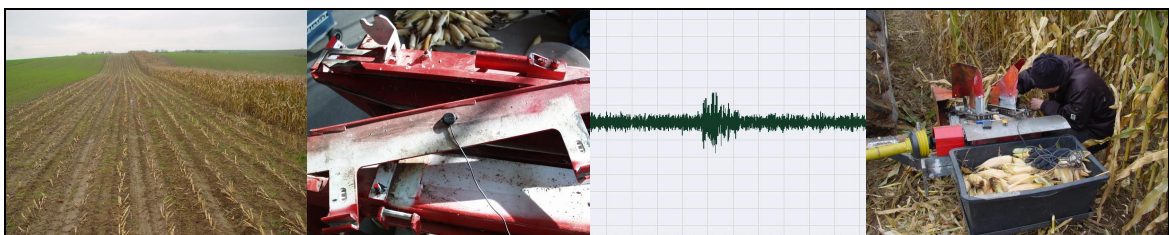


**Untersuchungen zum Pflückverhalten beim
Körnermais**

**Diplomarbeit
im Fachgebiet Agrartechnik**



1. Prüfer:

Prof. Dr. Oliver Hensel

2. Prüfer:

Dr. Christian Schüler

vorgelegt von:

Martin Becker

Leibnizstr. 20

37083 Göttingen

Matrikelnummer: 21103931

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand des Wissens und der Technik	3
2.1	Pflanzenbauliche Grundlagen.....	3
2.1.1	Botanik	3
2.1.2	Zucht.....	5
2.1.3	Anbauverfahren	7
2.2	Erntetechnik.....	9
2.2.1	Entwicklung der Erntetechnik	9
2.2.2	Heutiger Stand der Erntetechnik.....	13
2.2.3	Elektronische Informations- und Regelsysteme am Mähdrescher	17
3	Material und Methoden	20
3.1	Pflanzenmaterial	20
3.2	Laborversuche	20
3.2.1	Sensoren	22
3.2.2	Übertragungsverhalten der Pflückplatte	26
3.2.3	Einfluss von Sensorposition und Pflanzeigenschaften	26
3.2.4	Frequenzanalyse	28
3.3	Feldversuche.....	29
4	Ergebnisse.....	32
4.1	Laborversuche	32
4.1.1	Sensoren	32
4.1.2	Übertragungsverhalten der Pflückplatte	32
4.1.3	Einfluss von Sensorposition und Pflanzeigenschaften	33
4.1.4	Frequenzanalyse	39
4.2	Feldversuche.....	40
5	Diskussion	43
5.1	Laborversuche	43
5.1.1	Sensoren	43
5.1.2	Übertragungsverhalten der Pflückplatte	45
5.1.3	Einfluss von Sensorposition und Pflanzeigenschaften	45
5.1.4	Frequenzanalyse	49
5.2	Feldversuche.....	49
6	Zusammenfassung	53
7	Literaturverzeichnis	54
8	Anhang	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Pflückwalzen und Entlieschtisch eines Kolbenpflückers.....	10
Abbildung 2: Gezogener Maispflücker mit aufgebautem Bunker.....	11
Abbildung 3: Aufbau der Rebel- und Reinigungseinrichtung eines zweireihigen Pflückreblers.....	12
Abbildung 4: Arbeitsweise von Profil-Pflückwalzen und Pflückschienen mit darunter liegenden Durchziehwalzen.....	13
Abbildung 5: Arbeitsweise der Systeme PCA (l.) und Rota-Disk (r.) der Firma Geringhoff	15
Abbildung 6: Reihenunabhängiger Maispflückvorsatz Cornstar	15
Abbildung 7: Versuchsaufbau Laborversuche, verändert nach.....	21
Abbildung 8: Ausschnitt eines auftreffenden Maiskolbens aus einer mit dem Mikrofon aufgenommenen wav-Datei.....	22
Abbildung 9: Datenblatt des Piezokristallsensors PKS1	24
Abbildung 10: Blockschaltbild der Messwerterfassung mit den Piezokristallsensor.....	27
Abbildung 11: Aufbau der Versuchsmaschine für die Feldversuche.....	29
Abbildung 12: Ausschnitt aus einer mit dem Mikrofon aufgenommenen wav-Datei eines Feldversuches	30
Abbildung 13: Ausschnitt aus Abbildung 12 nach dem Herausfiltern der Frequenzen unterhalb von 1000 Hz und oberhalb von 9000 Hz.....	31
Abbildung 14: Blockschaltbild der Integrationsschaltung	31
Abbildung 15: Relatives Übertragungsverhalten der Pflückplatte.....	33
Abbildung 16: Arithmetisches Mittel der Signalstärke in Abhängigkeit von der Sensorposition	34
Abbildung 17: Arithmetisches Mittel der maximalen Signalstärke in Abhängigkeit von der Stärke der Gummilagerung der Pflückplatte	35
Abbildung 18: Arithmetisches Mittel der maximalen Signalstärke in Abhängigkeit vom Kolbengewicht.....	36
Abbildung 19: Arithmetisches Mittel der maximalen Signalstärke in Abhängigkeit vom TS-Gehalt der Kolben.....	37
Abbildung 20: Arithmetisches Mittel der maximalen Signalstärke in Abhängigkeit von der Einzugsgeschwindigkeit	38
Abbildung 21: Frequenzspektren von Kolbenaufprall- und Leerlaufgeräusch	39
Abbildung 22: Gesamtgewicht in Abhängigkeit von der Anzahl der geernteten Kolben aller Feldversuche.....	40
Abbildung 23: Summenintegral der Signalstärke des Piezokristallsensors in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht der geernteten Kolben.....	41
Abbildung 24: Summenintegral der Signalstärke des Piezokristallsensors in Abhängigkeit von der Anzahl der geernteten Kolben	41

