

Institut für Landtechnik  
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

---

# **Erfassung und Bewertung der Einzelung von Feinstsämereien in Einzelkornsägeräten**

**Entwicklung eines Prüfstandes zur Erfassung der Ablagegenauigkeit von  
Einzelkornsägeräten für Feinsämereien**

**Inaugural-Dissertation**

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften

(Dr. agr.)

der

Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

**Dipl.-Ing. agr. Matthias Benjamin Budde**

aus

Haltern am See

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers

Korreferent: Prof. Dr. Ralf Pude

Vorsitzender: Prof. Dr. Scherer

Tag der mündlichen Prüfung: 15.04.2016

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Im Selbstverlag: Matthias Budde

Erscheinungsjahr: 2016

Bezugsquelle: Institut für Landtechnik, Nussallee 5, 53115 Bonn

Meiner Familie.

## **Abstract**

The value of medicinal plants for the purpose of pharmaceuticals for humans in the German market is very high and largely covered by imports from abroad. The imported goods have a price advantage against the domestic products. However, this margin is lower for high-quality, well-documented goods.

An important aspect in the beginning of the value chain from the cultivation up to the selling of medicinal plants and products derived from these is the establishment of the plants from the different cultures in the field.

Currently, many medicinal plants being unusual have small seeds, such as valerian and lemon balm, yet they get costly intensive cultured in the greenhouse and planted. Intended to increase this aspect of the margin with lemon balm and valerian in the present work, the possibility of seeding those small seeds with two different single seeding machines build from leading manufacturers were investigated. The optimal parameters for sowing methods with these cultures shall be presented.

To study the two pneumatic single seeders for small seeds at first there was to create a test bench which is able to visualize small seeds and draw conclusions about the seeding results.

To build the test bench, optical micrometers as sensors were selected. Two candidate models were selected to record the small seeds in terms of their suitability and accuracy. With the appropriate sensor, a test bench for recording and evaluation the seeding quality of pneumatic single seeding machines were built. The procured planters were examined with the cultures of lemon balm and valerian and their suitability were evaluated.

During the investigation of the planters with the small seeds it turned out that the seeding accuracy below the coulter decreases with increasing speed. The distribution of the seeds below the coulter shifts with increasing speed from the typical shape of a single seeding machine to the shape of an exponential distribution by a normal drill.

However, to determine the different distribution groups of multiples and misses from the seeding results an Expectation-Maximization algorithm has been programmed to automatically calculate these apart.

Through the selection of sensors, it was further possible not only to calculate the time distance between consecutive seeds but also their position below the coulter during recording.

Thus, it is possible to calculate a correction factor to refine the mean values and standard deviations which are intended to describe the accuracy of seed placement to for a better and extent statement.

The results clearly showed that the main sources of influence on the seeding process of the used seeds and single seeding machines are the driving speed and the design of the scrapers of the seeders.

## Kurzfassung

Die Wertschöpfung von Arzneipflanzen auf dem deutschen Markt als Humanphytopharmazeutika ist sehr hoch und wird größtenteils durch Importe aus dem Ausland gedeckt. Die importierte Ware hat gegenüber der heimischen einen Preisvorteil. Dieser wird jedoch für qualitativ hochwertige und gut dokumentierte Ware geringer.

Ein sehr wichtiger Aspekt am Anfang der Wertschöpfungskette des Anbaues bis hin zur Vermarktung von Arzneipflanzen und den aus diesen gewonnenen Produkten ist die Bestandesetablierung mit der der Grundstock für das Gelingen einer Kultur gelegt wird.

Derzeit werden viele Arzneipflanzen, die als Feinstsämereien gelten, wie zum Beispiel Baldrian und Melisse, noch kostenintensiv als Pflanzkultur angezogen und ausgepflanzt. Um diesen Aspekt der Wertschöpfung zu vergrößern sollen in der vorliegenden Arbeit die Möglichkeit der Einzelung der beiden Feinstsämereien Melisse und Baldrian in zwei verschiedenen pneumatischen Sägeräten führender Hersteller untersucht und die optimalen Parameter für ein Säverfahren mit diesen Kulturen dargestellt werden.

Zur Untersuchung der beiden pneumatischen Sägeräte für Feinstsämereien musste ein Prüfstand geschaffen werden, der es möglich macht die kleinen Samen der verwendeten Kulturen sichtbar zu machen und Rückschluss auf das Säergebnis zu ziehen.

Zum Aufbau eines Prüfstandes wurden optische Mikrometer ausgewählt. Zwei in Frage kommende Modelle wurden hinsichtlich ihrer Eignung die Feinstsämereien aufzuzeichnen ausgesucht und auf ihre Genauigkeit überprüft. Mit dem geeigneten Sensor wurde ein Prüfstand zur Aufnahme und Auswertung der Säergebnisse von pneumatischen Einzelkornsäaggregaten aufgebaut und die beschafften Sägeräte wurden mit den Kulturen Melisse und Baldrian untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet.

Während der Untersuchung der Sägeräte mit den Feinstsämereien stellte sich heraus, dass sich das Ablagebild unterhalb des Säschaars mit steigender Geschwindigkeit in seinem Bild von der mehrgipfeligen Gausschen Verteilung einer Einzelkornsaat hin zu dem einer Exponentialverteilung einer Drillsaat verschiebt. Um dennoch die Ablagegruppen der Säergebnisse zu bestimmen, wurde ein Expectation-Maximization-Algorithmus programmiert um diese automatisch voneinander zu trennen.

Durch die Sensorauswahl war es zusätzlich möglich, nicht nur den zeitlichen Abstand der Samen zueinander zu berechnen, sondern auch deren Position unterhalb des Schares während der Aufzeichnung. Damit ist es möglich einen weiteren Korrekturfaktor zu bestimmen und die Mittelwerte und Standardabweichungen, welche die Genauigkeit der Saatgutablage beschreiben sollen, für eine bessere Aussage zu verfeinern.

Die Ergebnisse zeigten deutlich, dass die Haupteinflussfaktoren auf die Qualität der Ablage die Fahrgeschwindigkeit sowie die Bauform der Abstreifer der Sägeräte sind.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>A Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>B Formelverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>C Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>D Tabellenverzeichnis</b>	<b>XII</b>
<b>1. Einleitung, Aufgabenstellung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2. Stand des Wissens zur Sätechnik Einzelkornsaat</b>	<b>3</b>
2.1 Zweck, Entwicklung und Technik der Einzelkornsaat	3
2.2 Pneumatische und mechanische Einzelkornsätechnik	5
2.3 Technischer Stand der Einzelkornsaat	6
2.4 Unterschiede zur Drillsaat	7
2.5 Prüfmöglichkeiten Einzelkornsaat	11
2.5.1 Leimstreifen	11
2.5.2 Ölband	12
2.5.3 Prallmesssysteme	12
2.5.4 Optische Systeme	13
2.5.5 Prüfung von Drillmaschinen	14
2.6 Qualitätsbeurteilung der Einzelung	14
2.6.1 Normen zur Prüfung und Bewertung von Einzelkornsäegeräten	14
2.6.2 Grenzen der Laborüberprüfung und nachgelagerte Prüfmethode für Sätechnik	16
2.6.3 Weitere Einflüsse auf die Ablagequalität	17
<b>3. Material und Methoden</b>	<b>18</b>
3.1 Einzelkornsäegeräte	18
3.1.1 Sägerät 1	18
3.1.2 Sägerät 2	20
3.1.3 Unterschiede zwischen den Sägeräten 1 und 2	21
3.1.4 Versuchsaufbau Sägerät 1	23
3.1.5 Versuchsaufbau Sägerät 2	23
3.2 Saatgut	24
3.3 Auswahl, Funktionsweise und Aufbau des Einzelkornsäegeräteprüfstandes	26
3.3.1 Sensor 1	26
3.3.2 Sensor 2	26

---

3.3.3 Funktionsprinzip der Optischen Mikrometer	26
3.3.4 Unterschiede zwischen den Sensoren 1 und 2	27
3.3.5 Körnerzählgerät	27
3.3.6 Versuchsaufbau Sensorprüfung	27
3.3.7 Versuchsablauf Sensorprüfung	28
3.3.8 Überprüfung der Durchmesser Genauigkeitserkennung der Sensoren	28
3.3.9 Aufbau des Prüfstandes	29
3.4 Entwicklung der Auswertung	31
3.4.1 Datenaufzeichnung	31
3.4.2 Bezeichnung der aufgenommenen Parameter	33
3.4.3 Spannungsskalierung Sensor 2	33
3.4.4 Spannungskurve aufgenommener Samen von Sensor 2	34
3.4.5 Datenstruktur der aufgenommenen Messwerte	35
3.4.6 Berechnung der Fahrgeschwindigkeit und Versuchslänge	37
3.4.7 Wertungsparameter einer Einzelkorn-Saatgutablage	37
3.4.8 Berechnungsmethoden zu Erkennung von Doppelstellen	38
3.4.9 Berechnung der Fehlstellen	38
3.4.10 Streubreite	39
3.4.11 Zeitlicher Abstand und Position	39
3.4.12 Berechnung der mehrgipfeligen Verteilung durch den Expectation-Maximization-Algorithmus (EM-Algorithmus)	41
3.4.13 Berechnung von positionsbereinigtem Mittelwert und Standardabweichung	45
3.4.14 Berechnung des Variationskoeffizienten	48
3.4.15 Abwurfkurven	48
3.5 Versuchsaufbau der Sägeräteprüfung	49
3.6 Versuchsablauf der Sägeräteprüfung	52
<b>4. Ergebnisse</b>	<b>54</b>
4.1 Ergebnisse der Sensorprüfung	54
4.1.1 Samenerkennungsgenauigkeit Sensor 1	54
4.1.2 Samenerkennungsgenauigkeit Sensor 2	55
4.1.3 Körnerzählgerät	56
4.1.4 Größen der verwendeten Zuckerrübenpillen	56
4.1.5 Größenvermessung von pillierten Zuckerrüben Sensor 1	57
4.1.6 Größenvermessung von pillierten Zuckerrüben Sensor 2	58
4.2 Ergebnisse Entwicklung des EM-Algorithmus	59
4.2.1 EM-Algorithmus bei einer Verteilung ohne Doppel- und Fehlstellen	59

---

4.2.2 EM-Algorithmus bei einer manuell erstellten Verteilung	59
4.3 Ergebnisse Sägeräteprüfung	60
4.3.1 Ungenaueres Ablagebild der Feinstsämereien	60
4.3.2 Ergebnisse Abstreifer Einstellung Sägerät 1	61
4.3.3 Ergebnisse Abstreifer Einstellung Sägerät 2	62
4.3.4 Unterdruckeinfluss der Sägeräte auf die Einzelungsgüte	64
4.3.5 Ergebnisse Überdruckeinfluss Sägerät 1	66
4.3.6 Ergebnisse Überdruckeinfluss Sägerät 2	67
4.3.7 Ergebnisse Fahrgeschwindigkeit Sägerät 1	68
4.3.8 Zeitabstände zwischen zwei vermessenen Körnern, Sägerät 1 mit Melisse	69
4.3.9 Zeitabstände zwischen zwei vermessenen Körnern und zugehörige Positionen unter dem Schar, Sägerät 1 mit Baldrian	73
4.3.10 Ergebnisse Fahrgeschwindigkeit Sägerät 2	77
4.3.11 Zeitabstände zwischen zwei vermessenen Körnern und zugehörige Positionen unter dem Schar, Sägerät 2 mit Melisse	78
4.3.12 Zeitabstände zwischen zwei vermessenen Körnern und zugehörige Positionen unter dem Schar, Sägerät 2 mit Baldrian	83
4.3.13 Ergebnisse zur Querverteilung der Sägeräte	86
4.3.14 Messung mit umgedrehter Scheibe mit Sägerät 1	87
4.3.15 Messungen mit unterschiedlichen Säscheiben mit Sägerät 1	88
4.3.16 Ergebnisse zur Einstellung und Reproduzierbarkeit Sägerät 1	90
4.3.17 Ergebnisse zur Einstellung und Reproduzierbarkeit Sägerät 2	91
4.3.18 Messungen ohne Säschare	93
4.3.19 Abwurfkurven	94
<b>5 Diskussion</b>	<b>96</b>
5.1 Vergleich der Messsysteme	96
5.2 Prüfstandsaufbau	97
5.2.1 EM-Algorithmus	98
5.2.2 Genauigkeit des Prüfstandes	98
5.2.3 Erstellung von Abwurfkurven	98
5.2.4 Berechnung von positionsbereinigtem Mittelwert und positionsbereinigter Standardabweichung	98
5.3 Sägeräte	99
5.3.1 Sägerät 1	99
5.3.2 Sägerät 2	100
5.3.3 Unterschiede zwischen den Sägeräten 1 und 2	100

---

5.3.4 Erkenntnisse zur Verbesserung pneumatischer Sägeräte für Feinstsämereien Melisse und Baldrian _____	101
<b>6. Zusammenfassung _____</b>	<b>104</b>
<b>7. Literaturverzeichnis _____</b>	<b>106</b>

## A Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	ha	Fläche in Hektar (10.000 m <sup>2</sup> )
L	mm	Länge
m	kg	Gewicht
KAMEL		Demonstrationsprojekt Arzneipflanzen für die Kulturen <b>K</b> amille, <b>M</b> elisse und <b>B</b> aldrian
BMELV		Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
FNR		Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
KTBL		Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
$v$	km/h	Fahrgeschwindigkeit
$V_f$		Variationsfaktor (siehe (VK))
(VK)		Variationskoeffizient (Drillsaat)
$s^2$		Varianz der Stichprobe (Drillsaat)
$x$		Erwartungswert (Poissonverteilung)
$\lambda$		Mittelwert (Poissonverteilung)
$x_i$		Erwartungswert (Varianz der Stichprobe)
$f_i$		Häufigkeit (Varianz der Stichprobe)
$i$	1, ..., n	Messwertnummer
DLG		Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
ASABE		American Society of Agricultural and Biological Engineers
P	Pa	Druck
ISTA		International Seed Testing Association
n	U/min	Drehzahl
t	s	Zeit
F	Hz	Frequenz
U	V	Spannung
D	mm	Abschattungsbreite (Sensor 2)
z		Eingabevariable (Sensor 2)
s	s	Versuchsdauer
$\bar{x}$	mm	Mittelwerte der aufgezeichneten Kornzeitabstände
$\sigma_x$		Standartabweichungen der aufgezeichneten Kornzeitabstände
Y		Kornabstandswerte
j	1 / 2 / 3 Gruppe	Gruppenvariable (EM-Algorithmus)
$\Phi_j(y_i)$		Variable für gewichtete Werte der Kornzeitabstände
$P_{i,j}$		Variable für Wahrscheinlichkeiten der Verteilung der Kornzeitabstände
pos. ber. MW		Positionsbereinigter Mittelwert siehe $\mu_z$
pos. ber. STABW		Positionsbereinigte Standardabweichung siehe $\sigma_z$
Ka	mm	Kornabstände
Mp	mm	Mittelwert der Einzelkornpositionen
Kp	mm	Einzelkornpositionen der Ist-Stellen
w	mm	Positionsabweichung der Einzelkörner

---

$z$	mm	Neue Abstandswerte der Einzelkörner
$\mu_z$	mm	Positionsbereinigter Mittelwert
$\sigma_z$	mm	Positionsbereinigte Standardabweichung
$\mu_x$	mm	Mittelwerte der aufgezeichneten Kornzeitabstände
$\sigma_x$	mm	Standardabweichungen der aufgezeichneten Kornzeitabstände

**B Formelverzeichnis**

Formel 1: Poissonsverteilung, (GRIEPENTROG, 1991) geändert durch den Verfasser	8
Formel 2: Variationskoeffizient (VK), (GRIEPENTROG, 1991), geändert durch den Verfasser	8
Formel 3: Varianz der Stichprobe $s^2$ , (GRIEPENTROG, 1991), geändert durch den Verfasser	8
Formel 4: Elektronisches Signal Sensor 2 zu Größenangabe in mm	33
Formel 5: Versuchsdauer	37
Formel 6: Berechnung des ersten Schätzwertes des Mittelwertes der Gruppen des Em-Algorithmus	41
Formel 7: Berechnung des ersten Schätzwertes der Standardabweichung der Gruppen des Em-Algorithmus	41
Formel 8: Normierungsschritt des EM-Algorithmus	42
Formel 9: Gewichtungsschritt des EM-Algorithmus Teil 1 – Aufteilung der Körner	42
Formel 10: Gewichtungsschritt des EM-Algorithmus Teil 2 – Berechnung der wahrscheinlichen Zugehörigkeit zu einer der drei Gruppen	43
Formel 11: Berechnung der neuen Mittelwerte der drei Gruppen des EM-Algorithmus	43
Formel 12: Berechnung der neuen Standardabweichungen der drei Gruppen des EM-Algorithmus	43
Formel 13: Berechnung der Kornabstände ( $K_a$ )	46
Formel 14: Berechnung der Mittelwerte der der Einzelkornpositionen ( $M_p$ )	46
Formel 15: Berechnung der Einzelkornpositionsabweichung ( $w$ )	46
Formel 16: Ermittlung der neuen Kornabstandswerte ( $z$ )	47
Formel 17: Positionsbereinigter Mittelwert $\mu_z$	47
Formel 18: Positionsbereinigte Standardabweichung $\sigma_z$	47
Formel 19: Variationskoeffizient (VK)	48

**C Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Prozessphasen der Einzelkornsaat (EICHHORN & BÖHRNSEN, 1999), verändert vom Verfasser	4
Abbildung 2: Funktionsprinzipien von Einzelkornsämaschinen (Institut für Land- technik)	5
Abbildung 3: Längsverteilung bei Drillmaschinen, Häufigkeitsverteilung der Korn- abstände und Ablagebereiche (HEIER, 1995)	10
Abbildung 4: Samenabstandsmessung auf einem Ölband mit Highspeed-Kamerasystem nach KARAYEL et al., (2006), verändert	12
Abbildung 5: Kennzeichnung der Ablagegruppen am Beispiel eines Sollabstandes von 1 cm (EICHHORN, H. et al., 1999) verändert	15
Abbildung 6: Pflanzenabstände Einzelkornsaat bei Rüben (Bildquelle: DLG-Prüfstelle für Landmaschinen, Groß-Umstadt), (GRIEPENTROG 1992)	16
Abbildung 7: Sägerät 1, Säherz mit Aufhängung und Saatguttank,	19
Abbildung 8: Sägerät 1, Säherz-Innenaufbau	19
Abbildung 9 : Sägerät 2, Säherz mit Aufhängung	20
Abbildung 10: Sägerät 2; Säherz-Innenaufbau	21
Abbildung 11: Verwendete Saatgüter, Fotografien auf Millimeterpapier	25
Abbildung 12: Funktionsprinzip optisches Mikrometer (ANONYM_d)	26
Abbildung 13: Sägeräteprüfstand	30
Abbildung 14: Steuerungsbox zur Einstellung der Sensorik und Aufnahme von Messdaten	30
Abbildung 15: Bildschirmaufbau des Labview Aufnahme-Programmes „Corn Count“ mit:	32
Abbildung 16: Aufzeichnung der Spannung eines Kornfalls einer Zuckerrübenpille durch den Lichtvorhang von Sensor 2, Darstellung der Kornmitte und Flanken	34
Abbildung 17: Häufigkeit der gemessenen Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,32 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung	40
Abbildung 18: Häufigkeit der Kornpositionen unter dem Schar, Sägerät 1 Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,32 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung	40
Abbildung 19: Programmablaufplan des EM-Algorithmus	44
Abbildung 20: Pillengrößen-Vermessung mit Sensor 1, 10 Aufnahmen im Vergleich zu den Siebturmfraktionen	57
Abbildung 21: Pillengrößen-Vermessung mit Sensor 2, 10 Aufnahmen im Vergleich zu den Siebturmfraktionen	58
Abbildung 22: Änderung der Samenmenge durch Einstellung des Kammabstreifers, Sägerät 1, Melisse, 0,6 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung	61

---

Abbildung 23: Änderung der Samenmenge durch Einstellung des Kammabstreifers, Sägerät 1, Baldrian, 0,18 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	62
Abbildung 24: Änderung der Samenmenge durch Einstellung des Kammabstreifers, Sägerät 2, Baldrian, 0,79 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	63
Abbildung 25: Änderung der Samenmenge durch Einstellung des Kammabstreifers, Sägerät 2, Melisse, 0,26 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	63
Abbildung 26: Änderung der Samenmenge durch zusätzliche Einstellung des Feinabstreifers, Sägerät 2, Baldrian, 0,79 km/h, 220 Lochsäscheibe, Kammabstreiferposition 3, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	64
Abbildung 27: Änderung der Samenmenge, des pos. ber. Mittelwertes und der pos. ber. Standardabweichung der Kornabstände durch Erhöhung des Unterdrucks, Sägerät 2, Baldrian, 0,79 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	65
Abbildung 28: Änderung der Samenmenge durch steigende Fahrgeschwindigkeit, Sägerät 1, Melisse, Unterdruck 30 Pa, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	65
Abbildung 29: Änderung der Samenmenge durch steigenden Unterdruck, Sägerät 1, Melisse, Unterdruck 30 Pa bis 175 Pa, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	66
Abbildung 30: Änderung der Samenmenge bei gleichbleibendem Unterdruck Fahrgeschwindigkeiten 0,26 km/h und 0,79 km/h, Sägerät 2, Melisse, Unterdruck 200.000 Pa, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	67
Abbildung 31: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,19 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	69
Abbildung 32: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,19 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	69
Abbildung 33: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,6 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	70
Abbildung 34: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,6 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	70
Abbildung 35: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 1,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	71
Abbildung 36: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 1,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	71
Abbildung 37: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 2,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung _____	72

- Abbildung 38: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 2,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 72
- Abbildung 39: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,19 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 73
- Abbildung 40: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,19 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 73
- Abbildung 41: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,6 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 74
- Abbildung 42: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,6 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 74
- Abbildung 43: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 1,2 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 75
- Abbildung 44: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 1,2 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 75
- Abbildung 45: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 2,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 76
- Abbildung 46: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 2,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 76
- Abbildung 47: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,26 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 78
- Abbildung 48: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,26 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 78
- Abbildung 49: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,79 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 79
- Abbildung 50: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,79 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 79
- Abbildung 51: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,96 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 80
- Abbildung 52: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,96 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 80
- Abbildung 53: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 2,1 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 81
- Abbildung 54: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 2,1 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 81

- 
- Abbildung 55: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 4,2 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 82
- Abbildung 56: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 4,2 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 82
- Abbildung 57: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,26 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 83
- Abbildung 58: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,26 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 83
- Abbildung 59: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,79 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 84
- Abbildung 60: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,79 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 84
- Abbildung 61: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 2,1 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 85
- Abbildung 62: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 2,1 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung \_\_\_\_\_ 85
- Abbildung 63: Querpositionen der aufgezeichneten Samen unter Schar, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,6 km/h, 160 Lochsäscheibe \_\_\_\_\_ 86
- Abbildung 64: Durch umgedrehten Einbau der Lochsäscheibe verursachter Schaden am Zwangsabstreifer, Sägerät 1, oben: neuer Abstreifer, unten: beschädigter Abstreifer \_\_\_\_\_ 87
- Abbildung 65: Aufnahme der Kornverteilung unter dem Sägerät mit steigender Fallhöhe, Sägerät 1, Melisse, 0,6 km/h \_\_\_\_\_ 94
- Abbildung 66: Aufnahme der Kornverteilung unter dem Sägerät mit steigender Fallhöhe, Sägerät 2, Melisse, 0,79 km/h \_\_\_\_\_ 95

**D Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Eigenschaften der verwendeten Saatgüter	24
Tabelle 2: Unterschiede der Sensoren 1 und 2, Versuchsaufbau vorliegende Arbeit	27
Tabelle 3: Beispiel einer Werte-Aufzeichnung für Melisse, Rohwerttabelle	36
Tabelle 4: Saatguterkennungsgenauigkeit des Sensors 1 im Längs- und Queraufbau unter dem Sägerät	54
Tabelle 5: Saatguterkennungsgenauigkeit des Sensors 2 im Längs- und Queraufbau unter dem Sägerät	55
Tabelle 6: Schwankung der Samenerkennung des Körnerzählgerätes, Werte aus 5 Wiederholungen zu je 1000 Samen	56
Tabelle 7: Zuckerrübenpillen-Fraktionen des verwendeten Saatgutes gemessen mit dem Siebturm	56
Tabelle 8: Drei EM-Gruppen-Werte von Messungen mit weißem Senf, Sägerät 2, Fahrgeschwindigkeit 0,87 km/h, 60 Loch Säscheibe, 7 Wiederholungen, Aufnahmedauer 120 s / Messung	59
Tabelle 9: Doppel- und Fehlstellen der Sägeräte bei optimaler Einstellung, Mittelwerte von 5 Wiederholungen, Aufnahmedauer 120 s / Messung für Baldrian und Melisse	60
Tabelle 10: Einzelungsgenauigkeit verschiedener Säscheiben, Sägerät 1, (Mittelwerte aus fünf Wiederholungen)	89
Tabelle 11: Geeignete Einstellungen zur Aussaat von Melisse und Baldrian mit Sägerät 1	90
Tabelle 12: Geeignete Einstellungen zur Aussaat von Melisse und Baldrian mit Sägerät 2	91
Tabelle 13: Kennwerte der Prüfung der Reproduzierbarkeit, Sägerät 1 und 2 mit Melisse und Baldrian, (Mittelwerte aus fünf Wiederholungen zu je 120 s)	92
Tabelle 14: Kennwerte der Prüfung des Einflusses der Fallhöhe, Sägerät 1 und 2 mit Melisse und Baldrian, (Mittelwerte aus fünf Wiederholungen zu je 120 s)	93

## **1. Einleitung, Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Der wichtigste Markt für Arzneipflanzen in Deutschland ist das Segment der Phytopharmazeutika. Der Bundesverband der Pharmazeutischen Industrie e.V. gab für das Jahr 2011 bekannt, dass in Deutschland Humanphytopharmazeutika im Wert von 1,4 Milliarden Euro abgesetzt wurden (BUNDESVERBAND DER PHARMAZEUTISCHEN INDUSTRIE e.V., 2012). Der Anbauumfang von Arzneipflanzen in Deutschland betrug im Jahr 2011 12.240 ha. Die Nachfrage an pflanzlichen Arzneimitteln wird hauptsächlich durch Importe gedeckt. So wurden im Jahr 2011 87 % der 15 wichtigsten Arzneipflanzen als Rohdrogen importiert. Die importierte Ware hat gegenüber der heimischen einen Preisvorteil. Dieser wird jedoch für qualitativ hochwertige und gut dokumentierte Ware geringer (PFORTE, 2013). Zu den 15 wichtigsten Arzneipflanzen zählen unter anderem Melisse und Baldrian.

Ein Hauptaspekt der Wertschöpfungskette des Anbaues von Melisse, Baldrian und anderen anspruchsvollen Arzneipflanzen und auch Feinstsämereien ist die problematische Situation der Bestandesetablierung. So haben die Samen von Melisse und Baldrian eine geringe Größe (<1 mm) und ein kleines Tausendkorngewicht (0,6 g). Exakte Aussaatbedingungen bestimmen Gelingen oder Misslingen einer Kultur. Mit der Aussaat wird der Grundstock der Pflanzenkultur gelegt, der den grundlegenden Einfluss auf die spätere Führung und Wertschöpfung hat. Gerade bei schwierig zu etablierenden Kulturen wie Melisse und Baldrian wird häufig die kostenintensive Pflanzung der Saat vorgezogen.

Im Rahmen des Demonstrationsprojektes Arzneipflanzen (KAMEL), gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMELV für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe, sollte die Bestandesetablierung der drei Beispielkulturen Kamille, Melisse und Baldrian untersucht und verbessert werden.

Eine Hauptaufgabe ist es, die kostenintensive, großflächige Pflanzung der Kulturen Melisse und Baldrian durch ein funktionierendes Säverfahren zu ersetzen. Durch ein Einzelkornsäverfahren soll eine maximal präzise Ablage der Feinstsämereien auf Endabstand erreicht werden, um bei geringstmöglichem Saatgutaufwand einen bestmöglichen Ertrag zu generieren.

In diesem Rahmen ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit den Aspekt des Einzelungsvorganges von Melisse, Baldrian und anderen Saatgütern in Sägeräten zu erfassen und zu bewerten. Dafür sollte ein Versuchsaufbau geschaffen werden, der es möglich macht, sehr kleine Samen, wie Melisse und Baldrian, genau in ihrer Position und zeitlichen Abfolge unter der Einzelungseinheit aufzunehmen und zu bestimmen. Des Weiteren sollte eine Versuchsanwendung geschaffen werden, um Messungen einzelner Maschinen-Parameter, wie die Fahrgeschwindigkeit und den pneumatischen Unterdruck, am Prüfstand nachzustellen und ihre Auswirkung auf das Einzelungsergebnis der verwendeten Sämaschinen darzustellen und zu bewerten.

Außerdem sollten durch die systematische Erfassung und Bewertung der Saatgutablage verschiedene Einflussgrößen auf die Güte des Säprozesses sichtbar gemacht werden. Hierdurch soll der Vorgang des Säens von Feinstsämereien optimiert werden.

Durch Herausstellung der größten Einflussparameter und der saatspezifisch besten Geräteeinstellung kann die Substitution der kostenintensiven großflächigen Pflanzung der Kulturen Melisse und Baldrian durch ein Säverfahren erreicht werden.

Zur Evaluierung der Sensorik und Bewertung der Einzelung von Feinstsämereien werden zwei unterschiedliche Einzelkornsäegeräte der führenden Hersteller von Aussaattechnik für Feinstsämereien eingesetzt. Zum Aufbau des Prüfstandes werden zwei in der Industrie verwendete handelsübliche Sensoren auf ihre Eignung untersucht.

Mit dem Prüfstand sollten die größten technischen Einflussquellen auf eine Saat von Feinstsämereien aufgenommen, geprüft und dargestellt werden, um bestmögliche Maschineneinstellungen für Feldversuche zu gewährleisten. Außerdem sollte es zukünftig mit dem Prüfstand und durch die geschaffene Technik möglich sein jegliche Einzelkornsäetechnik mit verschiedensten Saatgütern hinsichtlich ihrer Einzelungsqualität vermessen und beurteilen zu können.

## **2. Stand des Wissens zur Sätechnik Einzelkornsaat**

Dieses Kapitel zielt insbesondere darauf ab, den Vorgang der Einzelkornsaat zu beschreiben, die gegenwärtig verwendete Technik darzustellen und die derzeitigen Prüfmöglichkeiten von Einzelkornsaat zu erläutern. Ferner wird die Drillsaat beschrieben, da diese für das Verständnis der späteren Ergebnisse wichtig ist.

### **2.1 Zweck, Entwicklung und Technik der Einzelkornsaat**

Der Zweck der Einzelkornsaat besteht darin, einen homogenen Feldbestand zu erzielen, indem die Samen geeinzelt und auf einen vorbestimmten Endabstand gelegt werden. Der Sinn der Einzelung besteht darin, den Einzelpflanzen den Standraum zu geben, der ein optimales Wachstum ermöglicht und so den Ertrag zu maximieren. Die präzise Ablage der Saatgüter auf einen vordefinierten Endabstand hat zusätzlich weitere Vorteile. HEIER(1997) schreibt hierzu:

„Die Voraussetzung für einen sicheren und hohen Ertrag bei geringen Verlusten an Saatgut, Dünger, Pflanzenschutzmitteln ist ein gleichmäßiger, schneller, und hoher Feldaufgang. Die Entwicklung eines Pflanzenbestandes ist durch die Einflussfaktoren Standort, Saatgut und natürlich in der heutigen Landwirtschaft durch die Technik beeinflusst. Diese Einflussfaktoren lassen sich in der ersten Phase durch Auflaufgeschwindigkeit und Feldaufgang sowie durch Pflanzenverteilung und Standgenauigkeit beschreiben und bewerten. Das pflanzenbauliche Ziel ist es, speziell bei der Einzelkornsaat auf Endabstand, einen homogenen Bestand zu erzeugen. Nur ein solcher Bestand ermöglicht die höchstmögliche Ausbeute an wertgebenden Inhaltsstoffen. Diese Homogenität lässt sich als eine hohe Bestandesqualität durch hohe Auflaufgeschwindigkeit, gleichmäßige Feldaufgänge, hohe Standgenauigkeit und wenige Fehl- und Doppelstellen beschreiben.“

Auch andere Autoren beschreiben den positiven Effekt der Einzelkornsaat (GEISLER, 1984; GRIEPENTROG et al., 2009). Die beiden hauptsächlich für Einzelkornsaat bekannten Kulturen sind Zuckerrüben und Mais. Mais ist aufgrund seiner Größe und rundlichen Form für eine Einzelkornsaat geeignet und profitiert von diesem Verfahren. Zuckerrüben werden für dieses Verfahren eigens pilliert um sie geeignet zu machen (SCHRÖDL, 1979; ZSCHEISCHLER, 1990).

Für andere Kulturen konnte ebenfalls ein positiver Einfluss einer optimalen Standraumzumessung belegt werden, unter anderem für die Kultur Raps (GEISLER & STOY, 1987; GRIEPENTROG, 1996).

Im Laufe der Jahre wurden unterschiedlichste Arten von Einzelkornsäegeräten und Verfahren für die Einzelkornsaat entwickelt und beschrieben (BRINKMANN W., 1986; DAMEROW, 2008). Die Kriterien zur Bewertung der Einzelkornsaat haben sich über die Jahre nicht verändert und sind durch das Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) genau definiert, systematisiert und eingeordnet worden (KTBL, 2000).

Das Hauptziel der Technik ist, das gewünschte Saatgut zu einzeln und präzise auf den gewünschten Endabstand zu legen. BENINGER(2013) beschreibt, dass viele technisch ausgefeilte Verfahren zur Einzelung entwickelt wurden, während sich die Funktionsstruktur der Sägeräte, um den Einzelungsprozess herum, bis heute fast nicht verändert hat.

Die Funktionen der Einzelkornsaat lassen sich in einzelne Prozessphasen schematisch zerlegen, die gesondert zu beschreiben sind.

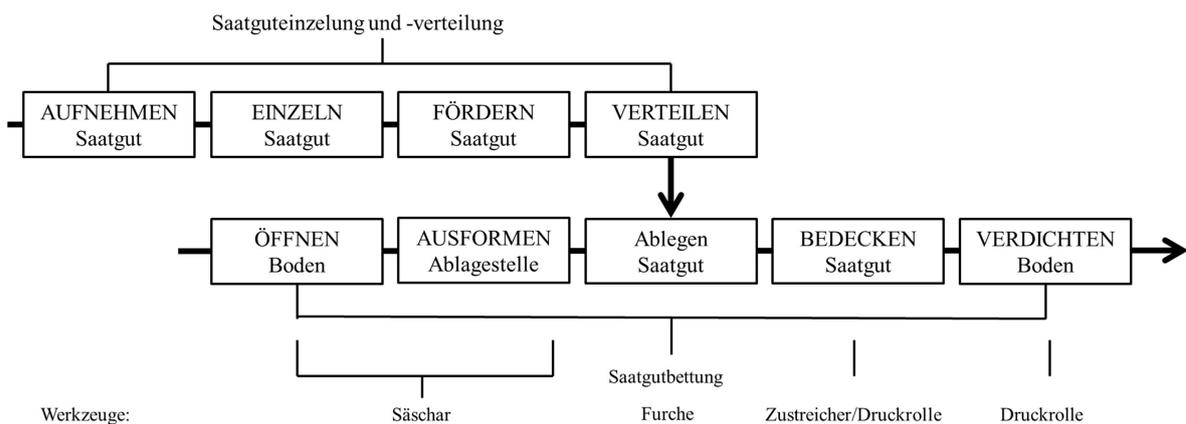


Abbildung 1: Prozessphasen der Einzelkornsaat (EICHHORN & BÖHRNSEN, 1999), verändert vom Verfasser

Die Prozessphasen lassen sich in zwei Gruppen aufteilen: Erstens in die Phasen der Saatguteinzelung und -verteilung und zweitens in die der Saatguteinbettung in den Boden.

Die Prozessphasen der ersten Gruppe strukturieren sich in das Aufnehmen der Samen im Saatgutbehälter und das Einzeln des Saatgutes durch verschiedene Werkzeuge. Im weiteren Verlauf wird das geeinzelt Saatgut zum Schar gefördert und in den Boden abgelegt.

Die zweite Gruppe teilt sich in die Prozessphasen des Öffnens des Bodens und die Formung eines Ablagebettes für das Saatgut auf. Dies kann durch unterschiedlichste Schararten geschehen. Das Saatgut verlässt die Maschine und wird anschließend durch unterschiedlichste Werkzeuge mit Erde bedeckt. Der Boden über dem Saatgut wird durch eine nachlaufende Rolle verdichtet. Diese einzelnen Prozessphasen werden durch zahlreiche verschiedene Werkzeuge bewerkstelligt, um verschiedensten Saatbedingungen, zum Beispiel Bodenunterschieden, gerecht zu werden (KTBL, 2000).

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Sichtbarmachung der Prozesse und Einflüsse der in Abbildung 1 gezeigten Saatguteinzelung und -verteilung.

## 2.2 Pneumatische und mechanische Einzelkornsätechnik

Die am häufigsten verwendeten Einzelungsverfahren für die Einzelkornsaat sind mechanische oder pneumatische Einzelung. Ein neues Säsystem einzelt großkörnige Saatgüter mittels einer rotierenden Lochtrommel mit Unterdruck im Inneren und ermöglicht Fahrgeschwindigkeiten von 15 km/h. Dieses und andere Verfahren werden in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, da sie für die Aussaat von Feinstsämereien keine Rolle spielen. Vielmehr steht hier die pneumatische Einzelung im Mittelpunkt, da diese für die Feinstsämereien derzeit am relevantesten ist.

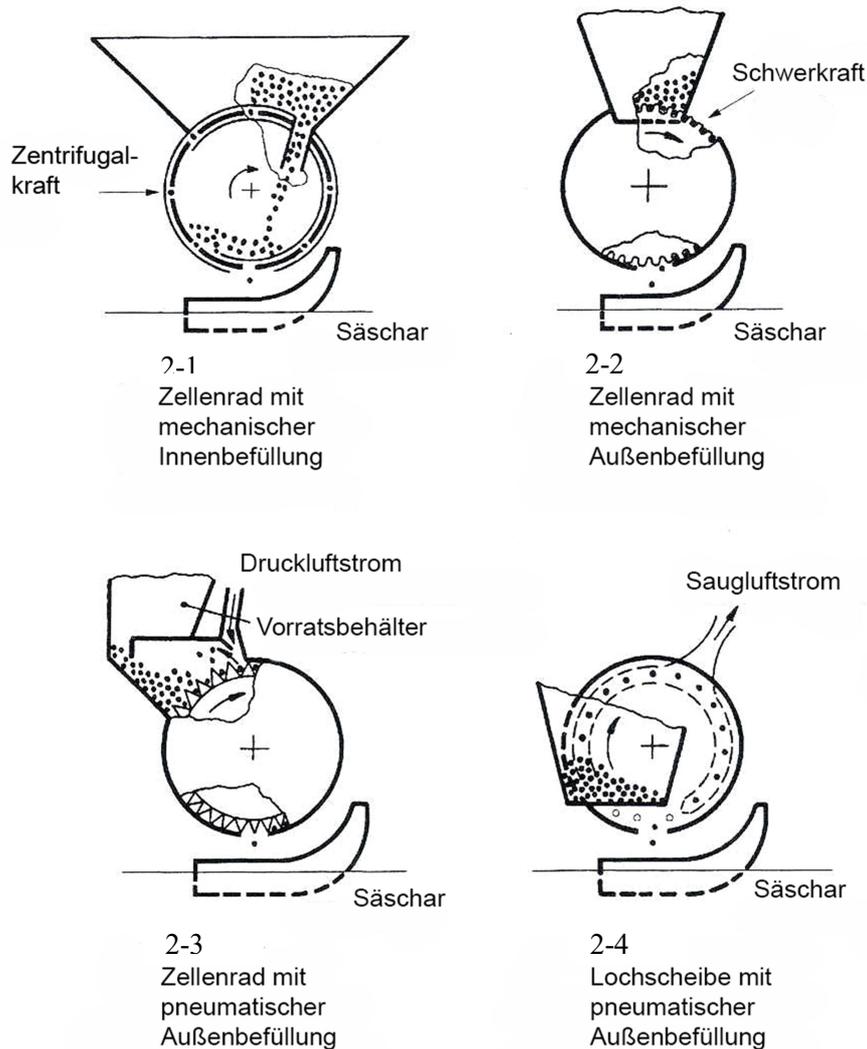


Abbildung 2: Funktionsprinzipien von Einzelkornsämaschinen (Institut für Landtechnik)

Die mechanische Einzelung arbeitet mit rotierenden Elementen, in der Regel mit Zellenrädern. Diese werden mittels Gravitation oder Zentrifugalkraft gefüllt und über Abstreifersysteme oder Schwerkraft entleert. Die heute am häufigsten verwendeten mechanischen Einzelkornsämethoden einzeln die Körner über vertikal rotierende Zellenräder mit Außen- oder Innenbefüllung (siehe Abb.2 -1 und Abb. 2 - 2).

