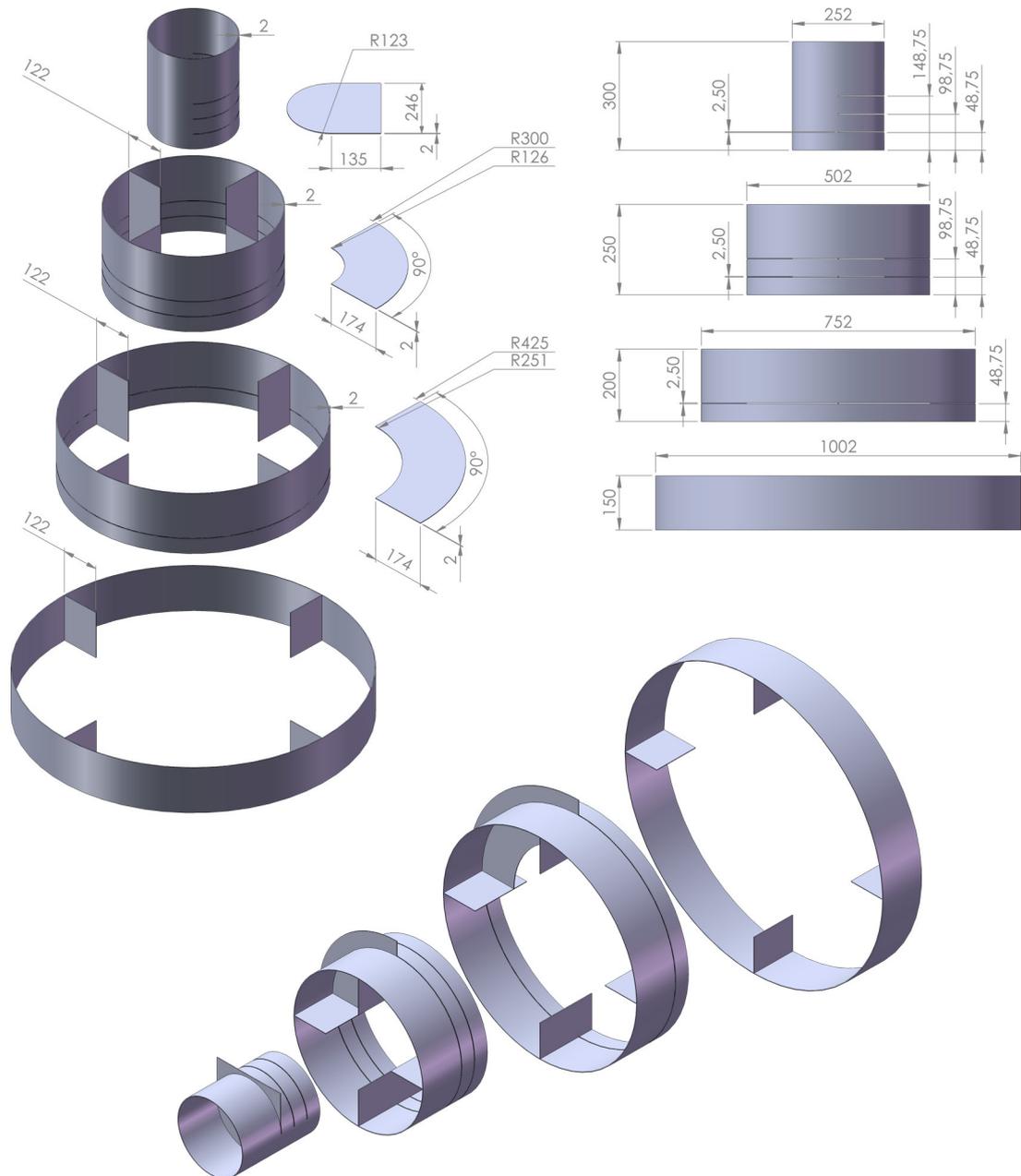


Abbildung 21: Konstruktionszeichnung des Probenteilers (alle Maße in mm, R = Radius)

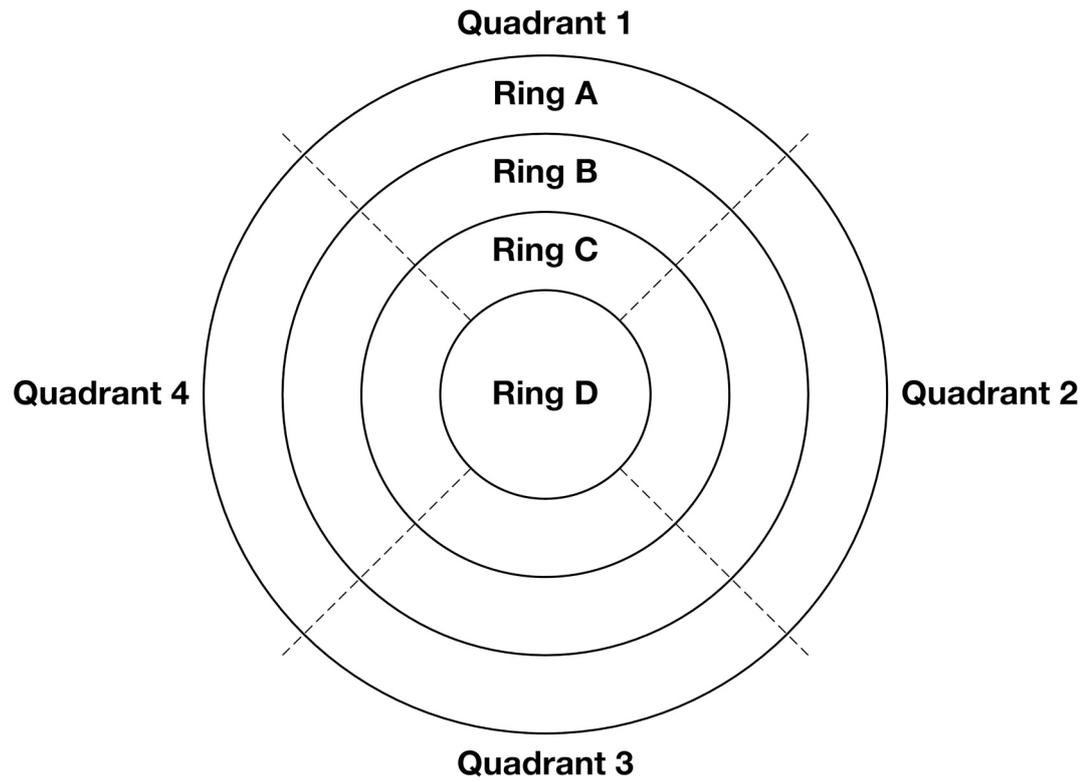


Abbildung 22: Sektorenkennzeichnung des Probenteilers



Abbildung 23: Eingestochener Probenteiler im Schüttkegel

Die einzelnen Proben wurden mit einem Staubsauger aus dem Probenteiler herausgesaugt und die Korndummies aus ihnen herausselektiert. Die Dummies wurden nach den unterschiedlichen Dummytypen sortiert und gezählt. Zur Errechnung der Korndummykonzentration im Weizen c_{Dummy} [n/kg] wurden die abgesaugten Weizenproben anschließend gewogen.

Da Ring D sich aus technischen Gründen nicht in vier Quadranten unterteilen ließ, wurde zur Vereinfachung der Datenauswertung Ring D virtuell in vier Quadranten aufgeteilt. Diesen Quadranten wurde jeweils die in Ring D ermittelte Korndummydichte zugewiesen.

Der Versuche wurden in vierfacher Wiederholung durchgeführt.

3.3 Versuchsauswertung

Die Eingabe und Aufbereitung der Daten erfolgte mit dem Programm Microsoft Excel 2003. Die Auswertung der Daten wurde mit dem SAS System für Windows 8.02 durchgeführt und die grafischen Darstellungen mit dem Programm SigmaPlot 10.0 erstellt.

Die ermittelten Dummykonzentrationen in den Proben wurden mit der Prozedur UNIVARIATE sowie den Optionen NORMAL und PLOT auf ihre Normalverteilung hin untersucht. Nichtnormalverteilte abhängige Variablen wurden durch Logarithmierung in die Normalverteilung transformiert.

Anschließend erfolgte die varianzanalytische Auswertung mit der Prozedur GLM. Mithilfe des Statements LSMEANS und den Optionen PDIFF und STDERR wurden die Gruppenmittelwerte verglichen und der Standardfehler ermittelt.

Da die Wiederholungen keine signifikanten Einflüsse auf die Korndummykonzentrationen aufwiesen, wurde dieser Effekt in den folgenden statistischen Modellen nicht weiter berücksichtigt.

3.3.1 Vergleich der Dummykonzentrationen in Abhängigkeit von den Ringen und Quadranten

Bei der varianzanalytischen Auswertung der Korndummykonzentrationen wurden die fixen Effekte des Ringes und des Quadranten sowie deren Interaktion im Modell 1 berücksichtigt. Diese Auswertung wurde für jeden der in Tab. 3 (S. 42) aufgeführten Korndummies durchgeführt.

Modell 1:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + Q_j + R_i \cdot Q_j + e_{ijk}$$

Darin sind:

Y_{ijk} = Beobachtungswert

μ = Mittelwert

R_i = fixer Effekt des i-ten Ringes (i = 1, 2, 3, 4)

Q_j = fixer Effekt des j-ten Quadranten (j = 1, 2, 3, 4)

$R_i \cdot Q_j$ = Interaktion des i-ten Ringes · des j-ten Quadranten

e_{ijk} = zufallsbedingte Restkomponente von Y_{ijk}

3.3.2 Vergleich der Dummykonzentrationen in Abhängigkeit von den Dichteklassen und Formen

Mithilfe des Modells 2 wurde der Einfluss der fixen Effekte der Dichteklasse und der Form sowie deren Interaktion auf die Konzentration der Korndummies in jedem einzelnen Ring und Quadranten geschätzt.

Modell 2:

$$Y_{ijk} = \mu + D_i + F_j + D_i \cdot F_j + e_{ijk}$$

Darin sind:

Y_{ijk} = Beobachtungswert

μ = Mittelwert

D_i = fixer Effekt der i-ten Dichteklasse ($i = 1, 2, 3, 4$)

F_j = fixer Effekt der j-ten Form ($j = 1, 2$)

$D_i \cdot F_j$ = Interaktion der i-ten Dichteklasse · der j-ten Form

e_{ijk} = zufallsbedingte Restkomponente von Y_{ijk}

4 Ergebnisse

4.1 Vergleich der Dummykonzentrationen in Abhängigkeit von den Ringen und Quadranten (Modell 1) innerhalb der einzelnen Dummytypen

Der Vergleich der Konzentrationsmittelwerte innerhalb der einzelnen Dummytypen in Abhängigkeit von den Ringen zeigt sehr deutliche signifikante Unterschiede bezüglich der Dummykonzentrationen der Dichteklassen 1 und 4. Dies gilt für beide Dummyformen dieser Dichteklassen (Tab. 4).