Abbildung 25: Summenintegral der Signalstärke des Mikrofons in Abhängigkeit von der Gesamtmasse der geernteten Kolben.....	42
Abbildung 26: Summenintegral der Signalstärke des Mikrofons in Abhängigkeit von der Anzahl der geernteten Kolben	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nährstoffentzug von Körnermais	8
Tabelle 2: Technische Daten von Messmikrofon und Vorverstärker.....	25
Tabelle 3: Arithmetisches Mittel und Standardabweichung der Kolbengewichte im Versuch „Einfluss des Kolbengewichtes auf die Signalstärke“	36

Abkürzungsverzeichnis

A	Ampere (elektrische Stromstärke)
Bt	Bacillus thuringiensis
C	Kohlenstoff
dB	Dezibel (Schallstärke)
D-GPS	Differenzial-GPS
DMS	Dehnungsmessstreifen
FAO	Food and Agricultural Organisation (Organisation für Ernährung und Landwirtschaft der Vereinten Nationen)
FFT	Fast Fourier Transformation
G	Gravitationskonstante
GPS	Global-Positioning-System (Globales Ortungssystem)
Hz	Hertz
K ₂ O	Kaliumoxid
MgO	Magnesiumoxid
Pa	Pascal (1 Pa = 1 N/m ² bzw. 1 Pa = 10 ⁻⁵ bar)
pF	Pikofarad (elektrische Kapazität)
P ₂ O ₅	Phosphoroxid
PS	Pferdestärke (1 PS = 0,7355 kW)
N	Stickstoff
NKB	Nicht-Korn-Bestandteile
TM	Trockenmasse
TKM	Tausend-Korn-Masse
TS	Trockensubstanz
V	Volt (elektrische Spannung)
wav-Datei	waveform-Datei