Bei den pneumatischen Systemen wird zwischen Saugluft- und Drucklufteinzelung unterschieden. Bei der Einzelung mittels Saugluft wird eine rotierende Scheibe mit

Löchern einer definierten Größe und Abstand, an der ein Unterdruck anliegt, durch den Saatgutbehälter geführt. Die Samen schließen die Löcher der Säscheibe und werden mit einem mechanischen Abstreifer wieder von ihr gelöst (Siehe Abb.2 - 3).

Bei Druckluftsystemen werden durch den Saatgutbehälter laufende Zellenräder mittels Gravitation befüllt. Der Überdruck wird genutzt, um Doppelbelegungen zu minimieren, indem überschüssige Körner aus den Einzelzellen geblasen werden (Druckspülsysteme) (Siehe Abb.2 - 4).

Bei den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Sämaschinen handelt es sich um pneumatische Säegeräte mit einer Lochsäscheibe mit Außenbefüllung mittels Unterdruck (Siehe Abb.2 - 3). Diese wurden gewählt, weil sie die derzeitige Marktsituation von Aussaattechniken für Feinstsämereien widerspiegeln.

### **2.3 Technischer Stand der Einzelkornsaat**

Großvolumige Körner, wie zum Beispiel Zuckerrübenpillen oder Maissaatgut, werden mit Einzelkornsämaschinen mit Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 15 km/h abgelegt. Bei gleichzeitiger Überwachung der Zellbelegung finden Fehl- und Doppelstellen bei dieser Korngröße so gut wie nicht mehr statt. Automatische Füllstandsanzeigen der Saatguttanks und optische Sensorik zur Überwachung der Abstreifergenauigkeit unterstützen den Anwender während des Säens. Mit der neusten Technik sind so bereits Einzelkornsämaschinenbreiten von bis zu 24 Reihen möglich (EIKEL, 2011a).

Nicht nur für großvolumiges Saatgut, auch für Feinstsämereien im Bereich Gemüse und Arznei- und Gewürzpflanzen gibt es bereits ein großes Portfolio an verwendbaren Maschinen. Hier werden meist pneumatische Lochsäscheiben-Sämaschinen mit Außenbefüllung verwendet (DAMEROW, 2008).

Neue Entwicklungen zielen auf genauere Einzelpflanzen-Positionierung ab. Für jede Pflanze wird eine genaue GPS-Position bestimmt. Durch Koordinaten-gestützte-Ablage können ferner Pflanzenverbände angelegt werden, die das Unkrautbekämpfen mittels Hacke vereinfachen und sowohl Längs wie auch Quer zur Säreihe ermöglichen (GRIEPENTROG H. W., 2005; GRIEPENTROG, SKOU, & SORIANO, 2005; SCHMITTMANN, KAM HING, & LAMMERS, 2010; SCHMITTMANN et al., 2008). Außerdem soll es durch die genaue Kenntnis der Position der einzelnen Nutzpflanze Robotern in Zukunft möglich sein, autonom und gezielt Unkräuter zu bekämpfen.

Zusätzlich zu diesen Bemühungen befindet sich die Pflanzenerkennung mittels Kamerasystemen in Entwicklung. Die Erkennung von Unkräutern und Nutzpflanzen ermöglicht zum Beispiel einen Hackvorgang innerhalb der Nutzpflanzenreihe (DZINAJ et al., 1998; NIEUWENHUIZEN et al., 2010).

Diese Entwicklungen werden die Bestandsführung der Zukunft prägen, ob im Bereich der Sätechnik, der Düngung, des Pflanzenschutzes oder der Ernte, da alle diese Bereiche miteinander verknüpft sind.

Unabhängige Institutionen, die die neuen Technologien untersuchen und ihre Funktionalität bewerten, stellen sicher, dass Landwirte informierte Kaufentscheidungen treffen können (LAMMERS, 2013; SCHRÖDL, 1997; ZIEGLER & SCHMITTMANN, 2012; ZIEGLER & SCHMITTMANN, 2013; EIKEL, 2011b; SCHRÖDL, 1992). Es lässt sich zusammenfassen, dass die Technik der Einzelkornsaat als Säverfahren etabliert ist und über einen hohen Entwicklungsstand verfügt. Insbesondere für großvolumige Saatgüter sind die technischen Möglichkeiten heute weit fortgeschritten und allgemein verfügbar und funktionell.

#### **2.4 Unterschiede zur Drillsaat**

In der etablierten Sätechnik wird zwischen zwei Säverfahren unterschieden, der Einzelkornsaat und der Drillsaat. Um die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zu erfassen, wird die Drillsaat erläutert.

Während bei der Einzelkornsaat das Saatgut geeinzelt wird, um die Samen gezielt auf einen gewünschten Endabstand zu legen, wird bei der Drillsaat das Saatgut mit Hilfe von Särädern dosiert. Griepentrog und andere Autoren fassen die Saatgutverteilung der Drillsaat wie folgt zusammen: „Diese Verteilung sollte möglichst gleichmäßig sein. [...] Die Verteilungen der Kornabstände einer Drillmaschine folgen im Gegensatz zum Einzelkornsägerät keiner Normalverteilung“ (GRIEPENTROG, 1991; GRIEPENTROG, OLSEN, & WEINER, 2009; HEEGE, 1967), „sondern einer Exponentialverteilung“ (BLENK, 1951; GRIEPENTROG, 1999).

GRIEPENTROG(1991) schreibt: „Diese Verteilung besitzt jedoch keinen Streuungsparameter, der die Wahrscheinlichkeitsfunktion wie bei der Normalverteilung mit definiert. Die Güte der Längsverteilung kann deshalb nicht direkt bewertet werden. Die Poissonverteilung ist eine diskrete, unsymmetrische Verteilung für ganzzahlige Zählergebnisse, die durch einen Mittelwert  $\lambda$ , definiert ist. [...] Liegt eine Verteilung nach Poisson vor, so lassen sich die Kornabstände durch eine Exponentialverteilung beschreiben. Die durch Auszählen ermittelte Längsverteilung wird auf ihre Variabilität untersucht und mit der zugehörigen theoretischen Poissonverteilung verglichen. Zur Beschreibung der Güte dieser Verteilungen eignet sich die für Poissonverteilungen übliche Prüfgröße Dispersionsindex, hier Variationsfaktor genannt“.

GRIEPENTROG(1991) fasst die Poissonsverteilung folgendermaßen zusammen:“

$$P(x) = \frac{\lambda^x * e^{-\lambda}}{x!} \quad (1)$$

mit:

$x = \text{Erwartungswert}$

$\lambda = \text{Mittelwert}$

(GRIEPENTROG, 1991), geändert durch den Verfasser

Der Variationsfaktor  $V_f$ , in der allgemeinen Literatur heute Variationskoeffizient (VK) (siehe Formel 2), ist das Maß für die Genauigkeit der Drilltechnik. Je geringer der (VK) ist, desto genauer ist die Drilltechnik. Üblicherweise wird der Variationskoeffizient in Prozent angegeben und berechnet sich über die Varianz ( $s^2$ ) (siehe Formel 3) geteilt durch den Mittelwert der Positionsabstände aller ausgesäten Körner. Beträgt dieser 100 % oder darunter, kann man von einer gleichmäßigen Verteilung und guten Ablage der Drillsaat sprechen“ (GRIEPENTROG, 1996).

$$(VK) = \frac{\text{Varianz der Stichprob}}{\text{Theoretischer Poisson-Mit}} \quad (2)$$

(GRIEPENTROG, 1991), geändert durch den Verfasser

Die Varianz der Stichprobe  $s^2$  berechnet sich nach Griepentrog(1991) wie folgt.

$$s^2 = \frac{(\sum x_i^2 * f_i) - \frac{(\sum x_i * f_i)^2}{n}}{n-1} \quad (3)$$

mit:

$x_i = \text{Erwartungswert}$

$f_i = \text{Häufigkeit}$

$i = 1, \dots, n = \text{Messwertnummer}$

(GRIEPENTROG, 1991), geändert durch den Verfasser

GRIEPENTROG beschreibt die Bewertung der Verteilungen mit dem Variationskoeffizient wie folgt:,,

$V_f > 1,1$  : Negative Binominal Verteilung (überdispers)

$0,9 < V_f < 1,1$  : Poissonverteilung

$V_f < 0,9$  Binominalverteilung (unterdispers)

Ist  $V_f > 1,1$  dann liegt eine sogenannte Poissonverteilung vor, auf ein seltenes Ereignis folgen also häufig mehrere. Bei Drillmaschinen wären dies das übermäßige Auftreten von Körnerhäufungen und Fehlstellen. Eine solche Verteilung gilt als überdispers.

Bei  $V_f < 0,9$  tritt für Drillmaschinen hinsichtlich der Funktionsweise der positive Effekt ein, daß weniger Fehlstellen und Körnerhäufungen auftreten. Die Verteilung ist dann unterdispers. Der Variationsfaktor  $V_f$  ist somit ein Maß für die Güte einer Längsverteilung: Je kleiner  $V_f$  ist desto höher die Gleichmässigkeit der Kornabstände“ (GRIEPENTROG, 1991).

Die Häufigkeitsverteilung der Kornabstände von Drillmaschinen lässt sich dementsprechend als Hyperbel darstellen. Ein großer Anteil der relativen Kornabstände hat bei einer solchen Verteilung einen kleineren Abstand als der mittlere Ist-Abstand  $\bar{x}$ . Mehr als der 2-fache mittlere Ist-Abstand zwischen zwei Körnern wird selten durch Drillmaschinen abgelegt. Bei einer guten Verteilung sollten 90 % der ausgesäten Körner sich im unter 2-fachen Ablagebereich des mittleren Ist-Abstandes  $\bar{x}$  befinden. Dies wird in der Abbildung von HEIER deutlich (siehe Abb. 3) (HEIER; 1995).

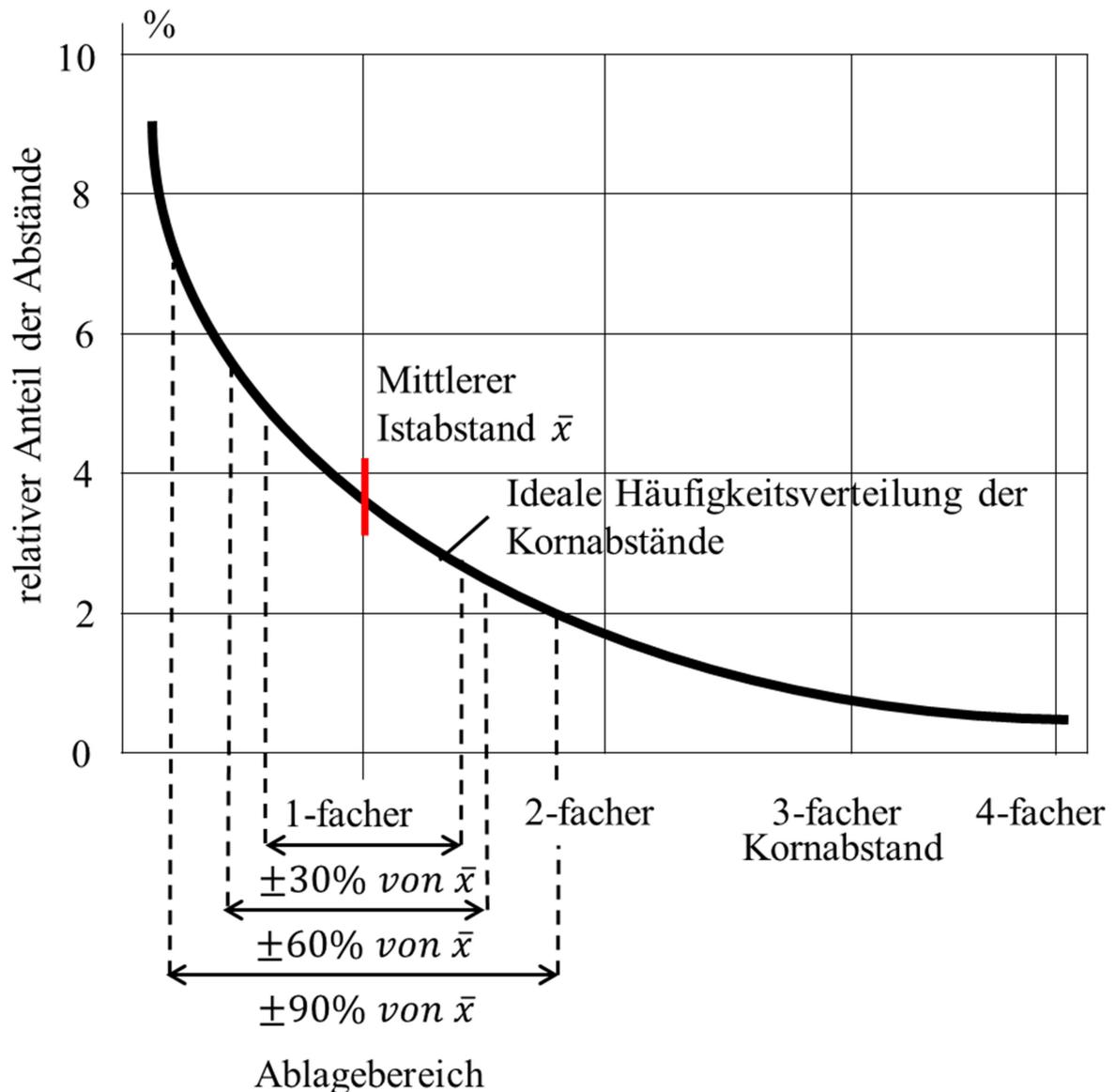


Abbildung 3: Längsverteilung bei Drillmaschinen, Häufigkeitsverteilung der Kornabstände und Ablagebereiche (HEIER, 1995)

Der Ertragsunterschied durch eine gleichmäßige Saat wird von Griepentrog wie folgt zusammengefasst: „Durch Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Längsverteilung ist gegenüber dem heutigen Stand der Technik mit einer Ertragsteigerung von 6% durch den Einsatz von Einzelkorntechnik und von 11% durch den Einsatz von Gleichstandsmaat zu rechnen“ (GRIEPENTROG, 1996). Während bei der Drillsaat ein (VK) von 100 % und weniger bereits eine gute Verteilung darstellt, sinkt dieser im Falle von Einzelkorntechnik (auf 58% bei Raps) und bei der Gleichstandsmaat (auf 0% bei Raps) deutlich, während die Erträge auf über 110 % steigen können (GRIEPENTROG, 1996). Es wird deutlich, dass für die Aussaat von Feinstsämereien eine Einzelkorntechnik mit einem möglichst niedrigen Variationskoeffizient anzustreben ist.

In Abbildung 3 wird dieses Schema mit einer idealen Poisson-Verteilung verdeutlicht. Dargestellt ist der gewünschte Kornabstand hier als Ist-Abstand  $\bar{x}$  bezeichnet, 90 % der

abgelegten Körner befinden sich hier im näheren Bereich um den gewünschten Kornabstand. 10 % der Körner haben einen wesentlich kleineren Abstand zueinander oder einen mehrfachen Kornabstand.

Dies erklärt auch, dass für die üblichen Drillkulturen, zum Beispiel Getreide, immer wieder Einzelkorn-Säversuche und Verfahren getestet werden um bessere Kornabstände in der Saat zu erzielen (MÜLLER, 1980).

## **2.5 Prüfmöglichkeiten Einzelkornsaat**

Im Folgenden sollen die im Laufe der Zeit entstandenen Verfahren für die Überprüfung der Ablagequalität von Einzelkornsämaschinen dargestellt werden.

### **2.5.1 Leimstreifen**

Anfänglich wurde die Qualität von Sämaschinen durch Ausmessen der Standpositionen der Pflanzen bewertet. Die erste Entwicklung, die die Aufnahme der Ablagequalität von Sägeräten im Labor, also unter Ausschluss von Außenbedingungen wie Boden und Klima, möglich machte, waren Leimstreifen, entwickelt von Fischer (FISCHER, 1911). Eine weitere Entwicklung dieser Überprüfungsmethode war, die aufgelaufenen Pflanzenfolgen auf einem Papierstreifen neben der Säreihe zu markieren oder diesen zu lochen und über einen Lochstreifencomputer einzuscannen. Bereits in den 1930er Jahren wurden an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Sägeräte mittels Leimstreifen in ihrer Arbeitsqualität bewertet (BACHNER, 2011). Auch an anderen Universitäten und Prüfstellen, wie z.B. der Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG), wurden die Körner aus Sämaschinen auf Papierstreifen mit Leim aufgebracht und die Verteilungen ausgewertet. Dieses Verfahren hat sich vielfach bewährt (ANONYM\_b, 1984; ANONYM\_c, 1989; MÜLLE, 1979).

### 2.5.2 Ölband

Eine Weiterentwicklung der Leimstreifen stellt das Ölband dar (siehe Abb. 4) (BUREMA et al., 1980). Das zu untersuchende Sägerät wird über einem umlaufenden Band befestigt. Am Anfang des Bandes befindet sich ein Ölzuteiler, der das Band benetzt, auf dem das abzulegende Saatgut aufgebracht wird, das auf dem Ölfilm halten bleibt. Die Umlaufgeschwindigkeit des Ölbandes und die Arbeitsgeschwindigkeit der Sämaschine müssen aufeinander abgestimmt sein.

Die Auswertung der Kornfolgen mit Hilfe eines Ölbandes wird auch heute noch angewandt und wurde über die Jahre durch zusätzliche Technik erweitert und vereinfacht. Beispielsweise durch die manuelle Eingabe der Ablage mittels Maus und EDV-Verarbeitung (ONAL, 2009) oder auch die Aufnahme der Ablage und des Kornfalls und automatischer Verarbeitung mittels Kamerasystemen (KARAYEL et al., 2006).

Allerdings ist zu erwähnen, dass die Aufnahme kleinerer Körner und der Umgang mit einem Ölband sich als schwierig erweist und nicht für die Aufnahme von Feinstsämereien geeignet ist. Hinzu kommt, dass einmal verwandtes Saatgut mit Öl kontaminiert und nicht mehr wiederverwendbar ist.

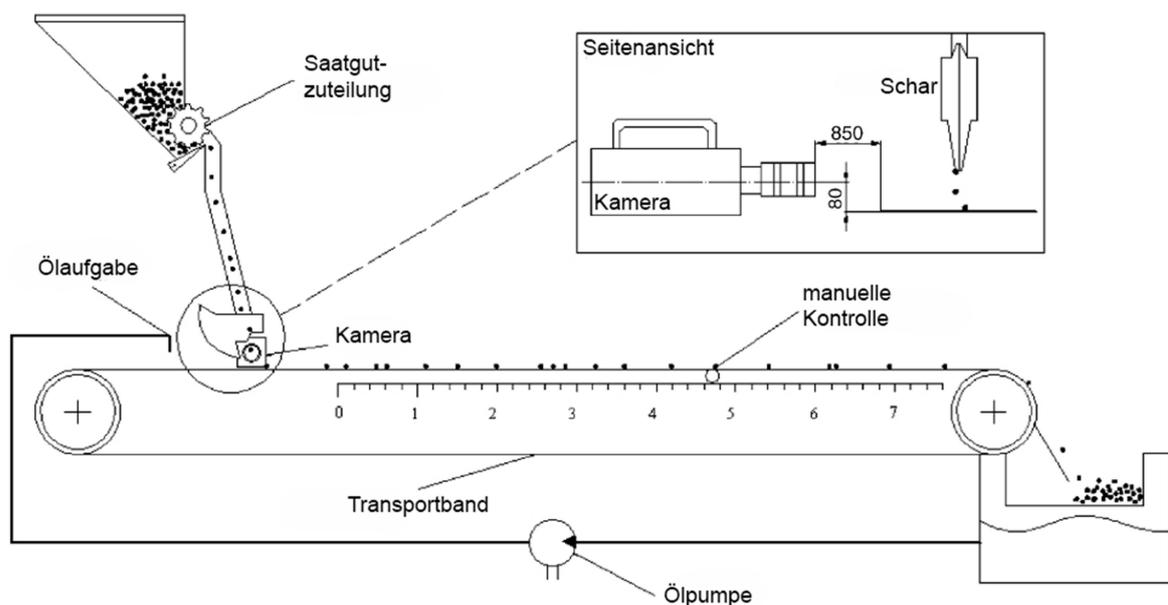


Abbildung 4: Samenabstandsmessung auf einem Ölband mit Highspeed-Kamerasystem nach KARAYEL et al., (2006), verändert

### 2.5.3 Prallmesssysteme

Zu den über die Jahre etablierten und bewehrten Verfahren wurden immer wieder neue Ansätze untersucht, um die Qualität von Sägeräten zu bewerten. Zu nennen sind hier die Verfahren der Prallmesssysteme. Diese konnten den Aufprall von abgeworfenem Saatgut, mit Hilfe von elektronischen oder akustischen Aufnahmegeräten, aufzeichnen (SCHUPP, 1946). Diese Verfahren konnten sich allerdings aufgrund mangelnder Praktikabilität nicht durchsetzen.

### 2.5.4 Optische Systeme

Mit der Weiterentwicklung der Elektronik konnten neue Systeme geschaffen werden, die die Aufnahme von Saatgut im Fall und auch eine Bewertung direkt an der zu prüfenden Maschinen ermöglichen. Die elektronische Aufnahme und auch die Weiterentwicklung hin zu schnellerer Datenverarbeitung führen zu immer besser werdender Genauigkeit der Systeme. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass verwendetes Saatgut nicht durch Kleber oder Öl verschmutzt und somit mehrfach verwendbar ist.

Die optischen Kontrollsysteme teilen sich in zwei Hauptgruppen auf: die Lichtschranken- und die Kamerasysteme.

Im Falle der Lichtschranken wurden weltweit unterschiedlichste Verfahren entwickelt. Zu nennen ist hier der Optosensor der Universität Hohenheim (MÜLLER et al., 1997). Es ist ein System mit auf vier Seiten gegenüberliegenden Foto- und Lumineszenzdioden, deren Erkennungsfehler auch bei hohen Kornfolgen von Drillmaschinen nur bei 2 % liegt (MÜLLER et al., 1997). Des Weiteren wurde an der Universität Lincoln in Nebraska ein ähnliches System mit an zwei Seiten liegenden Dioden geschaffen, das in Verbindung mit einem Ölband arbeitet und bei größeren Samen auch mit einem Fehler von 2 % angegeben wird (KOCHER, 1998; LAN, KOCHER & SMITH, 1999; PANNING, 2000). Ein ähnliches Modell zur Erkennung der Ablagegenauigkeit von Raps wurde 1994 von Griepentrog verwendet. Hier handelte es sich um eine Gabellichtschranke mit hoher Auflösung.

Weiterhin wurde an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn im Institut für Landtechnik ein Messsystem für Sägeräte mit einer Rahmen-Lichtschranke entwickelt. Das sogenannte Abstands-Aufzeichnungs-System (AAZ) kann sowohl für Einzelkorn als auch für Drillmaschinen verwendet werden. Zusätzlich verfügt es über einen Klappen-Mechanismus, der es ermöglicht, eine vorbestimmte Zeit der Kornablage einzustellen, so dass eine gewünschte Wegstrecke simuliert werden kann (HEIER, 1996; HEIER, 1997; HEIER, 2001). Das System wird durch ein hydraulisch angetriebenes Umlaufband ergänzt, das es möglich macht, bodengetriebene Sämaschinen anzutreiben, so dass außerhalb des Labors gemessen werden kann. Darüber hinaus wird die Messtechnik im Labor durch einen Feldmesswagen ergänzt, der die Standgenauigkeit der Pflanzen im Feld nach dem Auflaufen bestimmt. Überdies komplementierte das Institut für Landtechnik seine Versuchsauswahl mit diversen Messgeräten zur Bestimmung verschiedener Bodenparameter, spezielle Geräte zur Zuckerrübenvermessung sowie einem Regensimulator (KROMER, 1997).

Während die Erkennung und Bestimmung der Ablagequalität größerer Samen mit diesen Sensoren gut möglich ist, werden Kamerasysteme meist dazu verwendet, die Flugbahnen der abgeworfenen Samen zu bestimmen (BUFTON, 1978; BUFTON & RICHARDSON, 1975). Kamerasysteme eignen sich gut um Flugverläufe oder auch Samen auf umlaufenden Bändern aufzunehmen. Für die Aufnahme von Feinstsämereien in horizontalem sowie vertikalem Flug werden eine sehr hohe Rechen- Speicherkapazität und aufwändige Optik benötigt.

### **2.5.5 Prüfung von Drillmaschinen**

Die Gleichmäßigkeit der Samenablage von Drillmechanismen wird im Allgemeinen mit demselben Verfahren wie Einzelkornsämaschinen geprüft. Verwendet werden unter anderem Highspeedkamarasysteme, Leimstreifen, Ölbänder oder Lichtschranken (MÜLLER, 1994; KARAYEL et al., 2006).

Allerdings ist bei der Drillsaat, durch die zufällige Portionierung der Samen, die Gefahr sich überschneidender Körner größer. Diese Zählfehler können jedoch mathematisch reduziert werden. Feldhaus stellt hierzu ein Regressionsmodell vor, welches über die theoretische Poissonverteilung der Samenzuteilung der Drillsaat gelegt werden kann (FELDHAUS, 1996).

Nach Prüfung der vorliegenden Literatur stellen sich die Lichtschrankensysteme als geeignetes Verfahren zur Prüfung der Saatgutablagequalität von Sämaschinen heraus. Sie sind sowohl funktionell wie auch nicht-invasiv und kostengünstig. Des Weiteren können Lichtschranken mit einem geringen Rechen- und Betriebsaufwand arbeiten und geben konkrete Werte aus, die im Gegensatz zu Kamerabildern nicht aufwendig ausgewertet werden müssen.

## **2.6 Qualitätsbeurteilung der Einzelung**

Sägeräte erzeugen ein beschreibbares Bild der Saatgutablage. Dieses wird zur Qualitätsbeurteilung der verwendeten Technik von verschiedenen Institutionen aufgegriffen. Solche Prüfungen unterliegen allerdings Grenzen und es gibt weitere Einflüsse auf die Saatgutablage im Feld.

### **2.6.1 Normen zur Prüfung und Bewertung von Einzelkornsägeräten**

Die Bewertung von Sämaschinen wird von verschiedenen Institutionen bearbeitet. Ein Standard wurde von der Internationalen Standard Organisation (ISO) entwickelt. Dieser teilt sich in die Nummer 7256/1 für Einzelkornsämaschinen und in die Nummer 7256/2 für die Prüfung von Drillmaschinen (Anonym\_a, 1984; Anonym\_b, 1984) auf. In Anlehnung an diese Norm arbeitete die Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Landtechnik an der Umsetzung eines Prüfverfahrens. So wurde ein eigener, an den technischen Fortschritten optimierter (MÜLLER, 1999), Prüfrahmen für Sägeräte entwickelt (DLG e.V., 1991). Ebenfalls wird durch die American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) das Thema der Sägeräteprüfung behandelt (KACHMAN & SMITH, 1995). Die Ansätze der ASABE ähneln denen der deutschen Prüfrahmen. Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf das Prüfverfahren der DLG, da dies den besten Praxisbezug hat.

Während sich das Ablagebild einer Drillmaschine als Exponentialfunktion darstellt, zeigt sich die Ablage einer Einzelkornsämaschine als mehrgipfelige Normalverteilung (siehe Abb. 6) (GRIEPENTROG, 1992). Diese Verteilung setzt sich zusammen aus den einzelnen Ablagegruppen (GRIEPENTROG, 1992).

Die Ablagegruppen stellen die Standgenauigkeit auf dem Feld exemplarisch dar (siehe Abb. 5) und bestehen aus den Ist-Stellen, Doppelstellen und Fehlstellen.

An einer Einzelkornsämaschine wird der Soll-Abstand eingestellt, dies ist der gewünschte Abstand zwischen zwei Körnern im Feld. Sind die Körner in den Boden gelegt, so werden die real messbaren Positionen zwischen den Körnern als Ist-Stellen bezeichnet.

Befinden sich zwei Körner näher aneinander als der 0,5-fache Soll-Abstandswert, wird von einer Doppelstelle gesprochen. Diese entstehen durch eine Mehrfachbelegung der Zellen innerhalb der Sägeräte.

Wenn zwei Körner weiter auseinander gelegt werden als der 1,5-fache Soll-Abstandswert, ist dies eine Fehlstelle. Fehlstellen entstehen durch nicht Belegung von Zellen.

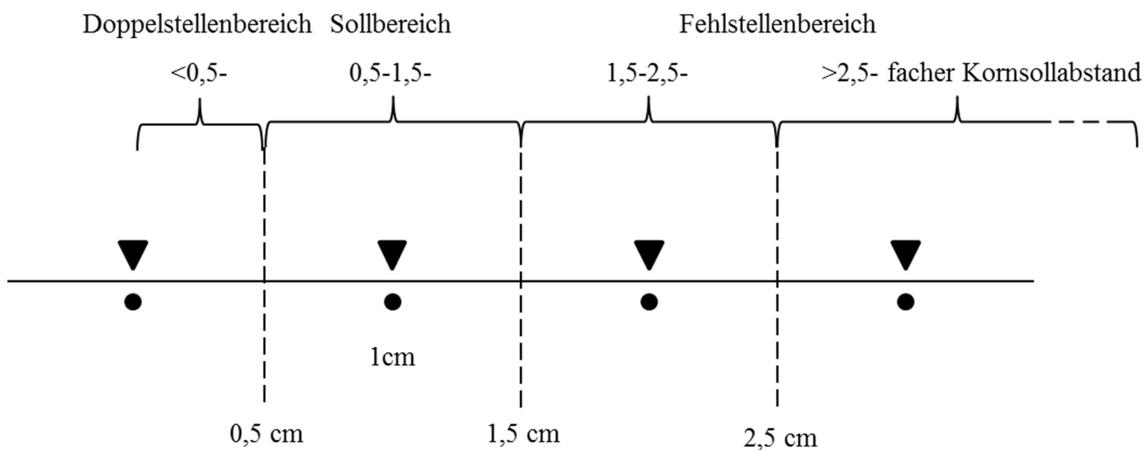


Abbildung 5: Kennzeichnung der Ablagegruppen am Beispiel eines Soll-Abstandes von 1 cm (EICHHORN, H. et al., 1999), verändert

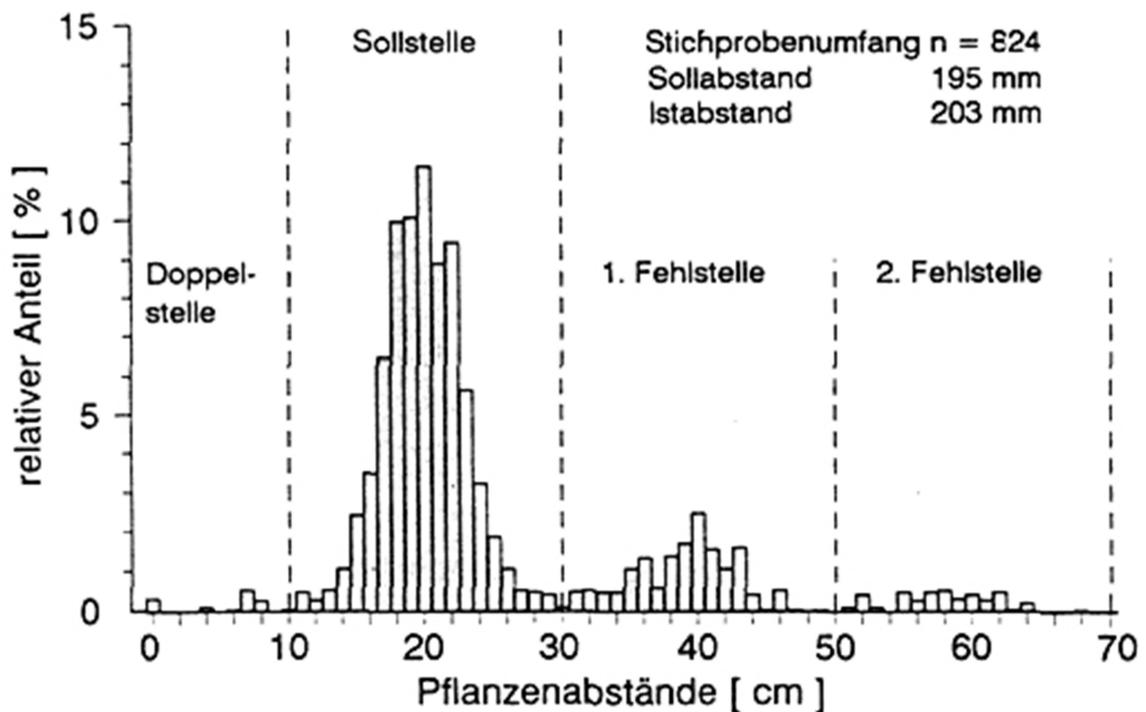


Abbildung 6: Pflanzenabstände Einzelkornsäat bei Rüben (Bildquelle: DLG-Prüfstelle für Landmaschinen, Groß-Umstadt) (GRIEPENTROG, 1992)

### 2.6.2 Grenzen der Laborüberprüfung und nachgelagerte Prüfmethode für Sätechnik

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Einzelung und der Ablageabstand von Einzelkornsämaschinen im Labor unter kontrollierten, reproduzierbaren Bedingungen überprüft. Es sollen so optimale Einstellungen für die jeweiligen Geräte oder neue Anbauteile gefunden werden. Dieser Versuchsaufbau mit kontrollierten Bedingungen wird zum Beispiel durch GÖTZEN(2006) für die Überprüfung neuer Abstreifer, die auf ihre Eignung untersucht werden, dargestellt. Weitere Faktoren, wie unterschiedliche Bodenbedingungen, Laufruhe der Aggregate, sowie der Einfluss von Witterung machen die nachgelagerte Feldversuchstechnik unabdingbar (DLG e.V., 1991; EIKEL, 2011). Die labortechnische Untersuchung eines Sägerätes muss für eine vollständige Bewertung durch Feldtests ergänzt werden und kann immer nur ein Einzelschritt in einer Prozesskette der Entwicklung sein.

### 2.6.3 Weitere Einflüsse auf die Ablagequalität

#### 1. Fahrgeschwindigkeit und Drehzahl

Während der Ablage haben weitere Faktoren einen Einfluss auf das Gelingen der richtigen Standortverteilung der Körner und der Einhaltung der Soll-Abstände. Es wurde in zahlreichen Versuchen nachgewiesen, dass die Fahrgeschwindigkeit der Maschinen und die Drehzahl der umlaufenden Säscheiben die größte Auswirkung auf die Genauigkeit der Ablage haben (BOZDOAN 2008; IVANČAN et al., 2004; KAM H. et al., 2010; KARAYEL, 2004; SINGH et al., 2005; SMITH J. et al., 2003; YAZGI et al., 2007; ZHAN et al., 2010). Es gilt zu überprüfen, ob dies für die Ablage von Feinstsämereien ebenfalls relevant ist.

#### 2. Flugbahn und Fallhöhe

Weitere maschinenbedingte Einflüsse auf die Ablagequalität sind unter anderem der Abgabepunkt der Säscheibe, der hieraus resultierende Einfluss auf die Flugbahn, die zusätzlich geschwindigkeitsabhängig ist, und die Fallhöhe des Samenkornes (BUFTON et al., 1974; KAM H. et al., 2010; KOCHER et al., 2011; PARISH & BRACY, 2003; WILSON, 1980).

Bei einigen Ansätzen wird versucht den Faktor Fallhöhe durch eine gezielte Führung der Saat bis zum Auftreffen auf den Boden zu minimieren (KOCHER M.F. et al., 2011; PARISH & BRACY, 2003; WILSON, 1980).

Der Einfluss des freien Falls der Samen nach Verlassen der Sämaschine auf die Ablagequalität ist für Feinstsämereien noch nicht untersucht und kann durch die vorliegende Arbeit dargestellt werden.

#### 3. Verollung und Springen

Sind die Samen durch die Maschine geeinzelt und haben das Einzelungsorgan verlassen, so treffen sie auf den Boden, wo sich ihre Geschwindigkeit abbauen muss, damit sie zum Liegen kommen. Dieser Vorgang äußert sich durch ein Verrollen und Springen der Körner und hat ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Präzision der Ablage. Es wird versucht die Horizontalkomponente der Abwurfgeschwindigkeit aufzuheben, indem sich die Geschwindigkeit der Vorfahrt der Sämaschine und die der sich drehenden Säscheibe gleich sein sollen. Dies wird Nullablage genannt (BUFTON et al., 1974; SINGH et al., 2005; WILSON, 1980). Das Verrollen und Springen kann nur durch spezielle Versuchsaufbauten oder direkt im Feldversuch durch Messen des Pflanzenabstandes abgeschätzt werden.

#### 4. Bedecken und Andrücken des Saatgutes

Die letzte Teilfunktion des Säens, bei dem die Maschine Einfluss auf die Ablage des Saatgutes nimmt, ist die Bedeckung und das Andrücken. Die Samenkörner sollen ohne Verlagerung gleichmäßig bedeckt und angedrückt werden (BUFTON et al., 1974; ÖZMERZI et al., 2002; SINGH et al., 2005; WILSON, 1980). Die Bedeckung und der Einfluss des Andrückens kann nur durch Feldversuche unter realen Bedingungen sichtbar gemacht werden und ist nicht Teil der vorliegenden Arbeit.

### **3. Material und Methoden**

#### **3.1 Einzelkornsäegeräte**

Zur Überprüfung und Bewertung der Sensorik und Messung der Ablagequalität sowie zur Herausstellung der auf einen Sävorgang relevanten Einflussparameter wurden zwei Säegeräte führender Hersteller verwendet.

##### **3.1.1 Säegerät 1**

Das verwendete Säegerät 1 wird von der Firma Kverneland unter der Typ Bezeichnung „MiniAir Nova“ (KVERNELAND GROUP DEUTSCHLAND GMBH, 2009) vertrieben. Dieses Säegerät ist auf die Saat von Feinsämereien, insbesondere Gemüsekulturen, ausgelegt. Die Maschine wird in 2 m bis 6 m Arbeitsbreite mit 10 bis 32 Säereihen am Dreipunktkraftheber des Schleppers angehängt und durch die Zapfwelle betrieben. Die einzelnen Säaggregate sind an einem Rahmen aufgehängt. Die Scharführung findet durch ein Parallelogramm zwischen vorlaufender und nachlaufender Andrückrolle statt. Zusätzlich kann die Maschine mit Zwischenandruckrollen und verschiedensten Zustreichern ausgerüstet werden. Die Einzelung des verwendeten Saatgutes findet pneumatisch über eine sich in Fahrtrichtung drehende Säscheibe statt. Der Kornabstand lässt sich über ein Kettenradgetriebe einstellen. Er berechnet sich über die Größe der verschiedenen gewählten Zahnräder, Antriebsrad, die Übersetzung der festen Zahnräder in der Maschine und den Säaggregaten sowie über die Anzahl der Sälöcher der verwendeten Lochsäscheiben. Das Säegerät 1 wurde aufgrund seiner Eignung zur Aussaat der verwendeten Versuchssaatgüter ausgewählt. Das Säegerät 1 wird in seinem Außenaufbau mit den wichtigsten Bauteilen in Abbildung 7 beschrieben. Abbildung 8 zeigt im Folgenden den inneren Aufbau der wichtigsten Bauteile von Säegerät 1 sowie die Säscheiben Drehrichtung.