So sind Korndummies der Dichteklasse 1 (geringere spezifische Dichte als der Versuchswitzen) im Ring A (Randbereich des Schüttkegels) höher konzentriert als in den anderen Ringen. Die Dummies der Dichteklasse 4 (höhere spezifische Dichte als der Versuchswitzen) sind dagegen überwiegend im Ring D (Zentrum des Schüttkegels) vorzufinden (Tab. 4).

Keine signifikanten Konzentrationsunterschiede sind bei den Dummies der Dichteklasse 3, ebenfalls unabhängig von der Dummyform, festzustellen (Tab. 4). Diese Dummies entsprechen derselben Dichteklasse wie der in den Versuchen genutzte Weizen (Tab. 3, S. 42).

Die Korndummies der Dichteklasse 2 verhalten sich dagegen unterschiedlich in Abhängigkeit von ihrer äußeren Form. Keine signifikanten Konzentrationsunterschiede zwischen den Ringen weisen die Dummies der Form 2, Dichteklasse 2 auf im Gegensatz zu den Dummies der Form 1 derselben Dichteklasse (Tab. 4).

Dies weist darauf hin, dass die unterschiedliche Form der Korndummies einen Einfluss auf ihr Entmischungsverhalten haben könnte, auch wenn bei

beiden Formen der Dichteklasse 2 eindeutig eine Konzentrationsabnahme zum Zentrum des Schüttkegels hin zu beobachten ist (Tab. 4).

Tabelle 4: Mittelwerte der Konzentrationen der einzelnen Dummytypen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) in Abhängigkeit von den Ringen

Form	<i>c_{Dummy}</i> [n/kg]							
	1	2	1	2	1	2	1	2
Dichte- klasse	1	1	2	2	3	3	4	4
Ring A	5,65 ^a	4,55 ^a	3,23 ^a	3,05 ^a	2,15 ^a	2,09 ^a	0,33 ^c	0,91 ^c
Ring B	2,05 ^b	1,97 ^b	2,65 ^{ab}	2,39 ^a	2,53 ^a	1,96 ^a	1,96 ^b	1,52 ^b
Ring C	1,72 ^b	1,79 ^{bc}	1,68 ^c	1,84 ^a	1,87 ^a	2,37 ^a	2,89 ^a	2,65 ^a
Ring D	1,54 ^b	1,31 ^c	1,93 ^{bc}	1,60 ^a	2,31 ^a	2,34 ^a	2,37 ^{ab}	3,15 ^a

Mittelwerte gefolgt von verschiedenen Buchstaben innerhalb einer Spalte unterscheiden sich signifikant ($\alpha=0,05$).

In Abhängigkeit von den Quadranten sind keine signifikanten Konzentrationsunterschiede innerhalb der einzelnen Dummytypen erkennbar. Die Ausnahme bildet hier der Dummytyp Form 2, Dichteklasse 4. Er ist in Quadrant 2 signifikant höher konzentriert als in den anderen drei Quadranten (Tab. 5).

Tabelle 5: Mittelwerte der Konzentrationen der einzelnen Dummytypen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) in Abhängigkeit von den Quadranten

Form	<i>c_{Dummy}</i> [n/kg]							
	1	2	1	2	1	2	1	2
Dichte- klasse	1	1	2	2	3	3	4	4
Quadrant 1	2,74 ^a	2,54 ^a	2,63 ^a	2,64 ^a	2,39 ^a	1,84 ^a	1,88 ^a	1,94 ^b
Quadrant 2	2,88 ^a	2,39 ^a	2,35 ^a	1,90 ^a	2,41 ^a	2,14 ^a	1,77 ^a	2,59 ^a
Quadrant 3	3,09 ^a	2,44 ^a	2,16 ^a	2,39 ^a	2,13 ^a	2,33 ^a	1,94 ^a	1,83 ^b
Quadrant 4	2,26 ^a	2,24 ^a	2,36 ^a	1,95 ^a	1,94 ^a	2,45 ^a	1,95 ^a	1,86 ^b

Mittelwerte gefolgt von verschiedenen Buchstaben innerhalb einer Spalte unterscheiden sich signifikant ($\alpha=0,05$).

Eine signifikante Interaktion zwischen den fixen Effekten Ring und Quadrant kann nur bei den Konzentrationen des Dummytyps der Form 1, Dichteklasse 1 beobachtet werden (Abb. 24).

Dieser Dummytyp ist in den Quadranten 1, 2 und 3 des Ringes A mit steigender Tendenz wesentlich höher konzentriert als in Quadrant 4, Ring A (Abb. 24).

Keine signifikanten Konzentrationsunterschiede treten dagegen in den vier Quadranten der Ringe B und C auf, mit Ausnahme der Dummykonzentration in Quadrant 4, Ring B (Abb. 24).

Ein Vergleich mit den vier Quadranten des Ringes D kann nicht vorgenommen werden, da diese aus technischen Gründen wie weiter oben erwähnt lediglich virtuell eingerichtet wurden.

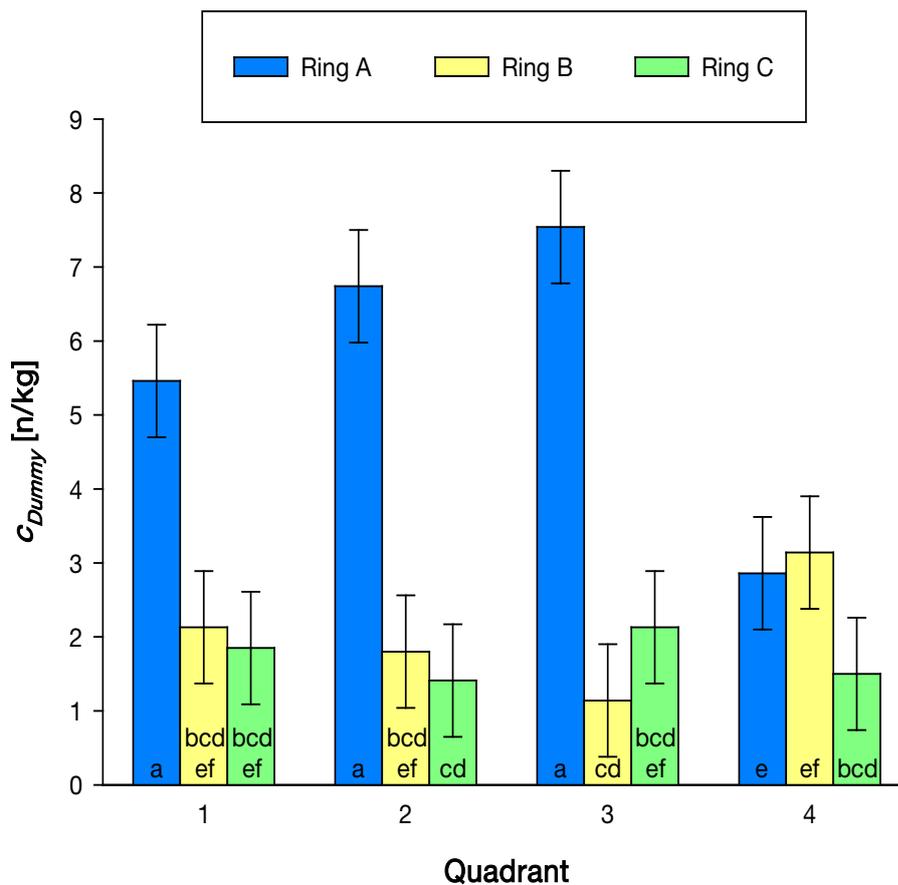


Abbildung 24: Mittelwerte und Standardfehler der Konzentrationen des Korndummies der Dichteklasse 1, Form 1 in Abhängigkeit von den Ringen und Quadranten (Säulen mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant)

4.2 Vergleich der Dummykonzentrationen in Abhängigkeit von den Dichteklassen und Formen (Modell 2) innerhalb der einzelnen Ringe

Innerhalb der Ringe A, B, C und D ist durch die signifikanten Unterschiede deutlich zu erkennen, dass die Dummykonzentrationen von den vier Dichteklassen abhängig sind (Tab. 6).

Im äußeren Ring A sind die Dummies der Dichteklasse 1 wesentlich stärker konzentriert als die der Dichteklasse 4. In den Ringen B und C kehrt sich

dieses Verhältnis sukzessive um, im inneren Ring D ist dann die Konzentration der Dummies der Dichteklasse 4 am höchsten (Tab. 6).

Tabelle 6: Mittelwerte der Dummykonzentrationen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) innerhalb der Ringe in Abhängigkeit von der Dichteklasse

	<i>c_{Dummy}</i> [n/kg]			
	Ring A	Ring B	Ring C	Ring D
Dichteklasse 1	5,10 ^a	2,01 ^{bc}	1,76 ^c	1,43 ^d
Dichteklasse 2	3,14 ^b	2,52 ^a	1,76 ^c	1,76 ^c
Dichteklasse 3	2,12 ^c	2,25 ^{ab}	2,12 ^b	2,33 ^b
Dichteklasse 4	0,62 ^d	1,74 ^c	2,77 ^a	2,76 ^a

Mittelwerte gefolgt von verschiedenen Buchstaben innerhalb einer Spalte unterscheiden sich signifikant ($\alpha=0,05$).

Ein signifikanter Einfluss der beiden Dummyformen auf die Dummykonzentrationen in den einzelnen Ringen kann mit Ausnahme der Konzentration in Ring B nicht festgestellt werden (Tab. 7).

Dieser signifikante Konzentrationsunterschied in Ring B deutet auf eine mögliche, jedoch nicht signifikante Wirkung des fixen Effektes der Dummyform auf die Dummykonzentrationen auch in den anderen Ringen hin (Tab. 7).

Tabelle 7: Mittelwerte der Dummykonzentrationen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) innerhalb der Ringe in Abhängigkeit von der Form

	<i>C_{Dummy}</i> [n/kg]			
	Ring A	Ring B	Ring C	Ring D
Form 1	2,84 ^a	2,30 ^a	2,04 ^a	2,04 ^a
Form 2	2,65 ^a	1,96 ^b	2,16 ^a	2,10 ^a

Mittelwerte gefolgt von verschiedenen Buchstaben innerhalb einer Spalte unterscheiden sich signifikant ($\alpha=0,05$).

Eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Dichteklassen und Formen der Korndummies auf ihre Konzentration ist nur in Ring D (Zentrum des Schüttkegels) nachweisbar (Abb. 25).

Es wird deutlich, dass mit steigender Dichteklasse der Korndummies die Dummyform 2 eine vergleichsweise höhere Wirkung auf die Dummykonzentration ausübt als dies bei einer geringeren Dichteklasse der Fall ist. Denn die Korndummies der Form 2 weisen innerhalb der Dichteklassen 1 und 2 geringere Konzentrationen auf als die Dummies der Form 1. Dagegen sind die Dummykonzentrationen der beiden Formen innerhalb der Dichteklasse 3 annähernd identisch. Schließlich sind in der Dichteklasse 4 die Dummies der Form 2 wesentlich höher konzentriert als die der Form 1 (Abb. 25).