1 EINLEITUNG

Der Mais gehört zusammen mit Weizen und Reis zu den wichtigsten Kulturpflanzen der Welt. So liefern diese drei Kulturpflanzen rund 86 % der Weltgetreideproduktion und 60 % der weltweiten Nahrungsenergie und Nahrungsproteine. Obwohl der Körnermais mit einer Anbaufläche von ca. 140 Mio. ha in der Reihenfolge hinter Weizen und Reis steht, führt er die Erntestatistik im Jahr 2003 mit ca. 635 Mio. t deutlich vor Weizen und Reis an [1, 15]. Ermöglicht wurde diese enorm hohe Flächenproduktivität durch die Entdeckung der Hybridzucht durch die beiden Amerikaner EAST und SHULL in den Jahren 1905-1910. Schlagartig konnten dadurch die Erträge um 25-30 % gesteigert werden und Sorten für klimatisch weniger günstige Standorte geschaffen werden. Durch kontinuierliche Züchtung sowie verbesserte Düngung, Pflanzenschutz und Anbautechnik konnten die Erträge bis heute weiter deutlich erhöht werden [33]. In Deutschland, wo sich der Maisanbau von etwa 1950 bis heute auf ca. 400.000 ha ausgebreitet hat, werden im Körnermaisbau durchschnittliche Flächenerträge von über 80 dt ha⁻¹ geerntet [1].

Ein weiterer Grund für die starke Ausbreitung des Körnermaisbaus ist die enorme Mechanisierung bei Anbau und Ernte im Laufe des letzten Jahrhunderts. So konnte der übliche Arbeitsaufwand für den Körnermaisbau allein in der Zeit von 1950/52 bis 1966/68 von 370 Akh ha⁻¹ auf nur noch 30 Akh ha⁻¹ reduziert werden. Einen wesentlichen Anteil an dieser Arbeitszeiteinsparung hat der Bereich der Erntetechnik. Hier ging die Entwicklung vom Handernteverfahren über Kolbenpflücker und Pflückrebler bis hin zum Mähdrescher mit Kolbenpflückvorsatz.

Zur maximalen Nutzung der möglichen Mähdrescherleistung sind heute elektronische Informations- und Regelsysteme nicht mehr wegzudenken. Wie wichtig es ist, die Maschineneinstellung ständig den aktuellen Erntebedingungen anzupassen, wird bei der Betrachtung möglicher Ertragsschwankungen deutlich. So kann der Ertrag bei Getreide wie auch bei Körnermais auf einem Schlag um nahezu 100 % (<50 bis >80 dt ha⁻¹) variieren [11]. Ähnlich hohe Schwankungen sind sicherlich auch z.B. bezüglich der Kornfeuchte und des Unkrautbesatzes denkbar. Zur Kontrolle der Arbeitsqualität der Dresch- und Trennorgane sind deshalb seit etwa 30 Jahren Sensoren zur Erfassung der Körnerverluste an Schüttler und Sieben üblich, in jüngster Zeit wurden zusätzlich Sensoren zur Erfassung der Überkehr auf den Markt gebracht [12]. Drehzahlanzeigen für Trommel und Gebläse sowie die Strohstauklappe über den Schüttlern, die den Fahrer vor einer Überlastung der Maschine warnen, sind schon seit langem Stand der Technik.

Die zur Teilschlagbewirtschaftung nötige Erfassung des Ertrages ist heute ebenfalls im Mähdrescher untergebracht. Die dafür genutzten Systeme erfassen entweder den Volumen- oder den Massenstrom am Elevator im Korntank.

Die Gemeinsamkeit aller genannten Systeme liegt jedoch darin, den Durchsatz bzw. die Veränderung des Durchsatzes immer erst an den Trennorganen oder sogar dahinter zu erfassen. Die auf diesen Informationen aufbauende Regelung reagiert also immer erst auf

die Auswirkungen des sich ändernden Gutflusses. Eine Erfassung der zu verarbeitenden Erntemenge bereits vor den Trennorganen des Mähdreschers wäre deshalb sinnvoll. So könnte, z.B. durch die Anpassung der Fahrgeschwindigkeit, der Gutfluss in den Trennorganen konstant im für Flächenleistung und Arbeitsqualität optimalen Bereich gehalten werden.