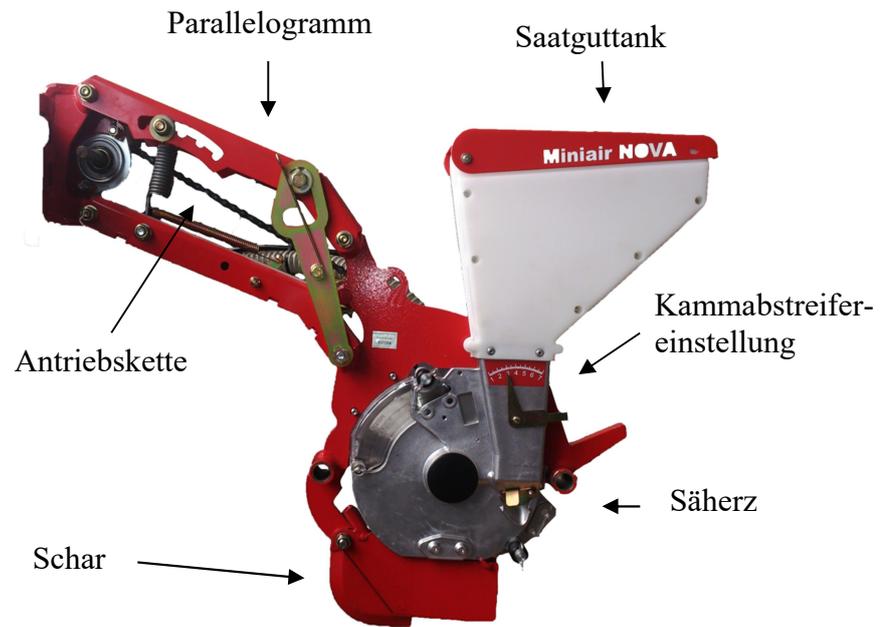


Abbildung 7: Sägerät 1, Säherz mit Aufhängung und Saattguttank,

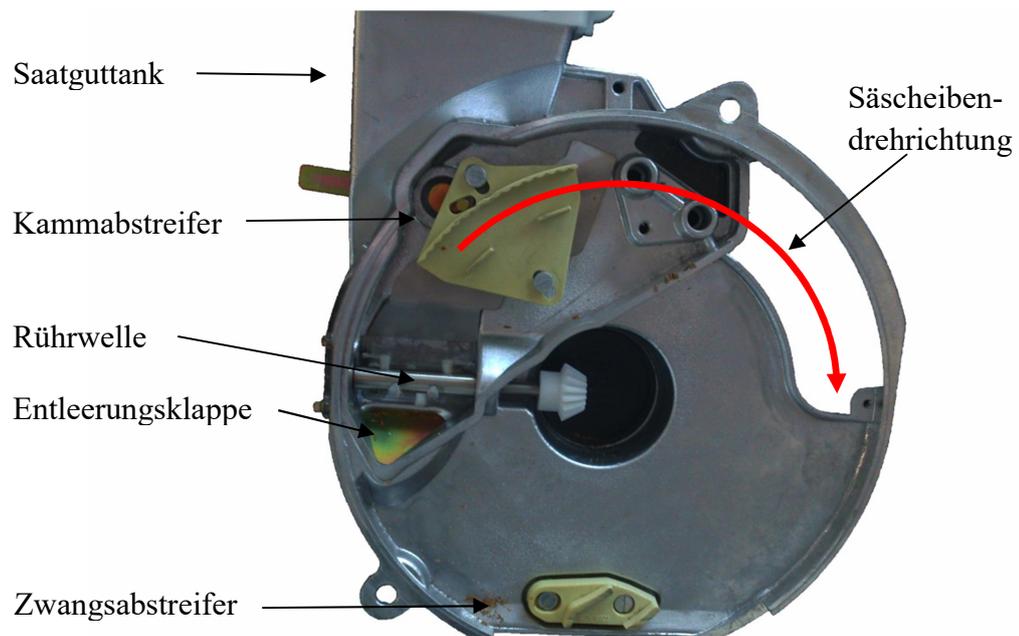


Abbildung 8: Sägerät 1, Säherz-Innenaufbau

### 3.1.2 Sägerät 2

Als Alternative zu Sägerät 1 wurde ein Säaggregat der Firma Agricola Italiana geprüft. Verwendet wurde ein Gemüsesägerät der Baureihe „SN“. Der Säherztyp wird in verschiedensten Sämaschinen der Firma verbaut und ist in mehreren Ausführungen von 6 bis 24 Reihen mit unterschiedlichsten zusätzlichen Werkzeugen erhältlich. Die Scharsteuerung erfolgt ebenso wie bei Sägerät 1 über einer Parallelführung zwischen vorlaufender und nachlaufender Andruckrolle. Es besteht die Möglichkeit eine Zwischenandruckrolle und verschiedenste Zustreicher zu kombinieren. Der Säabstand bei dieser Maschine berechnet sich wie bei Sägerät 1 auch aus der Kombination von verwendeten Zahnrädern zum Antrieb der Säscheiben sowie der Größe des Antriebsrades, den unveränderlichen Zahnrädern in der Maschine und der Anzahl der Sälöcher der einzelnden Lochsäscheibe. Der Außenaufbau mit den wichtigsten Bauteilen von Sägerät 2 ist in Abbildung 9 dargestellt. Der innere Aufbau mit den auf den Sävorgang einwirkenden Bauteilen und der Säscheibendrehrichung ist in Abbildung 10 verbildlicht.

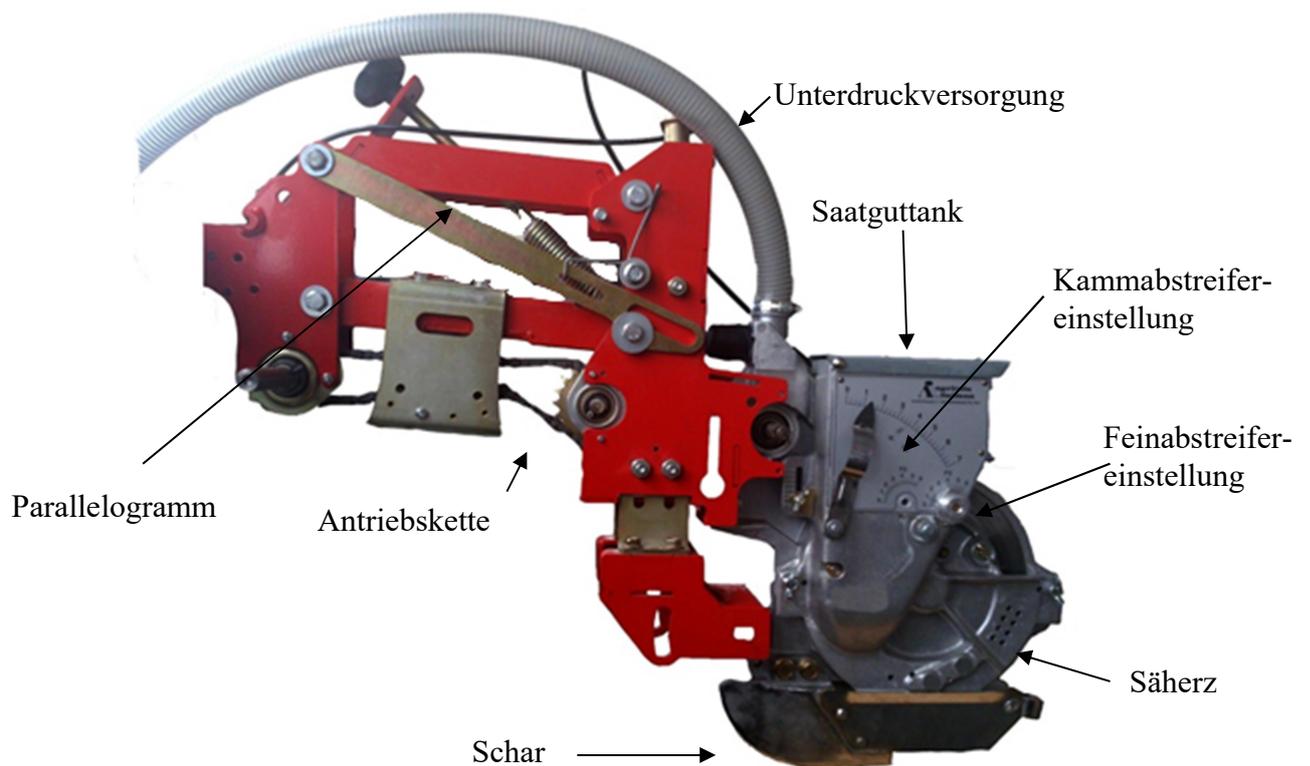


Abbildung 9 : Sägerät 2, Säherz mit Aufhängung

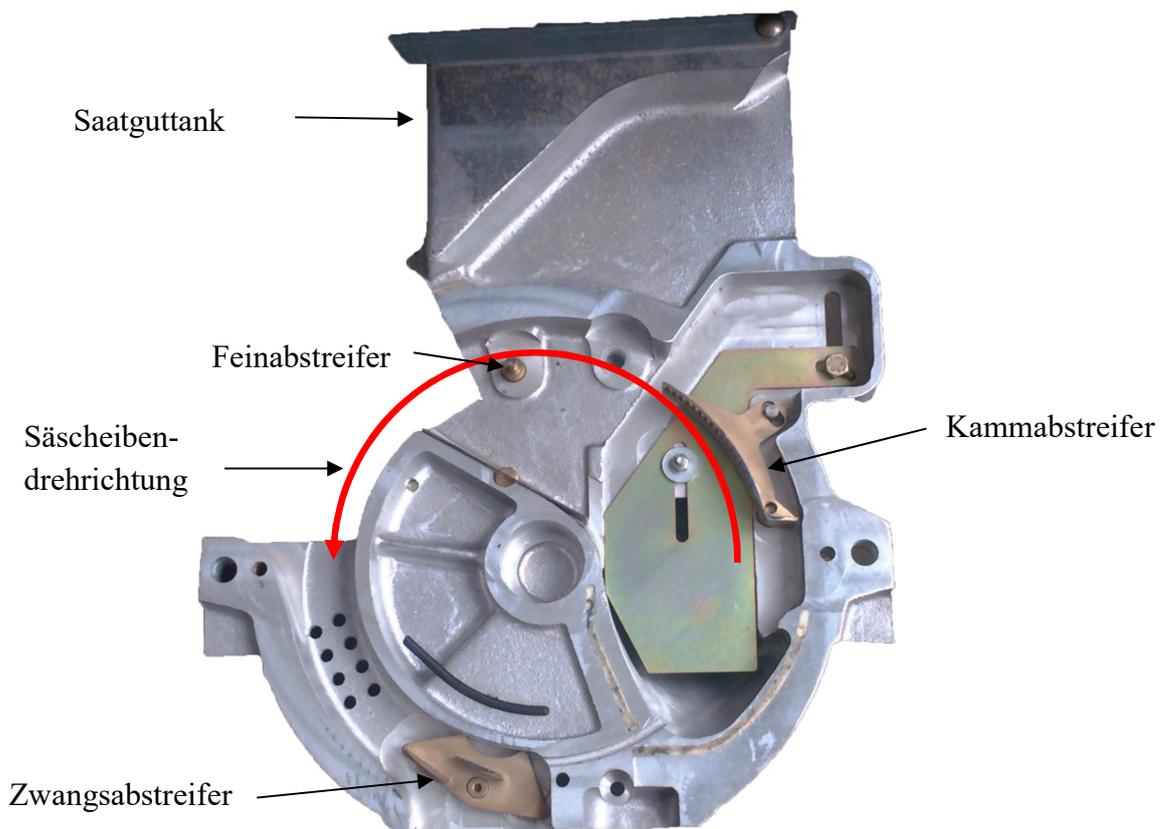


Abbildung 10: Sägerät 2; Säherz-Innenaufbau

### 3.1.3 Unterschiede zwischen den Sägeräten 1 und 2

Folgende prägnante Unterschiede zwischen den beiden verwendeten Sägeräten mit einer definitiven Auswirkung auf das Säergebnis sind festzustellen:

1) Die Einzelung

In Sägerät 1 werden die Samen durch eine Rührwelle unterhalb des Saatgutbehälters in Bewegung gehalten, damit es hier nicht zu einer Brückenbildung kommt. Sägerät 2 verfügt über keine Rührwelle. Die sich drehende Säscheibe läuft an dem Saatgut vorbei. Durch den eingestellten Unterdruck legen sich die Samenkörner an die Löcher der Scheibe. Die Scheiben sind bei beiden Sägeräten so einzubauen, dass die Senkungen zur Unterdruckseite zeigen. Bei Sägerät 1 ist es möglich, die Senkungen zur Kornseite auszurichten. Die sich drehende Säscheibe führt bei beiden Sägeräten das Saatgut an einem variablen Kammabstreifer vorbei um zu viel aufgenommene Körner von den Löchern der Säscheibe abzustreifen, diese fallen wieder in den Saatguttank zurück. Schließlich verlässt die Säscheibe mit einem Einzelkorn den Saatgutbehälter und der Vorgang der Einzelung ist abgeschlossen.

## 2) Drehrichtung der Säscheibe

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Sägeräten ist die sich entgegen der Fahrtrichtung drehende Säscheibe bei Sägerät 2. Auf Abbildung 8 wird die Drehrichtung von Sägerät 1 dargestellt. Dieses dreht die Säscheiben in Fahrtrichtung während, wie in Abbildung 10 dargestellt, Sägerät 2 die Säscheibe entgegengesetzt zur Fahrtrichtung dreht.

## 3) Abstreifer

Im Säprozess sind zwei Arten von Abstreifern zu unterscheiden. Erstens die variablen Abstreifer, die während des Einzelungsvorganges an die Säscheiben und das Saatgut angepasst werden und eine Mehrfachbelegung der Sälöcher verhindern sollen. Zweitens die festen Zwangsabstreifer, die das überzählige Saatgut von den Säscheiben der Geräte lösen. Sägerät 1 verfügt über einen einstellbaren Kammabstreifer aus Hartplastik. Säaggregat 2 verfügt hinter dem Kammabstreifer über einen Feinabstreifer. Alle Abstreifer sind aus Messing gefertigt. Die unteren festen Zwangsabstreifer der beiden Sägeräte weisen ebenfalls Unterschiede auf. Der Abstreifer von Sägerät 1 ist aus Hartplastik und hat eine harte Kante, an die das Saatgut durch die Scheibe angeführt wird. Der Abstreifer von Sägerät 2 ist aus Messing und hat eine konkave Form. Beide Abstreifertypen werden mittels Federdruck an die Lochsäscheibe gedrückt.

Es ist zu erwähnen, dass wenn der Abstreifereinstellwert bei Sägerät 2 erhöht wird, der Kammabstreifer an das Saatgut geführt wird während es bei Sägerät 1 umgekehrt ist. Hier wird mit steigendem Wert der Abstreifer vom Saatgut weg geführt.

## 4) Größe des Samenauswurfes

Während bei Sägerät 1 die Samen unterhalb der Säscheibe auf 9 cm in das Schar abgestripen werden, hat das Sägerät 2 einen 5,5 cm langen Auslass über dem Schar. Die Fallhöhe bis auf die Särille beträgt bei beiden Sägeräten 8 cm und der Scharauslass ist bei beiden 1,5 cm breit.

## 5) Einstellung der Überdrücke zur Reinigung der Säscheiben

Der Überdruck der Reinigungsdüse, welche die Löcher der Säscheibe frei von Verunreinigungen halten soll, wird bei Sägerät 1 durch das zur Erzeugung des Unterdrucks verwendete Gebläse bereitgestellt. Er ist variabel und wird für verschiedene Saatgüter zwischen 2 kPa bis 5 kPa vorgeschrieben.

Säaggregat 2 verfügt neben dem Gebläse für den Unterdruck über einen separaten Kompressor, der ebenfalls über die Zapfwelle des Schleppers angetrieben wird. Dieser liefert einen Überdruck von 200 kPa.

#### 6) Getriebeübersetzung zum Antrieb der Säscheiben

Die ausgebauten Säherzen der Maschinen 1 und 2 haben unterschiedliche Zahnradkombinationen, die während des Tischbetriebs berücksichtigt werden müssen. Säaggregat 1 hat eine Zahnradübersetzung von 0,75 zwischen Getriebemotor und Lochsäscheibe. Säaggregat 2 hat eine Übersetzung von 0,8 und kehrt gleichzeitig die Drehrichtung der Säscheibe um. Die Drehzahlen wurden mit einer Messung durch einen optischen Drehzahlmesser überprüft.

#### 3.1.4 Versuchsaufbau Sägerät 1

Zur Sensorentwicklung und Vermessung wurde das Säherz einer Maschine ausgebaut und auf einem Versuchstisch befestigt. Der Betrieb erfolgte stationär mit Hilfe eines Getriebemotors, Überdruckkompressors und Sauggebläses. Das Sägerät 1 wurde nicht nur hinsichtlich seiner Ablagequalität vermessen, sondern diente anfänglich ebenfalls dazu, unterschiedlichste Saatgüter zu einzeln, um den geeigneten Sensor für einen Prüfstandsaufbau zu ermitteln.

Nach Auswahl der Sensorik zum Aufbau des Prüfstandes wurde Sägerät 1 mit den Saatgütern Melisse und Baldrian in einem definierten Versuchsablauf überprüft und die aufgezeigten Parameter bewertet (siehe Kapitel 3.6). Es sollten hierdurch die Parameter mit dem größten Einfluss auf die Ablagequalität von Feinstsämereien ermittelt und die Unterschiede zu Sägerät 2 sowie der Einfluss der sägeräte-spezifischen Unterschiede auf die Sägenauigkeit geprüft und bewertet werden.

Da es bei Sägerät 1 möglich ist, die Senkungen der Säscheibe auch zur Kornseite auszurichten, wurde dieser Parameter auch auf seinen Einfluss hinsichtlich der Ablagequalität geprüft.

#### 3.1.5 Versuchsaufbau Sägerät 2

Zur Erfassung und Bewertung des Sägerätes 2 wurde, wie bei Sägerät 1, das Säherz ausgebaut, auf den Versuchstisch aufgebaut und gleichfalls wie das Säaggregat 1 mit Melisse- und Baldriansaatgut vermessen. Hierzu diente ebenso der vordefinierte Versuchsablauf (siehe Kapitel 3.6).

Durch Aufnahme aller relevanten Versuchsparameter sollten die bestmöglichen Varianten und größten Einflussparameter auf die Genauigkeit des Sävorganges dargestellt werden.

Hierzu wurden, unter Berücksichtigung der Unterschiede zwischen den Sägeräten 1 und 2, vor allem steigende Geschwindigkeiten und unterschiedliche Unterdrücke sowie weitere wichtige Parameter untersucht.

### 3.2 Saatgut

Die in Tabelle 1 aufgelisteten Saatgüter (siehe Abb. 11) wurden mittels Siebturm in feste Größen fraktioniert und verwendet. Die Tausendkorngewichte der einzelnen Fraktionen wurden nach den Richtlinien der International Seed Testing Association (ISTA) bestimmt. Hierzu wurden acht Mal 100 Samen ausgewogen (International Seed Testing Association, 2009).

Tabelle 1: Eigenschaften der verwendeten Saatgüter

Saatgut	Lat. Name	Sorte	Fraktion [mm]	TKG [g]	Farbe	Besonderheiten
Zuckerrüben	Beta vulgaris subsp. vulgaris	Pauletta	3,75-5,25	30,25	orange	pilliert
Weißer Senf	Sinapis alba L.	Asta	2,0-2,25	5,41	gelb	helles Saatgut
Raps	Brassica napu	Licosmos	2,0-2,25	3,68	schwarz	dunkles Saatgut
Phacelia Mantelsaat	Phacelia tanacetifolia	Stala	1,2-1,4	3,33	hellbraun	Hüllmasse 50%
Rotklee	Trifolium pratense	Daiana	1,0-1,2	1,97	braun, weiß, schwarz	dreifarbiges Saatgut
Baldrian	Valeriana officinalis	Anton	<1mm	0,58	braun	länglich
Melisse	Melissa officinalis	Citronella	<1mm	0,62	schwarz	rundlich

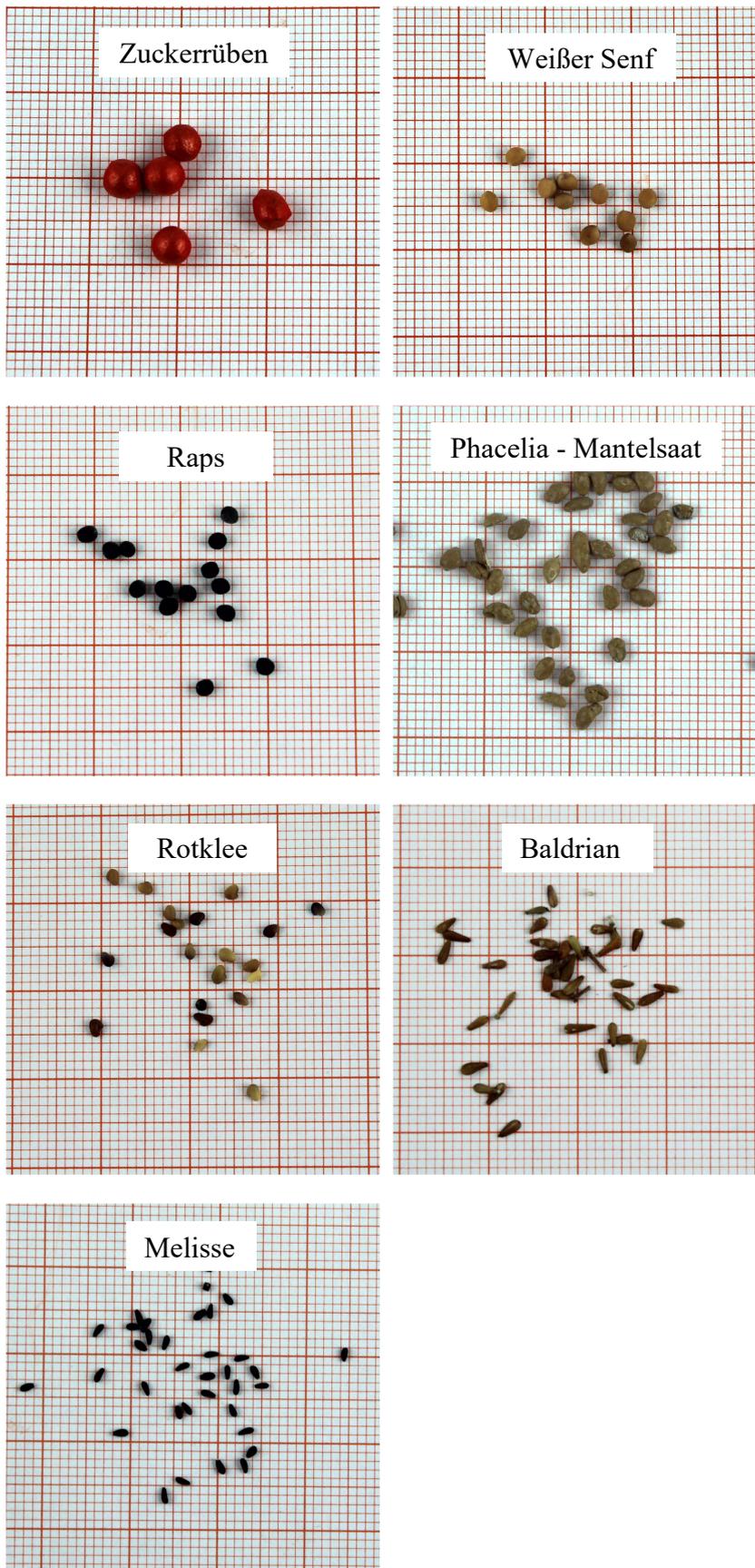


Abbildung 11: Verwendete Saatgüter, Fotografien auf Millimeterpapier

### 3.3 Auswahl, Funktionsweise und Aufbau des Einzelkornsägeräteprüfstandes

In diesem Kapitel werden die verwendete Sensorik sowie das Funktionsprinzip und die Unterschiede der Sensoren beschrieben. Ferner der Versuchsaufbau und Ablauf der Sensorprüfung sowie der Aufbau des Prüfstandes.

#### 3.3.1 Sensor 1

Zum Aufbau des Prüfstandes wurden zwei optische Mikrometer auf ihre Eignung geprüft. Sensor 1 ist ein optisches Mikrometer ODC2600-40 der Firma Mikro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG (ANONYM\_d).

#### 3.3.2 Sensor 2

Bei Sensor 2 handelt es sich um den optischen Mikrometer LS-7070M der Firma Keyence Corporation (ANONYM\_e, 2008, ANONYM\_f, 2007).

#### 3.3.3 Funktionsprinzip der Optischen Mikrometer

Das Funktionsprinzip ist bei beiden getesteten Sensoren einheitlich und wird in Abbildung 12 dargestellt. Eine LED-Lichtquelle sendet einen Lichtstrahl aus, der über eine Linse geweitet wird. Dieser trifft als paralleler Lichtvorhang auf die Empfängereinheit, wo das Licht durch eine Linse auf eine CCD-Zeile geworfen wird. Diese CCD-Zeile wird ausgewertet. Tritt ein Objekt in den Lichtvorhang, so wird ein Teil des Lichtes abgeschattet und auf der CCD-Zeile als Lücke erkannt. Die Abschattung kann photometrisch bestimmt werden wodurch Größe und Position der abschattenden Objekte erkannt werden können. Da dieser Prozess nur eindimensional ist, muss für eine Messung der Ablagegenauigkeit quer oder längs zur Fahrtrichtung der Sensor entsprechend positioniert werden. Eine Überkreuzschaltung von zwei Sensoreinheiten zur zweidimensionalen Vermessung ist mit dem Sensormodell 2 möglich, konnte aber aus Kostengründen nicht durchgeführt werden.

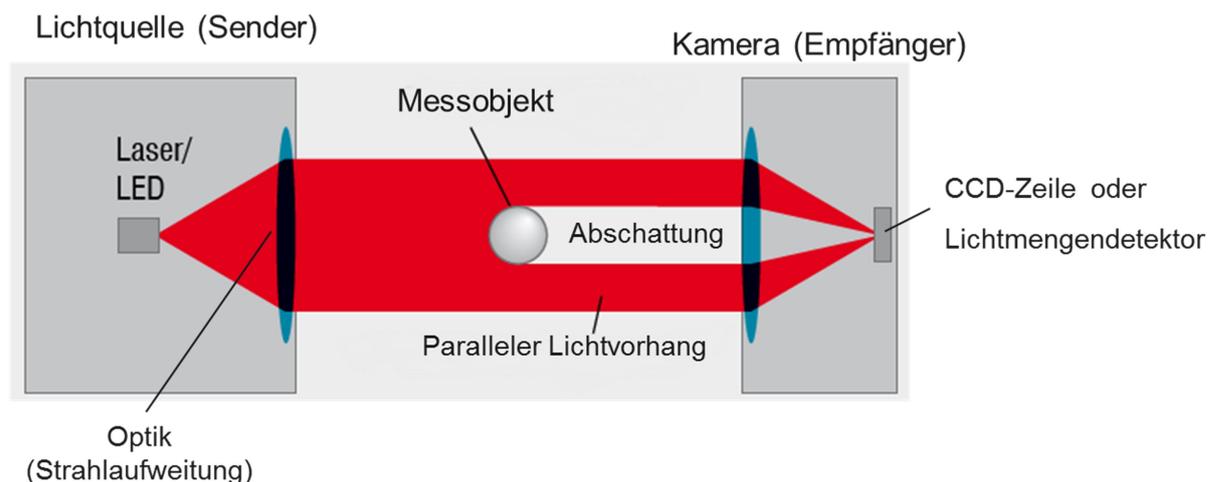


Abbildung 12: Funktionsprinzip optisches Mikrometer (ANONYM\_d)

### 3.3.4 Unterschiede zwischen den Sensoren 1 und 2

Die zwei getesteten Sensoren zeichnen sich durch einige Unterschiede aus (siehe Tab. 2).

Einer der wichtigsten zu nennende Unterschiede zwischen den Sensoren ist, dass Sensor 2 für jedes gemessene Korn sowohl den Durchmesser als auch die Position bestimmen kann. Sensor 1 kann immer nur eine der beiden Eigenschaften als Wert ausgeben.

Tabelle 2: Unterschiede der Sensoren 1 und 2, Versuchsaufbau vorliegende Arbeit

	Sensor 1	Sensor 2
<b>Messfläche</b>	300x40 mm	250x68 mm
<b>Frequenz / Zeit</b>	2,3 kHz (0,435 ms)	2,4 kHz (0,4 ms)
<b>Messprogramme</b>	Durchmesser / Position (1 Messmodus wählbar)	Durchmesser / Position (beide Messmodi gleichzeitig)
<b>Ausgabe</b>	mm Objektausdehnung	-10 bis +10 V Signal
<b>Rechnerschnittstelle</b>	RS-232	Messbox - USB (5 kHz)
<b>Zusatzkamera</b>	nein	ja

### 3.3.5 Körnerzählgerät

Zur Überprüfung der Anzahl der Körner, die durch die neue Messtechnik erfasst wurden, diente das Körnerzählgerät „Contador“ der Firma Pfeuffer, welches geeignet war Samen bis zu der Größe von Baldrian zu erkennen.

Das Gerät wurde auf Zählgenauigkeit überprüft, indem 1000 Samen der verwendeten Saatgüter zu je 10 Wiederholungen gezählt wurden.

### 3.3.6 Versuchsaufbau Sensorprüfung

Zur Überprüfung der Aufnahmegenaugigkeit der zu testenden Sensoren und zur Bewertung der verwendeten Sägeräte wurde ein Prüfstand aufgebaut. Das Säaggregat wurde auf einem Versuchstisch durch einen stufenlos einstellbaren, elektrischen Getriebemotor der Firma Stöber angetrieben. Die Drehzahl wurde durch einen an den Motor angeschlossenen, unabhängigen Drehzahlmesser bestimmt. Im Verlauf der Versuche wurde der Motor 1, der Drehzahlen im Bereich von 9 bis 90 U/min bereitstellen kann, durch einen langsameren Getriebemotor im Bereich von 3 bis 8 U/min ersetzt. Die Erweiterung in langsamere Drehzahlbereiche war erforderlich, weil bereits bei geringen Geschwindigkeiten keine ausreichende Ablagequalität gegeben war. Die zum Betrieb der Sägeräte benötigten Unter- und Überdrücke wurden von einem Sauggebläse sowie durch einen Druckluftkompressor mit Niederdruckregler mit angeflanschem Druckablass erzeugt. Die während des Betriebes der Sägeräte benötigten Verfahrensdrücke wurden mit Hilfe eines Staurohres zur

Strömungsmessung nach Prandtl und eines Differenzdruckmessgerätes bestimmt. Die Stromversorgung der Sensoren wurde anfänglich durch einen einstellbaren Transformator bereitgestellt, der im Prüfstand durch ein festes Netzteil ersetzt wurde.

### **3.3.7 Versuchsablauf Sensorprüfung**

Um die Aufnahmequalität der Messgeräte zu ermitteln, wurden diese an einem Rahmen befestigt und die Testsaatgüter mit kleiner werdenden Durchmessern (5,25 mm bis <1 mm) sowie ihren unterschiedlichen Beschaffenheiten mit steigenden Geschwindigkeiten von 9 bis 90 U/min aus Sägerät 1 in die ausgewählte Sensorik abgegeben. Die Samenerkennung wurde im Längs- sowie im Queraufbau des Sensors unter dem Schar getestet.

Die aufgenommenen Daten wurden anschließend ausgewertet und auf Plausibilität überprüft. Um die Zählgenauigkeit zu bewerten, wurden die durch das Säaggregat abgeworfenen Körner aufgefangen und mit Hilfe des Körnerzählgerätes rückgezählt und verglichen.

### **3.3.8 Überprüfung der Durchmesserengenauigkeitserkennung der Sensoren**

Zur Überprüfung der Durchmesserbestimmung durch die Sensoren wurden 5000 Zuckerrübenpillen mittels Siebturm in Fraktionen von 3,5 mm bis 5 mm in 0,25 mm Schritten aufgeteilt. Die Zuckerrübenpillen wurden zu je 1000 Stück durch eine Schüttelrinne in den Lichtvorhang der Sensoren geführt, da diese sich nicht durch das verwendete Sägerät einzeln ließen. Dies geschah in fünf Versuchen zu je fünf Wiederholungen. Die aufgenommen Durchmesser wurden mit den Fraktionen des Siebturmes verglichen.

### 3.3.9 Aufbau des Prüfstandes

Nach umfangreicher Prüfung der beiden Sensoren stellte sich Sensor 2 als geeignetes Modell zur Schaffung eines Prüfstandes (siehe Abb. 13) zur Messung von Feinstsämereien heraus (siehe Kapitel 4.1).

Ausschlaggebend für die Wahl von Sensor 2 waren die Aufnahmequalität und die Möglichkeit, Größe und Position der erfassten Feinsämereien gleichzeitig zu bestimmen, während Sensor 1 nur einen einzigen Wert (Position oder Größe) aufnehmen kann. Zusätzlich liefert die integrierte Kamera von Sensor 2 die Möglichkeit den Sensor akkurat unter der zu messenden Schareinheit zu positionieren. Außerdem konnte die Korndurchmesserbestimmung mit Sensor 1 nicht zufriedenstellend durchgeführt werden.

Sensor 2 wurde zu einem Prüfstand aufgebaut, der aus zwei Hauptbauteilen bestand. Dies war zum einen eine Steuerbox mit Kontrolleinheit (siehe Abb. 14), die mit einem Rechner zur Datenaufnahme und Auswertung verbunden wurde und zum anderen der Sensoreinheit mit Kornauffangbehälter und Saatgutablass (siehe Abb. 13).

Ein Plastiknetz mit einer Maschenweite von ca. 1 mm stellte sich als geeignetes Kornauffangmittel innerhalb des Behälters heraus. Mittels einer im Sensor eingebauten Kamera ist der Prüfstand gut an das zu messende Säaggregat anzupassen. Durch eine Grob- und Feineinstellung kann die Höhe variabel angepasst werden.

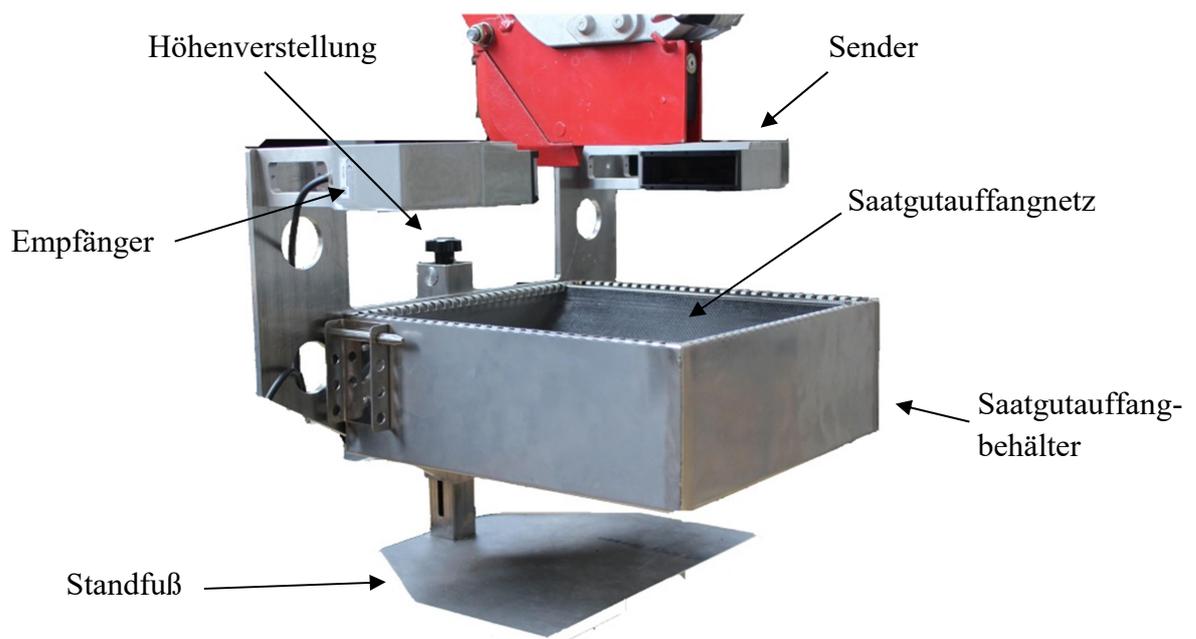


Abbildung 13: Säugerprüfstand



Abbildung 14: Steuerungsbox zur Einstellung der Sensorik und Aufnahme von Messdaten

### **3.4 Entwicklung der Auswertung**

Das Kapitel Entwicklung der Auswertung beschreibt die Aufnahme und Berechnung der für eine Sägerätebewertung relevanten Daten.

#### **3.4.1 Datenaufzeichnung**

Die von den Sensoren aufgezeichneten Daten wurden durch einen angeschlossenen Computer aufgezeichnet. Durch Sensor 1 werden Werte in Millimeter ausgegeben. Sensor 2 gibt zwei Spannungssignale mit einer Frequenz von 2,4 kHz aus. An Sensor 2 wurde eine Messbox, Modell 6008 der Firma National Instruments, angeschlossen, die die Analogwerte der Sensorausgabe an den Rechner weitergibt. Diese wurden mit jeweils einer Aufnahmezeit von 2,5 kHz an der Messbox erfasst und durch diese an den Rechner weitergeleitet. Diese Rohwerte wurden anschließend an die Aufzeichnung durch ein Tabellen-Kalkulations-Programm (Microsoft Excel, Version 2010) weiterverarbeitet. Sensor 1 konnte direkt über die RS232-Schnittstelle an den verarbeitenden Computer angeschlossen werden.

Der Prüfstand verfügte über eine Zwei-Komponenten-Lösung. Die Aufzeichnung und Aufbereitung der analogen Rohdaten des Sensors 2 geschah über die Messbox mit Hilfe eines Corn Count Programmes (Labview, National Instruments). Die weitere Verarbeitung dieser Daten zu einem aussagekräftigen Dokument, mit den für eine Bewertung wichtigen Daten, geschah durch ein Tabellen-Kalkulations-Programm (Microsoft Excel, Version 2010).

Das Programm Corn Count (siehe Abb. 15) verfügt über einen Aufnahmeteil und einen Auswerteteil. In dem Aufnahmeteil des Programms können Dateinamen, Speicherort, Aufnahmezeit und Aufnahmezeit eingegeben werden. Außerdem können Messparameter, wie zum Beispiel das verwendete Saatgut und die Drehgeschwindigkeit eingegeben werden. Zusätzlich verfügt Corn Count über einen automatischen Wiederholungszähler, der jeder neuen Messung eine laufende Nummer hinzufügt.

In dem Auswerteteil können die aufgenommenen Rohspannungssignale betrachtet und visuell ausgewertet werden.

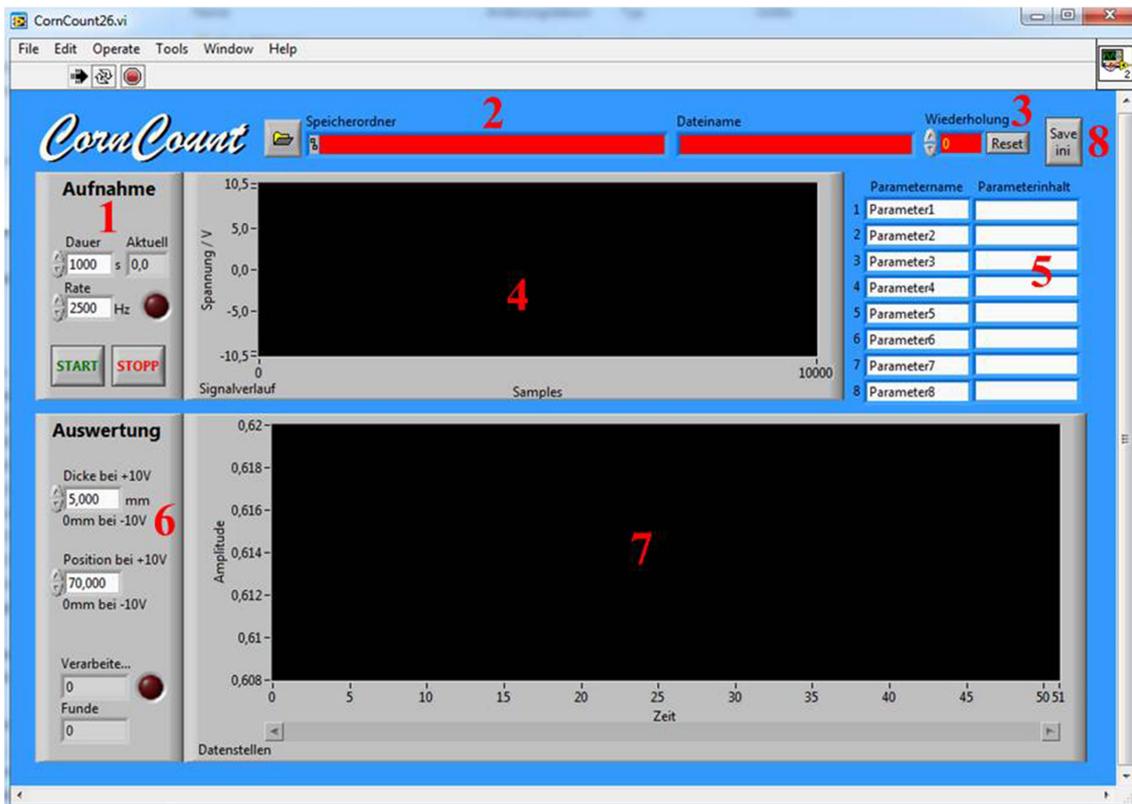


Abbildung 15: Bildschirmaufbau des Labview Aufnahme-Programmes „Corn Count“ mit:

1. Einstellung der Aufnahmedauer und –frequenz
2. Speicherort und Dateiname
3. Automatischer Wiederholungszähler
4. Livedarstellung der aufgenommenen Spannungen
5. Eingabe von Prüfparametern
6. Verrechnungsvariablen für die Spannungen
7. Auswerteteil: Ausgabe der Spannungswerte der gemessenen Einzelkörner (Endkontrolle der Aufnahme)
8. Parameterspeicherung

### 3.4.2 Bezeichnung der aufgenommenen Parameter

Wird im Folgenden von „Abständen“ gesprochen, so wird damit Zeitabstand zwischen zwei aufgenommenen Körnern bezeichnet. Wird von „Positionen“ gesprochen, so handelt es sich um die Position unter dem Säschar, an der ein Korn erkannt wurde.