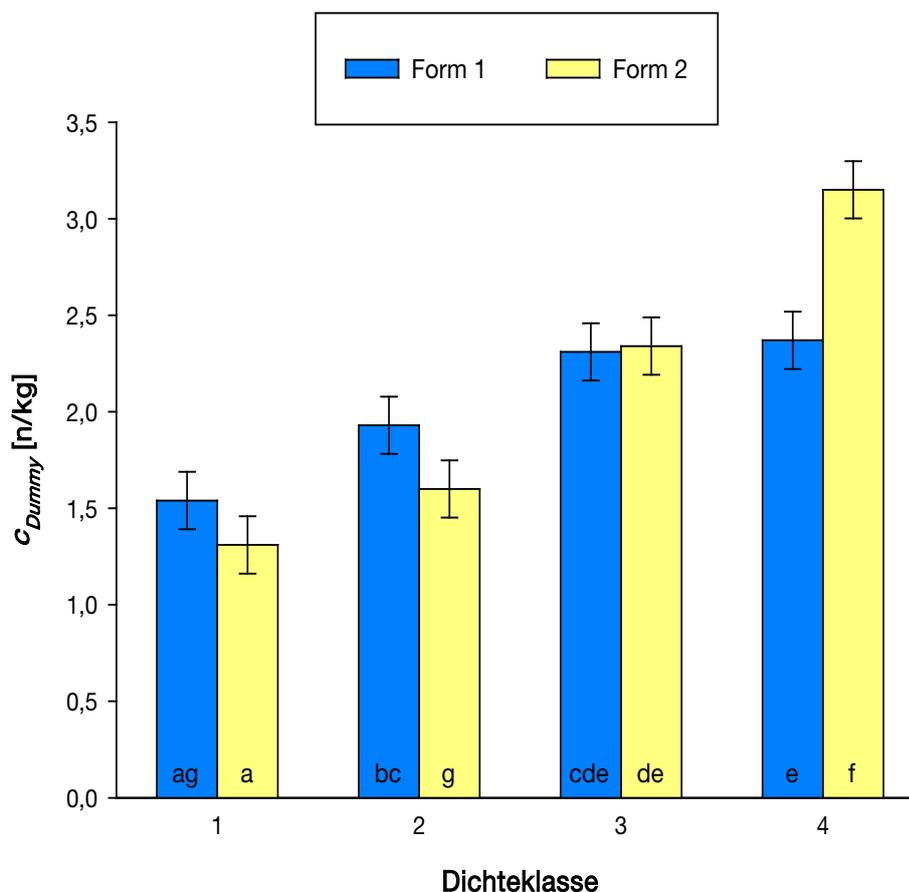


Abbildung 25: Mittelwerte und Standardfehler der Korndummykonzentrationen in Ring D in Abhängigkeit von der Form und der Dichteklasse (Säulen mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant)

4.3 Vergleich der Dummykonzentrationen in Abhängigkeit von den Dichteklassen und Formen (Modell 2) innerhalb der einzelnen Quadranten

Der Vergleich der Dummykonzentrationen innerhalb der einzelnen Quadranten in Abhängigkeit von den Dichteklassen zeigt signifikante Unterschiede in den Quadranten 1 und 3 (Tab. 8).

Es fällt auf, dass es sich um gegenüberliegende Quadranten handelt und dass in beiden Fällen immer nur die Konzentrationen der Korndummies der

Dichteklassen 1 und 4 signifikant voneinander abweichen. Eine Ausnahme stellt in Quadrant 1 nur die Konzentration der Dichteklasse 2 dar. Auch sie unterscheidet sich in ihrer Konzentration signifikant von der Dichteklasse 4. Dennoch bleibt eindeutig erkennbar, dass in den Quadranten 1 und 3 die Korndummies mit einer vom Versuchsweizen Bommer abweichenden spezifischen Dichte ungleichmäßig verteilt sind (Tab. 8)

Tabelle 8: Mittelwerte der Dummykonzentrationen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) innerhalb der Quadranten in Abhängigkeit von der Dichteklasse

	<i>c_{Dummy}</i> [n/kg]			
	Quadrant 1	Quadrant 2	Quadrant 3	Quadrant 4
Dichteklasse 1	2,65 ^a	2,63 ^a	2,77 ^a	2,25 ^a
Dichteklasse 2	2,63 ^a	2,12 ^a	2,28 ^{ab}	2,15 ^a
Dichteklasse 3	2,11 ^{ab}	2,28 ^a	2,23 ^{ab}	2,20 ^a
Dichteklasse 4	1,91 ^b	2,18 ^a	1,89 ^b	1,90 ^a

Mittelwerte gefolgt von verschiedenen Buchstaben innerhalb einer Spalte unterscheiden sich signifikant ($\alpha=0,05$).

Ein signifikanter Einfluss der Dummyform auf die Dummykonzentrationen in den einzelnen Quadranten kann nicht festgestellt werden (Tab. 9).

Tabelle 9: Mittelwerte der Dummykonzentrationen (Anzahl Korndummies pro kg Weizen) innerhalb der Ringe in Abhängigkeit von der Form

	<i>c_{Dummy}</i> [n/kg]			
	Quadrant 1	Quadrant 2	Quadrant 3	Quadrant 4
Form 1	2,41 ^a	2,35 ^a	2,33 ^a	2,13 ^a
Form 2	2,24 ^a	2,26 ^a	2,25 ^a	2,13 ^a

Mittelwerte gefolgt von verschiedenen Buchstaben innerhalb einer Spalte unterscheiden sich signifikant ($\alpha=0,05$).

In Quadrant 2 kann zusätzlich eine signifikante Wechselwirkung zwischen der Dichteklasse und der Form der Korndummies auf die Dummykonzentration registriert werden (Abb. 26).

In diesem Quadrant ist mit Zunahme der Dichte bis zur Klasse 3 eine tendenzielle Abnahme der Korndummykonzentrationen beider Dummyformen zu verzeichnen. Form 2 ist dabei immer niedriger konzentriert als Form 1, auch wenn dieser Effekt innerhalb der einzelnen Dichteklassen nicht signifikant ist. Dieses Verhältnis aber dreht sich bezüglich der Dummykonzentrationen innerhalb der Dichteklasse 4 um. In diesem Fall sind Korndummies der Form 1 wesentlich geringer konzentriert als Dummies der Form 2 (Abb. 26).

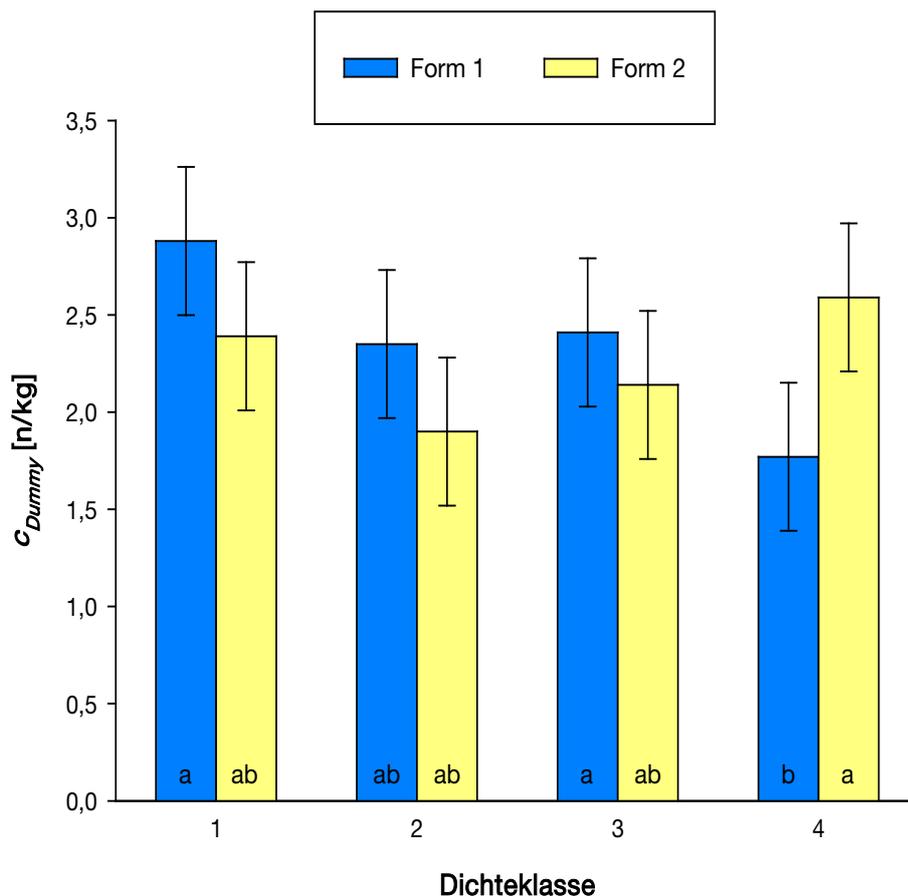


Abbildung 26: Mittelwerte und Standardfehler der Korndummykonzentrationen in Quadrant 2 in Abhängigkeit von der Form und der Dichteklasse (Säulen mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant)

5 Diskussion

Die Versuche zum Entmischungsverhalten der Korndummies zeigten eindeutig, dass sich alle Dummytypen außer den Typen 5 und 6 (Tab. 3, S. 42) wie erwartet signifikant entmischten. Diese beiden Korndummytypen waren einem Weizenkorn bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften wie beispielsweise äußere Abmessungen und spezifische Dichte am ähnlichsten nachempfunden. Zusätzlich wiesen alle Korndummies eine sehr gute mechanische Stabilität auf. An keinem Dummy konnten nach den Versuchsdurchführungen Beschädigungen festgestellt werden. Im Folgenden soll dargelegt werden, anhand welcher Partikeleigenschaften, Entmischungsmechanismen und -prozesse sich die Versuchsergebnisse erklären lassen.

5.1 Partikeleigenschaften

Die notwendige Voraussetzung für die Entmischung von Schüttgütern sind Unterschiede zwischen den physikalischen Eigenschaften der enthaltenen Partikel [8, 34]. Die Korndummies und die Weizenkörner der Sorte Bommer unterschieden sich im Wesentlichen in ihrem Volumen, ihrer Masse, ihrer Dichte und ihrer Form. Dementsprechend kommen nur diese vier Eigenschaften als Ursache für die in den eigenen Versuchen festgestellten Entmischungen in Betracht.