Für die Ertragskartierung ist eine möglichst schnelle und damit zeitnahe Erfassung des Gutflusses ebenfalls wünschenswert. Wird der Ertrag erst im Korntank gemessen, so wird der Teil der Erntemenge, der durch Sieb- und Schüttlerverluste oder durch Undichtigkeiten der Maschine verloren geht, gar nicht mit erfasst. Ein weiteres Problem stellt die Tatsache dar, dass zwischen der Aufnahme des Erntegutes und der Ankunft von diesem am Sensor eine gewisse Zeit verstreicht (transportation delay). Während dieser Zeit hat sich der Mähdrescher aber bereits weiter fortbewegt und der erfasste Ertrag ist nicht mehr der aktuellen Position zuzuordnen. Ein konstanter Ausgleichsfaktor zur Berücksichtigung dieses Delays, wie er bei den angebotenen Ertragsmesssystemen üblich ist, ist jedoch bei sich änderndem Durchsatz und Fahrgeschwindigkeit nicht ausreichend [28]. Die Erfassung des Materialflusses am Aufnahmeorgan hätte mit derartigen Problemen nicht zu kämpfen. Ziel dieser Arbeit ist es, ein für die Erfassung des Kolbendurchsatzes am Pflückvorsatz des Mähdreschers geeignetes Sensorsystem zu bestimmen und zu untersuchen. Dazu wird zunächst eine Überblick über die historische Entwicklung und den Stand der Technik des Körnermaisbaus, insbesondere der Erntetechnik und der Ertragserfassung gegeben. Im weiteren Verlauf sollen verschiedene Sensoren zur Erfassung des Schallimpulses der auf die Pflückplatte auftreffenden Maiskolben an einem stationären Maispflücker im Labor untersucht und ein geeignetes System zur Ertragserfassung am Maispflückvorsatz des Mähdreschers empfohlen werden. Variiert werden dabei die Faktoren Lagerung der Pflückplatte und Anbaustelle der Sensoren, die Größe und Kornfeuchte der Maiskolben sowie die Drehzahl der Einzugsorgane. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse soll dann ein Prototyp gebaut und dessen Funktion im Feldversuch überprüft werden. Abschließend sollen die Ergebnisse dargestellt und diskutiert werden.

2 STAND DES WISSENS UND DER TECHNIK

In zweiten Teil der Arbeit soll der Stand des Wissens zum Thema dieser Diplomarbeit zusammengefasst werden. In Kapitel 2.1 wird dabei auf die pflanzenbaulichen Grundlagen eingegangen, während Kapitel 2.2 die Entwicklung und den aktuellen Stand der Körnermaiserntetechnik beschreibt.

2.1 Pflanzenbauliche Grundlagen

Dieser Teil der Arbeit gliedert sich in die Kapitel Botanik (Kap. 2.1.1), Zucht (Kap. 2.1.2) und Anbauverfahren (Kap. 2.1.3) des Körnermais.

2.1.1 Botanik

Mais (*Zea mays* L.) gehört wie alle Getreidearten zur Familie der Gräser (Gramineen) und stellt in dieser die einzige Art der Gattung *Zea*. Innerhalb der Art gibt es jedoch eine große Anzahl an Varietäten, die nach ihrer Kornform in die sieben Gruppen Zahnmais (dent), Hartmais (flint), Puffmais (pop), Zuckermais (sweet), Stärkemais (flour), Wachsmais (waxy) und Spelzmais (pod) eingeteilt werden [16]. Die weltweit größte wirtschaftliche Bedeutung hat der Zahnmais mit 70 %, gefolgt von Hartmais mit 13-14 %, Stärkemais mit 12 % und Süß- und Puffmais mit 1-2 %. Spelzmais, bei dem zusätzlich zu den Kolben auch die einzelnen Körner von Lieschblättern umhüllt sind, spielt im weltweiten Anbau keine Rolle [33].