### 3.4.3 Spannungsskalierung Sensor 2

Sensor 2 gibt, wenn sich während einer Messung kein Objekt innerhalb des Lichtvorhanges befindet, ein Spannungssignal von +10,5 V aus. Wird der Lichtvorhang durch ein Objekt verschattet, so wird von dem Sensor, je nach Größe und Position des Objektes, eine Spannung zwischen -10 und +10 V ausgegeben. Aus diesem Signal werden dann mit Hilfe von Formel 4 die Position und die Größe des Objektes in Millimeter errechnet. Im Normalbetrieb sind die vorhandenen 20 V auf eine Breite von 68 mm skaliert.

Für eine genauere Messung kann ein Bereich  $z$  (siehe Formel 4) angegeben werden, für den diese Spannungsweite von 20 V gilt (siehe Formel 4). Zum Beispiel kann eine Durchmesser-berechnung von +10 V = 5 mm und -10 V = 0 mm angegeben werden. Für diesen Fall wird die Messung genauer, da der Messbereich über eine höhere Auflösung verfügt. Objekte, die größer sind als 5 mm, werden in diesem Fall nicht vermessen.

Diese Skalierung und Berechnung von Formel 4 gilt ebenso für die Bestimmung der Kornposition.

Durch die Messbox werden Spannungssignale bis auf die vierte Nachkommastelle aufgezeichnet und an den auswertenden Rechner weitergegeben. Eine Skalierung macht es möglich, insbesondere bei Feinstsämereien, die Körner genauer zu vermessen.

$$D = \left(\frac{U}{20} + 0,5\right) * z \quad (4)$$

mit:

$D$  = Abschattungsbreite eines Objektes im Lichtvorhang

$U$  = Ausgabespannung Sensor 2

$z$  = eingegebene Größe für die Spannung von +10 V (-10 V = 0 mm, Maximum 68mm)

### 3.4.4 Spannungskurve aufgenommenen Samen von Sensor 2

Während der Messungen mit Sensor 2 stellte sich heraus, dass durch den Lichtvorhang fallende Samenkörner eine Spannungskurve bilden. Werden die für eine Aufnahme vorhandenen 20 Volt Spannung (-10 bis +10V) auf 5 mm skaliert, so ergibt sich folgendes Bild für die Aufnahme einer Zuckerrübenpille (siehe Abb. 16):

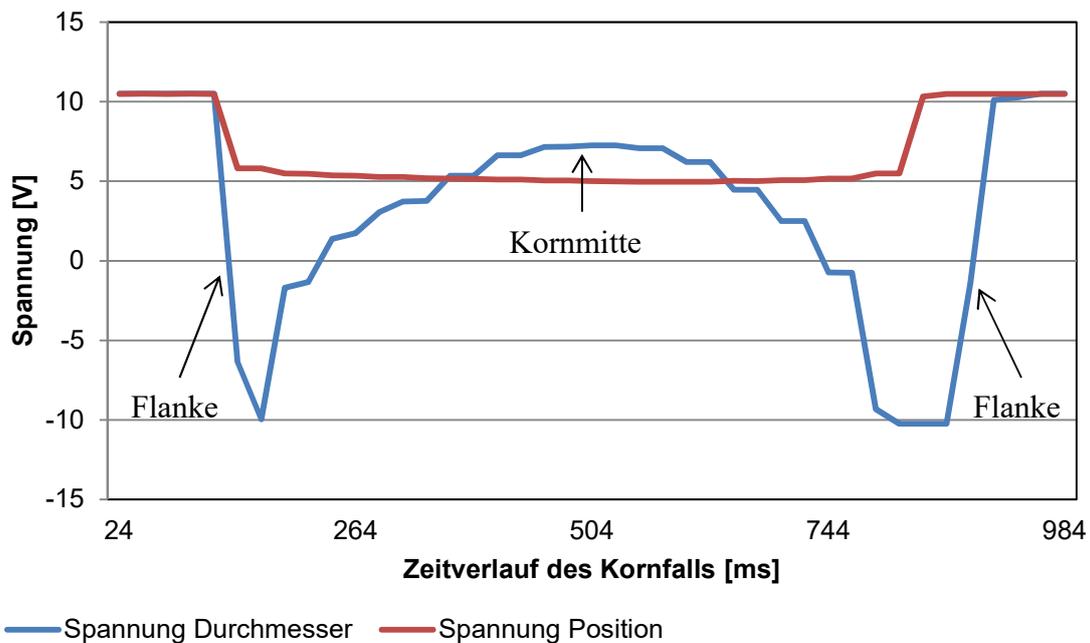


Abbildung 16: Aufzeichnung der Spannung eines Kornfalls einer Zuckerrübenpille durch den Lichtvorhang von Sensor 2, Darstellung der Kornmitte und Flanken

Wenn ein rundliches Korn in den Lichtvorhang von Sensor 2 eintritt, so wird zu erst die Unterkante gemessen. Die Verschattung durch das Korn wird im Laufe des Kornfalls größer, bis es mit dem Maximaldurchmesser (Kornmitte, siehe Abb. 16) verschattet und anschließend wieder kleiner wird. Die Seiten dieser Kurve werden im weiteren Verlauf als ‚Flanken‘ (siehe Abb. 16) bezeichnet. Es ist notwendig den richtigen Spannungswert innerhalb dieser Kurve für den Durchmesser eines Kornes und die dazugehörige Position zu bestimmen. Wird der Lichtvorhang des Sensors nicht verschattet, so gibt dieser 10,5 V aus.

Fallen sehr kleine Körner durch den Lichtvorhang werden kleine Spannungswerte ausgegeben. Dementsprechend stark sind die Flanken, die benötigt werden, damit die Spannung auf den auszugebenden Wert sinken kann. Während des Sinkens dieser Flanken werden bereits Werte aufgezeichnet, die es auszuschneiden gilt.

Während eine Zuckerrübenpille bis zu 15 Mal vermessen wird, beträgt die Aufnahme eines wesentlich kleineren Melisse Kornes maximal 4 Messpunkte. Folgendes Schema wurde verwendet, wenn die Messung eines Kornes weniger als 4 Messwerte beträgt:

Die Gruppen gültiger, aufeinanderfolgender Messwerte (ein Korn) werden je nach ihrer Breite (Anzahl Samples, Messwerte / Korn) differenziert:

1 Sample:

Das Wertepaar Durchmesser / Position wird komplett übernommen.

2 Samples:

Durchmesser: Der niedrigere Wert wird übernommen. Der höhere Wert könnte durch die fallende oder steigende Flanke zustande gekommen sein.

Position: Der niedrigste Wert, also die vorderste Position, wird übernommen.

3 oder mehr Samples:

Durchmesser: Die beiden äußersten Wertepaare für den Durchmesser werden verworfen (Flankenproblematik). Von den restlichen Werten wird der größte Durchmesser übernommen.

Position: Der niedrigste Wert, also die vorderste Position wird übernommen.

Da die Anzahl der Samen als Vergleich durch ein Körnerzählgerät bestimmt wurden, wurde dieses hinsichtlich seiner Genauigkeit durch mehrfaches Zählen einer vorgegebenen Menge ausgewertet. Aufgrund der Ungenauigkeit der Zählergebnisse bei Melisse wurde die Tausendkornmasse von Melisse berechnet und mit der abgeworfenen Masse der Samen verglichen.

### **3.4.5 Datenstruktur der aufgenommenen Messwerte**

Eine durch das Corn-Count-Programm aufgenommene Datei enthält die aufgezeichneten Körner sowie die eingetragenen Parameterwerte (siehe Tab. 3), wie zum Beispiel Datum, Sämaschine, Fahrgeschwindigkeit und Unterdruck. Jedes aufgezeichnete Korn erhält fortlaufend eine Nummer sowie den Zeitpunkt, zu welchem es gemessen wurde, und seine Position in den Analogwerten (siehe Tab. 3). Außerdem wurden der Zeitabstand zum vorherigen Korn, seine Größe und Position innerhalb der Sensorfläche ausgegeben. Zusätzlich wurde vermerkt, wie oft der einzelne Samen bei seinem Durchtritt durch den Lichtvorhang vermessen wurde.

Tabelle 3: Beispiel einer Werte-Aufzeichnung für Melisse, Rohwerttabelle

Auswertung „Corn Count“						
Datum:	12.08.2013					
Zeit:	13:52:01					
Dateiname:	Melisse_2					
Wiederholung:	2					
Sägerät:	2					
Fahrgeschw. (km/h):	0,32					
Säuscheibe (Lochanzahl):	160					
Unterdruck (Pa):	30					
Überdruck (Pa):	30					
Saatgut:	Melisse					
Abstreifereinstellung :	3,5					
Getriebeübersetzung:	0,75					
Nr.	Zeile	Zeitpunkt	Abstand	Größe	Position	Messpunkte
1	164	0,066	0,066	0,714	17,64	3
2	335	0,134	0,068	0,584	15,218	4
3	521	0,208	0,074	1,162	17,429	4
4	559	0,224	0,015	0,991	15,918	3
5	690	0,276	0,052	0,813	14,338	3
6	889	0,356	0,08	0,718	17,919	3
7	1244	0,498	0,142	0,907	15,252	3
8	1613	0,645	0,148	0,68	11,882	5
9	1790	0,716	0,071	0,636	17,992	4
10	1821	0,728	0,012	0,632	13,917	2
...	...	...	...	...	...	...

Die aufgezeichnete Rohdatei wird mit einem Tabellenkalkulationsprogramm zu aussagekräftigen Werten umgerechnet und in eine Darstellungsform gebracht, mit der die Ablage eines Sägerätes bewertet werden kann. So soll es dem Benutzer möglich gemacht werden die Ablagequalität einer Aufzeichnung direkt zu bewerten und mit anderen Aufnahmen vergleichen zu können.

### 3.4.6 Berechnung der Fahrgeschwindigkeit und Versuchslänge

Über die Sägerateinstellungen, unter Miteinberechnung des Radschlupfes (2%), wurde im Getriebe der Sägeräte 1 oder 2 die Radumdrehung in die Säscheibenumdrehung umgesetzt. Diese wird über den an den Testaggregaten angeschlossenen Getriebemotor eingestellt. So konnte bei einer Umdrehungszahl, unter Berücksichtigung der Getriebeübersetzung am Prüfstand, die gewünschte Fahrgeschwindigkeit eingestellt werden.

Die Versuchsdauer  $s$  richtete sich nach der Aufnahmezeit  $t$  und der Fahrgeschwindigkeit  $v$  (siehe Formel 5).

$$s = v * t \quad (5)$$

mit:

$s = \text{Versuchsdauer}$

$v = \text{Fahrgeschwindigkeit}$

$t = \text{Aufnahmezeit}$

### 3.4.7 Wertungsparameter einer Einzelkorn-Saatgutablage

Zur Beschreibung der Ablagegenauigkeit der geprüften Geräte und Einstellungen wurden insbesondere folgende Wertungsparameter verwendet:

- 1) Ist-Stellen  
In der Messung vorliegende real gemessene Kornabstände. Diese wurden über den Mittelwert der vorliegenden Normalverteilungen (0,5 bis 1,5-facher Soll-Abstand) berechnet (siehe Kapitel 3.4.13)
- 2) Standardabweichung  
Das Streuungsmaß der Ist-Stellen
- 3) Variationskoeffizient (VK)  
Relative Angabe der Einzelungsgüte, berechnet durch die Standardabweichung und den Mittelwert
- 4) Soll-Abstand  
Eingestellter Kornabstand durch das Sägerät
- 5) Fehlstellen  
Fehlbelegungen innerhalb der Maschine, verursacht durch ungenaue Einzelung, die sich durch größere Kornabstände äußern (1,5 bis 2,5-facher und >2,5 facher Soll-Abstand)
- 6) Doppelstellen  
Doppelbelegungen innerhalb der Maschine, verursacht durch ungenaue Einzelung, die sich durch kleine Kornabstände äußern (<0,5-facher Kornabstand)

### 3.4.8 Berechnungsmethoden zu Erkennung von Doppelstellen

Durch die verwendete Messtechnik lassen sich Doppelstellen durch drei verschiedene Verfahren aus den Rohwerten berechnen.

Zur Bewertung der Einzelungsqualität von Einzelkornsäegeräten für Feinsämereien wird auf die Wertvorstellungen des Prüfrahmens der DLG eingegangen. Diese wurden weiterentwickelt, um den vorliegenden Problemen der Einzelung von Feinstsämereien gerecht zu werden. Da die in den Prüfrahmern angegebenen Werte durch die Aussaat der Feinsämereien weit unterboten wurden, wurden die realen Messwerte angegeben und keine Wertungsbegriffe wie: „Sehr gut, gut, befriedigend etc.“. Des Weiteren wurden zusätzlich methodische Parameter entwickelt und zur Beschreibung der Einzelung hinzugezogen:

a) Doppelstellenberechnung über den Zeitabstand

Da eine Doppelstelle als der kleiner als 0,5-fache Soll-Abstand zwischen zwei Körnern definiert ist, kann bei einem Zeitabstand des 0,5-fachen Soll-Zeitabstandes zwischen zwei aufeinander folgenden Körnern davon ausgegangen werden, dass es sich um eine Doppelstelle handelt.

b) Doppelstellenberechnung über die gemessene Korngröße (Plausibilitätstest)

Die für den Prüfstand verwendete Sensorik gibt zu jedem gemessenen Korn dessen Größe an. Treten zwei oder mehr Körner gleichzeitig durch den Sensor, so erhöht sich die Größe des gemessenen Kornes deutlich, da der Sensor nur die beiden äußersten gemessenen Kanten der Abschattung des Lichtvorhangs verrechnet. Hat ein Korndurchgang eine den Mittelwert aller Körner deutlich übersteigende Größe, so muss von einer Doppelstelle ausgegangen werden.

c) Doppelstellenberechnung über die Messwerte pro Korn (Plausibilitätstest)

Die Rohdatei gibt für jeden gemessenen Samen an, wie oft dieser erfasst wurde. Im Fall einer Rübenpille wurden zwischen 13 und 15 Messungen gezählt. Fallen zwei Körner direkt hintereinander ohne Lücke, so erhöht sich die Anzahl der Messwerte pro Korn ebenfalls stark und es kann von einer Doppelstelle ausgegangen werden.

### 3.4.9 Berechnung der Fehlstellen

Fehlstellen entstehen durch eine Fehlbelegung innerhalb der Einzelungseinheit und zeichnen sich durch einen erhöhten Ist-Abstand aus.

Durch die Sensorik aufgezeichnete Fehlstellen berechnen sich über den Zeitabstand zwischen zwei aufeinander folgenden, gemessenen, Körnern. Ist dieser größer als das 1,5-fache des Soll-Zeitabstandes, so ist von einer Fehlstelle auszugehen.

#### **3.4.10 Streubreite**

Die Breite des Lichtvorhanges von Sensor 2 betrug 68 mm. Für jedes Korn, das in diesen Bereich von 68 mm durch den Sensor fällt, wird die Position innerhalb des Lichtvorhanges aufgezeichnet (Siehe Formel 4). Mit den Positionswerten kann die Gesamtstreubreite der Körner bestimmt werden. Über die Differenz der zwei Körner, die am weitesten vorne und hinten gefallen sind, lässt sich dieser Wert berechnen.

Je höher die Streubreite ist, desto breiter ist die Samenverteilung unterhalb des Schares und desto ungenauer das Säbild.

#### **3.4.11 Zeitlicher Abstand und Position**

Mit einer Messung der Saatgutablage ließen sich zwei Darstellungen erzeugen, erstens die zeitlichen Abstände zwischen zwei gemessenen Körnern (siehe Abb. 17) und zweitens die gemessenen Positionen unter dem Säschar (siehe Abb. 18). Die Ausgabe der Zeitabstände zwischen den Körnern und auch der Darstellung der Positionen unterhalb des Säschares sollten im Optimalfall eine enge Normalverteilung bilden. Im schlechteren Fall bildet sich bei den Zeitwerten eine mehrgipfelige Verteilung, die durch Fehl- und Doppelstellen erzeugt wird. Die Zeitabstände zwischen den Körnern konnten in Millisekunden angegeben werden. Unter Zuhilfenahme der Drehgeschwindigkeit der Säscheibe und der Lochanzahl, also der simulierten Fahrgeschwindigkeit, konnten die Abstände der aufgezeichneten Körner wie diese sich bei Vorfahrt auf der gemessenen Ebene befinden würden in Millimeter angegeben werden (Reale Positionsabstände nach Ablage). Die Positionsabstände werden anhand des in Fahrtrichtung vordersten gefallenen Kornes ausgegeben. Hierzu wird das vorderste Korn als Null-Position genutzt.

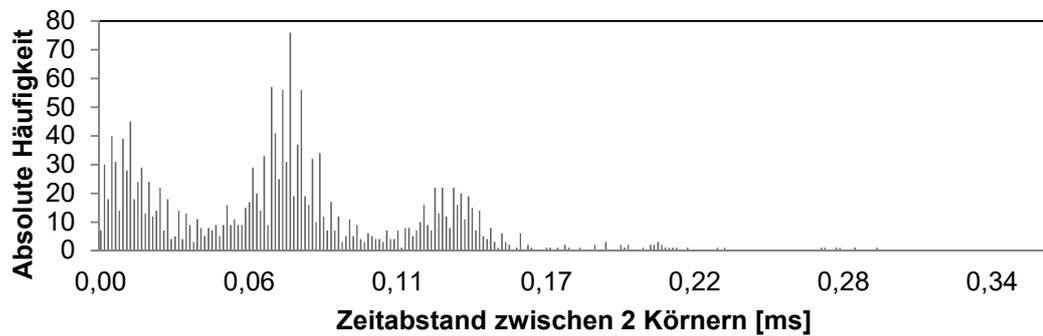


Abbildung 17: Häufigkeit der gemessenen Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,32 km/h, 160 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

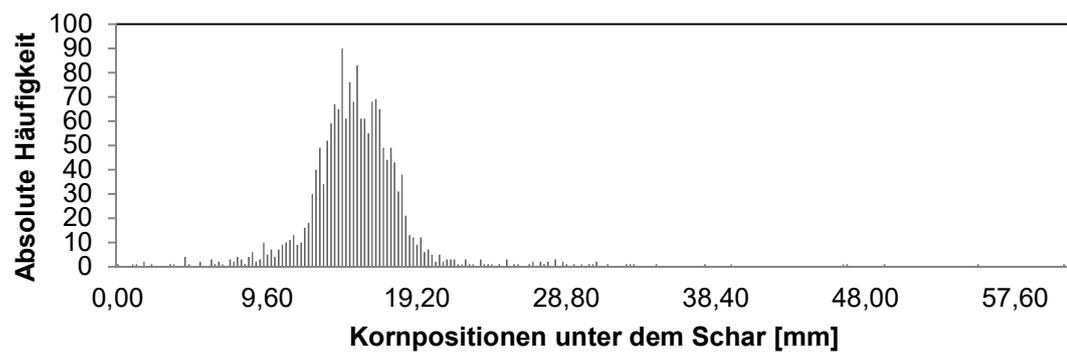


Abbildung 18: Häufigkeit der Kornpositionen unter dem Schar, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,32 km/h, 160 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

### 3.4.12 Berechnung der mehrgipfeligen Verteilung durch den Expectation-Maximization-Algorithmus (EM-Algorithmus)

Während für Samen bis 1 mm Größe die bisher aufgezählten Methoden ausreichen, um einen Einzelungsvorgang zu bewerten, ergeben sich bei Feinstsämereien Probleme bei der Bestimmung der Normalverteilungen des Zeitabstandes. Bei höheren Kornfrequenzen durch höhere Geschwindigkeiten wird eine neue Berechnungsmethode notwendig, um den Einzelungsvorgang hinreichend beschreiben zu können.

Mit dem Expectation-Maximization-Algorithmus ist es möglich, die einzelnen Körner drei vorgewählten Gruppen (in diesem Falle den Normalverteilungen von Doppel-, Soll- und Fehlstellen) zuzuordnen. Er gibt die Mittelwerte und Standardabweichungen der drei Normalverteilungen aus, in denen sich die Körner befinden. Der Programmablauf des EM-Algorithmus ist in Abbildung 19 bildlich dargestellt.

Der EM-Algorithmus wurde für die Auswertung der Kornpositionen angepasst und verläuft in folgenden Schritten (HASTIE et al., 2011; WELP et al., 1998):

1) Aufteilungsschritt

Die aufgezeichneten Kornabstandswerte werden durch den Algorithmus zufällig in drei gleichgroße Gruppen aufgeteilt.

2) Erste Schätzwerte

Für die drei Gruppen werden die jeweiligen Schätzwerte des Mittelwertes ( $\bar{x}$ ) (siehe Formel 6) und der Standardabweichung ( $\sigma_x$ ) (siehe Formel 7) errechnet.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

mit:

$\bar{x}$  = Mittelwerte der aufgezeichneten Kornzeitabstände  
 $i = 1, \dots, n =$  Messwertnummer

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

mit:

$\sigma_x$  = Standardabweichungen der aufgezeichneten Kornzeitabstände  
 $i = 1, \dots, n =$  Messwertnummer

## 3) Normierungsschritt

Für jeden aufgezeichneten Abstandswert werden mit den drei Gruppenmittelwerten und Gruppenstandardabweichungen drei normierte Werte berechnet (siehe Formel 8). Es ist davon auszugehen, dass die Abstandswerte drei Normalverteilungen (mehrgipfelige Verteilung) bilden und  $Y$  standardnormalverteilt ist.

$$X \sim N(\bar{x}_j, \sigma_j^2) \Leftrightarrow Y = \frac{X - \bar{x}_j}{\sigma_j}; Y = \text{Standardnormalverteilt} \quad (8)$$

mit:

$\bar{x}_j = \text{Mittelwerte der drei Gruppen}$

$\sigma_j = \text{Standardabweichungen der drei Gruppen}$

$Y = \text{Kornabstandswerte}$

$j = 1, 2, 3 \text{ Gruppe}$

## 4) Gewichtungsschritt

Mit Hilfe der normierten Werte wird über einen Gewichtungsschritt berechnet, wie sich die Kornzeitabstandswerte auf die drei Gruppen  $\Phi_j(y_i)$  aufteilen. Hierfür wird die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung verwendet. Mittels der Standardnormalverteilung (siehe Formel 9) werden die Körner gewichtet.  $T$  steht für die Integrationsvariable der Formel. Nach der Integration und dem Einsetzen der Integrationsgrenzen verbleibt  $(y_i)$  als Variable.

$$\Phi_j(y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y_i} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \quad (9)$$

mit:

$\Phi_j(y_i) = \text{gewichtete Kornzeitabstandswerte}$

Aus den Verteilungswerten  $\Phi$  wird die Wahrscheinlichkeit  $P_{i,j}$ , mit welcher sich die Kornzeitabstandswerte in einer der drei geschätzten Verteilungen befinden, berechnet. Dieser Schritt des EM-Algorithmus, die Berechnung der wahrscheinlichen Zugehörigkeit zu einer der drei Gruppen der in Formel 9 berechneten Gewichtungen, wird in Formel 10 dargestellt.

$$P_{i,j} = \frac{\Phi_j(y_i)}{\sum_{j=1}^3 \Phi_j(y_i)} \quad (10)$$

mit:

$P_{i,j}$  = Wahrscheinlichkeiten der Verteilung der Kornzeitabstandswerte

$\Phi_j(y_i)$  = Gewichtete Kornzeitabstandswerte

#### 5) Neue gewichtete Schätzwerte

Die drei Wahrscheinlichkeiten  $P_{i,j}$  die für jeden Abstandswert errechnet wurden, werden verwendet um für alle Abstandswerte drei neue gewichtete Schätzwerte für die Mittelwerte (siehe Formel 11) und Standardabweichungen (siehe Formel 12) der drei Gruppen zu berechnen.

$$\bar{x}_j = \sum_i x_i \frac{P_{ij}}{\sum_i P_{ij}} \quad (11)$$

mit:

$\bar{x}_j$  = Neue Mittelwerte der drei Gruppen

$P_{i,j}$  = Wahrscheinlichkeiten der Verteilung der Kornzeitabstandswerte

$$\bar{\sigma}_j = \sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x}_j)^2 \frac{P_{ij}}{\sum_i P_{ij}}} \quad (12)$$

mit:

$\bar{\sigma}_j$  = Neue Standardabweichungen der drei Gruppen

$\bar{x}_j$  = Neue Mittelwerte der drei Gruppen

$P_{i,j}$  = Wahrscheinlichkeiten der Verteilung der Kornzeitabstandswerte

## 6) Iterationsschritt

Mit den neu berechneten Schätzwerten  $(\bar{x}, \bar{\sigma})$  wird der EM-Algorithmus in 10 Iterationen von Schritt 3 an wiederholt. Die Schätzwerte konvergieren hierdurch.

In Vorversuchen stellte sich eine Iterationszahl von 10 als ausreichend heraus.

Die den Ist-Stellen entsprechende Verteilung wird ausgewählt. Es kann aufgrund der Vorversuche davon ausgegangen werden, dass die Gruppe mit der höchsten Kornhäufigkeit den Ist-Stellen entspricht, da Doppel- und Fehlbelegungen der geprüften Sämaschinen in geringerem Maße vorkommen.

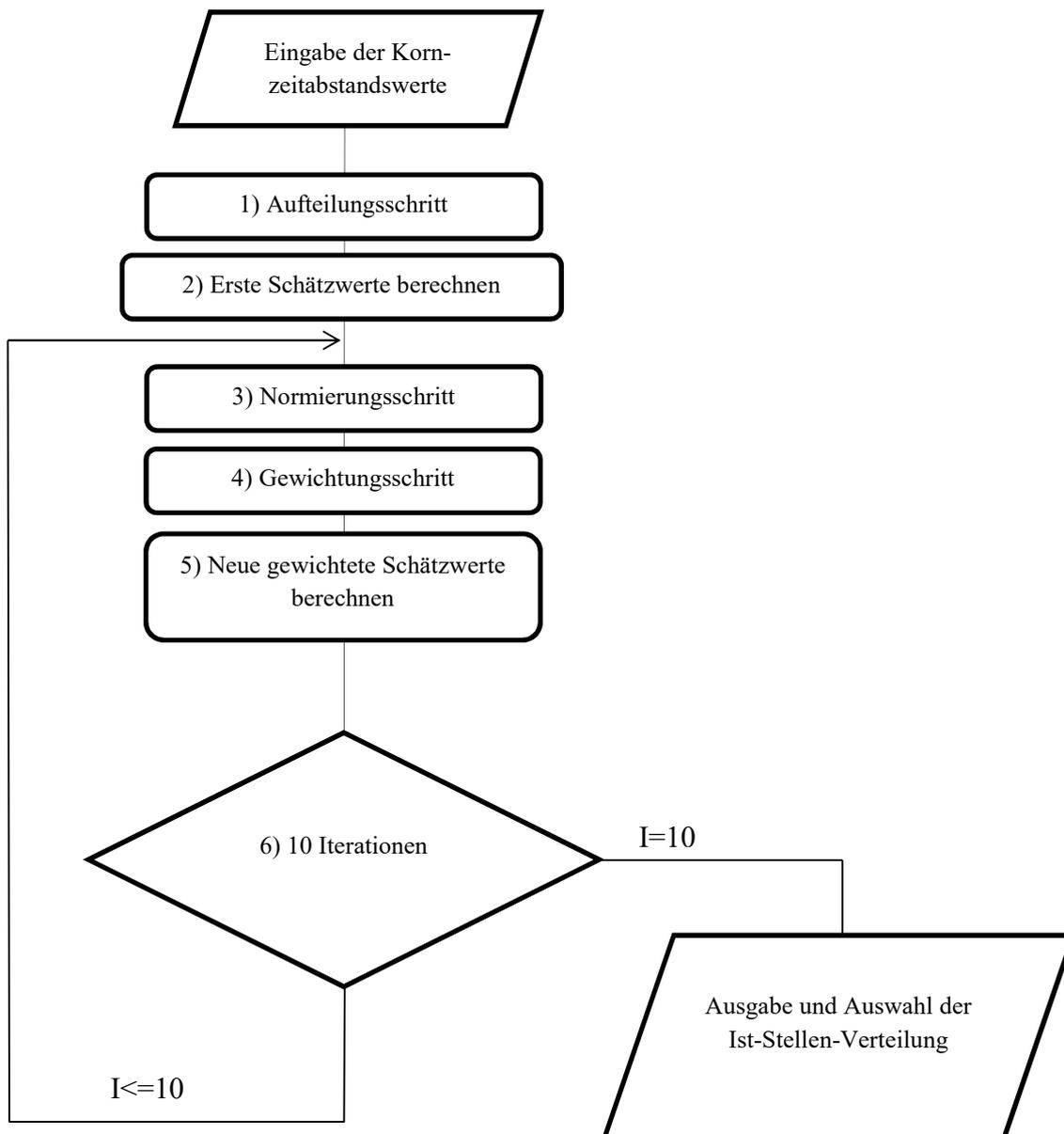


Abbildung 19: Programmablaufplan des EM-Algorithmus

Durch den im Versuchsaufbau angepassten EM-Algorithmus kann die den Ist-Abständen entsprechende Verteilung aufgrund der höheren Kornzahl gegenüber den Doppel- und Fehlstellen Normalverteilungen erkannt werden. Bei einer sehr ungleichen Verteilung ergeben sich drei sich an den Enden überschneidende Normalverteilungen, die die Situation der Einzelung zusammenfassen.

Im Falle einer sehr homogenen Ablage (keine Doppel- und Fehlstellen) sollten alle drei errechneten Mittelwerte und Standardabweichungen denselben Wert annehmen, weil es sich bei der Saatgutablage nur um eine einzige Normalverteilung handelt.

Die Gruppe, die den Ist-Abständen entspricht, wird zur Berechnung des positionsbereinigten Mittelwertes und der Standardabweichung herangezogen, um den Einzelungsvorgang zu bewerten.

### **3.4.13 Berechnung von positionsbereinigtem Mittelwert und Standardabweichung**

Durch die Berechnung der Korn-Ist-Positionen mit dem EM-Algorithmus können Mittelwert und Standardabweichung der Saatgutablage genauer bestimmt werden. Dies geschieht durch die Berechnung des positionsbereinigten Mittelwertes und der positionsbereinigten Standardabweichung.

Für die Berechnung des positionsbereinigten Mittelwertes werden die Körner der, mit dem EM-Algorithmus errechneten, Ist-Abstände verwendet. Der positionsbereingte Mittelwert soll im weiteren Verlauf mit „pos.ber. MW“ und die positionsbereinigte Standardabweichung mit „pos. ber. STABW“ abgekürzt werden.

Da der Sensor zusätzlich zu den Zeitwerten die Position der Samen ausgibt, können die Ist-Stellen durch den Positionswert verändert werden, um ein genaueres Bild der Samenverteilung unter dem Schar zu erhalten.

Fallen zwei Körner im Soll-Zeitabstand hintereinander, haben unter dem Schar aber einen Positionsabstand von 1 cm zueinander, so verschieben sich entsprechend Mittelwert und Standardabweichung.

Ein Problem, welches sich durch die Herausnahme von Doppel- und Fehlstellen ergibt, ist, dass nicht jedes Korn mit seinem Vorgänger und Nachfolger verrechnet werden kann. Deswegen wurden alle Kornpositionswerte unter dem Schar mit dem Mittelwert der Ist-Abstände unter dem Schar verrechnet und diese Werte wurden von den Abstandswerten, die sich durch den Zeitabstand ergeben, addiert oder subtrahiert.

Die Berechnung des positionsbereinigten Mittelwertes und der Standardabweichung geschah folgendermaßen:

- 1) Auswertung der Kornabstände  $Ka$  durch die Fahrgeschwindigkeit  $v$  (Drehzahl des Getriebemotors und Getriebeübersetzung) und den Kornzeitabstand  $t$ . Für jedes aufgezeichnete Korn der Ist-Abstände wird der Abstand in mm zum vorherigen Korn errechnet.

$$Ka_i = v * t_i \quad (13)$$

mit:

$Ka_i$  = Kornabstände (in mm)

$v$  = Fahrgeschwindigkeit (in km/h)

$t_i$  = Zeitabstand zwischen zwei Körnern (in s)

$i = 1, \dots, n$  = Messwertnummer

- 2) Berechnung des Mittelwertes  $Mp$  der Einzelkornpositionen  $Kp_i$  unter dem Schar mit den Körnern der Ist-Abstände. Der Wert  $Mp$  legt fest wie weit die abgeworfenen Samen der Ist-Abstände im Mittel auseinander sind.

$$Mp = \frac{\sum_{i=1}^n Kp_i}{n} ; \text{ nur Werte der Körner im Ist - Abstandsbereich} \quad (14)$$

mit:

$Mp$  = Mittelwert der der Einzelkornpositionen (in mm)

$Kp_i$  = Kornpositionen Einzelabstände

- 3) Erstellung der Positionsabweichung ( $w_i$ ) der Körner der Ist-Abstände unter dem Schar in Fahrtrichtung

$$w_i = Mp - Kp_i \quad (15)$$

mit:

$w_i$  = Positionsabweichung der Einzelkörner

$Mp$  = Mittelwert der Kornpositionen der Ist-Abstände

$Kp_i$  = Einzelkornpositionen der Ist-Abstände

Der Wert  $w$  legt fest, um wie viel mm sich jedes einzelne Korn unter dem Schar in Fahrtrichtung nach vorne oder hinten zum Mittelwert der Ist-Abstände  $Mp$  verschoben hat.

- 4) Ermittlung der neuen Kornabstandswerte  $z_i$  unter dem Schar

$$z_i = Ka_i - w_i \quad (16)$$

mit:

$z_i$  = Neue Abstandswerte der Einzelkörner

$Ka_i$  = Kornabstände nach Zeitabstand des Auswurfes (siehe Formel 13)

$w_i$  = Positionsabweichung der Einzelkörner unter dem Schar nach Abwurf (Position in Fahrtrichtung, siehe Formel 15)

Der Wert  $z_i$  gibt an wie weit sich jedes einzelne aufgezeichnete Korn der Ist-Abstände vom Mittelwert  $Mp$  in Fahrtrichtung nach vorne oder hinten verschoben hat. Es werden negative Werte für eine Positionsverschiebung in Fahrtrichtung nach hinten ausgegeben und positive für eine Verschiebung nach vorne. Wenn der Kornabstand der aufgezeichneten Körner genau dem Mittelwert der Ist-Abstände entspricht, so wird folglich der Wert Null errechnet.

- 5) Berechnung des positionsbereinigten Mittelwerts  $\mu_z$  und der Standardabweichung  $\sigma_z$  mit den neuen Kornabstandswerten  $z_i$

$$\mu_z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (17)$$

mit:

$\mu_z$  = positionsbereinigter Mittelwert

$z_i$  = neue Abstandswerte der Einzelkörner (siehe Formel 16)

Durch Berechnung des positionsbereinigten Mittelwertes  $\mu_z$  aus den Kornabstandswerten  $z_i$  kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie sich die reale Abstandsverteilung der Ist-Abstände darstellt.

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (18)$$

mit:

$\sigma_z$  = positionsbereinigte Standardabweichung

$z_i$  = neue Abstandswerte der Einzelkörner (siehe Formel 16)

Durch Berechnung der positionsbereinigten Standardabweichung  $\sigma_z$  aus den Kornabstandswerten  $z_i$  kann eine Aussage darüber getroffen werden wie weit sich die aufgezeichneten Körner der Ist-Abstände um den pos. ber. Mittelwert  $\mu_z$  verteilen. Je geringer die pos. ber. Standardabweichung, desto geringer weichen die Kornpositionen der Körner der Ist-Abstände vom pos. ber. Mittelwert ab und desto genauer ist die Kornablage durch das vermessene Sägerät.

#### 3.4.14 Berechnung des Variationskoeffizienten

Da bei höherer Fahrgeschwindigkeit die zeitliche Abfolge der Feinstsämereien von der mehrgipfeligen Verteilung zu der einer Exponentialverteilung abweicht, wurde zusätzlich der Variationskoeffizient über alle aufgezeichneten Kornzeitabstände errechnet. Er dient als weiteres Bewertungskriterium für die Ablagequalität der Sämaschinen.

Der Variationskoeffizient (VK) setzt sich aus der Standardabweichung zusammen, die durch den Mittelwert dividiert wird und ist eine relative Angabe (%).

$$(VK) = \frac{\sigma_x}{\mu_x} * 100 \% \quad (19)$$

mit:

$\mu_x$  = Mittelwerte der aufgezeichneten Kornzeitabstände

$\sigma_x$  = Standardabweichungen der aufgezeichneten Kornzeitabstände

#### 3.4.15 Abwurfkurven

Als Abwurfkurven sind die Samenflugbahnen der Körner bezeichnet, nachdem diese die Sämaschine verlassen haben und aus dem Schar austreten.

Es ist möglich den Sensor schrittweise unter dem Schar abzusenken und so über mehrere Aufnahmen ein Schichtmodell zu bilden. Über dieses Modell ist es möglich, die Häufigkeitsverteilung der abgeworfenen Samen in verschiedenen Ebenen, und ihre Flugbahn darzustellen.

### **3.5 Versuchsaufbau der Sägeräteprüfung**

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau der Sägeräteprüfung. Diese wurde in einem Versuchsablauf (siehe Kapitel 3.6), mit einer vorher festgelegten Reihenfolge, durchgeführt.

Da sich während der ersten Testreihen herausstellte, dass bereits Fahrgeschwindigkeiten größer 0,6 km/h ein sehr ungenaues Säbild erzeugen, wurde innerhalb des Versuchsaufbaues ein Getriebemotorwechsel vorgenommen. Zur Vollständigkeit der Versuchsreihen wurden alle Versuche mit der vorgewählten Geschwindigkeit durchgeführt und zusätzlich Versuchsreihen mit langsameren Drehgeschwindigkeiten aufgestellt. Für jede Versuchsvariante wurden fünf Wiederholungen zu je 120 Sekunden aufgezeichnet und ausgewertet.

#### **- Versuchsaufbau der Abstreifereinstellung Sägerät 1**

Die Abstreifereinstellung von Sägerät 1 geschah bei einer Drehgeschwindigkeit, die einer Fahrgeschwindigkeit von 0,6 km/h entspricht, eine weitere Einstellung wurde geprüft mit 0,19 km/h. Für den Unter- und Überdruck wurden Werte für ähnliche Saatgutkulturen verwendet, die in der Betriebsanleitung der Sämaschine 1 angegeben sind. Es wurden 30 Pa Über- und Unterdruck eingestellt.

#### **- Versuchsaufbau der Abstreifereinstellung Sägerät 2**

Die Prüfung der Abstreifereinstellung von Sägerät 2 geschah mit einer Drehgeschwindigkeit, die einer Fahrgeschwindigkeit von 0,79 km/h entspricht, sowie einer Drehgeschwindigkeit die einer Fahrgeschwindigkeit von 0,26 km/h entspricht. Der Unter- und Überdruck wurde ebenfalls dem Betriebshandbuch des Sägerätes 2 entnommen. Hier wurden für den Unterdruck 30 Pa eingestellt und der Überdruck wurde mit 200.000 Pa versorgt.

#### **- Unterdruck**

Der Unterdruckeinfluss wurde steigend in 0,5 Pa Schritten von 0,5 Pa bis 80 Pa auf seinen Einfluss auf das Säergebnis untersucht.

#### **- Überdruck Sämaschine 1**

Die Reinigungsleistung der Sämaschinen durch Überdruck, welcher die Säscheiben freihalten soll, um eine gute Einzelung zu gewährleisten, wurde bei Sämaschine 1 zusätzlich in verschiedenen Stärken auf ihre Wirkung untersucht. Es wurden Drücke von 0 bis 17,5 kPa verwendet.

#### **- Überdruck Sämaschine 2**

Sämaschine 2 verfügt über ein eigenständiges Gebläse, das einen Überdruck von 200.000 Pa bereitstellt und unveränderbar ist.

### **- Fahrgeschwindigkeit**

Die Fahrgeschwindigkeit wurde mit zwei verschiedenen Getriebemotoren erzeugt. Zuerst im Drehbereichen von 9 bis 50 U/min, welche je nach Übersetzung zwischen 0,6 bis 4 km/h Fahrgeschwindigkeit ermöglicht. Nachdem sich herausstellte, dass sich das Säbild der Feinstsämereien bei 0,6 km/h bereits ungenau darstellt, wurde ein Motorwechsel vollzogen. Es wurden mit 3 bis 8 U/min weitere Einzelungsaufnahmen erstellt.

### **- Unterdruck und Fahrgeschwindigkeit**

Zusätzlich zu den Messungen der Fahrgeschwindigkeit mit einem festen Unterdruck von 30 Pa wurde zu den einzelnen Drehbereichen der Unterdruck variiert, um einen eventuellen Einfluss zu verifizieren. Hierzu wurden die Unterdrücke in 5 Pa Schritten gesteigert und für jede Unterdruckstufe wurden steigende Fahrgeschwindigkeiten von 0,6 km/h bis 2 km/h, in 0,2 km/h Schritten, angelegt.