Die Korndummies und die Versuchsweizenkörner wiesen bewusst sehr ähnliche Abmessungen auf, um Entmischungen, verursacht durch Partikelgrößenunterschiede, ausschließen zu können (Tab. 2, S. 39). Trotz dieser annähernd gleichen Abmessungen resultierten daraus aufgrund von Formunterschieden zwischen den Dummies und Weizenkörnern unterschiedliche Partikelvolumina. Es lässt sich anhand der in Tab. 3. (S. 42) dargestellten physikalischen Eigenschaften erkennen, dass alle Dummytypen fast

identische, aber grundsätzlich höhere Volumina als die Weizenkörner aufwiesen. Da sich die Dummytypen 5 und 6 trotz ihres höheren Volumens nicht entmischten (Tab. 4, S. 51; Tab. 5, S. 52), kann ein diesbezüglicher Effekt auf die Versuchsergebnisse als vernachlässigbar angesehen werden.

Gleiches gilt analog auch für die Masse der Korndummies im Vergleich zu den Weizenkörnern (Tab. 3, S. 42). Außer den Dummytypen 1 und 2 wiesen alle anderen Typen eine höhere Masse auf als die in den Versuchen verwendeten Weizenkörner. Trotz höherer Masse als die Körner zeigten ausschließlich die Dummytypen 5 und 6 keine Entmischung (Tab. 4, S. 51; Tab. 5, S. 52). Dies lässt ebenfalls einen zu vernachlässigenden Einfluss der Masse auf die Versuchsergebnisse erkennen.

Obwohl die Masse und das Volumen der Korndummies keinen Einfluss auf die Entmischung hatten, zeigte sich, dass die hieraus resultierende physikalische Größe, die spezifische Dichte, sehr deutliche Auswirkungen hatte. Die spezifischen Dichten der sich nicht entmischenden Korndummytypen 5 und 6 sowie des Versuchswizens waren annähernd identisch (Tab. 3, S. 42). Die spezifischen Dichten der anderen, sich entmischenden Dummytypen dagegen nicht. Daraus ist abzuleiten, dass diese Partikeleigenschaft die Hauptursache für die in den Versuchen festgestellten Entmischungen war. In der Literatur wird der Einfluss unterschiedlicher spezifischer Dichten von Partikeln auf die Entmischung kontrovers diskutiert und von der Mehrheit vergleichsweise gering eingestuft [31, 46, 55]. Die eigenen Versuchsergebnisse (Tab. 4, S. 51; Tab. 6, S. 54; Tab. 8, S. 57) zeigen aber eindeutig, dass dies in den durchgeführten Versuchen nicht der Fall war. Die spezifische Dichte der Korndummies hatte einen wesentlichen Einfluss auf ihre Entmischung. Es bestätigen sich somit jene Auffassungen, die unterschiedlichen spezifischen Dichten von Partikeln signifikante Beiträge zu Entmischungen beimessen [19, 48].

Der Grund für den wesentlichen Einfluss der Partikeldichte in den Versuchen war das o. a. weitgehende Fehlen des für Entmischungen wichtigsten Faktors der unterschiedlichen Partikelgrößen [41, 45, 46, 52, 53, 54, 55].

Dieser Faktor hätte Effekte verursacht durch Dichteunterschiede der Partikel wahrscheinlich überlagert [19].

Ähnliche Feststellungen wie für die spezifische Dichte der Partikel gelten auch für die Partikelform. Ihr Einfluss ist gering, solange sie keine extremen Unterschiede annimmt [19, 31, 46]. Dies spiegelt sich auch in den Versuchsergebnissen in Tab. 7 (S. 55) und Tab. 9 (S. 57) wider. Dennoch kann sie einen signifikanten Einfluss auf Entmischungen haben [16, 45, 48], dies zeigt der Konzentrationsunterschied in Ring B in Tab. 7 (S. 55). Zwar ist diese Hauptwirkung der Dummyform, wie aus Tab. 7 (S. 55) und Tab. 9 (S. 57) ersichtlich wird, eher als gering einzustufen. Jedoch ist ihre Wechselwirkung zusammen mit der spezifischen Dichte der Dummies umso größer (Abb. 25, S. 56; Abb. 26, S. 58). Die beiden Abbildungen zeigen deutlich, dass mit steigender Dichteklasse der Einfluss der Partikelform auf die Korndummykonzentration zunehmend bedeutender wird. In beiden Fällen sind die Konzentrationen von Korndummies niedriger Dichteklassen der Form 1 (glatte Form) höher als die der Form 2 (eingeschnürte Form) (Abb. 19, S. 40). Dieses Verhältnis ist bei den Korndummies der Dichteklasse 4 umgekehrt. Es ist damit zu begründen, dass die Einschnürung der Form 2 erst verbunden mit einer hohen spezifischen Dichte der Partikel und der daraus resultierenden hohen Masse die Beweglichkeit der Dummies im Getreidestrom hemmte, gewissermaßen eine erhöhte Reibung verursachte. Dies führte zur signifikanten Absonderung der Dummyform 2 im Vergleich zur Form 1 in der Dichteklasse 4 (Abb. 25, S. 56; Abb. 26, S. 58). Aufgrund der geringen Haupt- aber schon deutlicheren Wechselwirkungen der Dummyform ist daraus zu schließen, dass sich die Form in ihrer Ausprägung in einem Grenzbereich befindet, um die Korndummykonzentrationen merklich zu beeinflussen.

5.2 Entmischungsprozesse

Ein Entmischungsprozess ist eine Situation, in der Entmischungsmechanismen aktiv werden und zu einer Entmischung führen können, wie beispielsweise die Schüttung eines Haufens oder Kegels [18]. Aus dem Vergleich der Dummykonzentrationen in Tab. 4 (S. 51) und Tab. 5 (S. 52) sowie in Tab. 6 (S. 54) und Tab. 8 (S. 57) lässt sich ableiten, dass als Prozess, der zur Entmischung der Dummies der Dichteklassen 1, 2 und 4 führte, weitgehend die Schüttung des Kegels am Ende der Förderstrecke des Weizens in Frage kommt. Dies belegen die hochsignifikanten Konzentrationsunterschiede der Korndummies zwischen und innerhalb der Ringe. Diese können nur durch eine ungleichmäßige Verteilung der Dummies in radialer Richtung nach dem Auftreffen auf den Schüttkegel zustande gekommen sein.

Einen geringeren Beitrag zur Entmischung leistete der Prozess der Getreideförderung durch die Versuchsanlage hindurch. Denn aufgrund des Versuchsaufbaus hätte sich eine Entmischung während des Transportvorgangs in signifikanten Dummykonzentrationsunterschieden zwischen und innerhalb der einzelnen Quadranten niederschlagen müssen: Wäre es zu einer Absonderung von bestimmten Korndummytypen im Laufe der Förderstrecke gekommen, so hätten sich diese bei einer Betrachtung des Querschnittes des Getreidestromes in einem bestimmten Bereich angesammelt. Während der horizontalen Förderung durch den Redler hätten sich Dummies im Weizen beispielsweise nach oben oder unten absondern können. Beim Verlassen des letzten Förderaggregates, einem Rohr, in welchem der Weizen senkrecht im freien Fall auf den Schüttkegel fiel, hätte sich diese ungleichmäßige Querschnittsverteilung widerspiegeln und zu signifikanten Konzentrationsunterschieden führen müssen. Aufgrund der Förderrichtung wären diese Unterschiede dann insbesondere zwischen und innerhalb der Quadranten 1 und 3 aufgetreten. Dies war zwischen den Quadranten nicht der Fall (Tab. 5, S. 52). Der einzige signifikante Unterschied (Quadrant 2, Form 2, Dichteklasse 4) lässt sich nicht erklären, auch sind keine ein-

deutigen Tendenzen zu erkennen. Innerhalb der Quadranten stellt sich jedoch ein anderes Bild dar (Tab. 8, S. 57). Hier sind signifikante Dummykonzentrationsunterschiede innerhalb der Quadranten 1 und 3 vorhanden. Die Unterschiede in Quadrant 1 zwischen den einzelnen Dichteklassen können die o. a. Theorie der ungleichmäßigen Querschnittsverteilung stützen. Denn die in Quadrant 1 signifikant höheren Konzentrationen der Korndummies der Dichteklasse 1 verglichen mit Dichteklasse 4 (Tab. 8, S. 57) lassen folgenden Schluss zu: Während der horizontalen Transportvorgänge haben sich Dummies der Dichteklasse 1 im Getreidestrom nach oben, die Dummies der Dichteklasse 4 dagegen nach unten abgesondert. Andererseits passen die Konzentrationsunterschiede in Quadrant 3 nicht in diesen Zusammenhang. In diesem Quadrant hätte theoretisch die Dummykonzentration der Dichteklasse 4 höher sein müssen als die der Dichteklasse 1. Dies ist nicht der Fall; dieses Versuchsergebnis kann nicht erklärt werden. Ähnliches gilt ebenso für die in Abb. 24 (S. 53) gezeigte Wechselwirkung der Quadranten und Ringe auf die Konzentration des Dummies der Dichteklasse 1, Form 1. Es konnten hochsignifikante Konzentrationsunterschiede ermittelt werden, deren Ursache allerdings unbekannt ist.

Natürlich ist nicht auszuschließen, dass im Verlauf der Getreideförderung Entmischungen durch Vermischungsprozesse, z. B. in der Körnerschnecke, wieder rückgängig gemacht worden sind. Diese könnten die o. a. nicht zu deutenden Konzentrationsunterschiede aufklären. Auch lässt sich anhand der Versuchsergebnisse nicht lokalisieren, wo in der Versuchsanlage genau die in Tab. 8 (S. 57) und Abb. 24 (S. 53) ablesbaren Entmischungen stattgefunden haben. Dazu wäre das Anhalten der gesamten Anlage während des Fördervorganges notwendig gewesen mit anschließender Probenentnahme aus allen Förderaggregaten. Dies war anlagentechnisch nicht möglich. Es steht allerdings fest, dass während der Getreideförderung eine Absonderung insbesondere der Dichteklassen 1 und 4 erfolgte (Tab. 8, S. 57; Abb. 24, S. 53), auch wenn diese nicht so gravierend war wie jene während der Schüttung des Kegels (Tab. 6, S. 54).

5.3 Entmischungsmechanismen

Ein Entmischungsmechanismus stellt ein örtlich begrenztes Ereignis dar, welches zur Absonderung von Partikeln mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften führt [18]. Aufgrund der bereits erwähnten weitgehend fehlenden Größenunterschiede zwischen dem Versuchsheizen und den Korndummies können prinzipiell alle Entmischungsmechanismen ausgeschlossen werden, für die ein Partikelgrößenunterschied zwingende Voraussetzung ist. Dies sind beispielsweise Siebung, Perkolation und Flugbahn. Weiterhin sind die auf Gasströmung und Fluidisierung beruhenden Mechanismen auszuklammern, da in den Versuchen sowohl die Weizenkörner als auch die Korndummies die diesbezügliche kritische Partikelgröße von 100 μm weit überschritten.