Das Wurzelsystem der Maispflanze lässt sich in Keimwurzeln, Kronenwurzeln und Luftwurzeln unterteilen. Die Keimwurzeln wachsen während der Keimung aus dem Korn nach unten, später kommen aus der Basis des zweiten Internodiums die ersten Kronenwurzeln hinzu. Luftwurzeln, oftmals auch als Stützwurzeln bezeichnet, entstehen an der Basis des zweiten und dritten oberirdischen Internodiums. Sie übernehmen ebenfalls Wurzelfunktionen wenn sie in den Boden eindringen. Der Mais ist gleichzeitig Tief- und Flachwurzler und zählt zu den Pflanzen mit der höchsten Wurzel ausbreitung. Jede Maispflanze entwickelt nur einen Haupttrieb zu einem voll ausgebildeten Stängel. Die Länge dieses Stängels beträgt bei den in Deutschland angebauten Sorten etwa 1,6 bis 2,8 m. An jedem oberirdischen Knoten entwickelt sich ein Blatt, insgesamt bei den hier angebauten Sorten 8 bis 16 Blätter, wobei mit zunehmender Reifezahl die Anzahl der Blätter zunimmt. In den Blattachsen sind die Knospen für die Bildung von Seitentrieben bzw. Kolben angelegt. Von diesen bilden eine oder mehrere, etwa in halber Höhe des Stängels einen Kolben. Der Kolben besteht aus einer verdickten Hauptachse, auch Spindel genannt, um die sich 18 bis 20 Kornreihen von jeweils 15 bis 20 Körnern mit einer TKM von 200 bis 600 g anordnen [15].

Die Anzahl der Kolben an einer Pflanze hängt im Wesentlichen von der Bestandesdichte ab. Bei weiten Pflanzenabständen kommen mehrere Kolben zur Entwicklung. Erwünscht ist jedoch nur ein Kolben je Pflanze, weil weitere Kolben mit jeweils etwa 10 Tagen

Verspätung ausreifen und so eine gleichmäßige Abreife des Bestandes nicht gewährleistet ist. Die Anzahl der Körnerreihen auf dem Kolben ist dagegen weitgehend genetisch fixiert, Unterschiede in der Anzahl der Körner je Kornreihe sind jedoch bedingt durch die Unsicherheiten bei der Fremdbefruchtung häufig. Das Korngewicht der Körner am oberen Ende des Kolbens ist um bis zu 20 % geringer als das der übrigen Körner. Insgesamt ist das Korngewicht weitgehend sortenbedingt. Umweltfaktoren wie Wasser- und Nährstoffversorgung wirken ebenfalls stark auf das Korngewicht ein [17].

Der gesamte Kolben ist von Lieschblättern umhüllt, lediglich die Narbenfäden der ragen aus diesen zur Blüte heraus. An der Spitze des Stängels befindet sich die Rispe oder Fahne, der männliche Blütenstand der Maispflanze. Der Mais ist somit, anders als die übrigen Getreidearten, einhäusig-getrennt geschlechtlich. Die Bestäubung findet durch den Wind statt. Dadurch, dass die Pollen etwa zwei bis vier Tage vor dem Erscheinen der Narbenfäden entlassen werden, kommt es natürlicherweise fast ausschließlich zu Fremdbefruchtung [15, 16].

Bei der Abreife verlagert der Mais im Stängelmark zwischengelagerte Assimilate in den Kolben bzw. die Körner. Dieser Vorgang ist abgeschlossen und damit die physiologische Reife erreicht, wenn sich zwischen Maiskorn und Spindel eine schwarze Trennschicht, der sogenannte „black layer“, gebildet hat. Diese Trennschicht unterbindet jeden weiteren Flüssigkeitsaustausch zwischen Korn und Spindel. Der TS-Gehalt der Körner liegt zu diesem Zeitpunkt bei etwa 60-65 %, eine weitere Erhöhung des TS-Gehaltes ist von jetzt an nur noch durch die Abgabe von Flüssigkeit an die Umgebungsluft möglich [23].