### **- Wiederholungsmessungen**

Es wurden jeweils 5 Aufnahmen zu je 120 Sekunden durchgeführt.

### **- Querverteilungen**

Neben der Streuung der Samen in Fahrtrichtung fallen diese, begrenzt durch das Schar, auch quer in der Säreihe. Diese Messung wurde mit den vorher durch die Versuche ausgewählten optimalen Einstellungen durchgeführt, um zu überprüfen, in welcher Breite sich die Samenkörner unter dem Schar verteilen. Hierzu wurde der Sensor um 90° in horizontaler Richtung unter dem Schar gedreht.

### **- Säscheibenwechsel**

Ein eventueller Einfluss der Lochgröße und Lochanzahl sollte untersucht werden.

Für Sägerät 1 wurden zusätzlich zu der für die Versuche verwendeten 160 Lochsäscheibe, zwei weitere Säscheiben in die Aufnahme eingeschlossen (40 Löcher mit 0,8 mm Lochdurchmesser; 320 Löcher mit 0,6 mm Lochdurchmesser).

### **- Messungen mit umgedrehter Säscheibe bei Sägerät 1**

Die Säscheibe des Sägerätes 1 lässt sich so drehen, dass die Senkungen, die eigentlich auf die Unterdruckseite des Säherzens liegen, auch auf der Samenseite verwendbar sind. In den Messungen mit umgedrehter Säscheibe sollte untersucht werden, ob die Senkungen einen positiven Einfluss auf die Einzelungsqualität haben.

**- Messung ohne Schar**

Während der Messungen stellte sich heraus, dass sich auch bei geringen Fahrgeschwindigkeiten und guter Einzelungseinstellung eine ungenaue Verteilung der Samen bildete. Eine Haupteinflussgröße auf die unzureichende Genauigkeit des Säbildes kann die Fluglänge der abgeworfenen Körner, von der Säscheibe bis zum Boden, sein. Diese wird determiniert durch die Scharhöhe. Durch Demontage des Schares und Messungen der Kornverteilung direkt unter der Einzelungseinheit sollte der Einfluss dieser Flugphase analysiert werden.

**- Abwurfkurven**

Für die Vermessung der Abwurfkurven wurde für jede Einstellvariante der Sägeräte und Saatgüter eine Abwurfkurve über eine Höhe von 1,5 cm, in 0,125 cm Schritten, unter dem Schar gemessen. Dies entspricht der Scharhöhe von Sägerät 1. Hierdurch sollte eine Aussage getroffen werden inwieweit die Samen während eines realen Einsatzes springen oder verrollen könnten bzw. sich in der Säfurche verlagern.

### **3.6 Versuchsablauf der Sägeräteprüfung**

Im Folgenden wird der verwendete Versuchsablauf der Sägeräteprüfung beschrieben.

Zur Überprüfung der vorgestellten Methode wurden die vorhandenen Sägeräte mit Melisse und Baldrian in dem Folgenden vorbestimmten Ablauf getestet.

#### **- Abstreifereinstellung Sägerät 1**

Zuerst wurde die optimale Position der Abstreifer der Sämaschinen geprüft. Hierzu wurde der Abstreifer in kleinen Schritten an die Säscheibe geführt und das Säergebnis vermessen, sowie visuell bewertet.

#### **- Abstreifereinstellung Sägerät 2**

Da Sägerät 2 über mehrere Abstreifer verfügt, mussten beide in mehreren Kombinationen, sowie nur die Einstellung des Kammabstreifers ohne den Feinabstreifer untersucht werden. Hierzu wurde zuerst der Kammabstreifer optimal eingestellt und dann der Feinabstreifer nach dem visuellen Einzelungsergebnis justiert.

#### **- Unterdruck**

Der verwendete Unterdruck ist einer der wichtigsten Faktoren für die Einzelung der Saatgüter durch die Maschinen. Die Untersuchung des Unterdruckes auf seinen Einfluss hinsichtlich der Einzelung folgte als zweites.

#### **- Überdruck Sämaschine 1**

Folgend auf den Unterdruck wurde der Überdruck untersucht.

#### **- Überdruck Sämaschine 2**

Da der Überdruck von Sämaschine 2 um das einhundertfache höher ist als der vorgeschriebene Reinigungsdruck von Sämaschine 1, wurde dieser nicht weiter untersucht.

#### **- Fahrgeschwindigkeit**

Anschließend an die vermessenen Drücke wurde die Fahrgeschwindigkeit, der Faktor mit dem wahrscheinlich größten Einfluss auf die Qualität der Saatgutablage geprüft.

#### **- Unterdruck und Fahrgeschwindigkeit**

Nachdem sowohl Fahrgeschwindigkeit und Unterdruckeinfluss aufgezeichnet und bewertet wurden, konnte der gegenseitige Einfluss dieser beiden Faktoren aufeinander und das Säergebnis untersucht werden.

#### **- Wiederholungsmessungen**

Waren durch die vorhergehenden Versuche gute Einzelungsergebnisse erreicht worden, so wurde diese in mehrfachen Wiederholungsmessungen auf ihre Reproduzierbarkeit geprüft.

**- Querverteilungen**

Konnte die Reproduzierbarkeit der aufgenommenen Säergebnisse bestätigt werden, so wurde im Anschluss eine Quermessung der Saatgutablage aufgenommen.

**- Säscheibenwechsel**

An die Messung der Querverteilung folgte die Messung des Einflusses der Säscheibenlochgröße.

**- Messungen mit umgedrehter Säscheibe bei Sägerät 1**

Waren alle vorhergehenden Aufnahmen des Versuchsablaufs durchgeführt, so wurde für Sägerät 1 noch die Messung mit umgedrehter Säscheibe aufgezeichnet.

**- Messung ohne Schar**

Für die Determinierung des Einflusses der Fluglänge der Samenkörner wurde die Messung ohne Schar mit den zuvor bestimmten, reproduzierbaren, optimalen Säereiteinstellungen durchgeführt.

**- Abwurfkurven**

Waren alle Messungen durchgeführt und es konnten Einstellungen für die Säeräte 1 und 2 mit den Kulturen gefunden werden, so wurden die Abwurfkurven der unterschiedlichen Varianten gemessen.

## 4. Ergebnisse

Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Sensorprüfung, der Verwendung des EM-Algorithmus und der Sägeräteprüfung dargestellt.

### 4.1 Ergebnisse der Sensorprüfung

Die Ergebnisse der Geräteprüfung fassen die erhobenen Daten der zwei optischen Mikrometer, sowie die des Körnerzählgerätes, das zum Rückzählen der aufgezeichneten Samen dient, zusammen. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Erkennung von Zuckerrübenpillendurchmessern als Maß der Durchmessererkennungsgenauigkeit dargelegt.

#### 4.1.1 Samenerkennungsgenauigkeit Sensor 1

Zur Bewertung der Sensoren wurden alle Testsaatgüter mit steigender Geschwindigkeit bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von 5,7 km/h in den Lichtvorhang der Sensoren abgelegt (siehe Tab. 4).

Die mit Sensor 1 durchgeführten Messungen erkannten die länglichen Testsaamen des Baldrians noch zu 79%. Die Melisse Samen konnten mit Sensor 1 nicht erkannt werden (siehe Tab. 4).

Problematisch war die Aufnahme von Phacelia Mantelsaat. Durch abbrechende Mantelteile wurden mehr Samen erkannt als geeinzelt. Darüber hinaus konnten durch die verwendete Sätechnik bei Rotklee und Baldrian keine hinreichende Einzelung gewährleistet werden. Die abgeworfenen Körner, mit Ausnahme von Melisse und Baldrian, konnten durch Sensor 1 aufgezeichnet werden.

Tabelle 4: Saatguterkennungsgenauigkeit des Sensors 1 im Längs- und Queraufbau unter dem Sägerät

Saatgut; Fraktionsgröße (Durchmesser)	Sensor 1	
	Längs	Quer
Senf; 2,0-2,25 mm	100%	100 %
Raps; 2,0-2,25 mm	100%	100 %
Phacelia; 1,2-1,4 mm	100 %	105 %
Rotklee; 1,0-1,2 mm	100%	100 %
Baldrian; < 1 mm	79 %	16 %
Melisse ; < 1 mm	---	---

#### 4.1.2 Samenerkennungsgenauigkeit Sensor 2

Nach Prüfung der beiden optischen Sensoren stellte sich das Sensormodell 2 als geeignet für den Aufbau eines Prüfstandes zur Aufnahme von Feinstsämereien heraus. Sowohl die kleinsten verwendeten Samen der Melisse, sowie alle anderen verwendeten Saatgüter, konnten zu 100 % im Längs- und im Queraufbau unter dem Sägerät erkannt werden (siehe Tab. 5).

Die Phacelia Mantelsaat wurde aufgrund der absplitternden Mantelteile ebenfalls zu häufig erkannt. Weiterhin wurde Sensor 2 aufgrund der Zusatzausstattung mit einer Kamera ausgewählt, welche die genauere Positionierung des Sensors erlaubt. Außerdem bietet Sensor 2 die Möglichkeit, für jedes abgeworfene Korn sowohl die Position als auch die Größe simultan zu bestimmen.

Zusätzlich konnte die Durchmessererkennung von pilliertem Saatgut durch Sensor 2 bewerkstelligt werden.

Tabelle 5: Saatguterkennungsgenauigkeit des Sensors 2 im Längs- und Queraufbau unter dem Sägerät

Saatgut; Fraktionsgröße (Durchmesser)	Sensor 2	
	Längs	Quer
Senf; 2,0-2,25 mm	100 %	100 %
Raps; 2,0-2,25 mm	100 %	100 %
Phacelia; 1,2-1,4 mm	105 %	107 %
Rotklee; 1,0-1,2 mm	100 %	100 %
Baldrian; < 1 mm	100 %	100 %
Melisse; < 1 mm	100 %	100 %

### 4.1.3 Körnerzählgerät

Das Körnerzählgerät wurde mittels der Zählung von 1000 Samen zu je 10 Wiederholungen hinsichtlich seiner Genauigkeit geprüft.

Die Schwankung der Kornerkennung des Zählgerätes lag bei allen verwendeten Saatgütern unter 1% (siehe Tab. 6).

Tabelle 6: Schwankung der Samenerkennung des Körnerzählgerätes, Werte aus 5 Wiederholungen zu je 1000 Samen

	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient (%)
<b>Rotklee</b>	999,8	2,4	0,2%
<b>Gelbsenf</b>	1000,4	0,5	0,1%
<b>Raps</b>	1000,1	0,7	0,1%
<b>Phacelia</b>	1010,6	2,6	0,3%
<b>Melisse</b>	1000,7	0,7	0,1%
<b>Baldrian</b>	1015,8	6,1	0,6%

### 4.1.4 Größen der verwendeten Zuckerrübenpillen

Die Fraktionierung der Zuckerrübenpillen für die Größendurchmessererkennung mittels Siebturm ergab eine Verteilung der Körner in den Durchmessern von 3,75 mm bis 5 mm. Die Hauptfraktionen lagen bei 4,0 mm bis 4,5 mm Durchmesser (siehe Tab. 7).

Tabelle 7: Zuckerrübenpillen-Fractionen des verwendeten Saatgutes gemessen mit dem Siebturm

Siebturmgrößen [mm]	Anzahl Pillen*	Relative Häufigkeit*
5	1,6	0 %
4,75	34,4	3 %
4,5	234,2	23 %
4,25	425,4	43 %
4	283	28 %
3,75	21,4	2 %
<b>Summe</b>	<b>1000</b>	<b>100 %</b>

\* Mittelwerte aus 5000 Pillen vermessen in fünf Mal 1000 Pillen

#### 4.1.5 Größenvermessung von pillierten Zuckerrüben Sensor 1

Zur Bestimmung der Durchmessererkennungsgenauigkeit der Sensoren wurden diese unter Zuhilfenahme von pilliertem Zuckerrübensaatgut realitätsnah geprüft. Die Bestimmung der Pilledurchmesser mit den beiden Sensoren ergab, dass diese in der Lage sind, die Pillen zu erkennen.

Die Vermessung des Zuckerrübensaatgutes konnte aufgrund eines internen Rechenfehlers durch Sensor 1 nicht bewerkstelligt werden. Dieser gab den gemessenen Durchmesser gleichmäßig zu niedrig an. Der Fehler konnte während der Versuchsarbeiten nicht behoben werden.

Die Messkurven von Sensor 1 liegen bei alle Aufzeichnungen unter den Siebturmgrößen (siehe Abb. 20). Da Sensor 1 die Messwerte ohne Zwischenschritt an die auswertende Elektronik abgibt, konnte nicht geklärt werden, wie der Fehler zustande kam.

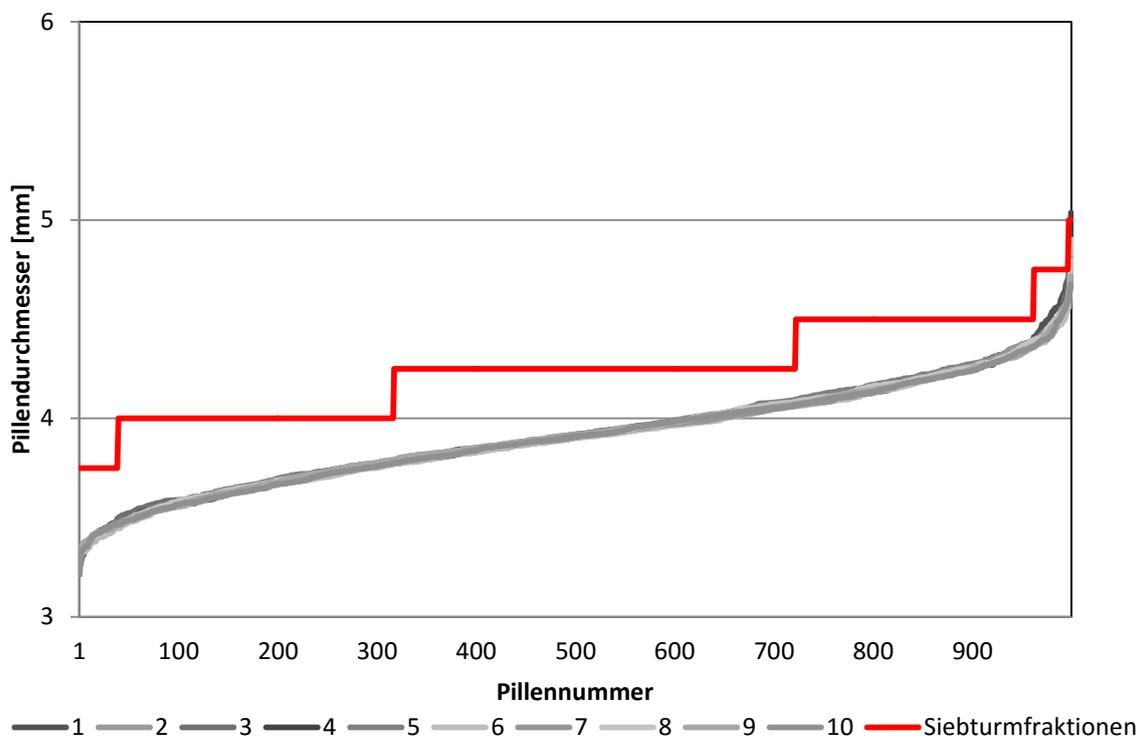


Abbildung 20: Pilledurchmesservermessung mit Sensor 1, 10 Aufnahmen im Vergleich zu den Siebturmfraktionen

#### 4.1.6 Größenvermessung von pillierten Zuckerrüben Sensor 2

Die Erkennung der Durchmessergröße von pilliertem Saatgut konnte mit Sensor 2 durchgeführt werden. Eine Pillengrößenvermessung ist dementsprechend nur mit Sensor 2 zu gewährleisten.

Sensor 2 misst wiederholbar eine Kurve durch die Mittelpunkte der Siebturmfraktionen und liefert somit eine genaue Messung (siehe Abb. 21).

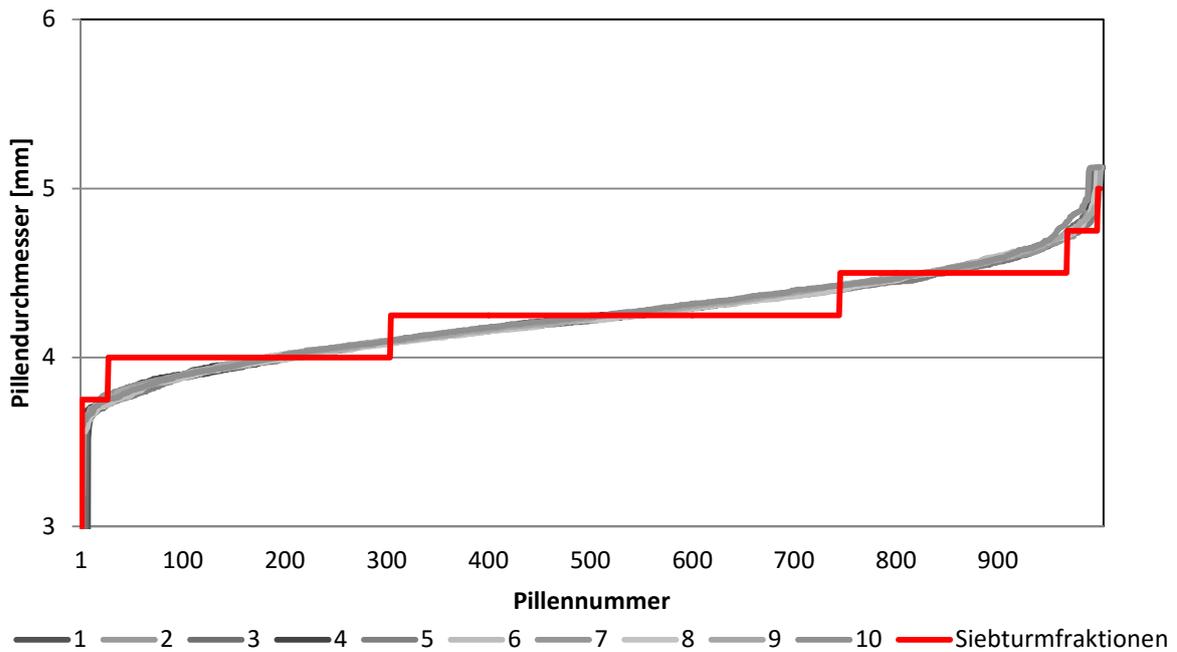


Abbildung 21: Pillengrößenvermessung mit Sensor 2, 10 Aufnahmen im Vergleich zu den Siebturmfraktionen

## 4.2 Ergebnisse Entwicklung des EM-Algorithmus

### 4.2.1 EM-Algorithmus bei einer Verteilung ohne Doppel- und Fehlstellen

Während der Abdrehversuche mit den Feinstsämereien stellte sich heraus, dass sich das Ablagebild mit steigender Geschwindigkeit von einer mehrgipfeligen Verteilung hin zu der Exponentialverteilung einer Drillsaat verschiebt. Um den Anteil der Ist-, Doppel- und Fehlstellen bestimmen zu können, wurden die aufgezeichneten Samen durch den EM-Algorithmus in drei Normalverteilungen separiert. Die Mittlere dieser Normalverteilungen soll die Ist-Stellen darstellen, mit denen weiter verfahren wurde.

Im Falle einer Ablage von Ist-Stellen, einer eingipfeligen Normalverteilung, ohne das Vorhandensein von Doppel- und Fehlstellen, müssen sich so die drei durch den EM-Algorithmus berechneten Normalverteilungen gleichen.

Dies konnte durch eine Ablage von nur Ist-Stellen von weißem Senf mit Sägerät 2 dargestellt werden.

Tabelle 8: Drei EM-Gruppen-Werte von Messungen mit weißem Senf, Sägerät 2, Fahrgeschwindigkeit 0,87 km/h, 60 Loch Säscheibe, 7 Wiederholungen, Aufnahmedauer 120 s / Messung

	Mittelwert	Standardabweichung
Gemessene Körner	957,7	9,6
Variationskoeffizient	6 %	1 %
Fehlstellen nach EM	0 %	0 %
Doppelstellen nach EM	0 %	0 %
EM 1 [pos. ber.] [mm Kornabstand]	30,3 ( $\mu_z$ )	2,3 ( $\sigma_z$ )
EM 2 [pos. ber.] [mm Kornabstand]	30,3 ( $\mu_z$ )	2,3 ( $\sigma_z$ )
EM 3 [pos. ber.] [mm Kornabstand]	30,3 ( $\mu_z$ )	2,3 ( $\sigma_z$ )
Kornpos. unter Schar 1 (gemessene Fallposition, mm von vorne)	35,8	1,7

### 4.2.2 EM-Algorithmus bei einer manuell erstellten Verteilung

Um den EM-Algorithmus bei einer mehrgipfeligen Verteilung auf seine Richtigkeit zu überprüfen, wurden mehrere Verteilungen manuell erstellt und berechnet.

Diese konnten durch den Algorithmus erkannt werden. Der EM-Algorithmus ist für mehrgipfelige Verteilungen als funktional zu betrachten.

### 4.3 Ergebnisse Sägeräteprüfung

#### 4.3.1 Ungenaues Ablagebild der Feinstsämereien

Es stellte sich bereits in den ersten Vorversuchen mit Highspeedkameraaufnahmen und der optischen Mikrometer heraus, dass die Ablage der Feinstsämereien ungenau ist und ein Anteil der Samen chaotisch fällt. Mit steigender Drehgeschwindigkeit nahm die zeitliche Aufeinanderfolge der Kornabstände nicht mehr das Bild einer mehrgipfeligen Verteilung an, sondern glich der Exponentialverteilung einer Drillmaschine. Diesem wurde durch zwei Schritte entgegengewirkt. Zum einen wurde der EM-Algorithmus verwendet um die aufgenommenen Samen in funktionale Gruppen aufzuteilen und die Ist-Stellen zu ermitteln. Zum anderen wurde der Versuchsaufbau um einen Getriebemotor mit geringerer Drehzahl erweitert um ein genaueres Bild der Saatgutablage zu erhalten.

Die ungenaue Verteilung von Baldrian und Melisse spiegelt sich unter anderem in den hohen Werten der Fehl- und Doppelstellen wieder (siehe Tab. 9).

Die aussagekräftigsten Werte für die Ablagequalität der geprüften Sägeräte waren der pos. ber. Mittelwert und die pos. ber. Standardabweichung der Ist-Stellen des EM-Algorithmus. Zusätzlich war der Variationskoeffizient ein aussagekräftiger Wert um die Güte der Saatgutablage zu bemessen.

Tabelle 9: Doppel- und Fehlstellen der Sägeräte bei optimaler Einstellung, Mittelwerte von 5 Wiederholungen, Aufnahmedauer 120 s / Messung für Baldrian und Melisse

Sägerät	Saatgut	Fahrgeschwindigkeit [km/h]	Doppelstellen*	Fehlstellen*
<b>1</b>	Baldrian	0,19	34%	18%
		0,6	30%	21%
	Melisse	0,19	26%	26%
		0,6	25%	27%
<b>2</b>	Baldrian	0,26	26%	22%
		0,79	27%	23%
	Melisse	0,26	16%	13%
		0,79	13%	11%

\* Die Doppel- und Fehlstellen wurden ausgewertet anhand des pos. ber. Mittelwerts der Ist-Stellen des EM-Algorithmus (Mittelwerte aus fünffacher Wiederholung)

### 4.3.2 Ergebnisse Abstreifer Einstellung Sägerät 1

Ein Abstreifertest der Sägeräte am Anfang des Versuchsablaufes sollte zeigen, ob die optimale Position des Abstreifers mit Hilfe der optischen Mikrometer sichtbar gemacht werden konnte und ob, wenn Unterschiede vorhanden waren, diese durch die neue Messeinrichtung kenntlich wurden.

Zur Überprüfung der richtigen Abstreifereinstellung wurde Sägerät 1 mit den Feinstsämereien Melisse und Baldrian beladen und in langsamer Geschwindigkeit von 0,6 km/h und 0,19 km/h, mit beiden Saatgütern, abgedreht.

Es stellte sich heraus, dass durch die Abstreifereinstellung in allen Versuchen, auch bei steigender Geschwindigkeit, die Sämence exakt eingehalten wird. Eine Einstellungsveränderung veränderte die Sämence nicht linear, sondern hatte das Bild einer Hyperbel (siehe Abb. 22 und 23) zur Folge.

Um eine vollständige Einzelung herzustellen, musste für jedes Gerät und Saatgut eine passende Position des Abstreifers gewählt werden. Dieser musste mit visueller Kontrolle der Lochsäscheiben des Sägerätes festgelegt werden um eine genaue Einzelung zu erzeugen.

Insbesondere bei dem länglichen Baldriansaatgut ließ sich eine Mehrfachbelegung der Löcher der Säscheibe nicht vermeiden.

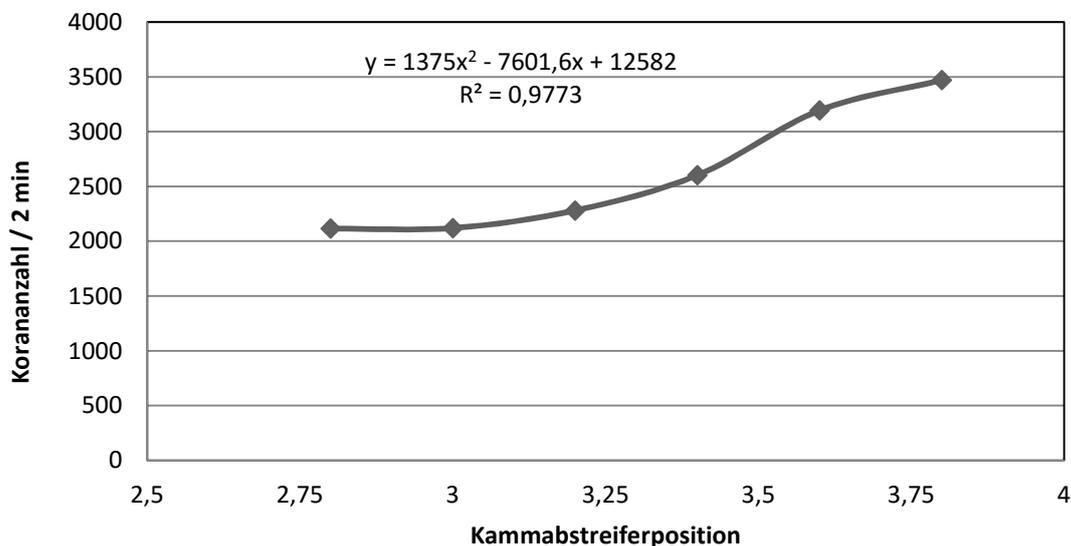


Abbildung 22: Änderung der Samenmenge durch Einstellung des Kammabstreifers, Sägerät 1, Melisse, 0,6 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

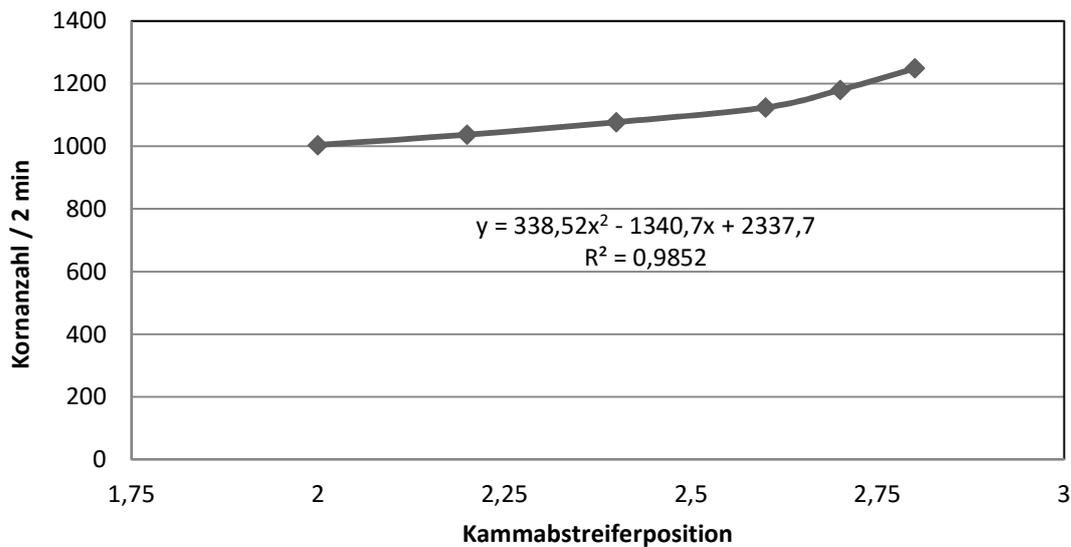


Abbildung 23: Änderung der Samenmenge durch Einstellung des Kammabstreifers, Sägerät 1, Baldrian, 0,19 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

#### 4.3.3 Ergebnisse Abstreifer Einstellung Sägerät 2

Sägerät 2 wurde zur Abstreifereinstellung mit und 0,79 km/h und 0,26 km/h betrieben.

Zu unterscheiden ist, dass das Sägerät 2 gegenüber Sägerät 1 über einen zusätzlichen Feinabstreifer verfügte. Hier konnte nach einer Einstellung des Kammabstreifers (siehe Abb. 24 und 25) mit Hilfe des Feinabstreifers die Belegung der Lochsäscheibe nachjustiert werden (siehe Abb. 26). Die Veränderung der Sämengen durch den Feinabstreifer (siehe Abb. 26) zeigt, dass hier im Gegensatz zum Kammabstreifer eine zusätzliche, feinere Einstellung vorgenommen wurde. Wie auch die Einstellung mit dem Kammabstreifer hat die Einstellung der Saatgutbelegung mit dem Feinabstreifer, im Bezug auf die abgeworfene Samenmenge, das Bild eines Polynoms.

Eine Mehrfachbelegung der Lochsächeiben mit dem Saatgut Baldrian war ebenfalls nicht zu vermeiden.

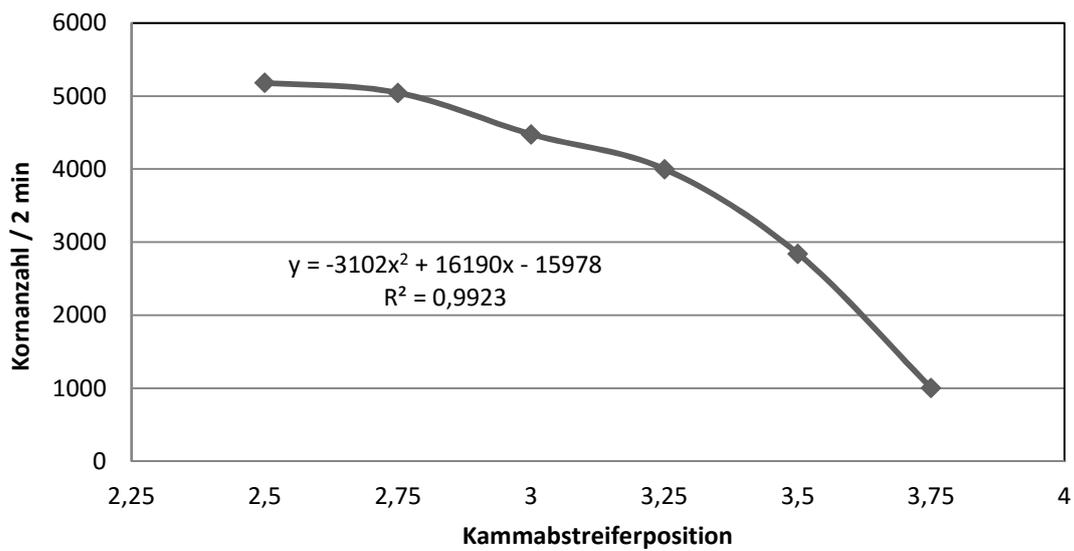


Abbildung 24: Änderung der Samenmenge durch Einstellung des Kammabstreifers, Sägerät 2, Baldrian, 0,79 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

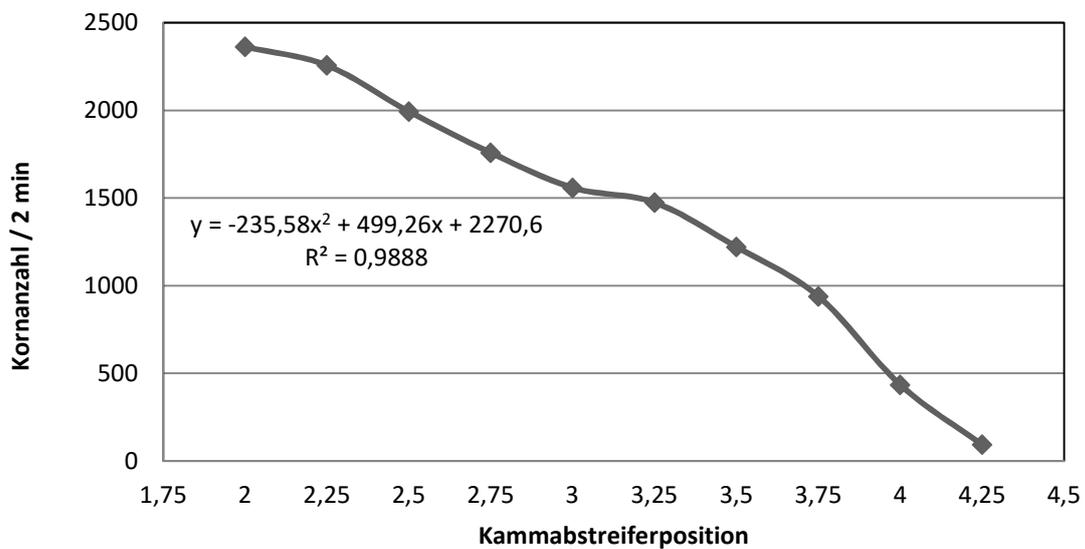


Abbildung 25: Änderung der Samenmenge durch Einstellung des Kammabstreifers, Sägerät 2, Melisse, 0,26 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

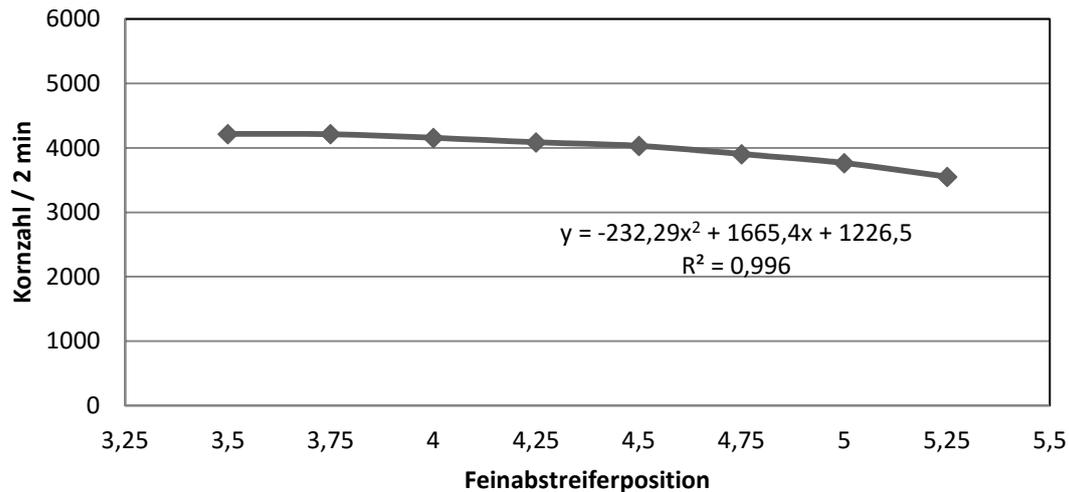


Abbildung 26: Änderung der Samenmenge durch zusätzliche Einstellung des Feinabstreifers, Sägerät 2, Baldrian, 0,79 km/h, 220 Lochsäscheibe, Kammabstreiferposition 3, Aufnahmedauer 120 s / Messung

#### 4.3.4 Unterdruckeinfluss der Sägeräte auf die Einzelungsgüte

Um den Einfluss des Unterdruckes der Sägeräte auf die Saatguteinzelung und Saatgutablage zu untersuchen, wurden für beide Sägeräte und Saatgüter Aufnahmen mit steigendem Unterdruck in 5 Pa Schritten gemacht. Zusätzlich wurde untersucht wie sich Unterdruck und steigende Fahrgeschwindigkeit zueinander verhalten. Hierzu wurde für jede Unterdruckstufe die Fahrgeschwindigkeit von 0,6 km/h bis 2 km/h in 0,2 km/h Schritten erhöht.

Es zeigte sich, dass für eine ausreichende Belegung der Lochsächeiben der Sägeräte bei allen Testsaatgütern mindestens ein Unterdruck von 30 Pa oder höher bereitgestellt werden muss. Mit steigendem Unterdruck bildete sich ein degressiv steigender Verlauf der Kornanzahl (siehe Abb. 27).

Der pos. ber. Mittelwert der Kornabstände sowie der Variationskoeffizient pendelten sich mit steigendem Unterdruck auf ein regelmäßiges Maß ein und unterlagen keinen Schwankungen durch Druckveränderungen. Auch die pos. ber. Standardabweichung war durch steigenden Unterdruck über 30 Pa nicht beeinflusst.

Eine steigende Fahrgeschwindigkeit hatte keinen Einfluss auf die Belegung der Löcher der Sächeiben. Mit einem Unterdruck von bereits 20 Pa konnte nachgewiesen werden, dass die Samenanzahl linear ( $R^2 = 0,99$ ) zur Fahrgeschwindigkeit steigt (siehe Abb. 28).

Diese Ergebnisse stimmen für beide verwendeten Sägeräte mit allen Saatgütern überein.

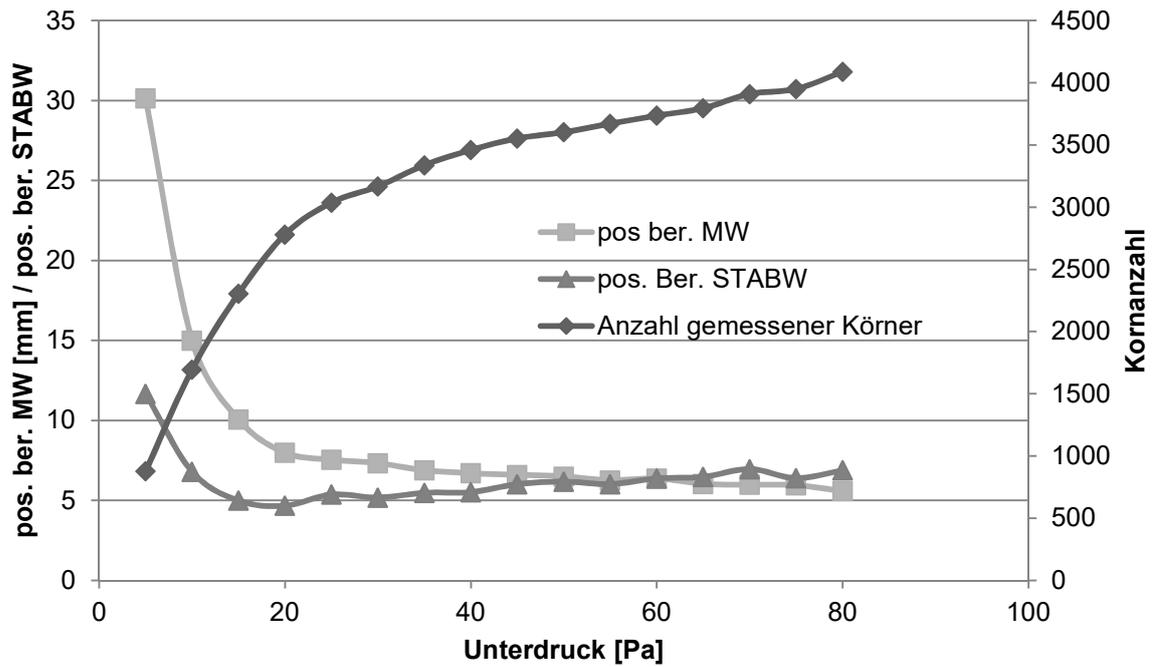


Abbildung 27: Änderung der Samenmenge, des pos ber. Mittelwertes und der pos. ber Standardabweichung der Kornabstände durch Erhöhung des Unterdrucks, Sägerät 2, Baldrian, 0,79 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmezeit 120 s / Messung

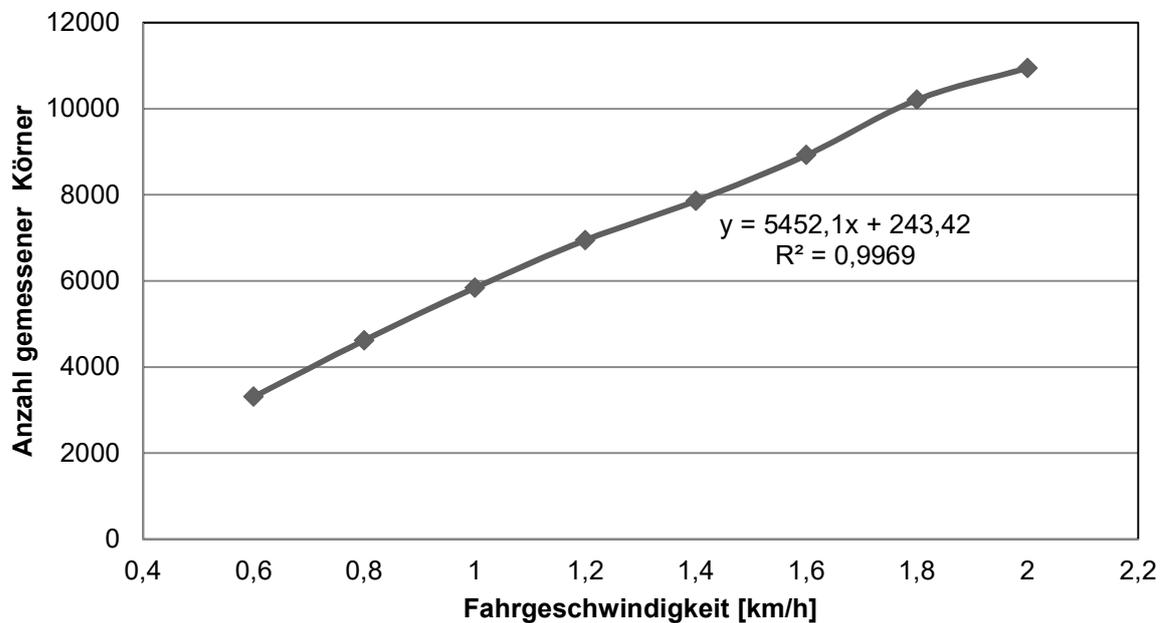


Abbildung 28: Änderung der Samenmenge durch steigende Fahrgeschwindigkeit, Sägerät 1, Melisse, Unterdruck 30 Pa, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmezeit 120 s / Messung

#### 4.3.5 Ergebnisse Überdruckeinfluss Sägerät 1

Für das Sägerät 1 wurde der Überdruck variabel von 30 Pa bis 175 Pa in unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten simuliert. Die Messergebnisse zeigen, dass bereits ein Überdruck von 30 Pa ausreicht um die Säscheiben der Geräte freizuhalten. Bei steigendem Überdruck sinkt die Anzahl der Körner auf der Säscheibe allerdings wieder leicht (siehe Abb. 29).