In Frage kommen dementsprechend nur Mechanismen, die auf Partikeldichteunterschieden und den aufgrund annähernd gleicher Volumina der Partikel daraus resultierenden Partikelmasseunterschieden sowie Partikelformunterschieden beruhen. Von den in der Literatur zitierten wesentlichen Entmischungsmechanismen sind aus diesem Grund vorrangig jene bedingt durch unterschiedliche Böschungswinkel (Kapitel 2.3.2.2) und Aufprall (Kapitel 2.3.2.3) zu betrachten.

Unterschiedliche Böschungswinkel werden von Partikeln aufgrund ihrer Größe oder Form ausgebildet [8, 45]. Da die Partikelgröße aus den o. a. Gründen als Ursache für die Entmischung nicht in Betracht kommt, bleibt nur die Form als Auslöser übrig. Weiter oben wurde allerdings anhand der Versuchsergebnisse dargelegt, dass der Einfluss der Partikelform gering war. Hinzu kommt, dass der Anteil der Korndummies im Weizen klein war und auch deshalb die Ausbildung eines unterschiedlichen Böschungswinkels durch die Dummies sehr unwahrscheinlich ist. Es muss also davon ausgegangen werden, dass der Mechanismus unterschiedlicher Böschungswinkel als Auslöser der Entmischung ebenfalls weitgehend auszuschließen ist.

Der Mechanismus des Aufprallens (Kapitel 2.3.2.3) von Korndummies auf den Schüttkegel ist dagegen in der Lage, einen Teil der in den Versuchen festgestellten Konzentrationsunterschiede zu erklären. Analog zu den Feststellungen anderer Wissenschaftler können die Dummies höherer spezifischer Dichten und dementsprechend auch höherer Massen als die Weizenkörner durch ihren Aufprall vergleichsweise tiefer in das Zentrum des Schüttkegels eindringen und dort liegen bleiben [27, 45]. Ebenfalls plausibel erscheint der Aufprallmechanismus zur Erklärung der hohen Konzentrationen von Korndummies niedriger spezifischer Dichten im Randbereich des Kegels. Durch die geringe Dichte der Dummies und der daraus resultierenden geringen Masse sowie ihre höhere Elastizität im Vergleich zu den Weizenkörnern war es möglich, dass diese Dummies beim Aufprall davonsprangen und sich im Randbereich ansammelten.

Es stellt sich in diesem Zusammenhang allerdings auch die Frage nach dem Einfluss des Untergrundes, auf den das Getreide und die Korndummies nach dem Verlassen der Förderstrecke zum Beginn der Schüttung des Kegels trafen. Es handelte sich dabei um einen Holzfußboden, der mit einer Plane abgedeckt war. Da der Massenfluss des Getreides so hoch war, dass innerhalb kürzester Zeit die Fläche unter dem Fallrohr mit Weizen bedeckt war, kann ein Einfluss des Untergrundes auf die in den eigenen Versuchen festgestellten Entmischungen weitgehend ausgeschlossen werden.

Mit den in diesem Kapitel bisher aufgeführten Entmischungsmechanismen lassen sich nur die Entmischungen erklären, welche zum Zeitpunkt der Schüttung des Kegels und nicht während des Transportvorgangs in den Versuchen stattfanden. Ein für diese beiden Entmischungsprozesse in Frage kommender Entmischungsmechanismus, der in der Literatur keine so große Beachtung findet wie beispielsweise die Mechanismen der Siebung oder Perkolation, ist das Schweben und Sinken (englisch: Floating and Sinking) [8]. Es wird durch Partikeldichteunterschiede hervorgerufen, die den Teilchen geringerer Dichte Auftrieb verleihen. Dieser Mechanismus wirkt be-

sonders stark, wenn der Gutstrom eines Gemisches gering ist und die Partikel in ihrer Beweglichkeit wenig eingeschränkt sind [8].

Alle diese Bedingungen waren in den Versuchen erfüllt, sowohl während der Förderung durch die Versuchsanlage hindurch als auch zum Zeitpunkt der Bildung des Schüttkegels. Für die Korndummies bedeutete dies im Laufe des Transports eine Absonderung in unterschiedliche Bereiche des Gutstromes z. B. durch das Rutschen und Fallen in den Rohren oder die interpartikulären Bewegungen in der Kornschnecke oder im Redler. Während der Schüttung des Kegels dagegen konnten die vergleichsweise weniger dichten Korndummies durch ihren Auftrieb zum Fuß des Schüttkegels rutschen. Im Gegensatz dazu kamen die dichteren Korndummies durch ihren Abtrieb relativ schnell in Kontakt mit dem schon ruhenden Getreide bzw. der ruhenden Schüttkegeloberfläche. Sie wurden abgebremst, blieben liegen und konzentrierten sich so im Zentrum des Schüttkegels.

Angesichts der klaren Versuchsergebnisse und dem Ausschluss fast aller in der Literatur als wesentlich erachteten Entmischungsmechanismen ist Folgendes offensichtlich: In den Versuchen sind sämtliche Entmischungen in allen Prozessen weitestgehend durch den Mechanismus des Schwebens und Sinkens aufgrund von Partikeldichteunterschieden verursacht worden. Einen geringeren Beitrag leistete der Mechanismus des Aufprallens. Allerdings lässt sich keine Aussage darüber treffen, ob die sich nicht entmischenden Dummytypen 5 und 6 nach dem Prozess der Förderung im Schüttkegel sich noch in demselben angestammten Getreidevolumen wie vor dem Transport befanden. Es muss aber berücksichtigt werden, dass die Korndummykonzentration in den Versuchen so hoch war, wie sie im Praxis-einsatz niemals sein wird. In der Praxis bedeutet es dementsprechend, dass die den einzelnen Korndummies zugeordneten Getreidevolumina wesentlich größer sein werden. Damit sinkt gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit, dass ein Korndummy sein angestammtes Getreidevolumen, durch welche Prozesse auch immer, verlässt.

Vor diesem Hintergrund und in Anbetracht der sehr guten mechanischen Stabilität der Dummytypen 5 und 6 sind diese grundsätzlich in der Lage, bei Einhaltung ihrer technischen Parameter als Träger von RFID-Transpondern zu dienen und diese zuverlässig im Weizen zu platzieren. Die Auswahl der Form erscheint dabei unerheblich. Durch die geringfügige Anpassung der physikalischen Eigenschaften der Korndummies an andere Getreidearten sollte auch ein universeller Einsatz problemlos möglich sein.

5.4 Nutzbarkeit der Verfahren zur Rückverfolgung von Getreide in der Praxis

Nicht alle der in Kapitel 2.2 aufgeführten Systeme und Verfahren zur Rückverfolgung von Getreide sind in der Lage, die Rückverfolgbarkeit von Getreide in dem Umfang sicherzustellen, wie es vom Gesetzgeber und der Wirtschaft verlangt wird. Hinzu kommen weitere Aspekte, die einen flächendeckenden Einsatz in der Praxis verhindern können. Wesentliche Merkmale der weiter oben vorgestellten Verfahren zur Rückverfolgung von Getreide sollen an dieser Stelle diskutiert werden.

5.4.1 Analytische Verfahren

Die zu den analytischen Verfahren zählende Stabilisotopenanalytik (Kapitel 2.2.2) ist in der Lage, die geografische Herkunft von Getreide zu ermitteln, nicht aber die einzelnen Stationen seines Weges durch die Getreidekette bis hin zum Verbraucher. Diese Tatsache macht das System für eine lückenlose Rückverfolgung im Sinne der Basisverordnung unbrauchbar. Hinzu kommt die Notwendigkeit von Datenbanken mit Informationen zu Isotopenverhältnissen authentischer Produkte, die mit hohem Kostenaufwand erstellt, erweitert und gepflegt werden müssen. Denn ohne Referenzdaten

oder auch -proben ist die geografische Zuordnung eines fraglichen Produkts nicht möglich. Nicht zuletzt lassen die lange Analysedauer einer Probe und die hohen Kosten die Stabilisotopenanalytik für den täglichen Warenverkehr als eher ungeeignet erscheinen. Die Anwendungsfelder der analytischen Rückverfolgungssysteme sind daher in Bereichen zu suchen, wo die geografische Herkunft vornehmlich hochpreisigerer Produkte als Getreide einen außerordentlich hohen Stellenwert einnimmt, z. B. bei Wein, Käse oder Fleisch mit Herkunftsschutz. Trotz alledem stellt das Verfahren insbesondere in Streitfällen ein äußerst wertvolles Instrument dar, um die wahre geografische Herkunft bzw. Authentizität von Getreide mit nahezu absoluter Sicherheit zu ermitteln.

5.4.2 EDV-basierte Verfahren

EDV-basierte, auf Datenbanken beruhende Rückverfolgungssysteme, wie z. B. QM-G (Kapitel 2.2.1), sind dagegen in der Lage, den Weg eines Getreideprodukts durch die gesamte Verarbeitungskette hindurch abzubilden. Ein Beweis für ihre Funktionalität ist der Praxiseinsatz in einigen Erzeugergemeinschaften [42]. Allerdings ist die notwendige Datenerfassung, -aufbereitung und -eingabe zur Aktualisierung der zentralen Datenbank von einer gewissen Disziplin und Sorgfalt der Systemteilnehmer abhängig, um die Funktion des Systems zu gewährleisten. Gerade dies ist ein wesentlicher Punkt insbesondere auf der Stufe der landwirtschaftlichen Primärproduktion an der Schnittstelle zum Landhandel. Die Erfahrung zeigt, dass vor allem unter Zeit- und Arbeitsdruck, beispielsweise in der Ernte, menschliches Versagen in der Regel nicht auszuschließen ist. Es kann leicht zu falschen Zuordnungen von Getreidepartien zu den Ackerschlägen ihrer Herkunft schon innerhalb eines einzelnen Betriebes kommen. Analog gilt dies auch für den Landhandel. Durchaus passiert es, dass bei Erschöpfung der Annahmekapazitäten Getreide auf dem Betriebsgelände auf dafür vorgesehene

betonierte Freiflächen oder in Hallen zur Zwischenlagerung abgekippt wird und eine spätere Zuordnung schwerfällt. Hinzu kommt der zusätzliche Dokumentationsaufwand für das System, auf den speziell die Unternehmer auf der Stufe der Primärproduktion, die Landwirte, abgeneigt reagieren dürften. Aus Effizienzgesichtspunkten weisen EDV-basierte Rückverfolgungssysteme verfahrensbedingt einen Nachteil auf, der unter Sicherheitsaspekten aber durchaus auch als vorteilhaft angesehen werden kann. Durch die kontinuierliche Vergabe von Partiecodes ist zwar gewährleistet, dass ausgehend von einer beliebigen Getreidepartie alle potenziell in ihr zusammengeführten Teilpartien ermittelt werden können. Jedoch bleibt bei dieser Vorgehensweise offen, welche Teilpartien in einer an den Kunden gelieferten Getreidemenge tatsächlich enthalten sind. Im Fall einer Rückverfolgung könnten so wertvolle Zeit und auch Geld durch die Verfolgung falscher Spuren verschwendet werden.

5.4.3 Verfahren zur direkten Markierung von Getreide

Es erscheint einleuchtend, dass den o. a. Nachteilen nur durch eine automatisierte, direkte Markierung des Getreides begegnet werden kann. Die zu diesem Zweck in der Entwicklung befindlichen Systeme, die Getreide-Rückverfolgungs-Kaplette (Nutzung von Barcodes, Kapitel 2.2.3) und der Korndummy (Nutzung von RFID, Kapitel 2.2.4.2), sind in der Lage, Getreide vom Zeitpunkt des Mähdruschs an bis zur Verarbeitung zu Mehl o. ä. quasi untrennbar mit seiner Identität zu verknüpfen. Nach der Verarbeitung greifen dann andere Systeme zur Herkunftssicherung, beispielsweise die gesetzlich vorgeschriebene Lebensmittel-Kennzeichnung und Los-Kennzeichnung von Müllereiprodukten [37].

5.4.3.1 Vergleich der Verfahren zur direkten Markierung von Getreide

Leider ist bislang nur wenig über die Getreide-Rückverfolgungs-Kaplette publiziert worden, sodass ein Vergleich mit anderen Systemen zur Rückverfolgung nicht einfach ist. Es steht aber fest, dass auch für dieses System eine zentrale Datenbank mit den schon erwähnten Nachteilen notwendig ist, um die Barcodes mit entsprechenden Informationen zu verknüpfen. Umständlich stellt sich auch der Zugriff auf die Kapletten im Getreide dar. Denn es ist ein visueller Kontakt notwendig, um die aufgedruckten Barcodes auslesen zu können. Dazu muss ein Getreidestrom sehr dünn aufgefächert werden, was sich bei hohen Massendurchsätzen schwierig darstellen dürfte. Ähnliches gilt auch für das von den Entwicklern präferierte Heraussieben und anschließende Ablesen der Kapletten. In diesem Fall kommt die Gefahr einer Entmischung hinzu, denn für eine erfolgreiche Abtrennung durch Siebung ist das Trennmerkmal Partikelgröße zwingende Voraussetzung. Weiter oben wurde anhand zahlreicher Publikationen dargelegt, dass insbesondere Partikelgrößenunterschiede Entmischungen auslösen (Kapitel 2.3.1). Als sehr vorteilhaft ist zu bewerten, dass die Getreide-Rückverfolgungs-Kaplette aus Hartweizengrieß besteht. Geht man davon aus, dass die Barcodes mit Lebensmittelfarbe auf die Kapletten gedruckt werden können, so handelt es sich um ein vollkommen unbedenkliches Produkt. Dieses kann theoretisch zusammen mit dem Getreide verarbeitet werden. Eine Abtrennung ist vorher nicht unbedingt erforderlich.

Der Einsatz von Radiofrequenzidentifikationstechnologie zur Rückverfolgung von Getreide in Form von Korndummies bietet dagegen ganz andere Perspektiven. Hervorzuheben ist insbesondere die Möglichkeit einer weitestgehenden Automatisierung, was den Arbeitsaufwand verringert und auch menschliches Versagen ausschließen kann. Gerade bei Importen aus Entwicklungs- oder Schwellenländern in die EU, die in diesem Fall ebenfalls der Basisverordnung unterliegen [3], darf Analphabetismus insbesondere in der Landwirtschaft nicht ausgeschlossen werden. Dieser kann die vor-

geschriebenen Dokumentationen sehr behindern und zu Informationslücken führen. Der gesamte Funktionsumfang der Rückverfolgung mit RFID kann natürlich nur ausgeschöpft werden, wenn zukünftig RFID-Transponder mit einer Reichweite von mehreren Zentimetern zur Verfügung stehen werden, die den gestellten Anforderungen entsprechen. Laut Expertenaussagen wird dies, wie schon erwähnt, mit großer Wahrscheinlichkeit in naher Zukunft der Fall sein [22]. Andernfalls wird dies System nicht mehr leisten können, als das Getreide mit seinem Ursprungsort analog zur Stabilisotopenanalytik zu kennzeichnen. Denn ein weiterer Zugriff auf die Korndummies im Verlauf der Getreidekette zur Datenaktualisierung wird sich schwierig gestalten, da die zu ihrer Abtrennung vorgesehenen Verfahren (Magnetabscheidung, optoelektronische Auslese) beispielsweise im Landhandel gar nicht eingesetzt werden. Diese Abtrennung wäre aber zwingend notwendig, um die Korndummies anschließend dicht genug für einen Lese- oder Schreibvorgang an einem entsprechenden Gerät vorbeizuführen. Hinzu kommt, dass bei der Markierung von Getreide mit Korndummies verglichen mit der Getreide-Rückverfolgungs-Kaplette oder EDV-basierten Systemen eine Verknüpfung mit einer zentralen Datenbank aus Gründen der Rationalisierung nicht vorgesehen ist. Alle relevanten Daten sollen ausschließlich dezentral auf den in den Dummies enthaltenen Transpondern gespeichert werden. Dementsprechend muss auf die RFID-Transponder in den Korndummies im Lauf der Verfahrenskette zugegriffen werden können.

5.4.3.2 Markierungsdichte und Vermischungsproblematik

Ausgehend von der geplanten Funktionsweise des Systems zur Rückverfolgung von Getreide mit RFID ergeben sich dennoch im Vorfeld wesentliche Fragestellungen, welche exakt auch auf die Getreide-Rückverfolgungs-Kaplette zutreffen. Denn beide Verfahren sehen das Einbringen getreidekornähnlicher Partikel in den Getreidestrom vor. Es sind die weiter oben

schon aufgeführten Problematiken der benötigten Anzahl von Korndummies pro Einheit Getreide und die Vermischung von Getreidepartien unterschiedlicher Herkünfte. Diese beiden Punkte können nicht isoliert voneinander betrachtet werden.

Die absolute Obergrenze der Anzahl von Korndummies pro Einheit Getreide wird durch die Verfahrenskosten in Relation zu den Marktpreisen von Getreide bestimmt werden. Hinzu kommt die Investitionsbereitschaft potenzieller Nutzer in dieses System. Da weder das Eine noch das Andere zurzeit verlässlich abgeschätzt werden kann, ist eine Prognose auf dieser Basis nur sehr schwierig durchführbar. Grundsätzlich muss Einigkeit darüber herrschen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Korndummy in einer bestimmten Getreidemenge wiedergefunden werden muss. Es wird also unausweichlich sein, eine entsprechende Stichprobengröße zu definieren. Ausgehend von dieser Stichprobengröße ist es dann einfach zu errechnen, wie viele Korndummies auf dem Mähdrescher in das Getreide gegeben werden müssen, um später mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit (z. B. 95 %) mindestens einen Dummy in der entsprechenden Probe wiederzufinden. Problematisch ist diesbezüglich die Tatsache, dass es im Getreidehandel prinzipiell keine kleinste gehandelte Standardeinheit gibt, nach der diese Stichprobengröße ausgerichtet werden könnte. Denn Getreide wird nicht in genormten Gebindegrößen gehandelt, sondern lose verkauft. Es stellt sich daher die Frage nach einer Partiegröße, die als jene kleinste Getreidemenge angesehen werden soll, in der mit hoher Wahrscheinlichkeit mindestens ein Korndummy wiedergefunden werden muss. Theoretisch könnte dies die Masse sein, die in den Korntank eines Mähdreschers (ca. 5-10 Tonnen) oder auf einen LKW (ca. 25 Tonnen) passt. Es leuchtet ein, dass die Genauigkeit des Systems mit einer erhöhten Korndummykonzentration steigt. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint es sinnvoll, eine sehr hohe Dummykonzentration zu wählen, die wirtschaftlich noch vertretbar ist, beispielsweise die zurzeit von den Entwicklern angestrebte o. a. Menge von einem Korndummy pro Tonne Getreide. Es muss mit den Unternehmern in

der Getreidekette abgestimmt werden, welche Konzentration als praktikabel angesehen werden kann.

Mit einer hohen Korndummykonzentration im Getreide lässt sich natürlich auch der Problematik der Vermischung von Getreidepartien unterschiedlicher Herkünfte leichter begegnen. Denn nur so kann sichergestellt werden, dass bei der Teilentleerung eines Silos gefüllt mit Getreide unterschiedlicher Herkünfte Korndummies dieser verschiedenen Partien auch mit ausgelagert werden. Dies muss selbst dann gewährleistet sein, wenn nur eine kleine Menge einer dieser Partien aus dem Silo fließt. So können später im Fall einer Rückverfolgung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ausschließlich die Unternehmer ermittelt werden, welche tatsächlich an der Entstehung dieser entnommenen Mischpartie beteiligt waren. Die Anlieferer der anderen, im Silo verbliebenen Partien können so als unbeteiligt angesehen werden. Aus Effizienzgesichtspunkten ist dies sehr positiv zu bewerten, weil diese Vorgehensweise u. a. die Menge der zu analysierenden Rückstellproben, die auch zukünftig unverzichtbar sein werden, sehr stark reduziert. Vorteilhaft für das System bezüglich der Vermischungsproblematik ist dabei auch die folgende Tatsache: Bei der Vermischung von belasteten und unbelasteten Chargen muss der Anteil der belasteten Charge eine gewisse Größenordnung ausmachen, um bei der Probenentnahme überhaupt erfasst werden zu können. Sollte der Anteil der belasteten Charge sogar so hoch sein, dass es zur Rückverfolgung der Gesamtcharge kommt, steigt damit gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit stark an, einen dem belasteten Getreide zuzuordnenden Korndummy im Getreide zu finden.

5.4.3.3 Datensicherheit und Lebensmittelechtheit

Im digitalen Zeitalter stellt sich selbstverständlich auch die Frage nach der Datensicherheit. Diese kann gewährleistet werden, denn die Verschlüsselung der auf den Korndummies gespeicherten Daten ist un-

problematisch [22, 33]. Ein unberechtigter Zugriff auf die Daten kann damit verhindert werden.