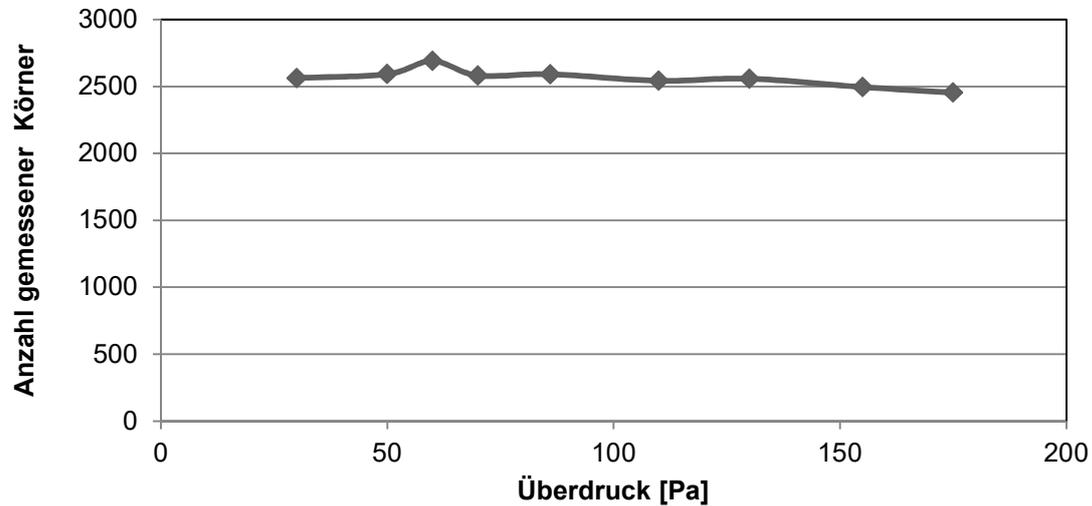


Abbildung 29: Änderung der Samenmenge durch steigenden Überdruck, Sägerät 1, Melisse, Überdruck 30 Pa bis 175 Pa, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

### 4.3.6 Ergebnisse Überdruckeinfluss Sägerät 2

Da das Sägerät 2 über einen eigenen zapfwellenangetriebenen Kompressor verfügt, der mit 200.000 Pa das Vielfache des Drucks von Sägerät 1 liefert, wurden für Sägerät 2 nur Versuche mit 200.000 Pa Druck aufgenommen. Es wurde durch fünffache Wiederholungsmessung nachgewiesen, dass mit diesem Druck, auch bei variierenden Fahrgeschwindigkeiten, an der Lochsäscheibe kein Zusetzen der Löcher auftritt. Die Samenverteilung war bei den Wiederholungsmessungen durchgehend gleichmäßig (siehe Abb. 30).

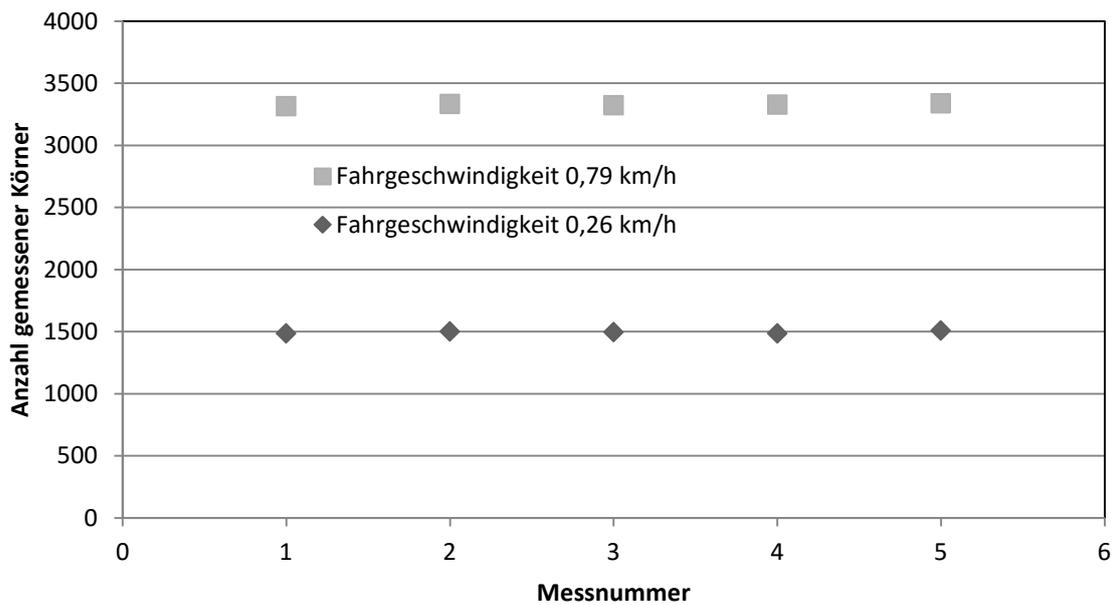


Abbildung 30: Änderung der Samenmenge bei gleichbleibendem Überdruck, Fahrgeschwindigkeiten 0,26 km/h und 0,79 km/h, Sägerät 2, Melisse, Überdruck 200.000 Pa, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

#### **4.3.7 Ergebnisse Fahrgeschwindigkeit Sägerät 1**

Für Sägerät 1 wurden anfänglich mit beiden Feinstsämereien Fahrgeschwindigkeiten von 0,6 km/h bis 3 km/h simuliert.

Die Ergebnisse zeigen bereits bei der kleinsten Geschwindigkeitsstufe von 0,6 km/h eine sehr ungenaue Verteilung der aufgezeichneten Samen. Mit steigender Geschwindigkeit nahm diese Ungenauigkeit zu und das Bild der mehrgipfeligen Normalverteilung einer Einzelkornsaat verschob sich hin zu dem einer Drillsaat.

Alle ausgewerteten Daten zeigten dasselbe Ergebnis hinsichtlich dieser Erkenntnis. So stiegen die Standardabweichung, sowie alle anderen aussagekräftigen Bewertungsparameter mit zunehmender Geschwindigkeit an.

Bei Sämaschine 1 kam es ab Geschwindigkeiten von 2,5 km/h zu erhöhtem Kornbruch.

Während bei einer geringen Fahrgeschwindigkeit die Samen durch Sägerät 1 in einem kleinen Streifenfenster von 1 cm in Fahrtrichtung unter dem Schar abgelegt wurden (siehe Abb. 32 und 40), verteilten sich diese bei höheren Geschwindigkeiten auf über 5 cm in Fahrtrichtung unter dem Säschar (siehe Abb. 38 und 46).

Bei höheren Geschwindigkeiten von über 1 km/h bildeten sich unter Sägerät 1, verursacht durch den Zwangsabstreifer, ungenaue Positionsablagebilder (siehe Abb. 38 und 40).

Erst ab Fahrgeschwindigkeiten von 0,6 km/h und darunter konnten erkennbare mehrgipfelige Verteilungen festgestellt werden (siehe Abb. 31, 33, 39 und 41).

#### 4.3.8 Zeitabstände zwischen zwei vermessenen Körnern, Sägerät 1 mit Melisse

Die Histogramme zeigen die zeitlichen Kornabstände zwischen zwei aufgezeichneten Körnern und die zugehörigen Positionen der Körner unter dem Schar und werden in steigender Geschwindigkeit aufgelistet. Die gezeigten Zeit- und Positionsdiagramme sind derselben Messung entnommen. Durch Analyse der vorliegenden Histogramme wird die zunehmende Ungenauigkeit der Saatguteinzelung und Ablage durch steigende Fahrgeschwindigkeit deutlich.

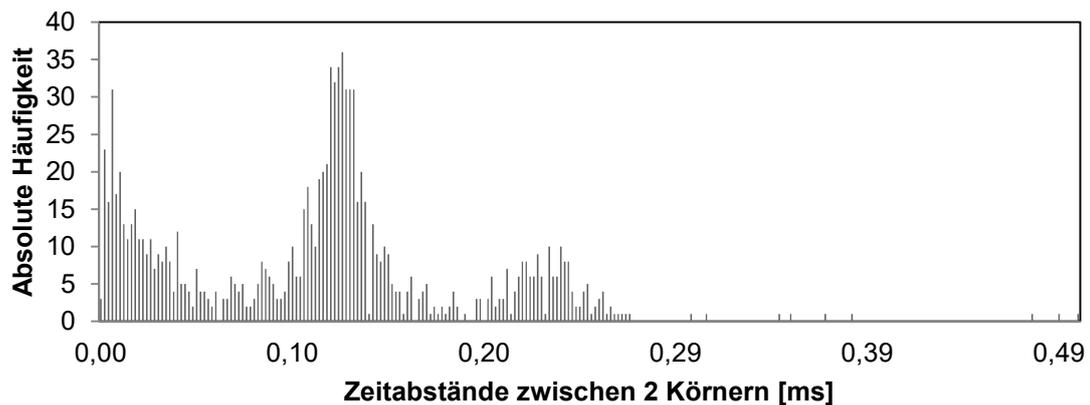


Abbildung 31: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,19 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

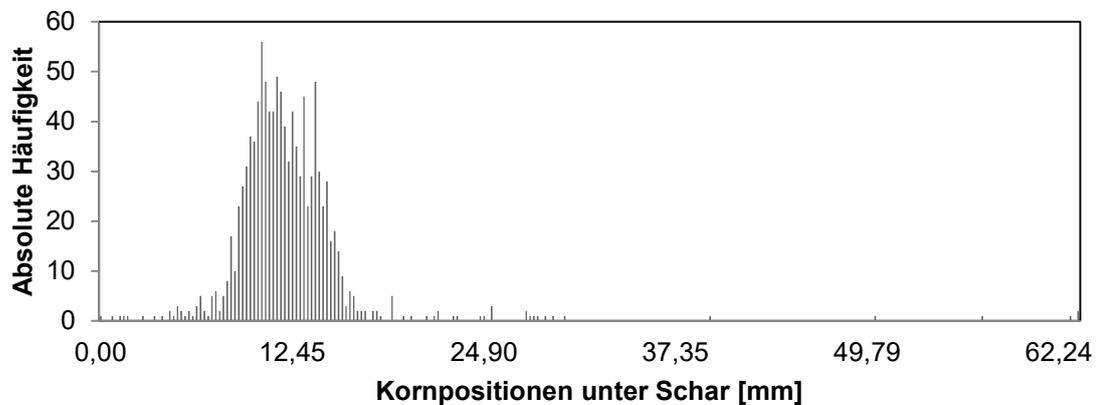


Abbildung 32: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,19 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

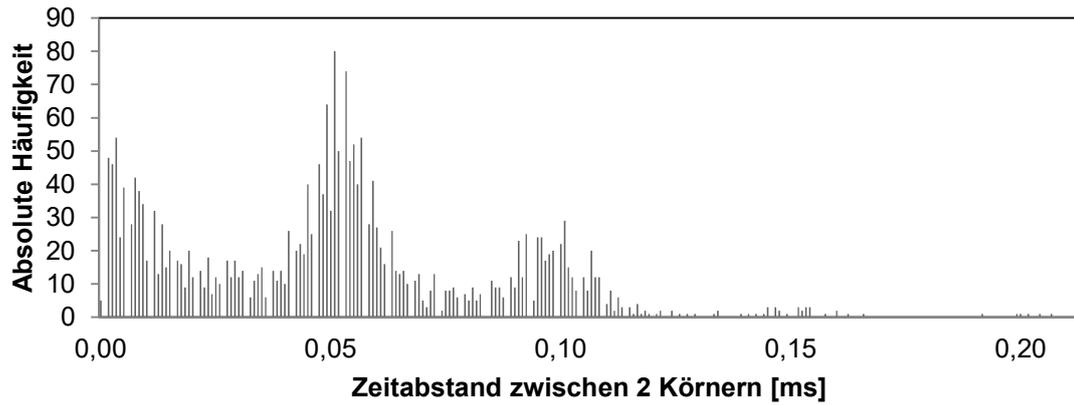


Abbildung 33: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,6 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

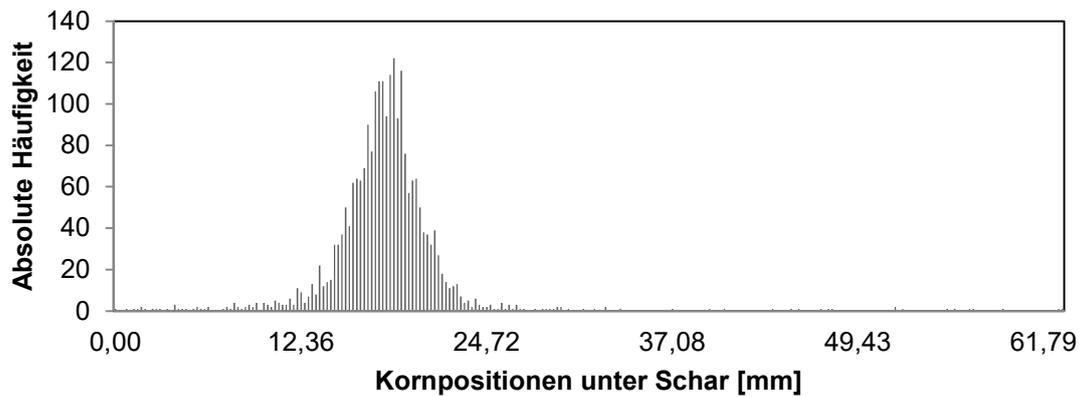


Abbildung 34: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,6 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

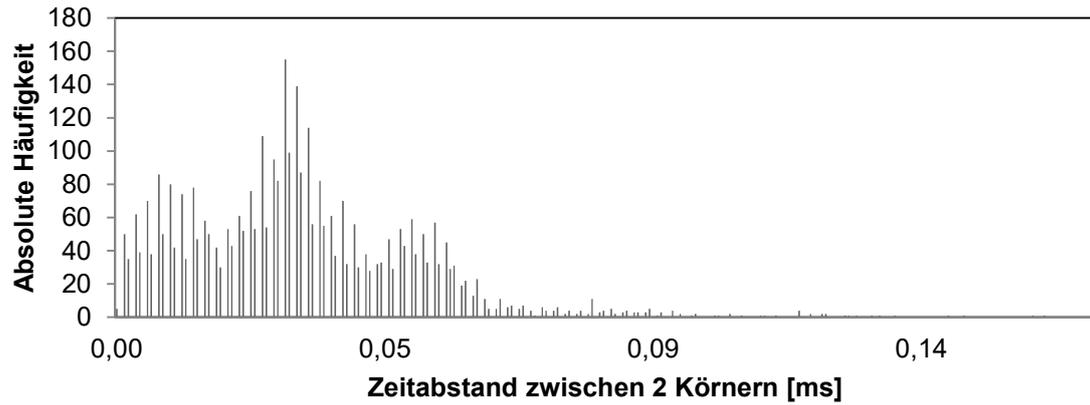


Abbildung 35: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 1,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

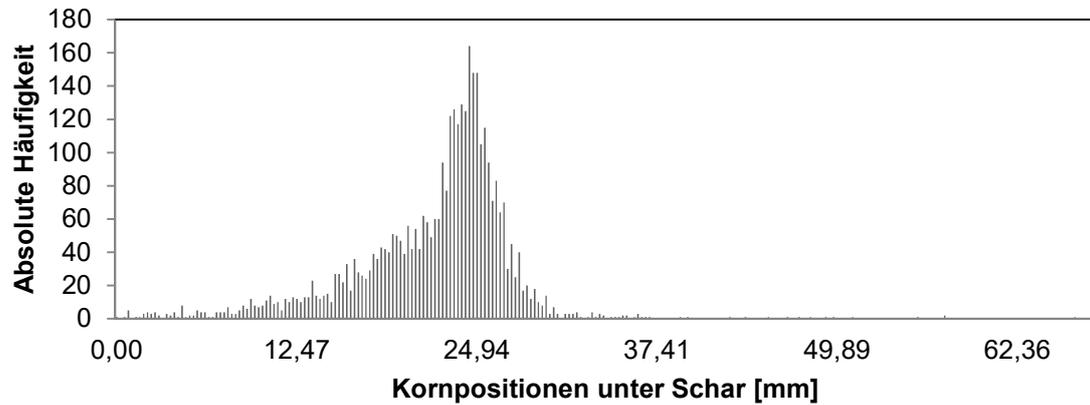


Abbildung 36: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 1,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

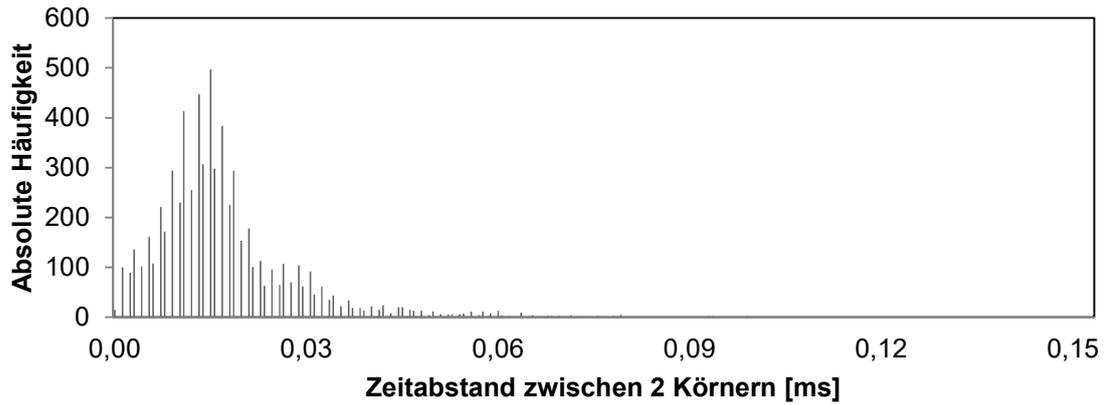


Abbildung 37: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 2,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

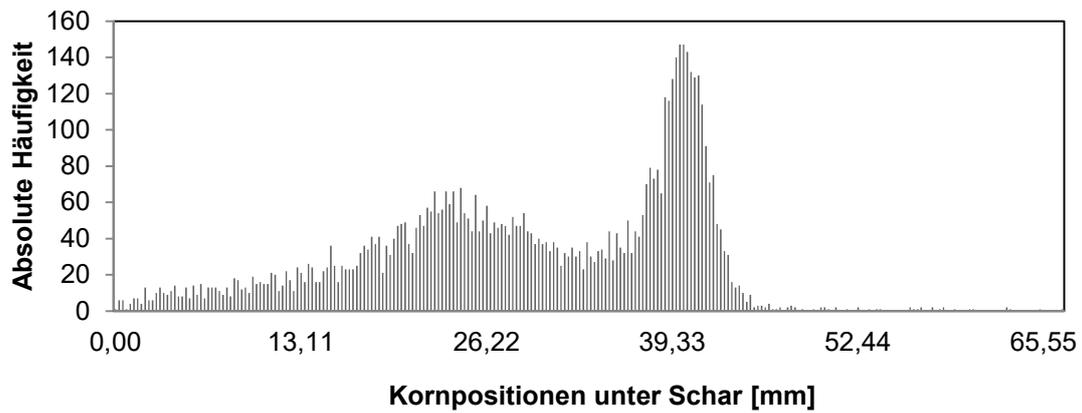


Abbildung 38: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 2,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

#### 4.3.9 Zeitabstände zwischen zwei vermessenen Körnern und zugehörige Positionen unter dem Schar, Sägerät 1 mit Baldrian

Die folgenden Abbildungen zeigen die zeitlichen Kornabstände zwischen zwei aufgezeichneten Körnern und die zugehörigen Positionen der Körner unter dem Schar und werden in steigender Geschwindigkeit aufgelistet. Die gezeigten Zeit- und Positionsdiagramme sind derselben Messung entnommen. Durch Analyse der vorliegenden Histogramme wird die zunehmende Ungenauigkeit der Saatguteinzelung und Ablage durch steigende Fahrgeschwindigkeit deutlich.

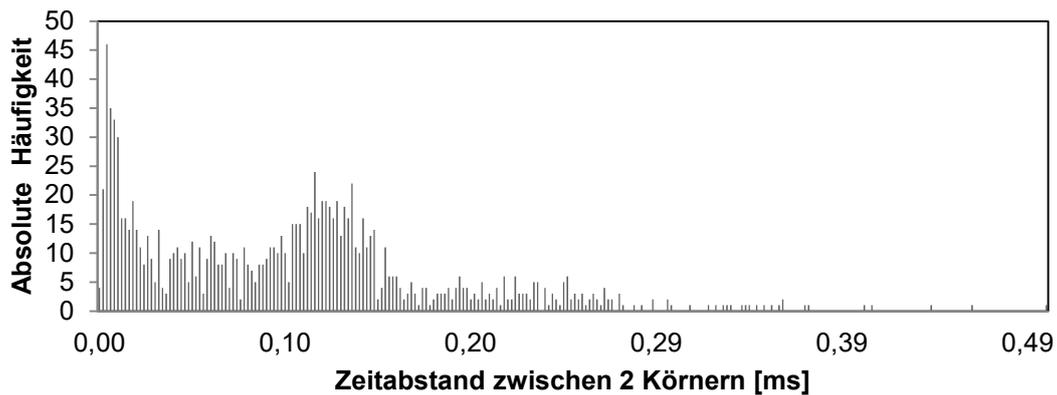


Abbildung 39: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,19 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

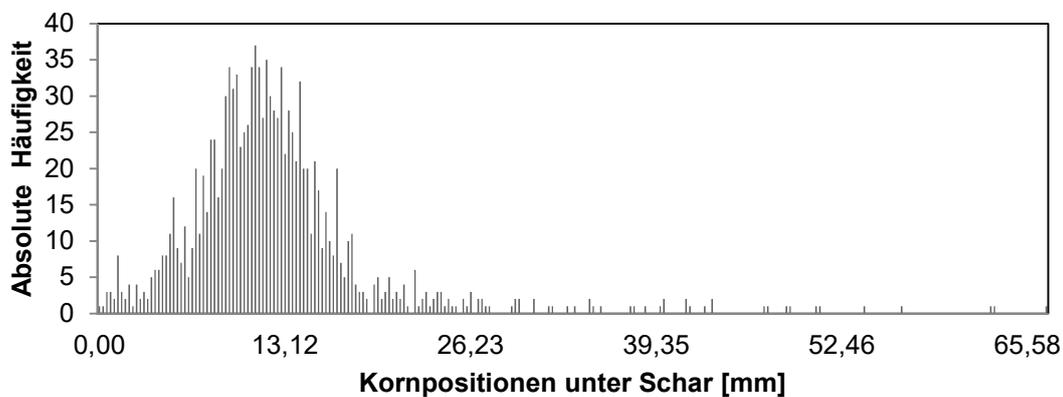


Abbildung 40: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,19 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

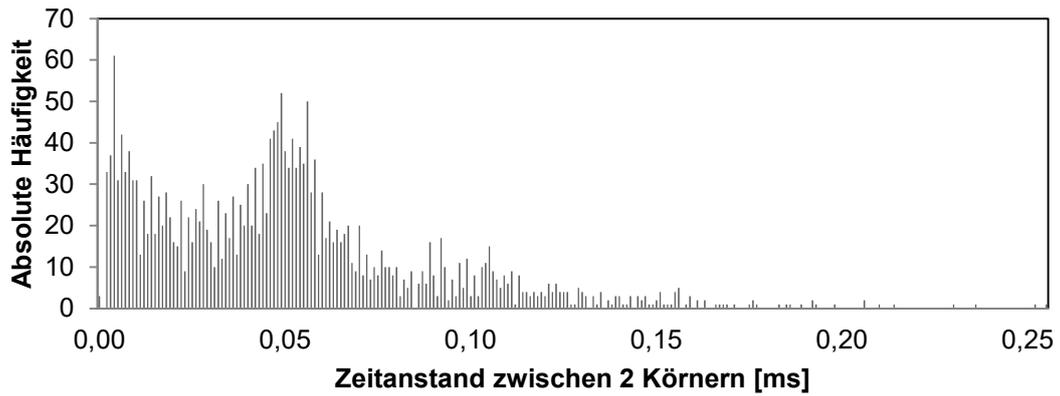


Abbildung 41: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,6 km/h, 160 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

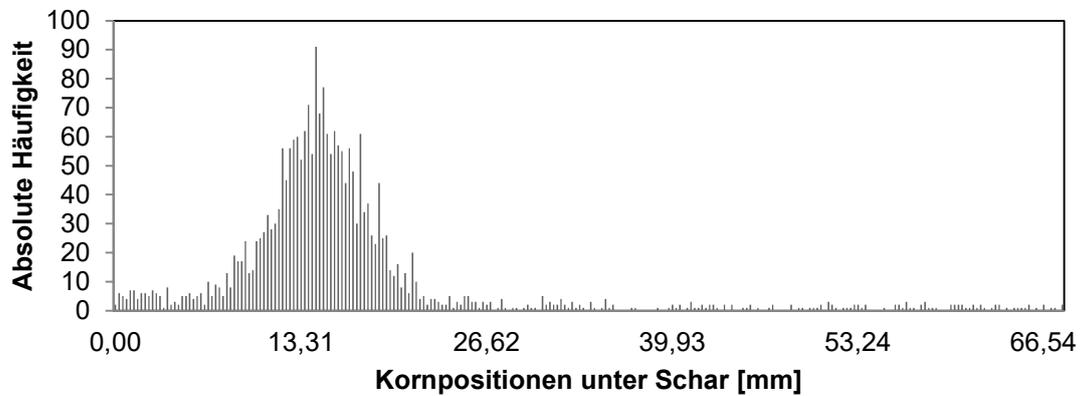


Abbildung 42: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,6 km/h, 160 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

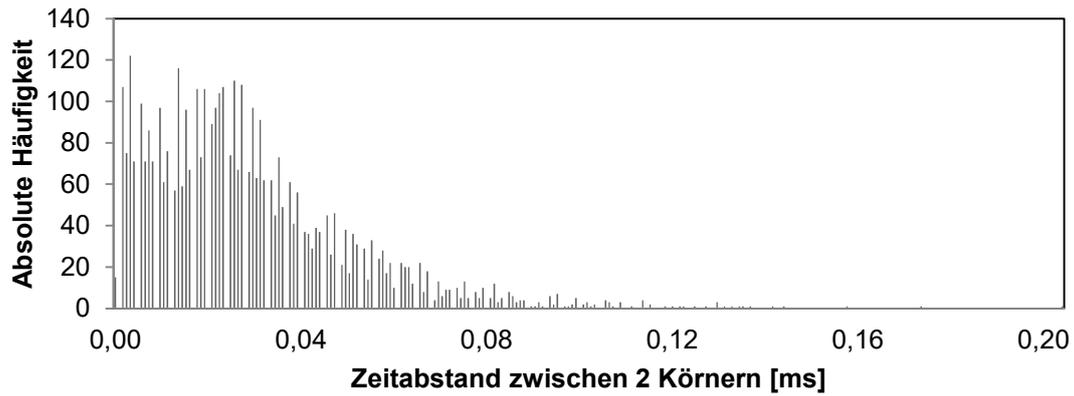


Abbildung 43: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 1,2 km/h, 160 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

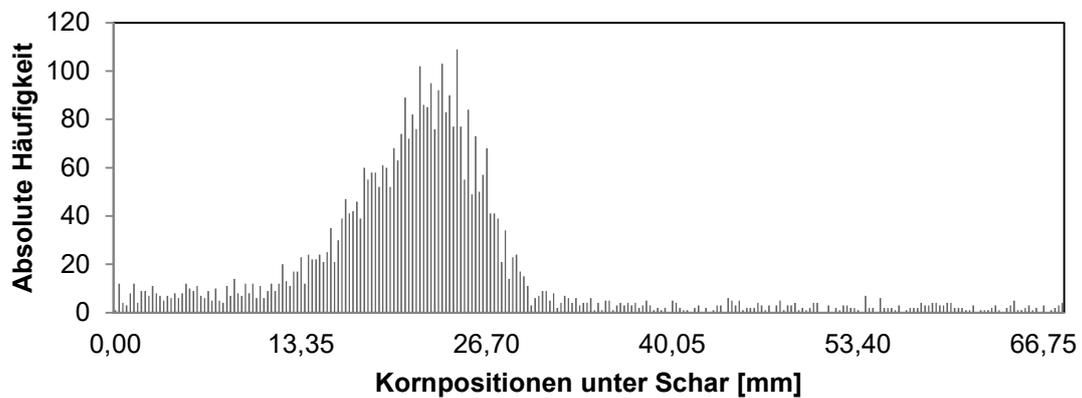


Abbildung 44: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 1,2 km/h, 160 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

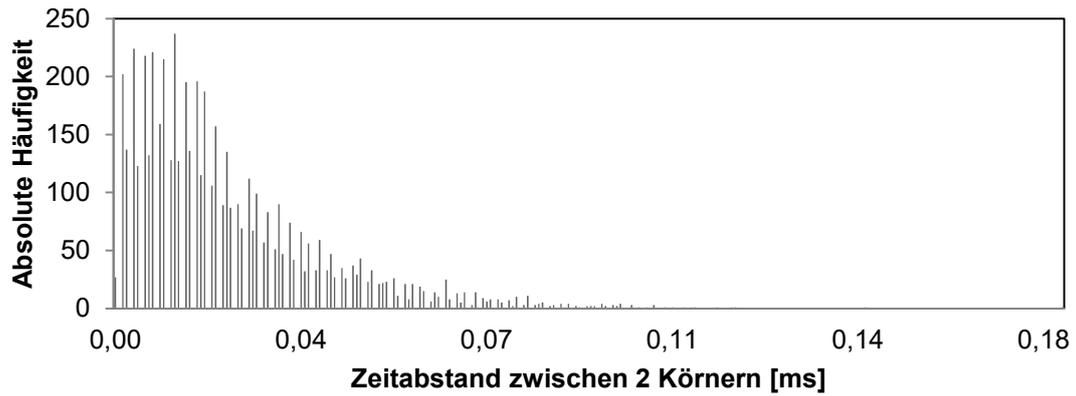


Abbildung 45: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 2,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

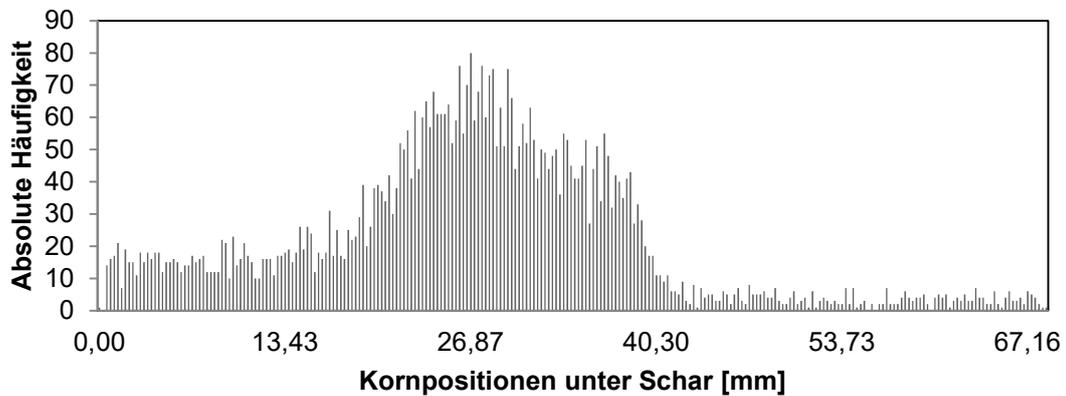


Abbildung 46: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 1, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 2,0 km/h, 160 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

#### 4.3.10 Ergebnisse Fahrgeschwindigkeit Sägerät 2

Mit Sägerät 2 wurden die Fahrgeschwindigkeiten von 0,26 km/h bis 4,2 km/h simuliert. Alle Versuche wurden ebenfalls mit Melisse und Baldrian durchgeführt.

Die Messergebnisse zeigen, wie auch bei Sägerät 1, eine ungenaue Verteilung. Mit Geschwindigkeiten unter 0,79 km/h konnte eine mehrgipfelige Verteilung erreicht werden (siehe Abb. 47, 49, 57 und 59). Über 0,79 km/h Fahrgeschwindigkeit kann keine eindeutige mehrgipfelige Verteilung bestimmt werden (siehe Abb. 51, 53, 55 und 61).

Mit Sägerät 2 konnten Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 4 km/h (mit geringem Kornbruch) realisiert werden. Dies ist der konvexen Kammabstreiferform zuzuschreiben, Dennoch nahmen die ausgewerteten Kornverteilungen das Bild einer Exponentialverteilung an (siehe Abb. 51, 53, 55 und 61).

Ersichtlich wurde bei höheren Geschwindigkeiten der Vorteil des Abstreifers, sowie des 3,5 cm kleineren Saatgutausslasses von Sägerät 2. Mit einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 4 km/h wurde ein Streufenster von 2 cm unter dem Säschar nicht durch viele Körner überschritten (siehe Abb. 56). Darüber hinaus bildete die Positionsverteilung der Saaten unter dem Schar von Sägerät 2 immer eine einfache Normalverteilung (siehe Abb. 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60 und 62). Der Mittelpunkt dieser gemessenen Positionsverteilungen lag je nach eingestellter Fahrgeschwindigkeit an einem anderen Ausgabepunkt unter dem Säschar (siehe Abb. 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60 und 62).

Trotz steigender Ungenauigkeit des Ablagebildes der Sägeräte kam es durch eine steigende Fahrgeschwindigkeit nicht zu einer Veränderung der eingestellten Samenanzahl. Diese stieg mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,99$  linear zur Fahrgeschwindigkeit (siehe Abb. 28).

#### 4.3.11 Zeitabstände zwischen zwei vermessenen Körnern und zugehörige Positionen unter dem Schar, Sägerät 2 mit Melisse

Die folgenden Abbildungen zeigen die zeitlichen Kornabstände zwischen zwei aufgezeichneten Körnern und die zugehörigen Positionen der Körner unter dem Schar. Diese werden in steigender Geschwindigkeit aufgelistet. Die gezeigten Zeit- und Positionsdiagramme sind derselben Messung entnommen.