Bezüglich der Lebensmittelechtheit der Korndummies wurde weiter oben schon erwähnt, dass eine Herstellung aus unbedenklichen Gießmassen möglich ist. Inwieweit der gesamte Korndummy inklusive RFID-Transponder aus lebensmittelrechtlicher Sicht als unbedenklich angesehen werden kann, ist noch zu klären. Dies ist ein weiterer sehr wichtiger Punkt, da ein Einsatz nichtlebensmittelechter Korndummies im Getreide nicht nur aus rechtlicher Sicht ausgeschlossen ist. Denn es gibt Stimmen, die sogar den lebensmittelechten Korndummy grundsätzlich kritisieren, da ein Fremdkörper unter das Getreide gemischt wird. Die Akzeptanz fehlt in diesen Fällen. Auf der anderen Seite stehen Meinungen, welche die Aussortierung der Korndummies aus einer Getreidepartie als überflüssig ansehen. Denn die Mitverarbeitung der Komponenten, aus denen sich die Korndummies zusammensetzen, wird bei einer Konzentration von wenigen Dummies pro Tonne Getreide als unproblematisch und unbedenklich angesehen. Dies aber wird aus Sicht der Verbraucher absolut inakzeptabel sein. Dementsprechend ist das Verfahren der Rückverfolgung von Getreide mit RFID-Technologie so ausgelegt, dass vor der Verarbeitung alle Korndummies gezielt vom Getreide abgetrennt werden. Diese Abtrennung wird, genauso wie das Einbringen der Korndummies in den Getreidestrom, als relativ leicht machbar angesehen. Der Grund ist das Vorhandensein der benötigten Technologien in den Getreide verarbeitenden Betrieben, wie beispielsweise Magnetabscheider oder optoelektronische Sortieranlagen. Diese müssen allerdings dem Anwendungszweck entsprechend modifiziert werden.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die direkte Markierung von Getreide mittels RFID als ein Verfahren zur Rückverfolgung mit sehr viel Potenzial dar, welches es zu entwickeln gilt. Neben der Beantwortung der aufgeworfenen Fragen muss zukünftig auch geprüft werden, auf welche anderen landwirtschaftlichen Produkte eine Anwendung der vorgestellten Technologie sinn-

voll erscheint. Dabei muss es sich nicht zwangsläufig nur um Schüttgüter handeln.

6 Zusammenfassung

Durch das Inkrafttreten der Verordnung (EG) Nr. 178/2002 ist die Rückverfolgbarkeit von Lebens- und Futtermitteln zur gesetzlichen Vorschrift geworden. Für das in der vorliegenden Arbeit im Vordergrund stehende Produkt Getreide ist dementsprechend die Verfolgung zurück zu dem Ackerschlag seiner Herkunft in der landwirtschaftlichen Primärproduktion sicherzustellen. Zu diesem Zweck stehen speziell auf Getreide angepasste Verfahren zur Verfügung, die allerdings noch nicht das Optimum darstellen. Die Nutzung von Radiofrequenzidentifikationstechnologie (RFID) verspricht in diesem Zusammenhang entscheidende Vorteile. Sie ermöglicht die direkte Markierung von Getreide zum Zeitpunkt der Ernte und eine automatisierte Dokumentation. Dies soll durch das Einbringen von RFID-Transpondern in den Getreidestrom auf dem Mähdrescher geschehen. Die Transponder können im Laufe der Getreidekette mit herkunftsrelevanten Daten beschrieben und damit aktualisiert werden.

Um die einzelnen RFID-Transponder vor mechanischen Einflüssen und einer potenziellen Entmischung im Getreide zu schützen, war die Entwicklung eines entsprechenden Trägerkörpers, dem sogenannten Korndummy, notwendig. Dieser wurde den physikalischen Eigenschaften eines Weizenkorns nachempfunden. Er besteht aus gefärbtem Epoxid-Laminierharz, einem magnetischen Partikel und einem RFID-Transponder. Durch diese Konstruktion werden gleichzeitig Trennmerkmale zur Verfügung gestellt, die eine Abtrennung der Korndummies aus dem Getreidestrom mittels Magnetabscheidung oder optoelektronischer Auslese ermöglichen sollen.

Es wurden Versuche durchgeführt, um das Entmischungsverhalten acht unterschiedlicher Korndummytypen in einem Weizenstrom zu untersuchen. Dazu wurde ein Gemisch aus Weizen und Korndummies durch eine praxisübliche Förderstrecke hindurchtransportiert. Die Dummies unterschieden sich nicht in ihren Abmessungen, aber in ihrer äußeren Form und spezi-

fischen Dichte zum Teil erheblich von dem Weizen, in den sie hineingemischt wurden.

Als hauptursächliches Partikelmerkmal, welches zur Entmischung führte, wurde die spezifische Dichte der Korndummies identifiziert. Die Dummyform hatte einen zu vernachlässigenden Einfluss. Dadurch konnte der Entmischungsmechanismus des sogenannten Schwebens und Sinkens wirksam werden. Dieser entfaltete sich besonders stark während des Entmischungsprozesses der Schüttung eines Getreidekegels am Ende der Förderstrecke.

Aufgrund der Versuchsergebnisse sind zwei der acht untersuchten Korndummytypen in der Lage, RFID-Transponder geschützt vor mechanischen Beschädigungen und Entmischungen im Weizen zu platzieren. Diese waren einem Weizenkorn am ähnlichsten nachempfunden und wiesen keine signifikante Entmischung auf.

Ungeklärt sind dagegen zahlreiche Fragen bezüglich der vielversprechenden Integration der Radiofrequenzidentifikationstechnologie in die Getreidekette nicht nur aus technischer Sicht. Vor diesem Hintergrund besteht auf jeden Fall weiterer Forschungsbedarf.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Agroisolab 2007, *Geografische Herkunftsüberprüfung*, <http://www.agroisolab.de/serv-geogrherk.htm>, gesehen am 03.05.2007.
- [2] Agroisolab 2007, *Markieren mit Isotopen*, <http://www.agroisolab.de/markieren-iso-id.htm>, gesehen am 03.05.2007.
- [3] Amtsblatt der Europäischen Union 2002, „Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit“, *Amtsblatt der Europäischen Union vom 01.02.2002*, L031, S. 1-24.
- [4] Amtsblatt der Europäischen Union 2004, „Berichtigung der Verordnung (EG) Nr. 852/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Lebensmittelhygiene“, *Amtsblatt der Europäischen Union vom 25.06.2004*, L226, S. 3-21.
- [5] Amtsblatt der Europäischen Union 2004, „Verordnung (EG) Nr. 853/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 mit spezifischen Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs“, *Amtsblatt der Europäischen Union vom 25.06.2004*, L226, S. 22-82.
- [6] Amtsblatt der Europäischen Union 2005, „Verordnung (EG) Nr. 183/2005 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Januar 2005 mit Vorschriften für die Futtermittelhygiene“, *Amtsblatt der Europäischen Union vom 08.02.2005*, L035, S. 1-22.

- [7] Authento Solutions GmbH & Co. KG 2007, *Persönliche Email-Korrespondenz*, 01.02.2007 und 06.02.2007, Lauenburg.
- [8] Bates, L & Hayes, GD 1997, *User Guide to Segregation*, 1. Auflage, British Materials Handling Board, Marlow.
- [9] Beplate-Haarstrich, L, von Hörsten, D & Lücke, W 2006, „RFID-Technologie zum Nachweis der Herkunft in der Getreideproduktion“, *Landtechnik*, 61, Nr. 6, November, KTBL, VDMA, VDI-MEG, Darmstadt, Frankfurt/Main, Düsseldorf, S. 378-379.
- [10] Beplate-Haarstrich, L, von Hörsten, D & Lücke, W 2006, „Rückverfolgung pflanzlicher Produkte - Nutzung von Radio Frequency Identification“, *Landtechnik*, 61, Nr. 2, April, KTBL, VDMA, VDI-MEG, Darmstadt, Frankfurt/Main, Düsseldorf, S. 80-81.
- [11] Beplate-Haarstrich, L, von Hörsten, D & Lücke, W 2007, „Einsatz von RFID-Transpondern zur Rückverfolgbarkeit pflanzlicher Produkte“, Tagung: 27. GIL Jahrestagung Stuttgart-Hohenheim 5.3.-7.3.2007, *Agrarinformatik im Spannungsfeld zwischen Regionalisierung und globalen Wertschöpfungsketten*, Hrsg.: Böttinger, S, Theuvsen, L, Rank, S & Morgenstern, M, Köllen Druck+Verlag GmbH, Bonn, S. 27-30.
- [12] Beplate-Haarstrich, L, von Hörsten, D & Lücke, W 2007, „Rückverfolgung von Getreide mit RFID-Transpondern“, *Mühle + Mischfutter*, 144, Nr. 10, 24.05.2007, Verlag Moritz Schäfer GmbH & Co. KG, Detmold, S. 335-337.
- [13] Bitter, K, Armster, H & Evers, H 2004, „Die Rückverfolgung der Getreideproduktion“, *Mühle + Mischfutter*, 141, Nr. 12, Verlag Moritz Schäfer GmbH & Co. KG, Detmold, S. 383-385.
- [14] Brockhaus 2006, *Band 8: Emas - Fasy*, 21. Auflage, Brockhaus, Leipzig [u. a.].

- [15] Bundesgesetzblatt 2006, „Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch (Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch - LFGB)“, *Bundesgesetzblatt Teil I vom 27.04.2006*, Nr. 20, S. 945-980.
- [16] Carson, J, Royal, T & Goodwill, D 1986, „Understanding and Eliminating Particle Segregation Problems“, *bulk solids handling*, 6, Nr. 1, Februar, Vogel Transtech Publications, Würzburg, S. 139-144.
- [17] DIN Deutsches Institut für Normung e.V 2006, *DIN EN ISO 22005 (Entwurf)*, Rückverfolgbarkeit in der Futter- und Lebensmittelkette - Allgemeine Grundsätze und grundlegende Anforderungen für die Gestaltung und Verwirklichung von Systemen (ISO/DIS 22005:2005); Deutsche Fassung prEN ISO 22005:2005, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- [18] De Silva, SR, Dyroy, A & Enstad, GG 2000, „Segregation Mechanisms And Their Quantification Using Segregation Testers“, *IUTAM Symposium on Segregation in Granular Flows*, Rosato, AD & Blackmore, DL (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht [u. a.], S. 11-29.
- [19] Drahn, JA & Bridgwater, J 1983, „The Mechanisms of Free Surface Segregation“, *Powder Technology*, 36, Elsevier Science, Amsterdam [u. a.], S. 39-53.
- [20] Feustel, J, Hemedinger, G, Niemann, U, Pohler, H, Schinkel, W & Weise, J 1984, *Aufbereitung von Getreide und Saatgut: technologische Verfahren, Prozesse, Ausrüstungen und Anlagen der Getreide- und Saatgutlagerwirtschaft*, 1. Auflage, VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- [21] Finkenzeller, K 2006, *RFID-Handbuch*, Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten, 4. Auflage, Hanser, München [u. a.].
- [22] Hampicke, M 2007, *persönliches Telefonat am 30.05.2007*, Fraunhofer Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Berlin.

- [23] Hannus, T, Poignée, O & Schiefer, G 2005, „Rückverfolgbarkeit und Qualitätssicherung in der Brotgetreidekette“, *Mühle + Mischfutter*, 142, Nr. 5, Verlag Moritz Schäfer GmbH & Co. KG, Detmold, S. 129-130.
- [24] Hirai, Y, Schrock, MD, Oard, DL & Herrman, TJ 2005, „A ‚proof of concept‘ delivery system for grain tracing caplets on the combine“, *ASAE Paper No. 056029*, ASAE, St. Joseph, Michigan.
- [25] Hirai, Y, Schrock, MD, Oard, DL & Herrman, TJ 2006, „Delivery System of Tracing Caplets for Wheat Grain Traceability“, *Applied Engineering in Agriculture*, 22, Nr. 5, American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), ASAE, St. Joseph, Michigan, S. 747-750.
- [26] Jahn, V, Hannus, T, Poignée, O & Schiefer, G 2005, „Verbesserung von Rückverfolgbarkeit und Qualitätssicherung in der Getreidekette“, *Mühle + Mischfutter*, 142, Nr. 21, Verlag Moritz Schäfer GmbH & Co. KG, Detmold, S. 718-719.
- [27] Johanson, JR 1978, „Particle segregation and what to do about it“, *Chemical Engineering*, Chemical Technology for Profit-Minded Engineers, May 8, Access Intelligence, Rockville, Md. [u. a.], S. 183-188.
- [28] Johanson, JR 1988, „Solids segregation: Causes and solutions“, *Powder and bulk engineering*, August, Minneapolis, Minn. [u. a.], S. 13-19.
- [29] Kern, C 2006, *Anwendung von RFID-Systemen*, Springer, Berlin [u. a.].
- [30] Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2000, *Weissbuch zur Lebensmittelsicherheit*, http://ec.europa.eu/dgs/health_consumer/library/pub/pub06_de.pdf, gesehen am 11.04.2007.

- [31] Lawrence, LR & Beddow, JK 1969, „Powder Segregation During Die Filling“, *Powder Technology*, 2, Elsevier Science, Amsterdam [u. a.], S. 253-259.
- [32] Menzl, M 2006, „Datenmanagement entlang der Lieferkette“, Tagung: INA Abschluss Symposium am 24. Januar 2006 in Magdeburg, http://www.agrardienstleistungen.de/praesentation/Symposium06/V_Lieferkette.pdf, gesehen am 26.04.2007.
- [33] Microsensys 2007, *Homepage der Firma Microsensys*, gesehen am 10.05.2007, Erfurt.
- [34] Mosby, J, de Silva, SR & Enstad, GG 1996, „Segregation of Particulate Materials - Mechanisms and Testers“, *KONA Powder and Particle*, Nr. 14, Hosokawa Powder Technology Foundation, Osaka, S. 31-43.
- [35] Müller, C 2004, „Eine detektivische Herausforderung - Rückverfolgbarkeit im kontinuierlichem Prozess“, *Mühle + Mischfutter*, 141, Nr. 12, Verlag Moritz Schäfer GmbH & Co. KG, Detmold, S. 388-390.
- [36] Nelson, SO 2001, „Dimensional and Density Data for Kernels and Seeds of Grain and Other Crops“, *ASAE Meeting Paper No. 01-6137*, ASAE, St. Joseph, Michigan.
- [37] Plasch, G 2006, „Die Rückverfolgbarkeit aus Mühlensicht“, *Mühle + Mischfutter*, 143, Nr. 17, Verlag Moritz Schäfer GmbH & Co. KG, Detmold, S. 529-531.
- [38] Poignée, O, Hannus, T & Schiefer, G 2004, „Qualitätsmanagement über die Getreidekette - Anforderungen als Chance begreifen“, *Mühle + Mischfutter*, 141, Nr. 1, Verlag Moritz Schäfer GmbH & Co. KG, Detmold, S. 1-8.

- [39] Poignée, O, Hannus, T, Jahn, V & Schiefer, G 2004, „QM-G: Rückverfolgbarkeit und Qualitätssicherung in Unternehmen der Getreidewirtschaft“, *Getreidetechnologie: Die Zeitschrift für Getreide, Mehl, Brot, Teigwaren, Cerealien & Technik*, 58, Nr. 2, BackMedia-Verlagsgesellschaft, Bochum, S. 72-79.
- [40] RAMPF Giessharze GmbH & Co. KG 2006, *Persönliche Email-Korrespondenz*, 25.10.2006, Grafenberg.
- [41] Rosato, AD, Blackmore, DL, Zhang, N & Lan, Y 2002, „A perspective on vibration-induced size segregation of granular materials“, *Chemical Engineering Science*, 57, Elsevier Science, Amsterdam, S. 265-275.
- [42] Schiefer, G, Hannus, T, Jahn, V & Poignée, O 2005, *Rückverfolgbarkeit und Qualitätsmanagement in der Getreide- und Futtermittelwirtschaft*, ILB, Bonn.
- [43] Schlicht C; Roßmann A; Brunner E 2006, „Anwendung der Multielement-Multikomponenten Isotopenverhältnismassenspektrometrie (IRMS) zur Prüfung der geographischen Herkunft von Spargel“, *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 1, Birkhäuser Verlag, Basel, S. 97-105.
- [44] Schmidt, H, Roßmann, A, Stöckigt, D & Christoph, N 2005, „Herkunft und Authentizität von Lebensmitteln“, *Chemie in unserer Zeit*, 39, Wiley-VCH, Weinheim, S. 90-99.
- [45] Schulze, D 2006, *Pulver und Schüttgüter*, Fliesseigenschaften und Handhabung, 1. Auflage, Springer Berlin, Berlin.
- [46] Scott, AM & Bridgwater, J 1975, „Interparticle Percolation: A Fundamental Solids Mixing Mechanism“, *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 14, Nr. 1, The American Chemical Society, Washington DC, S. 22-27.

- [47] Ständiger Ausschuss für die Lebensmittelkette und Tiergesundheit 2004, *Leitlinien für die Anwendung der Artikel 11, 12, 16, 17, 18, 19 und 20 der Verordnung (EG) Nr. 178/2002 über das allgemeine Lebensmittelrecht*
http://ec.europa.eu/food/food/foodlaw/guidance/guidance_rev_7_de.pdf, gesehen am 18.04.2007.
- [48] Tang, P & Puri, VM 2004, „Effect of particle characteristics on segregation“, *ASAE/CSAE Meeting Paper No. 044148*, ASAE, St. Joseph, Michigan.
- [49] Tovornik, S & Beplate-Haarstrich, L 2006, Top Agrar Fotoarchiv, *Aufnahme vom 24.02.2006*, Göttingen.
- [50] Tscheuschner, H 2004, *Grundzüge der Lebensmitteltechnik*, 3. Auflage, Behr's, Hamburg.
- [51] Waldner, H 2006, „Rückverfolgbarkeit als generelles Gebot im Gemeinschaftsrecht“, *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 1, Birkhäuser Verlag, Basel, S. 83-87.
- [52] Williams, JC & Khan, MI 1973, „The Mixing and Segregation of Particulate Solids of Different Particle Size“, *The Chemical Engineer, TCE, The Bulletin of the Institution of Chemical Engineers*, 269, Institution of Chemical Engineers, London, S. 19-25.
- [53] Williams, JC 1963, „The Segregation of Powders and Granular Materials“, *Fuel Society Journal*, 14, Nr. 29, Fuel Technology and Chemical Engineering Society, Sheffield, S. 29-34.
- [54] Williams, JC 1976, „The Segregation of Particulate Materials. A Review“, *Powder Technology, An International Journal on the Science and Technology of Wet and Dry Particulate Systems*, 15, Nr. 2, Elsevier Science, Lausanne, Amsterdam, S. 245-251.
- [55] Williams, JC 1990, „Mixing and Segregation in Powders“, *Principles of Powder Technology*, Rhodes, MJ (Ed.), Wiley, Chichester [u. a.], S. 71-90.

- [56] Zink, FJ 1935, „Specific Gravity and Air Space of Grains and Seeds“, *Agricultural Engineering*, 16, Nr. 11, American Society of Agricultural Engineering, St. Joseph, Mich., S. 439-440.
- [57] von Hörsten, D, Beplate-Haarstrich, L & Lücke, W 2005, „Rückverfolgung von Getreide mittels RFID-Technologie“, Tagung: Landtechnik 2005, Hannover, 04.-05. November, *VDI-Berichte Nr. 1895*, Hrsg.: VDI-Max-Eyth-Gesellschaft, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 443-448.

Lebenslauf

Angaben zur Person

Nachname, Vorname Beplate-Haarstrich, Lutz

Staatsangehörigkeit Deutsch

Geburtsdatum und -ort 04. März 1977 in Uelzen

Geschlecht Männlich

Schul- und Berufsbildung

Daten **2004 - 2007**

Tätigkeit Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Name und Art der Bildungseinrichtung Georg-August-Universität Göttingen, Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Agrartechnik

Daten **1999 - 2004**

Bezeichnung der erworbenen Qualifikation Master of Science

Fachrichtung Pflanzenproduktion

Name und Art der Bildungseinrichtung Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen

Daten **1997 - 1999**

Bezeichnung der erworbenen Qualifikation Landwirt

Art der Ausbildung Landwirtschaftliche Berufsausbildung in Ehlbeck

Daten **1996 - 1997**

Art der Ausbildung Wehrdienst in Munster

Daten **1989 - 1996**

Bezeichnung der erworbenen Qualifikation Abitur

Leistungskurse Chemie und Biologie

Name und Art der Bildungseinrichtung Herzog-Ernst-Gymnasium in Uelzen

Daten **1983 - 1989**

Name und Art der Bildungseinrichtung Grundschule und Orientierungsstufe in Suderburg

Danksagung

Folgenden Personen möchte ich für ihre Unterstützung danken:

Prof. Dr. Lücke für die entscheidende Reaktion auf eine Information, die zu dieser interessanten Aufgabenstellung geführt hat.

Dr. von Hörsten für die immerwährende Diskussions- und Hilfsbereitschaft, sowie für all das, womit ich noch ein paar weitere Seiten füllen könnte.

Dr. Hessel für die statistischen Diskussionen und die geduldigen Stunden im Umgang mit SAS.

Herrn Wilhelm für den Formenbau und sonstige Metallbearbeitungen.

Dr. Feil, Dr. Neumann und Herrn Ernst vom Forschungsinstitut Futtermitteltechnik der Internationalen Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik e. V., Braunschweig, für die Bereitstellung der Versuchsanlage und tatkräftige Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.

Herrn Wessel von den Vereinigten Saatzuchten Ebstorf (VSE) für den Versuchssweizen.

Herrn Steinmeier für die Hilfe vor, während und nach den Versuchen.

Herrn Feil und Herrn Peitsch von der Firma microsensys für alle Belange rund um die RFID-Technologie.

Meinem Kollegen Tim Wegener für die hervorragende gemeinsame Zeit zusammen in unserem kleinen Büro.

Dr. Block und Dr. Heinzemann für die ständige Diskussionsbereitschaft.

Allen anderen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Agrartechnik für eine absolut reibungsfreie gemeinsame Zeit.

Meiner Freundin Katrin und meinen Eltern für ihre Geduldigkeit.

Sowie allen hier nicht namentlich aufgeführten Personen, die auf ihre Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.