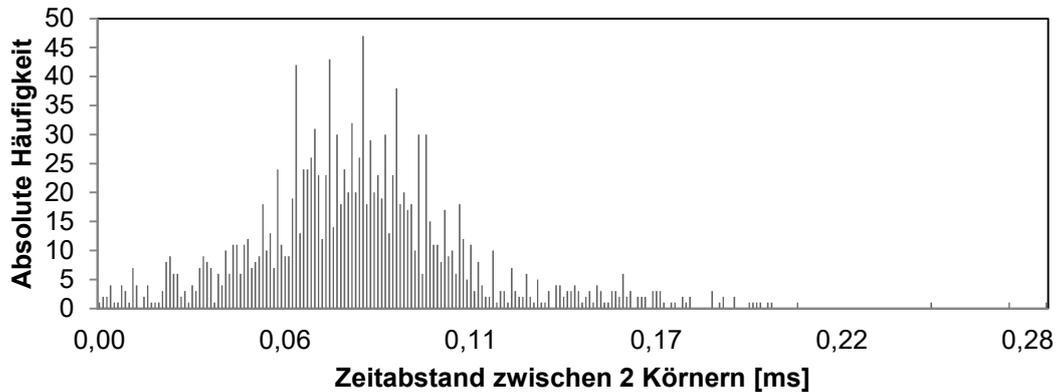


Abbildung 47: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,26 km/h, 220 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

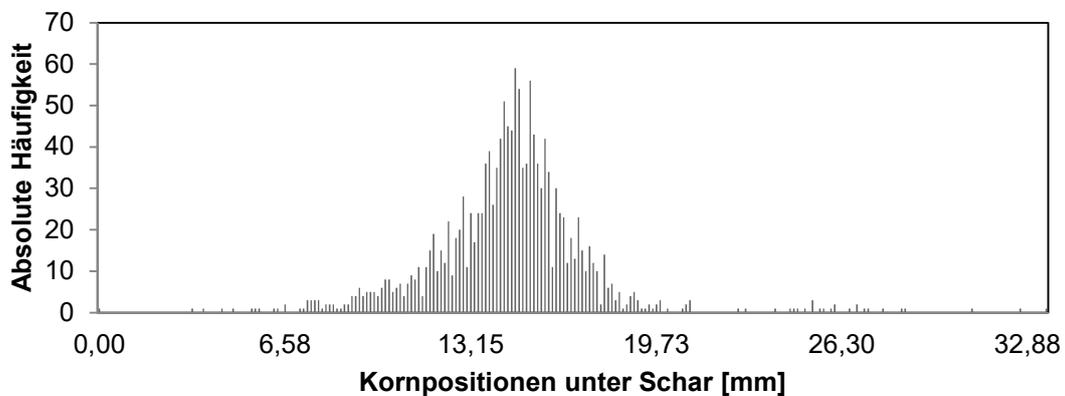


Abbildung 48: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,26 km/h, 220 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

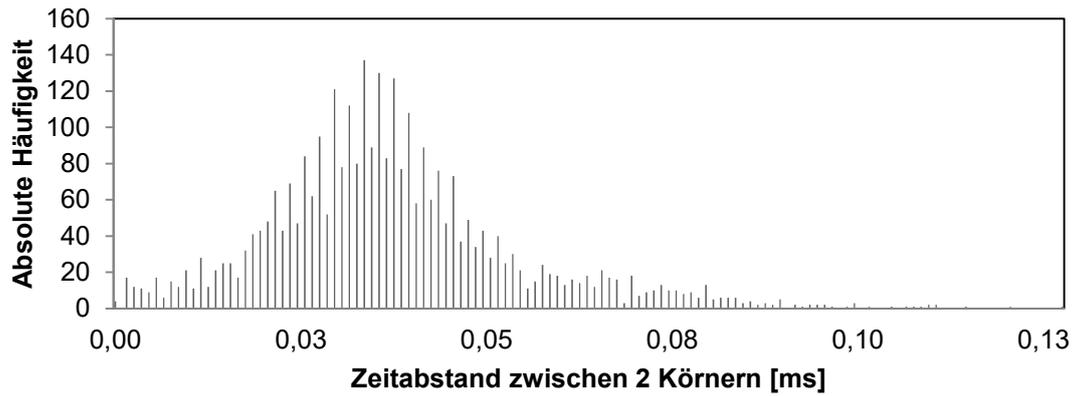


Abbildung 49: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,79 km/h, 220 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

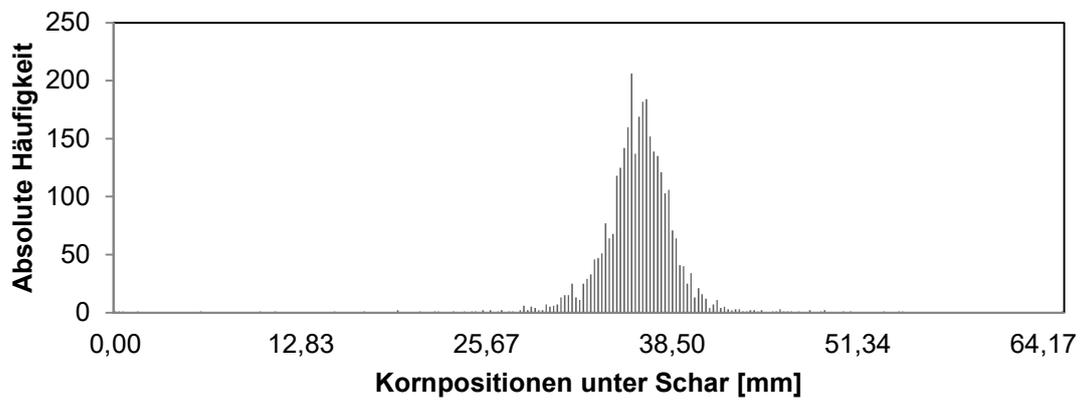


Abbildung 50: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,79 km/h, 220 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

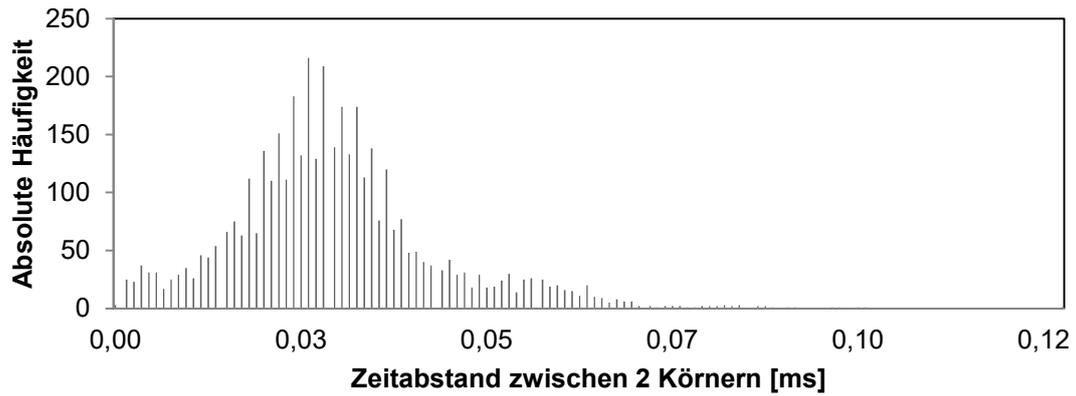


Abbildung 51: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,96 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

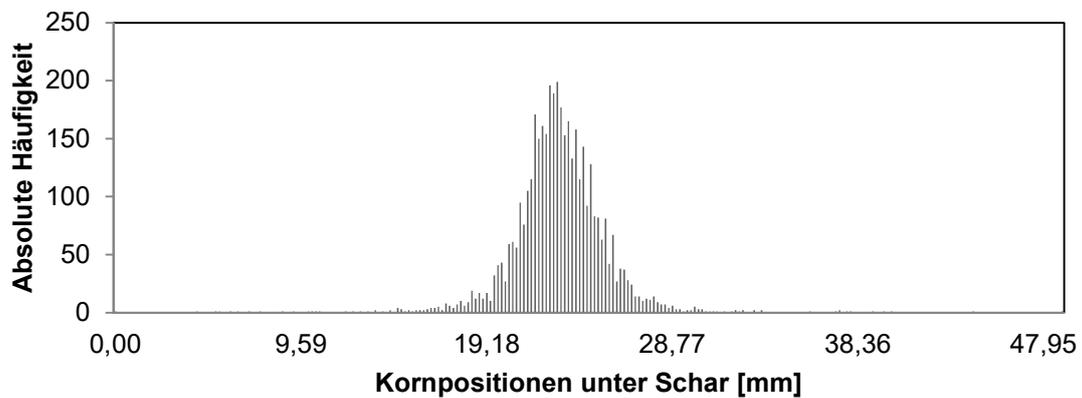


Abbildung 52: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,96 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

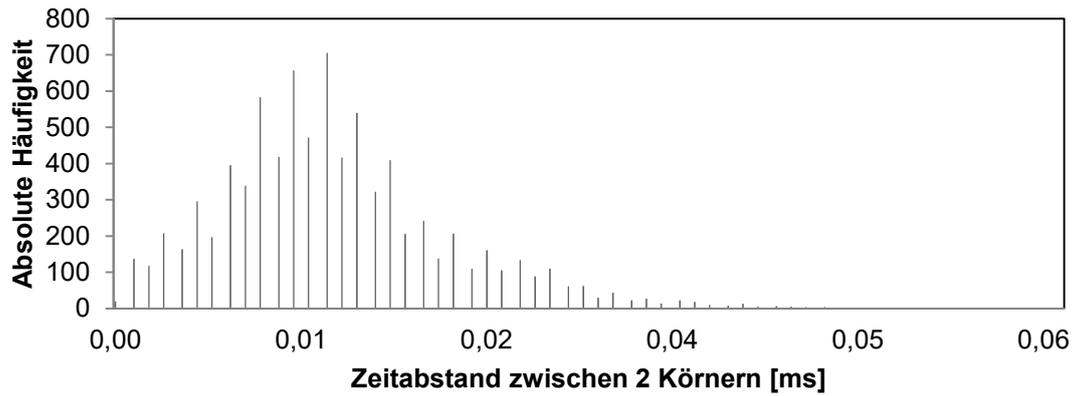


Abbildung 53: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 2,1 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

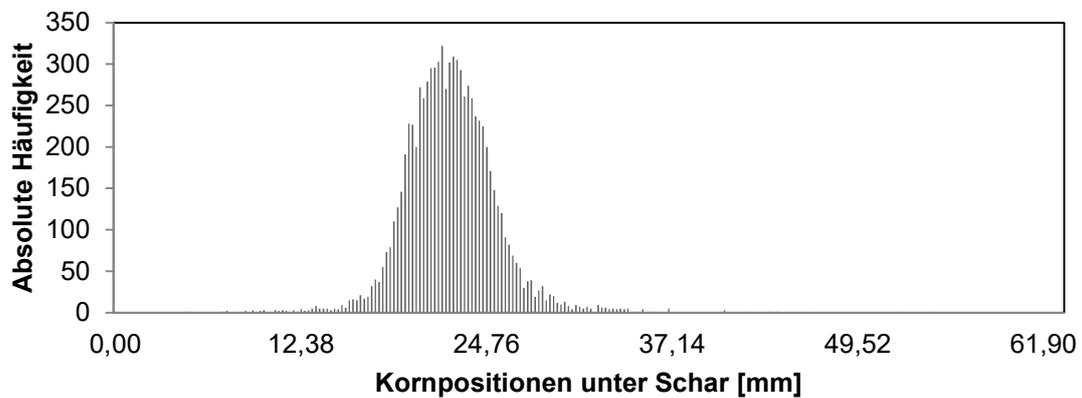


Abbildung 54: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 2,1 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

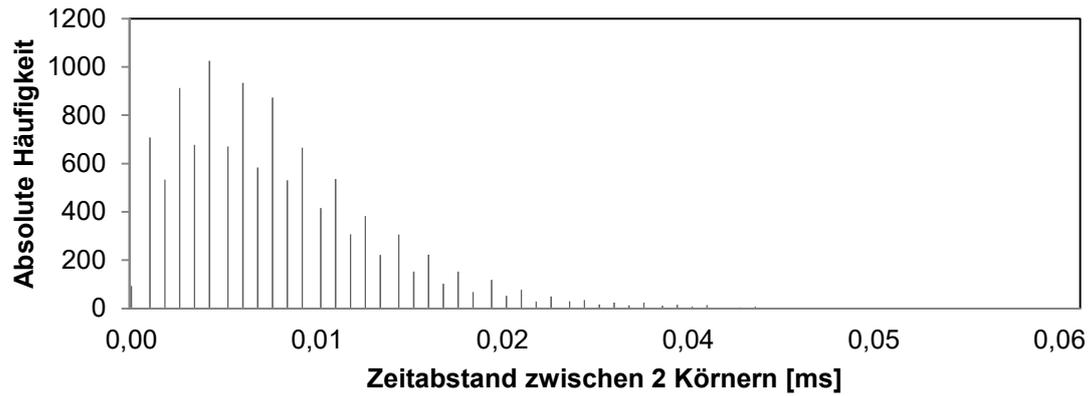


Abbildung 55: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 4,2 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

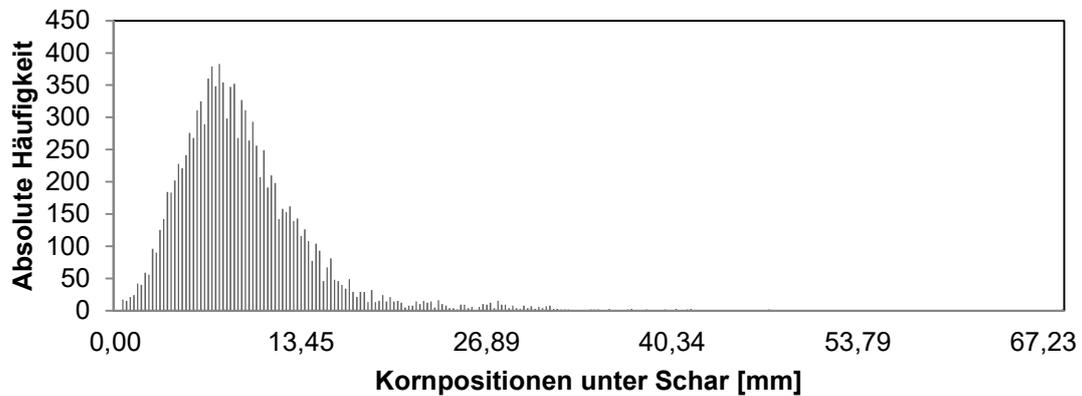


Abbildung 56: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 4,2 km/h, 220 Lochsäscheibe, Aufnahmedauer 120 s / Messung

#### 4.3.12 Zeitabstände zwischen zwei vermessenen Körnern und zugehörige Positionen unter dem Schar, Sägerät 2 mit Baldrian

Die Ergebnishistogramme zeigen die zeitlichen Kornabstände zwischen zwei aufgezeichneten Körnern und die zugehörigen Positionen der Körner unter dem Schar und werden in steigender Geschwindigkeit aufgelistet. Die gezeigten Zeit- und Positionsdiagramme sind derselben Messung entnommen.

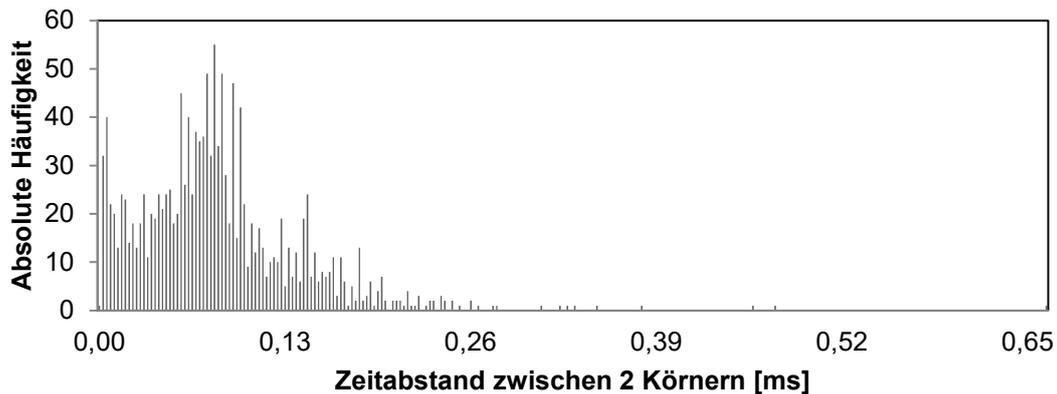


Abbildung 57: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,26 km/h, 220 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

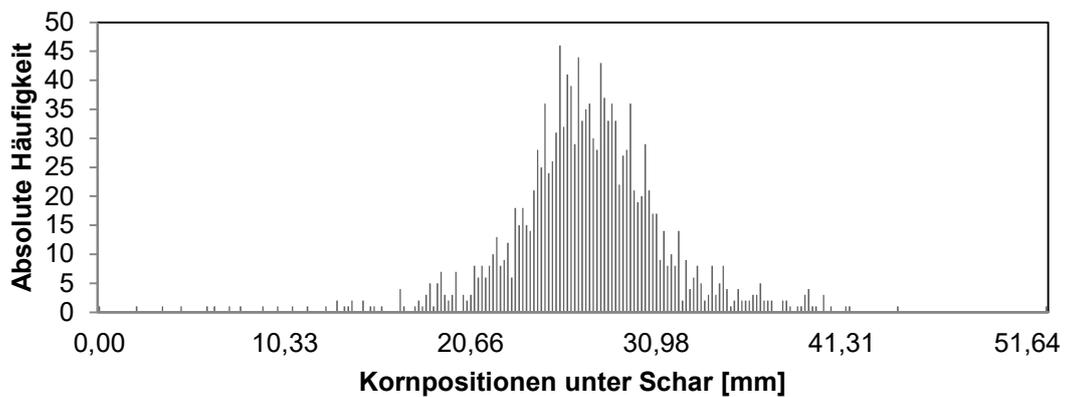


Abbildung 58: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,26 km/h, 220 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

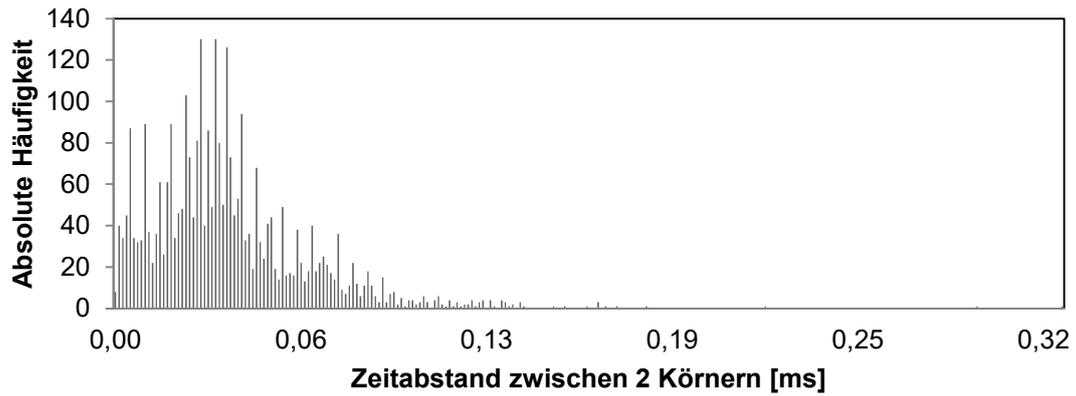


Abbildung 59: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,79 km/h, 220 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

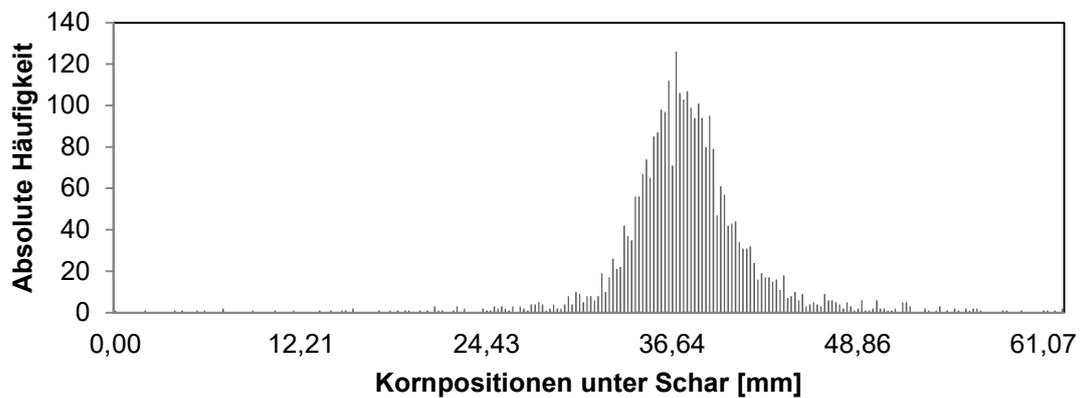


Abbildung 60: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 0,79 km/h, 220 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

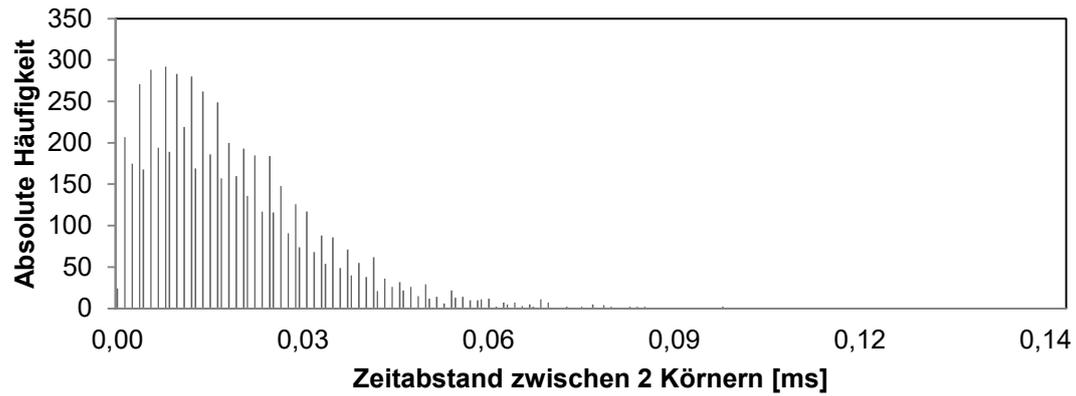


Abbildung 61: Gemessene Zeitabstände zwischen zwei Körnern, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 2,1 km/h, 220 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

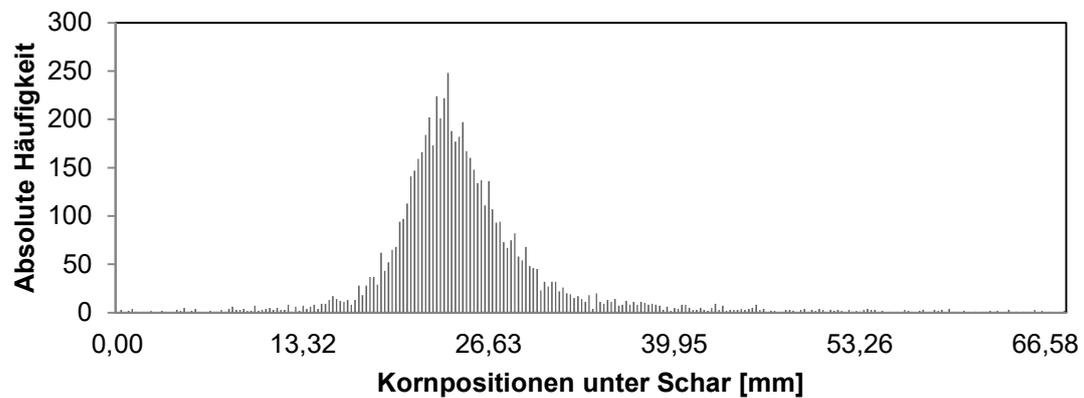


Abbildung 62: Kornpositionen unter Schar, Sägerät 2, Baldrian, Fahrgeschwindigkeit 2,1 km/h, 220 Lochsäge, Aufnahmezeit 120 s / Messung

### 4.3.13 Ergebnisse zur Querverteilung der Sägeräte

Durch Querstellung des Sensors und Aufnahme der Samenpositionen unter beiden Sägeräten wurde deutlich, dass die durch das Schar ausgegebenen Samen immer in Fahrtrichtung linksseitig abgelegt werden. Dies ist zurückzuführen auf die Position der Lochsäscheiben, an denen die Samen linksseitig angesaugt werden.

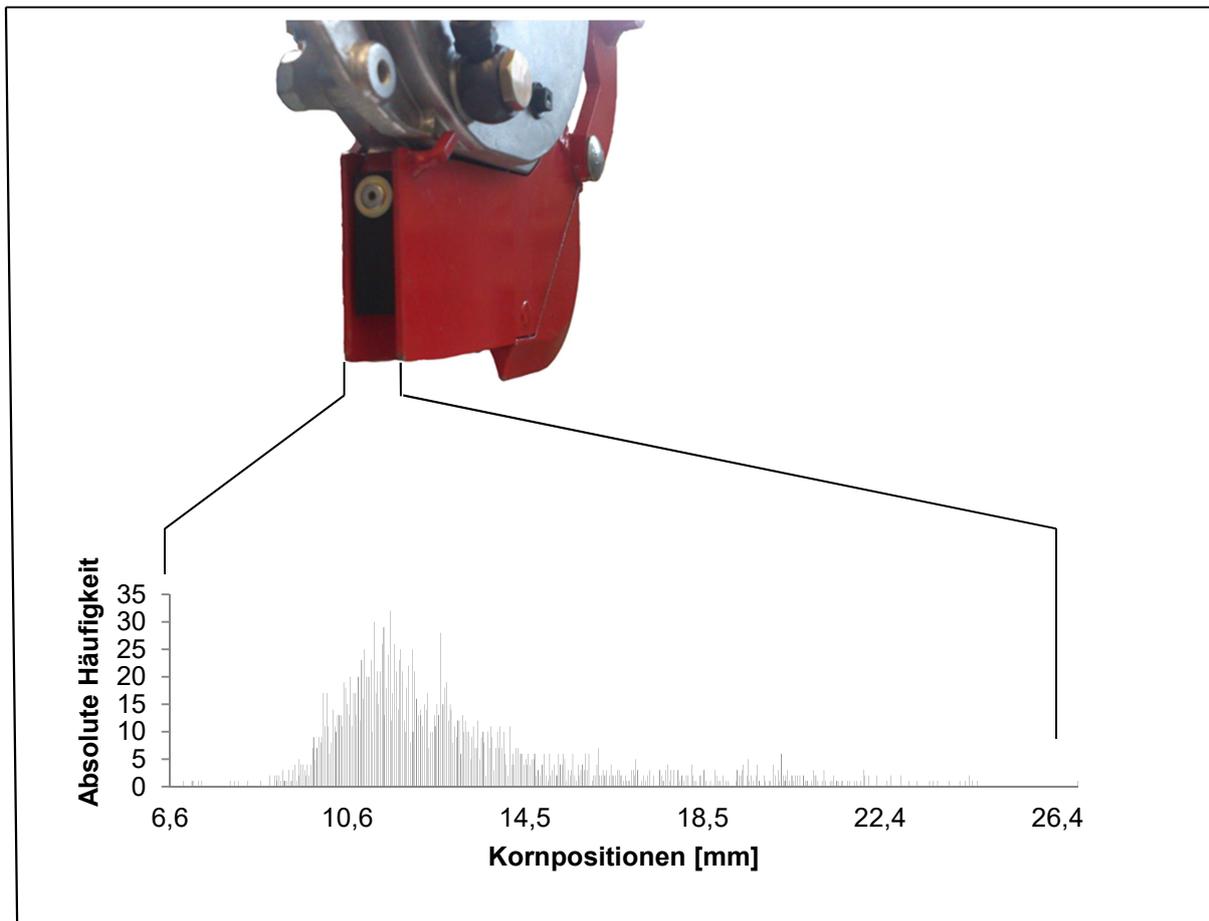


Abbildung 63: Querverteilungen der aufgezeichneten Samen unter dem Schar, Sägerät 1, Melisse, Fahrgeschwindigkeit 0,6 km/h, 160 Lochsäscheibe

#### 4.3.14 Messung mit umgedrehter Scheibe mit Sägerät 1

Zusätzlich zu der normalen Einbauweise ist es möglich die Lochsäscheiben bei Sägerät 1 umgedreht einzusetzen um die Senkungen der Sälöcher außen zu positionieren. Hierdurch wurde versucht eine bessere Einzelung herzustellen.

Durch den gedrehten Einbau der Säscheibe konnte keine bessere Einzelung erzielt werden. Vielmehr griffen die Außenseiten der Senkungen den Plastikabstreifer des Sägerätes an und verursachten Vertiefungen (siehe Abb. 64). Ferner wurde das Saatgut aufgrund der Senkungen nicht hinreichend durch den Abstreifer erfasst, setzte sich zwischen diesen und die Säscheibe und setzte somit den Abstreifprozess außer Kraft. Am Zwangsabstreifer vorbeigeführtes Saatgut wurde entweder durch die Reinigungsdüse ausgeblasen oder wieder zurück in den Saatgutbehälter geführt. Der Einsatz einer Säscheibe mit Senkungen ist nicht zu empfehlen.



Abbildung 64: Durch umgedrehten Einbau der Lochsäscheibe verursachter Schaden am Zwangsabstreifer, Sägerät 1, oben: neuer Abstreifer, unten: beschädigter Abstreifer

#### **4.3.15 Messungen mit unterschiedlichen Säscheiben mit Sägerät 1**

Um Effekte der Fahrgeschwindigkeit auf unterschiedliche Säscheiben mit verschiedener Lochanzahl auszuschließen, wurden Versuche mit einer 160- und 320 Lochsäscheibe am Sägerät 1 in fünffacher Wiederholung aufgezeichnet.

Zusätzlich wurde die Einzelungsgenauigkeit bei einer Vergrößerung des Sälochdurchmessers mit einer 40 Lochsäscheibe mit einer Bohrung von 0,8 mm Durchmesser, statt der üblichen 0,6 mm, geprüft.

Es konnte kein Unterschied in der Einzelungsqualität zwischen der Ablage mit einer 160- und einer 320 Lochsäscheibe festgestellt werden. Durch den Einsatz der doppelten Lochanzahl verdoppelte sich die Samenmenge (siehe Tab.10). Die Erhöhung des Lochdurchmessers um 0,2 mm führte zu einer starken Mehrfachbelegung der Säscheibe und einer starken Erhöhung des Variationskoeffizienten (siehe Tab.10).

Tabelle 10: Einzelungsgenauigkeit verschiedener Säscheiben, Sägerät 1, (Mittelwerte aus fünf Wiederholungen)

Saatgut	Fahrgeschwindigkeit [km/h]	Lochanzahl	Sälochdurchmesser [mm]	Kornanzahl	pos. ber. Mittelwert [mm]	pos. ber. Standardabweichung	(VK) [%]
<b>Melisse</b>	0,19	320	0,6	2118	3,23	3,97	72%
	0,6	320	0,6	4702	3,72	4,56	68%
	0,19	160	0,6	901	6,30	5,47	70%
	0,6	160	0,6	2036	8,70	3,96	65%
	0,19	40	0,8	476	13,11	14,12	99%
	0,6	40	0,8	846	25,02	14,31	117%
<b>Baldrian</b>	0,19	320	0,6	2381	2,49	8,81	89%
	0,6	320	0,6	3767	4,71	9,71	85%
	0,19	160	0,6	1219	5,15	7,20	79%
	0,6	160	0,6	2347	7,75	8,83	72%
	0,19	40	0,8	437	13,90	16,96	104%
	0,6	40	0,8	1182	16,09	16,56	99%

#### 4.3.16 Ergebnisse zur Einstellung und Reproduzierbarkeit Sägerät 1

Nach ausreichender Prüfung wurden für Sägerät 1 geeignete Einstellungen gefunden (siehe Tab. 11). Der Unterdruck sollte für alle geprüften Saatgüter und Geräte 30 Pa bis 35 Pa betragen. Der Überdruck von Sägerät 1 sollte mindestens 40 Pa betragen.

Folgende Abstreifereinstellungen stellten sich als geeignet heraus:

Tabelle 11: Geeignete Einstellungen zur Aussaat von Melisse und Baldrian mit Sägerät 1

	Melisse	Baldrian
<b>Abstreifereinstellung</b>	3,4	2,4
<b>Unterdruck [Pa]</b>	30 - 35	30 - 35
<b>Überdruck [Pa]</b>	40	40

Für Sägerät 1 sollte, um eine genaue Ablage nicht zu gefährden, keine Fahrgeschwindigkeit über 1 km/h angestrebt werden. Ab Geschwindigkeiten über 1 km/h kommt es zu einer starken Veränderung der Positionsablage der Samen unterhalb des Schares. Samen auf der Säscheibe werden nicht durch den Zwangsabstreifer abgelöst und weiter transportiert. Sie fallen weiter hinten am Säschar (siehe Abb. 34, 35, 42 und 43). Die fünffache Aufnahme von Sägerät 1 mit den Kulturen Melisse und Baldrian bei verschiedenen Geschwindigkeiten zeigt, dass die Ergebnisse der Ablage reproduzierbar sind (siehe Tab. 13). Die Anzahl der abgelegten Körner schwankt über alle Aufnahmen hinweg zwischen 0% und 2%. Dies bestätigt ebenfalls die Messung der Kornanzahl mit steigender Geschwindigkeit (siehe Abb. 28).

#### 4.3.17 Ergebnisse zur Einstellung und Reproduzierbarkeit Sägerät 2

Für Sägerät 2 wurden ebenfalls geeignete Einstellungen für die verwendeten Feinstsämereien gefunden (siehe Tab.12). Der Unterdruck für ein gutes Säergebnis mit Sägerät 2 sollte ebenfalls zwischen 30 Pa bis 35 Pa liegen.

Tabelle 12: Geeignete Einstellungen zur Aussaat von Melisse und Baldrian mit Sägerät 2

	<b>Melisse</b>	<b>Baldrian</b>
<b>Abstreifereinstellung Kammabstreifer</b>	3	3
<b>Abstreifereinstellung Feinabstreifer</b>	4,25	5
<b>Unterdruck [Pa]</b>	30 - 35	30 - 35

Mit Sägerät 2 können höhere Fahrgeschwindigkeiten realisiert werden. Es ist allerdings zu beachten, dass sich durch Erhöhung der Sägeschwindigkeit das Ablagebild der Samen von dem einer Einzelkornsaat zu dem einer Drillsaat verschiebt.

Die fünffache Aufnahme von Sägerät 2 zeigte ebenfalls Reproduzierbarkeit. Die Anzahl der abgelegten Körner schwankte ebenfalls über alle Aufnahmen hinweg zwischen 0% und 2% (siehe Tab. 13).

Tabelle 13: Kennwerte der Prüfung der Reproduzierbarkeit, Sägerät 1 und 2 mit Melisse und Baldrian, (Mittelwerte aus fünf Wiederholungen zu je 120 s)

Sägerät	1				2			
	Melisse		Baldrian		Melisse		Baldrian	
Fahrgeschwindigkeit [km/h]	0,19	0,6	19	0,6	0,26	0,79	0,26	0,79
Lochanzahl	160	160	160	160	220	220	220	220
Mittelwert Kornanzahl	901	2036	1219	2347	1483	3330	1523	3062
Standardabweichung Kornanzahl	16,08	14,57	21,34	16,85	21,47	9,04	36,04	64,15
Schwankung der Kornanzahl	2%	1%	2%	1%	1%	0%	2%	2%
Mittelwert Variationskoeffizient	70%	65%	79%	72%	49%	42%	71%	66%
Standardabweichung Variationskoeffizient	2%	1%	3%	1%	2%	2%	8%	1%
pos. ber. Mittelwert [mm]	6,30	8,70	5,15	7,75	5,34	7,33	5,09	7,46
pos. ber. Standardabweichung	5,47	3,96	7,20	8,83	3,41	2,90	4,58	4,92

#### 4.3.18 Messungen ohne Säscharre

Da die jeweiligen Säscharre unter den verwendeten Sägeräten die Fallhöhe der abgeworfenen Samen bestimmen, wurden diese zu Testzwecken demontiert, um den Einfluss der Fallhöhe auf die Säqualität zu quantifizieren. Die Prüfstandseinheit konnte so direkt unter dem Abwurf der Samen an den Säscheiben positioniert werden.

Die statistische Auswertung der Variationskoeffizienten mittels eines T-Tests ergab einen p-Wert von 0,32, sowie einen Wert von 0,41 für die Unterschiedlichkeit der Mittelwerte. Eine Auswertung der Standardabweichung mittels T-Test ergab einen p-Wert 0,22. Die Unterschiede der gemessenen Gruppen sind mit diesen p-Werten, bei einem Alpha von 0,05, demnach nicht signifikant.

Eine Entfernung des Schares und die Verkleinerung der Fallhöhe der Samen brachte somit keine signifikante Verbesserung der Ablagegenauigkeit (siehe Tab. 14).

Tabelle 14: Kennwerte der Prüfung des Einflusses der Fallhöhe, Sägerät 1 und 2 mit Melisse und Baldrian, (Mittelwerte aus fünf Wiederholungen zu je 120 s)

Sämaschine	Saatgut	Fahrgeschwindigkeit [km/h]	Schar	Mittelwerte der Kornabstände	Variationskoeffizient
1	Melisse	0,19	mit	7,08	70%
		0,19	ohne	7,26	68%
		0,6	mit	9,99	65%
		0,6	ohne	10,47	62%
	Baldrian	0,19	mit	5,90	79%
		0,19	ohne	6,10	72%
		0,6	mit	8,69	72%
		0,6	ohne	9,55	72%
2	Melisse	0,26	mit	5,71	49%
		0,26	ohne	5,55	48%
		0,79	mit	7,76	42%
		0,79	ohne	7,76	38%
	Baldrian	0,26	mit	5,77	71%
		0,26	ohne	5,73	68%
		0,79	mit	8,52	66%
		0,79	ohne	8,49	65%

### 4.3.19 Abwurfkurven

Durch stufenweise Absenkung des Lichtvorhanges des Prüfstandes wurde die Verteilung der abgeworfenen Samen nach Ausgabe durch das Schar bestimmt. Es wurde nachgewiesen, dass 75 % der Samen in den gemessenen 15 mm vertikal unter dem Schar (in 1,25 mm Stufen) eine nahezu gerade Linie bilden. Es kann also davon ausgegangen werden, dass 75 % der durch die Sägeräte abgeworfenen Samen eine vertikale Flugbahn haben (siehe Abb. 65 und 66).

Aufgrund der Position der Zwangsabstreifer, die unter anderem durch die Säscheibendrehrichtung bestimmt ist, fallen die Samen bei Sägerät 1 in Fahrtrichtung vorne am Schar (siehe Abb. 65), während sie bei Sägerät 2 in Fahrtrichtung weiter hinten fallen (siehe Abb. 66).

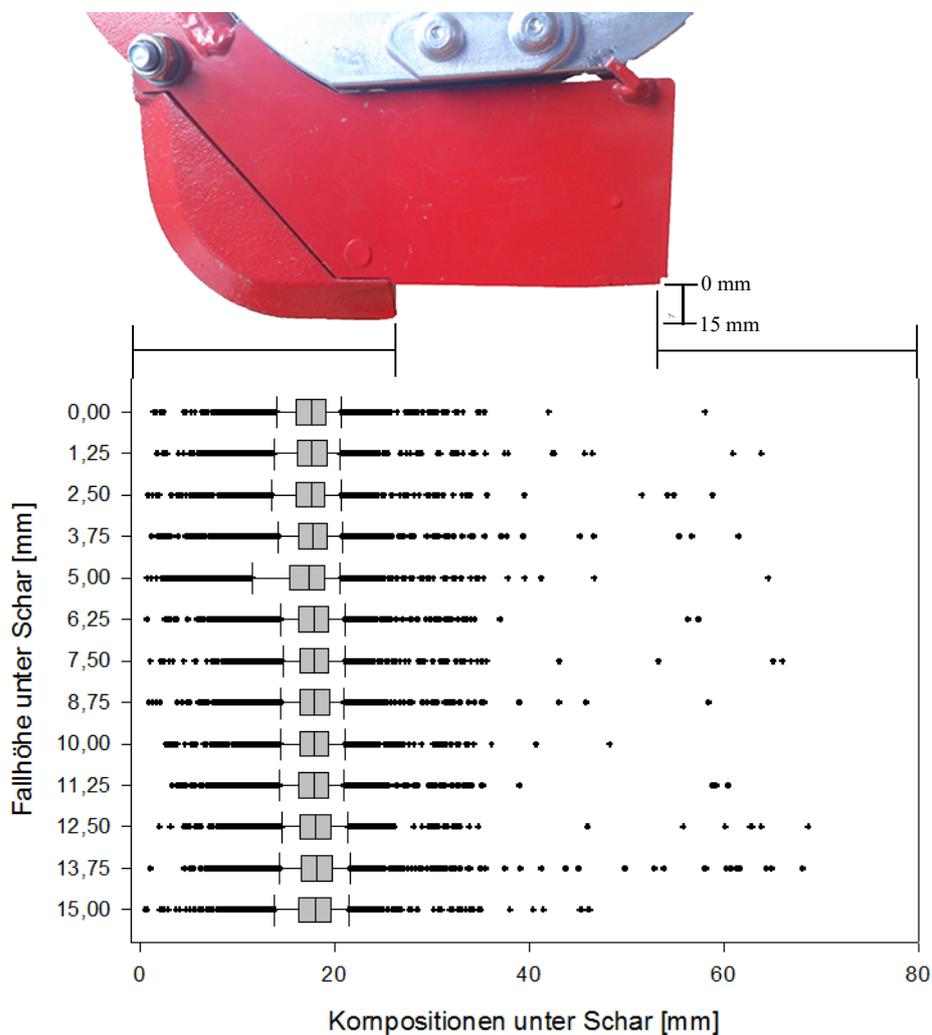


Abbildung 65: Aufnahme der Kornverteilung unter dem Sägerät mit steigender Fallhöhe, Sägerät 1, Melisse, 0,6 km/h

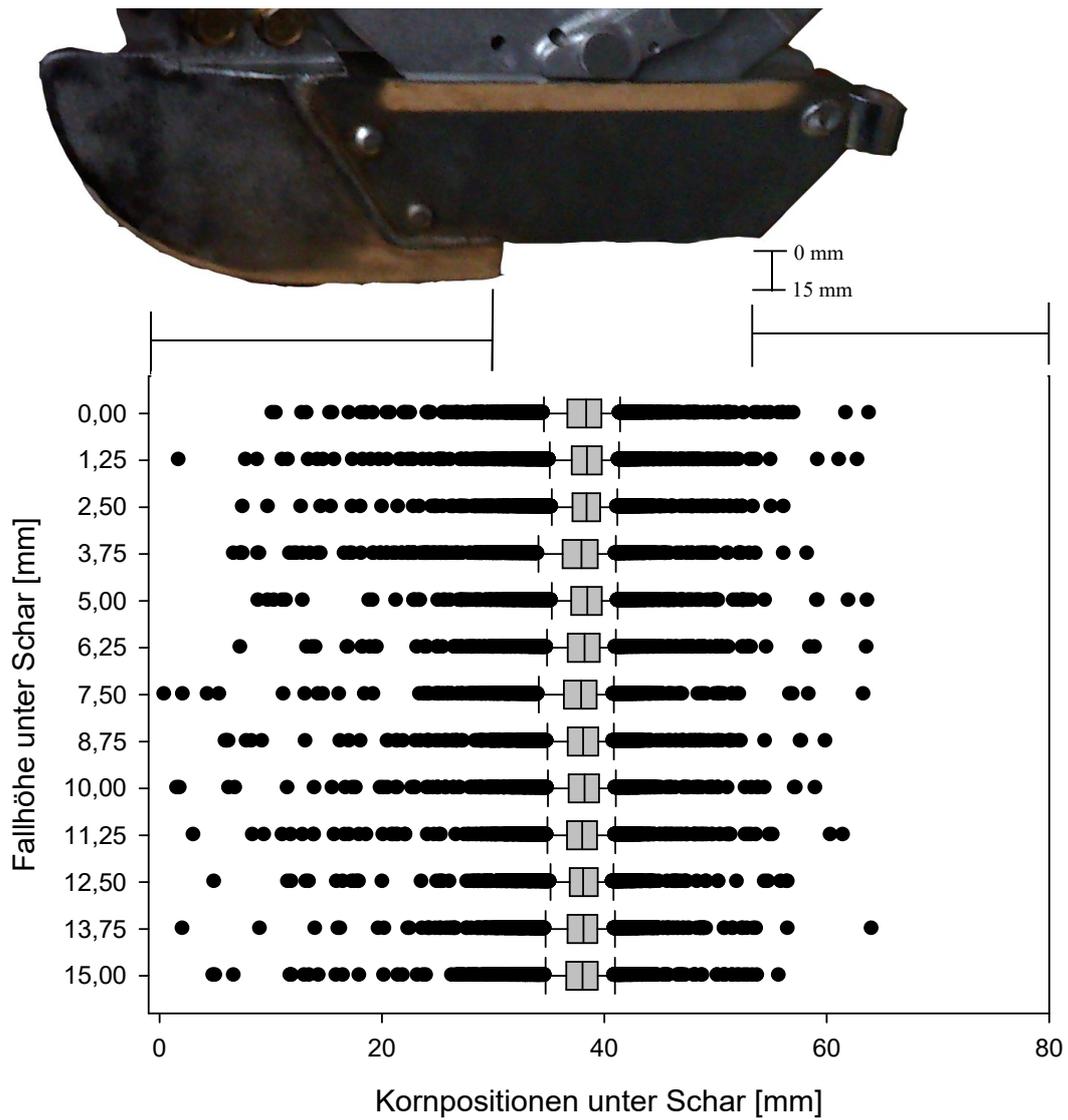


Abbildung 66: Aufnahme der Kornverteilung unter dem Sägerät mit steigender Fallhöhe, Sägerät 2, Melisse, 0,79 km/h

## 5 Diskussion

### 5.1 Vergleich der Messsysteme

Dieses Kapitel behandelt die Schlussfolgerung der Auswahl von Sensor 2 als geeignetes Messinstrument zum Aufbau für einen Sägeräteprüfstand.

Der Vergleich der Sensoren 1 und 2 zeigte die deutliche Tendenz zur Auswahl von Sensor 2 als geeignetes Modell für den Aufbau eines Sägeräteprüfstandes für Feinstsämereien.

Im Folgenden werden die Unterschiede, die zu der Entscheidung zu Sensor 2 führten, aufgezählt.

1) Aufnahmegenauigkeit

Die Aufnahme der unterschiedlichen Versuchssaatgüter zeigte, dass Sensor 1 Baldrian nur bedingt (79 % im Längsaufbau unter dem Sägerät, 16 % im Queraufbau unter dem Sägerät) und Melisse nicht erkennen konnte. Mit Sensor 2 war es möglich die beiden Feinstsämereien im Fall zu erkennen und aufzuzeichnen.

2) Durchmessererkennungsgenauigkeit

Die Ergebnisse zeigten, dass Sensor 1 einen durchgängigen Messfehler während der Aufzeichnung von pilliertem Zuckerrübensaatgut generierte. Die Durchmessererkennung mit Sensor 2 funktionierte dagegen.

3) Zusatzausstattung

Sensor 2 verfügt über eine interne Kamera, welche die passende Positionierung unter dem zu vermessenden Säschar vereinfacht.

4) Datenaufnahme

Sensor 1 kann während einer Messung entweder die Position der abgeworfenen Samen aufzeichnen oder deren Durchmesser. Sensor 2 zeichnet beides simultan auf. Hierdurch ist es möglich, während einer Messung sowohl die Erkennung von Doppelstellen durchzuführen (Plausibilitätstest; siehe Kapitel 3.4.8) als auch für dieselbe Messung die Berechnung der pos. ber. Mittelwerte und pos. ber. Standardabweichungen gleichzeitig vorzunehmen.

### 5) Erweiterung

Sensor 2 verfügt über die Möglichkeit ein weiteres Sensormodul anzuschließen und somit eine 2D-Aufnahme (Aufnahme von 2 Seiten) wie in der Literatur gezeigt (MÜLLER et al., 1997) zu realisieren.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Feinstsämereien Melisse und Baldrian durch eine Sensortechnologie aufzunehmen und zu bestimmen, wird dementsprechend durch Sensor 2 erfüllt. Somit dieser ist für einen Prüfstandsaufbau geeignet.

Dennoch können die weiteren Einflüsse auf eine Saatgutablage, wie zum Beispiel das Verrollen und Springen von Körnern (siehe Kapitel 2.6.3), durch den Sensor nicht aufgenommen werden.

Über die schrittweise Aufnahme eines Flugbahnen Profils durch ein Schichtmodell (siehe Kapitel 4.3.19) kann näherungsweise eine Aussage über Einflüsse auf die Flugbahn der Samen, nachdem diese abgestriffen wurden, getroffen werden. Hier ist deutlich zu machen, dass für diese Aufnahmen ein Kameraverfahren eine bessere Aussagekraft hätte (BUFTON, 1978; BUFTON & RICHARDSON, 1975).

## 5.2 Prüfstandsaufbau

Anschließend an die Auswahl des geeigneten Sensors zur Aufzeichnung der Säabstände von Feinstsämereien mit Einzelkornsägeräten wurde mit diesem Sensor ein Prüfstand erstellt.

Mit der zusätzlichen Kamera des ausgewählten Sensors war es möglich den Prüfstand passend unter den zu vermessenden Sägeräten zu positionieren.

Die Saatgutauffangvorrichtung wurde aus einem Fliegennetz gefertigt und stellte sich als geeignet heraus. Das Saatgut wurde durch diese nicht beschädigt oder versprang nach dem Auffang. Der Prüfstand kann somit als nicht-invasives Verfahren, im Gegensatz zur Verwendung von zum Beispiel Ölbändern, die als invasives Verfahren gelten, bezeichnet werden.

Anhand der Möglichkeit den Prüfstand schrittweise abzusenken, konnten statistische Flugprofile der Feinstsämereien in einem Schichtmodell aufgezeichnet und dargestellt werden.

Durch die geschaffene Vorrichtung konnten alle wichtigen Parameter, die von den unterschiedlichen internationalen Testinstituten gefordert werden, aufgezeichnet und ausgewertet werden (ANONYM\_a, 1984; DLG e.V., 1991; KACHMAN et al., 1995; MÜLLER, 1999).

Da der Prüfstand kleinrahmig und leicht gebaut wurde, ist es möglich diesen zu transportieren und für Außeneinsätze zu verwenden. Zur Überprüfung von Sämaschinen an einem Traktor könnte ein hydraulisches Bandlaufgerät, wie es bei Heier verwendet wurde, zum Einsatz gebracht werden (HEIER, 1997).

### **5.2.1 EM-Algorithmus**

Die Sägeräte zeigten mit allen geprüften Saatgütern deutlich eine mehrgipfelige Verteilung in verschiedene Ablagegruppen, Griepentrog zeigt dies auch (GRIEPENTROG, 1992). Bei den verwendeten Feinstsämereien Baldrian und Melisse veränderten sich diese mehrgipfeligen Verteilungen. Mit höheren Geschwindigkeiten verschoben sich diese zu dem Ablagebild einer Exponentialverteilung einer Drillsaat.

Es wurde ein EM-Algorithmus programmiert, um die aufgezeichneten Ablageabstände in die drei Ablagegruppen von Doppel-, Fehl- und Ist-Stellen einzuteilen. Dies ist notwendig, um eine Maßzahl der Verteilgenauigkeit zu errechnen. Die Verwendung eines Algorithmus zur automatischen Erkennung der Ablagegruppen wurde bisher in der wissenschaftlichen Literatur nicht behandelt.

### **5.2.2 Genauigkeit des Prüfstandes**

Die in der Literatur genannten Ablageabstands-Prüfstände konnten durch den in der vorliegenden Arbeit gebauten Prüfstand in ihrer Genauigkeit übertroffen werden. Den in der Literatur behandelten Prüfständen war es nicht möglich, Saatgut unterhalb der Größe von Raps zu erkennen. Baldrian und Melisse in ihrer Eigenschaft als Feinstsämereien konnten mit Hilfe des aufgebauten Prüfstandes erkannt werden. Durch die zusätzliche simultane Erkennung der Position des Samenauswurfes unter dem Schar, in einer Auflösung  $< 1$  mm, konnte ein weiteres Merkmal zur Bestimmung der Ablagequalität von Sägeräten aufgezeichnet werden.

### **5.2.3 Erstellung von Abwurfkurven**

Mit dem Prüfstand wurde die Erstellung von statistischen Abwurfkurven im Schichtmodell untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass es möglich ist durch schrittweise Absenkung des Lichtvorhanges unter dem zu untersuchenden Säschar ein Schichtmodell aufzubauen, dass die Verteilung der aufgezeichneten Samen wiedergibt. Über dieses Schichtmodell kann die Hauptflugrichtung der abgeworfenen Samen erkannt werden. Eine näherungsweise Erkennung von Flugbahnen, und somit ein Rückschluss auf eventuelles Verrollen und Springen der Saatkörner, kann durch den Prüfstand geleistet werden.

### **5.2.4 Berechnung von positionsbereinigtem Mittelwert und positionsbereinigter Standardabweichung**

Durch die Berechnungen von pos. ber. Mittelwert und pos. ber. Standardabweichung ergab sich die Möglichkeit nicht nur den zeitlichen Abstand der Körner für eine Bewertung zu verwenden, sondern es kann auch deren Fallposition unterhalb des Schares für eine Betrachtung der Güte der Saatgutablage hinzugezogen werden.

Die Auswertung der Fallposition und die Hinzunahme dieses Wertes zur Berechnung der Ablagegenauigkeit ist nicht grundlegend neu und wurde bereits durch Müller (MÜLLER et al., 1997) an Drillmaschinen untersucht und dargelegt. Die Berechnung von pos. ber. Werten mittels der Abwurfposition von Einzelkornsägeräten wurde, wie in der vorliegenden Arbeit verwendeten Art, bisher nicht in der Literatur beschrieben.

Anhand der Möglichkeit die Ablagegruppen durch den EM-Algorithmus automatisch zu erkennen, wurden die Auswertung des pos. ber. Mittelwert und der pos. ber. Standartabweichung komplettiert.

Die Messwerte für die Ablagegenauigkeit eines Sägerätes, die durch die Errechnung von pos. ber Mittelwert und pos. ber. Standartabweichung bestimmt werden, können zusätzlich neben dem (VK), als Bewertungsgrundlage für die Ablagequalität eines Sägerätes verwendet werden. Zusätzlich wird die Ablagequalität eines Sägerätes besser beschrieben als es durch bisherige bekannte Verfahren geschah.

### **5.3 Sägeräte**

Das folgende Kapitel diskutiert die Ergebnisse der Sägeräteuntersuchung mit dem geschaffenen Prüfstand.

#### **5.3.1 Sägerät 1**

Sägerät 1 wurde nach dem gewählten Versuchsablauf untersucht. Es stellte sich heraus, dass bei Geschwindigkeiten von über 1 km/h das Säbild von dem einer mehrgipfeligen Verteilung abweicht. Die zeitlichen Abstände der Samen verschoben sich hin zu einer Exponentialverteilung.

Mit Geschwindigkeiten über 2 km/h kam es bereits zu Samenbruch. Es ist mit Sägerät 1 nicht zu empfehlen mit einer Fahrgeschwindigkeit von größer als 1 km/h zu säen, da dies ein ungenaues Säbild zur Folge hat.

Mit Geschwindigkeiten von über 1 km/h kam es weiterhin unterhalb des Säschaes zu Positionsverschiebungen der Samen (siehe Kapitel 4.3.8 und 4.3.9). Dies ist auf den Zwangsabstreifer von Sägerät 1 zurückzuführen.

Wie in den Ergebnissen gezeigt, ist ein Unterdruck von mindestens 30 Pa notwendig, um eine ausreichende Belegung der Säscheibe mit Saatgut zu gewährleisten (siehe Kapitel 4.3.4). Mit steigender Geschwindigkeit wird kein höherer Unterdruck für eine ausreichende Belegung der Säscheibe benötigt (siehe Kapitel 4.3.4). Als geeignetes Lochmaß stellte sich die Bohrung von 0,6 mm Durchmesser heraus. Die Anzahl der Löcher einer Säscheibe hatte keinen Einfluss auf deren Belegung (siehe Kapitel 4.3.15). Sägerät 1 zeigte mit den vordefinierten optimalen Einstellungen Reproduzierbarkeit in der Saatgutablage (siehe Kapitel 4.3.16).

Den vorliegenden Ergebnissen nach ist mit Sägerät 1 theoretisch eine Aussaat von Baldrian und Melisse möglich. Es sollte aber eine Fahrgeschwindigkeit von 1 km/h nicht überschritten werden, um ein gutes Säergebnis zu gewährleisten.

### 5.3.2 Sägerät 2

Das Sägerät 2 wurde ebenfalls nach dem gewählten Versuchsablauf untersucht.

Eine Fahrgeschwindigkeit von über 1 km/h führte auch bei Sägerät 2 zu einer zeitlichen Verschiebung der Ablage der Samenkörner hin zu einer Exponentialverteilung (siehe Kapitel 4.3.11 und 4.3.12). Die Positionsverteilung der Samen unterhalb des Schares bleibt hingegen bis hin zu einer Fahrgeschwindigkeit von 4 km/h gleichmäßig und normalverteilt (siehe Kapitel 4.3.11 und 4.3.12).

Für Sägerät 2 wird ein Unterdruck von 30 Pa benötigt um einen ordnungsgemäßen Betrieb zu gewährleisten. Es wird kein höherer Unterdruck bei steigender Geschwindigkeit benötigt (siehe Kapitel 4.3.4). Es kann davon ausgegangen werden, dass für Sägerät 2, gleichermaßen wie bei Sägerät 1, der Lochgrößendurchmesser von 0,6 mm als geeignet anzusehen ist. Sägerät 2 zeigte mit den als optimal eingestellten Werten ebenfalls Reproduzierbarkeit in der Ablage von Melisse und Baldrian (siehe Kapitel 4.3.17).

Den vorliegenden Ergebnissen nach ist mit Sägerät 2 eine Aussaat von Melisse und Baldrian möglich, es sollte dabei, wie bei Sägerät 1, eine Fahrgeschwindigkeit von 1 km/h nicht überschritten werden um, ein optimales Ergebnis zu erzielen. Es wird aus den vorliegenden Ergebnissen deutlich, dass auch bei höheren Fahrgeschwindigkeiten die Ablage der Saatgüter mit Sägerät 2 eine bessere Verteilung aufweist als die Ablage mit Sägerät 1.

### 5.3.3 Unterschiede zwischen den Sägeräten 1 und 2

Dieses Kapitel behandelt die Ursachen der gefundenen Unterschiede in der Ablage der Feinstsämereien durch die Sägeräte.

#### 1) Zwangsabstreifer

Die verschobene Positionsablage unter dem Schar von Sägerät 1 bei höheren Geschwindigkeiten ist dem Abstreiferprozess des Zwangsabstreifers zuzuschreiben. Dieser sorgt für ein abruptes Ablösen des Saatgutes von der Scheibe (siehe Kapitel 4.3.8 und 4.3.9). Während Sägerät 1 über einen Zwangsabstreifer verfügt, der das Saatgut vertikal zur Drehrichtung der Säscheibe entfernt (siehe Kapitel 3.1.1, Abb. 8), wird das Saatgut bei Sägerät 2 durch einen konkaven an die Säscheibe angepassten Abstreifer getrennt (siehe Kapitel 3.1.2, Abb. 10). Es kann davon ausgegangen werden, dass die Bauweise der jeweiligen Zwangs-abstreifer einen Hauptaspekt für die Ablagegenauigkeit unter dem Schar darstellt.

Der Bauweise des Zwangsabstreifers ist ferner die mögliche höhere Fahrgeschwindigkeit von Sägerät 2 zuzuschreiben, da dieser das Saatgut weniger aggressiv abscheidet.

2) Größe des Samenauswurfes

Der Größe des Samenauswurfes ist ein Einfluss auf die Positionsablage unterhalb der Säscharre einzuräumen. Da dieser bei Sägerät 2 3,5 cm kleiner ist als bei Sägerät 1 kann von einer positiven Beeinflussung ausgegangen werden (siehe Kapitel 3.1.3).

3) Feinabstreifer bei Sägerät 2

Durch die Überprüfung des zusätzlichen Feinabstreifers von Sägerät 2 stellte sich heraus, dass es durch diesen möglich ist, die abgestriffene Samenmenge zusätzlich in kleinem Maßstab zu beeinflussen. Der Einbau eines Feinabstreifers ist als positiv zu bewerten (siehe Kapitel 4.3.3, Abb. 26).

### **5.3.4 Erkenntnisse zur Verbesserung pneumatischer Sägeräte für Feinstsämereien Melisse und Baldrian**

Dieses Kapitel beschreibt die gewonnenen Erkenntnisse der Sägeräteprüfung und setzt die einzelnen Ergebnisse in den Kontext der Verbesserungsmöglichkeiten einer Aussaat von Feinstsämereien.

1) Zwangsabstreifer

Als Haupteinflussgröße auf die Ablagequalität stellte sich die Bauform des Zwangsabstreifers der untersuchten Sägeräte heraus. Hier ist die konkave, sich langsam an die Sälöcher annähernde Form des Zwangsabstreifers von Sägerät 2 als positiv zu bewerten. Diese Bauweise führt nicht nur zu einer besseren Positionsablage unterhalb des Sägerätes, sondern ebenfalls zu einer möglichen höheren Fahrgeschwindigkeit.

2) Saatgutauslass

Als positiv zu bewerten ist der kleinere Samenauslass unterhalb des Schares von Sägerät 2, da dieser zu einer besseren Positionsverteilung beiträgt.

3) Feinabstreifer

Ferner ist die Verwendung eines Feinabstreifers wie bei Sägerät 2 ist als positiv zu bewerten, da dieser eine genauere Einstellung der Samen auf der Scheibe ermöglicht.

4) Unterdruck

Die Ergebnisse der Unterdruckuntersuchung zeigten keinen Änderungsbedarf. Es sollte sichergestellt werden, dass mindestens 30 Pa oder mehr an der Säscheibe anliegen, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

## 5) Überdruck

Die Untersuchung des Überdruckes zeigte ebenfalls keinen Änderungsbedarf. Bereits 30 Pa reichen aus, um die Säscheiben von Verunreinigungen freizuhalten.

## 6) Fahrgeschwindigkeit

Die Untersuchung der Fahrgeschwindigkeit deckt sich mit den Aussagen der Literatur, je höher die Fahrgeschwindigkeit desto ungenauer wird das Säergebnis (BOZDOAN 2008; IVANČAN et al., 2004; KAM H. et al., 2010; KARAYEL, 2004; SINGH et al., 2005; SMITH J. et al., 2003; YAZGI et al., 2007; ZHAN et al., 2010).

Hier sollte den vorliegenden Ergebnissen nach für die getesteten Feinstsämereien eine Maximalgeschwindigkeit von 1 km/h eingehalten werden, da sich die zeitliche Folge der Samen von Baldrian und Melisse sonst von einer mehrgipfeligen Verteilung hin zu einer Exponentialverteilung verschiebt, die ein schlechteres Säergebnis und eine schlechtere Standraumzuteilung der Pflanzen zur Folge hat.

## 7) Querverteilung

Die Untersuchung der Querverteilung der Samen ergab, dass diese immer in Fahrriechung linksseitig ausgeworfen werden und ist bauartbedingt durch den Einbau der Säscheiben und nur mit hohem Aufwand veränderbar.

## 8) Säscheibe

Für die verwendeten Feinstsämereien Baldrian und Melisse stellte sich ein Sälöchdurchmesser von 0,6 mm als geeignet heraus. Die Lochanzahl spielte keine Rolle für die Ablagequalität, sondern veränderte lediglich die Anzahl der abgeworfenen Körner.

## 9) Umgedrehte Säscheiben

Die Drehung der Säscheibe innerhalb des Sägerätes und eine Einzelung mit Senkungen auf der Lochsäscheibe führten zu starkem Verschleiß des Zwangsabstreifers von Sägerät 1 und zu einer unzureichenden Einzelung.

Der Einbau einer Säscheibe mit Senkungen ist nicht zu empfehlen.

## 10) Messung ohne Schar

Im Versuch ergaben die Messungen ohne Schar sowie die Auswertungen der Abwurfkurven keinen signifikanten Unterschied der Ablage durch eine Fallhöhe von 9 cm. Die Scharhöhe von 9 cm kann also für die Aussaat der beiden geprüften Kulturen mit den beiden verwendeten Säaggregaten vernachlässigt werden. Eine größere Fallhöhe als die durch die Sägeräte vorgegebene wurde nicht geprüft.

#### 11) Drehrichtung der Säscheiben

Über den Einfluss der Drehrichtung der Säscheiben konnte abschließend keine Aussage getroffen werden, da diese sich auf die Ablage der Samen im Feld bezieht und die Sägeräte für die Messungen nicht bewegt wurden.

## 6. Zusammenfassung

Die gesetzten Ziele, die Kulturen von Melisse und Baldrian auf ihre Eignung zur Aussaat mit Hilfe einer Einzelkornsämaschine für Feinstsämereien zu bewerten, wurden durch die vorliegende Arbeit erfüllt.

### 1) Sensorprüfung und –auswahl

Zur Überprüfung und Bewertung der Ablagequalität der untersuchten Säaggregate mit den Kulturen Melisse und Baldrian wurde ein Prüfstand aufgebaut. Für diesen Prüfstand wurden zwei optische Mikrometer hinsichtlich ihrer Eignung ausgewählt und überprüft.

Die Überprüfung der ausgewählten optischen Mikrometer fand mit ausgesuchten Saatgütern mit verschiedensten Eigenschaften und Größen statt. Diese wurden in immer schnellerer Folge in die zu testenden Sensoren abgeworfen und hinsichtlich ihrer Aufnahme Genauigkeit ausgewertet.

Außerdem wurde die Durchmessererkennungsgenauigkeit der verwendeten Sensoren getestet.

### 2) Prüfstands Aufbau

Mit dem geeigneten Sensormodell wurde ein Prüfstand aufgebaut, der sich unter den zu vermessenden Säaggregaten platzieren lässt und die Feinstsämereien Melisse und Baldrian unter dem Säschar in Abwurfposition, Abwurfzeitpunkt und Samengröße bestimmen kann.

### 3) Entwicklung eines ‚Expectation-Maximization-Algorithmus‘

Während der Untersuchungen der verwendeten Sägeräte stellte sich heraus, dass ab einer Geschwindigkeit von über 1 km/h die Samen von Melisse und Baldrian in ihrer zeitlichen Abfolge nicht mehr das für einen Einzelkornsävorgang typische Bild eine mehrgipfeligen Verteilung annehmen, sondern sich die zeitliche Verteilung der Samen zu dem Bild einer Exponentialverteilung verschiebt. Um dennoch die Ablagegruppen von Doppel-, Fehl- und Ist-Stellen zu erfassen, wurde der EM-Algorithmus programmiert. Dieser ermöglicht eine automatische Zuordnung der Samen zu den jeweiligen Ablagegruppen.

### 4) Entwicklung von positionsbereinigtem Mittelwert und positionsbereinigter Standardabweichung

Der im Prüfstands Aufbau verwendete Sensor ist in der Lage, nicht nur den Zeitpunkt des Kornabwurfes zu bestimmen, sondern auch die Abwurfposition unterhalb des Schares. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Saatgutauzeichnung erfuhren anhand dieser Werte eine Korrektur. Durch diesen Vorgang konnte eine genauere Aussage über die Ablagequalität der Feinstsämereien durch die Einzelkornsägeräte getroffen werden.

### 5) Sägeräteprüfung

Zur Aufnahme und Bewertung der Ablage der Kulturen Melisse und Baldrian wurde ein Versuchsablauf geschaffen, mit dem die beiden Säaggregate hinsichtlich ihrer Eignung untersucht wurden. Dieser enthält die Überprüfung von Abstreifer, Unterdruck- und Überdruckeinfluss, Fahrgeschwindigkeit, Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, Querverteilung sowie Änderungen an den verwendeten Säscheiben. Darüber hinaus wurden Untersuchungen über die Fallhöhe sowie die Abwurfkurve der Samen angefertigt.

Der durch die vorliegende Arbeit geschaffene Prüfstand erfüllte die Anforderungen. Die Aufnahme und Bewertung der Feinstsämereien von Melisse und Baldrian aus den Sägeräten war möglich und brachte Erkenntnisse zur Einstellung und Eignung dieser Maschinen für die Aussaat der verwendeten Samen.

Die Fahrgeschwindigkeit sowie die Form des verwendeten Zwangsabstreifers stellten sich als entscheidende Faktoren auf das Säergebnis dar. Zusätzlich waren die Größe des Samenauswurfes unter dem Säherz, sowie ausreichender Unterdruck von 30 Pa an der Säscheibe entscheidend für das Gelingen der Einzelung.

Haupterkennnis der Ergebnisse ist, dass sich ab einer erhöhten Fahrgeschwindigkeit das Bild der Ablage der Samen von dem einer mehrgipfeligen Verteilung hin verschiebt zu dem einer Exponentialverteilung einer Drillsaat. Für ein optimales Verteilungsergebnis mit den Kulturen Melisse und Baldrian sollte eine Fahrgeschwindigkeit von 1 km/h nicht überschritten werden.

## 7. Literaturverzeichnis

ANONYM\_a. (1984). ISO 7256/1. Sowing Equipment - Test methods - Part 1: Single Seed Drills (precision drills). Berlin.

ANONYM\_b. (1984). ISO 7256/2. Sowing equipment - Test methods - Part 2: Seed drills for sowing in lines. Berlin.

ANONYM\_c. (1989). Prüfprogramm Drillmaschinen. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG). Groß-Umstadt.

ANONYM\_d. MIKRO EPSILON MESSTECHNIK GMBH & CO. KG. Betriebsanleitung optoCONTROL 2600: Berührungsloses Optisches Mikrometer.

ANONYM\_e, KEYENCE CORPERATION (Ed.). (2008). Bedienungsanleitung Modellreihe LS-7600: Hoch präzises, digitales Hochgeschwindigkeits-Mikrometer. Japan.

ANONYM\_f, KEYENCE DEUTSCHLAND GMBH. (2007). Das Original digitale Lichtband-Mikrometer mit grüner LED: Schnelle, präzise Lichtband Mikrometer, Modellreihe LS-7000. Japan.

BACHNER, A. (2011). Forschungsschwerpunkt Mechanisierung und Automatisierung der Aussaat von Zuckerrüben an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Nr. 33). Der Goldene Pflug, 24–34.

BLENK, H. (1951). Poissonsche Verteilungskurven bei Versuchen mit Drillmaschinen. ZAMM - Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 31(8-9), 257–258.

BOZDOAN, A. M. (2008). Seeding uniformity for vacuum precision seeders. Scientia Agricola, 65, 318–322.

BRINKMANN, W. (1986). Geräte und Verfahren für die Produktion von Rüben und Mais. Sonderdruck aus "Landwirtschaftliches Lehrbuch 4 - Landtechnik".

BUFTON, L.P. (1978). The influence of seed-drill design on the spatial arrangement of seedlings and on seedling emergence. Acta Hort, (ISHS) 72, 135-158.

BUFTON, L. P. & RICHARDSON, P. (1975). A Technique to Record Seed Trajectories, Impact Position and Total Seed Displacement on a Soil Surface. Journal of Agricultural Engineering Research, 20, 99–104.

BUFTON, L. P., RICHARDSON, P. & O'DOGHERTY, M. J. (1974). Seed displacement after impact on a soil surface. Journal of Agricultural Engineering Research, 19(4), 327–338.

- BUNDESVERBAND DER PHARMAZEUTISCHEN INDUSTRIE e.V. (2012). Angabe Endverbraucherpreis (EVP). Eigene Berechnung nach IMS Health: Marktentwicklung von Phytopharmaka 2010, IMS OTC Report/Gesundheitsmittelstudie, Frankfurt (M) 2010, Pharma Daten 2012, Berlin 2012.
- BUREMA, H. J. Meijer; E. N. C. Telle. M. G. (1980). Development and Study of a Self-recording Sticky Belt (Ausgabe 3). Wageningen, Netherlands. Research Report, 80, 14.
- DAMEROW, L. (2008). Einzelkornsämaschinen für Gemüse: Bauarten und Typentabellen. KTBL-Arbeitsblatt, Lfd. Nr. 0723.
- DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS GESELLSCHAFT (DLG e.V.). (1991). DLG-Prüfrahmen für Einzelkornsägeräte. Groß-Umstadt.
- DZINAJ T. et al. (1998). Multi-Sensor-System zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern, Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI, 233-242.
- EICHHORN, H., & BÖHRNSEN, A. (1999). Landtechnik: 136 Tabellen (7th ed.). Landwirtschaftliches Lehrbuch. Stuttgart: Ulmer Verlag.
- EIKEL, G. (2011a). Meister der einzelnen Körner?: Horsch-Einzelkornsägerät Maestro. Profi, 09/2011, 26–28.
- EIKEL, G. (2011b). Hier ist Präzision gefragt. Profi, 04/2011, 80–81.
- FELDHAUS, B. (1996). Samenzählen bei Drillmaschinen. Landtechnik, 1/96, 10–11.
- FISCHER, G. (1911). Hauptprüfung der Drillmaschinen. Arbeiten der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG e.V.), Heft. 222, 1–25.
- GEISLER, G. (1984). Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 147(5), 643–644.
- GEISLER, G., & STOY, A. (1987). Untersuchungen zum Einfluß der Bestandesdichte auf das Ertragspotential von Rapspflanzen (*Brassica napus* L. var. *napus*). Journal of Agronomy and Crop Science, 159(4), 232–240.
- GÖTZEN, N. (2006). Steigerung der Fahrgeschwindigkeit bei der Einzelkornsäat durch Optimierung des Abstreifprozesses. Landtechnik, 5/2005, 281.
- GRIEPENTROG, H. W. (1991). Zur Bewertung von Längsverteilungen bei Drillmaschinen (Evaluation of longitudinal distribution of grain drills). Landtechnik 11/1991, 550-551.
- GRIEPENTROG, H. W. (1992). Bewertung von Längsverteilungen bei Einzelkornsämaschinen (Evaluation of longitudinal distribution of precision seeders). Landtechnik 03/1992, 123-125.

- GRIEPENTROG, H. W., OLSEN, J. M. & WEINER, J. (2009). The Influence of Row Width and Seed Spacing on Uniformity of Plant Spatial Distributions. VDI-Verlag, Düsseldorf, Germany, VDI-Berichte Nr. 2060, 2009.
- GRIEPENTROG, H. W., SKOU, P. T. & SORIANO, J. F. (2005). Design of a seeder to achieve highly uniform sowing patterns. 5<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, Sweden, 9<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup> June, 675-682.
- GRIEPENTROG, H.-W. (1996). Standflächenverteilung und Ertrag von Raps. Landtechnik 05/1996, 258-259.
- GRIEPENTROG, H.-W. (1999). Zur Bewertung der Flächenverteilung von Saatgut. Agrartechnische Forschung 5 (1999), H.2, 117-124.
- GRIEPENTROG H. W. et al. (2005). Seed Mapping of Sugar Beet. Precision Agriculture, 6, 157-165.
- HASTIE, T. J., TIBSHIRANI, R. & FRIEDMAN, J. (2011). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). Springer series in statistics. New York, N.Y: Springer.
- HEEGE, H. J. (1967). Die Gleichstand-, Drill- und Breitsaat des Getreides unter besonderer Berücksichtigung der Flächenmäßigen Kornverteilung. KTBL-Berichte über Landtechnik, Heft 112.
- HEIER, L.(2001). Das Bonner Abstands-Aufzeichnungs-System: Ein System zur Prüfung von Einzelkornsäegeräten, auch für die Praxis. Landtechnik, 1/2001, 192–194.
- HEIER, L.(1995). So wird die Arbeitsqualität gemessen und beurteilt. Profi, 8/1995, 28–29.
- HEIER, L. (1996). Das Bonner Abstands-Aufzeichnungs-System: System zur Bestimmung der Arbeitsqualität von Einzelkornsäegeräten und Drillmaschinen. Landtechnik, 4/1996, 204f.
- HEIER, L. (1997). Meßsystem zur Bestimmung der Arbeitsqualität von Säegeräten: Arbeiten aus dem Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Heft 23.
- INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION. (2009). International Rules for Seed Testing Edition 2009.
- IVANČAN, S., SITO, S. & FABIJANIĆ, G. (2004). Effect of Precision Drill Operating Speed on the Intra-row Seed Distribution for Parsley. Biosystems Engineering, 89(3), 373–376.
- KACHMAN, S. & SMITH J.A. (1995). Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering. Transactions of the ASAE, 38(2), 379–387.

- KAM H., PEVELING-OBERHAG C. & SCHULZE LAMMERS P. (2010). Quantifizierung von Einflussfaktoren auf die Ablagegenauigkeit von Zuckerrübensaatgut. *Landtechnik*, 5/2010, 357–359.
- KARAYEL, D., WIESEHOFF, M., ÖZMERZI, A. & MÜLLER, J. (2006). Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(2), 89–96.
- KARAYEL, D. (2004). Effect of forward speed on hill dropping uniformity of a precision vacuum seeder. *HortTechnology*, 14(4), 364.
- KOCHER, M. (1998). Opto-electronic sensor system for rapid evaluation of planter seed spacing uniformity. *Transactions of the ASAE*, 41(1), 237–245.
- KOCHER M.F. et al. (2011). Corn seed spacing uniformity as affected by seed tube condition. *Applied engineering in agriculture*, 27, 177–183.
- KROMER, K. H. (1997). Field Research Equipment for Sugar Beet. *Journal of Sugar Beet Research*, 29, 145–151.
- KTBL-Arbeitsgruppe "Optimierung der Sätechnik". (2000). Definition und Einordnung der Einzelkornsaat. KTBL-Arbeitsblatt Nr. 0262.
- KVERNELAND GROUP DEUTSCHLAND GMBH. (2009). Miniair Nova - Pneumatische Einzelkornsämaschine für Gemüse.
- LAMMERS, P. (2013). Testing of sugar beet harvesters in Germany 2012. *International Sugar Journal* 2013, 115/1370,100-106.
- LAN, Y., KOCHER, M. & SMITH, J. (1999). Opto-electronic Sensor System for Laboratory Measurement of Planter Seed Spacing with Small Seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(2), 119–127.
- PFORTE, L. Meo Carbon Solutions. (2013). Marktanalyse für den Bereich Nachwachsende Rohstoffe im Rahmen des Förderprogramms Nachwachsende Rohstoffe des BMELV. noch nicht veröffentlicht. Köln. aus Tagungsunterlagen. 2. Tagung – Arzneipflanzenanbau in Deutschland. Der Phytopharmazeutika-Markt und sein Bedarf an Arzneipflanzen. Bad Blankenburg. 16./17. Oktober 2013.
- MÜLLE, G. (1979). Untersuchungen zur Einzelkornsaat von Getreide. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft, Band 32.
- MÜLLER, G. (1980). Die Einzelkornsaat von Getreide als technisches Problem. *Grundlagen der Landtechnik*, Band 30, 29–36.
- MÜLLER, J. et al. (1994). Optoelectronic Measurement System for Evaluation of Seed Spacing. *Internationale Tagung "Land.Technik AgEng" 1994 (Ed.)*.

- MÜLLER, J. (1999). Prüfung der Quer- und Längsverteilung des Saatguts bei der Drillsaat. KTBL-Schrift 383 zur Sätechnik und Säverfahren.
- MÜLLER, J. et al. (1997). Optosensor: Kornstandserfassung bei Drillmaschinen. Landtechnik, 2/97. 76–77.
- NIEUWENHUIZEN, A.T.; HOFSTEE, J.W.; HENTEN, E.J. VAN; ZANDE, J. VAN DE (2010). Automated detection and control of volunteer potato plants. Aspects of Applied Biology 99 (2010). Association of Applied biologists, 2010, 413 - 414
- ONAL, O. (2009). Development of a Computerized Measurement System for in Row Seed Spacing Accuracy. Turkish journal of agriculture & forestry, 33(2), 99–109.
- ÖZMERZI, A., KARAYEL, D. & TOPAKCI, M. (2002). Effect of Sowing Depth on Precision Seeder Uniformity. Biosystems Engineering, 82(2), 227–230.
- PANNING, J. (2000). Laboratory and field testing of seed spacing uniformity for sugarbeet planters. Applied engineering in agriculture, 16(1), 7–13.
- PARISH, R. & BRACY, R. (2003). An Attempt to Improve Uniformity of a Gaspardo Precision Seeder. HortTechnology, 13(1), 100–103.
- SCHMITTMANN, O., KAM HING & LAMMERS, P. S. (2010). Entwicklung eines Präzisionssägerateantriebs zur koordinatengesteuerten Ablage von Saatgut. Landtechnik, 2/2010, 62–65.
- SCHMITTMANN, O., KAM HING, LAMMERS, P. S., SIEMES, M., SCHÖLDERLE, F. & KUHLMANN, H. (2008). Position steered sowing of row crops - parallel sowing of sugar beet. Agricultural and biosystems engineering for a sustainable world. International Conference on Agricultural Engineering, Hersonissos, Crete, Greece, 23-25 June, 2008. pp. OP-800.
- SCHRÖDL, J. (1979). Die Maissaat verlangt spezielle Sägeräte. Mais. 7/1979, 19–21.
- SCHRÖDL, J. (1992). Prüfung von Einzelkornsämaschinen: Erfahrungen, Ergebnisse und Hinweise. Landtechnik, 3/92, 126–129.
- SCHRÖDL, J. (1997). Erfahrungen bei der DLG-Prüfung von Einzelkornsämaschinen – Anforderungen, Arbeiten aus dem Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Heft. 23.
- SCHUPP, A. A. (1946). An Electric Device for Recording Distribution of Seed From Planters, American Society of Sugar Beet Technologists, 4, 448–450.
- SINGH, R. C., SINGH, G. & SARASWAT, D. C. (2005). Optimisation of Design and Operational Parameters of a Pneumatic Seed Metering Device for Planting Cottonseeds. Biosystems Engineering, 92(4), 429–438.

- SMITH J., GATCH R. & PALM K. (2003). Plant spacing accuracy of sugarbeet planter models and of options within planter models: Institut international de recherches betteravieres. JOINT IIRB ASSBT CONGRESS, 97–108.
- WELP, G., LIEBE, F., HELFRICH, H.-P. & BRÜMMER, G. W. (1998). Anorganische Schadstoffe in Böden Nordrhein-Westfalens. I. Möglichkeiten der Auswertung mehrmodaler Häufigkeitsverteilungen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 161(3), 205–210.
- WILSON, J. M. (1980). The effect of release errors and the release point on the design of precision seed drills. Journal of Agricultural Engineering Research, 25(4), 407–419.
- YAZGI, A. & DEGIRMENCIOGLU, A. (2007). Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology. Biosystems Engineering, 97(3), 347–356.
- ZHAN, Z., YAOMING, L., JIN, C. & LIZHANG, X. (2010). Numerical analysis and laboratory testing of seed spacing uniformity performance for vacuum-cylinder precision seeder. Biosystems Engineering, 106(4), 344–351.
- ZIEGLER, K. & SCHMITTMANN, O. (2012). Sägeräte-Tests in Franken 2009-2001. Sugar Industry, 137, 589–594.
- ZIEGLER, K. & SCHMITTMANN, O. (2013). Fünf Sägeräte im Test: Arge Franken und Uni Bonn testeten Einzelkornsägeräte. Zuckerrüben Journal; LZ, 09/2013, 10–12.
- ZSCHEISCHLER, J. (1990). Handbuch Mais. Umweltgerechter Anbau - Wirtschaftliche Verwertung. Frankfurt/Main: DLG-Verlag.

## **Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt meinen Arbeitskollegen Tobias Meinhold und Hanna Blum für den regen Gedankenaustausch zum Aufbau und der Auswertung der Sägeräte, sowie die durchgehende Unterstützung der beiden während unserer gemeinsamen Zeit mit dem KAMEL-Projekt.

Außerdem danke ich allen beteiligten am KAMEL Projekt sowie dem Projektträger, der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMELV für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).

Ferner möchte ich Herrn Dr. Damerow danken für die viele Unterstützung, besonders bei den verfahrenstechnischen Herausforderungen, sowie der regelmäßigen fachgerechten und professionellen Betreuung während meiner Versuche.

Bei Herrn Prof. Schulze Lammers möchte ich mich bedanken für die Bereitstellung und Übernahme des Dissertationsthemas der Sägeräteprüfung und der Doktorvaterschaft, mein Dank gilt insbesondere für die häufige fachliche Unterstützung und Diskussion meines Dissertationsthemas bis in die kleinsten Details und die Anregungen immer neue Berechnungen auszuprobieren und weiter zu entwickeln.

Herrn Prof. Ralf Pude danke ich sehr für die Übernahme des Korreferats und der Unterstützung der Versuche am Versuchsgut Campus Klein-Altendorf.

Ebenso danke ich auch dem gesamten Team des Campus für die mehr als dreijährige Unterstützung meiner Versuche. Der Werkstatt des Institutes für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn möchte ich danken für die Erstellung des umfangreichen Prüfstandes und der Sägeräteversorgung nach meinen Wünschen.

Herrn Prof. Helfrich und Herrn Jan Leppert danke ich für die Anregungen zur Entwicklung des EM-Algorithmus.

Herrn Lars Heier möchte ich danken für die vielen Diskussionen über den Positionskorrekturfaktor, der mit meinen Sensoren möglich ist, und die Erörterung der Vermessung von Säaggregaten hinsichtlich ihrer Ablagequalität allgemein.

Zudem möchte ich der Belegschaft des Institutes für Landtechnik sowie meinen Arbeitskollegen für die gute Zeit und Unterstützung in Rat und Tat bedanken.

Außerdem danke ich insbesondere meiner Schwester Janina und Frau Dr. Anette Massmann für die Unterstützung während meiner Promotionszeit.

Ein großes Danke“ gilt zugleich all meinen Bonner Freunden, die mich während der über drei Jahre währenden Promotion durch „diese Zeit begleitet haben.

Zu guter Letzt und doch allen voran möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die es mir ermöglicht haben, dass ich diesen Weg gehen konnte.