Im Gegensatz zu den anderen Getreidearten zeigt der Mais enorme Wachstumsleistungen. So entwickeln sich aus einem ausgesäten Maiskorn nach nur etwa 5 bis 6 Monaten 400-600 Körner, während es die übrigen Getreidesorten nur auf das 40-50fache bringen [33]. Und trotzdem verbraucht der Mais nur relativ wenig Wasser. Der Transpirationskoeffizient beträgt nach neueren Untersuchungen beim Mais nur $200 \text{ l H}_2\text{O kg}^{-1} \text{ TM}$, während Gerste und Roggen 220-300 l und Weizen 300-400 Wasser zur Erzeugung von einem kg TM benötigen [Ehlers, 1997 in [23]. Dies beruht auf der Tatsache, dass der Mais, wie einige andere tropische Gräser, bei der Assimilation von CO_2 dem Dicarbonsäurezyklus folgt, während die übrigen Getreidearten dem Calvin-Zyklus folgen. Beim Dicarbonsäurezyklus wird das CO_2 in einen C_4 -Körper verbaut, weshalb man derartige Pflanzen auch als C_4 -Pflanzen bezeichnet. Beim Calvin-Zyklus entsteht hingegen ein C_6 -Körper, der sofort in zwei C_3 -Körper zerfällt. Pflanzen, die bei der Assimilation dem Calvin-Zyklus folgen, werden deshalb auch als C_3 -Pflanzen bezeichnet [24].

Eine weitere Besonderheit des Maises ist sein hoher Wärmebedarf. Die subtropische Pflanze benötigt bereits zur Keimung 8 bis 10 °C und das eigentliche Wachstum setzt erst bei 14 bis 15 °C ein. Die Durchschnittstemperaturen zwischen Mai und September sollten selbst für sehr frühreife Körnermaishybriden über 13,5 °C und/oder die Sonnenscheindauer über 900 h liegen, damit eine vollständige Ausreife erfolgen kann. Außerdem ist der Mais

sehr frostempfindlich. Beim Spross erfrieren schon bei $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Blätter, ein Unterschreiten von $12\text{ bis }15\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der Jugendphase führt bei den jüngeren Pflanzenteilen zur Kühlechlorose und damit zu Wuchsdepressionen. Im späteren Wachstumsstadium der Abreife werden im Halm zwischengespeicherte Assimilate in den Kolben umgelagert. Dieser Vorgang kann schon durch Frostereignisse von nur wenigen Stunden unter $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, z.B. Nachtfröste irreversibel unterbunden werden [15].

Bezüglich der Bodeneigenschaften ist der Mais weniger anspruchsvoll, seine Bedürfnisse leiten sich in erster Linie aus den Temperaturansprüchen ab. So sollten zu kalte Ton- oder staunasse Böden und frostgefährdete Lagen gemieden werden und der pH-Wert darf $5,6$ nicht unterschreiten. Der Wasseranspruch während der Hauptwachstumsphase (Blüte) ist trotz des niedrigen Transpirationskoeffizienten, bedingt durch das enorme Massenwachstum in dieser Zeit, sehr hoch. Eine gute Wasserversorgung der Böden oder die Möglichkeit zur Bewässerung und eine rasche Erwärmung im Frühjahr sind deshalb von Vorteil [15].

Um für die jeweiligen Anbauverhältnisse geeignete Maissorten bestimmen zu können, wird allen Sorten nach Einstufung ihrer Reifezeit eine Reifezahl (FAO-Zahl) zugeordnet. Diese dreistellige FAO-Zahl gibt in der Reihenfolge ihrer Ziffern die Reifegruppe, die Stellung der Sorte innerhalb der Reifegruppe und die Kornfarbe an. Eingeteilt werden die Sorten durch die Feststellung des Wassergehaltes im Korn zu einer bestimmten Erntezeit im Vergleich zu bereits eingestufteten Referenzsorten. Ein hoher Wassergehalt der zeitgleich geernteten Kolben weist auf eine spätere Abreife hin und spiegelt sich in einer hohen FAO-Zahl wieder. In Deutschland anbauwürdige Sorten weisen FAO-Zahlen von 170 bis 300 auf, international reicht die Skala jedoch bis 900 . Die Differenz von 10 FAO-Einheiten bringt in der Reife einen Unterschied von $1-2$ Tagen bzw. im TS-Gehalt der Körner $1-2\text{ }\%$ -Punkte [15, 33].

Seit 1998 wird den Sorten je nach ihrer Nutzung als Körner- oder Silomais eine Körnerreifezahl oder eine Siloreifezahl zugeordnet. Errechnet wird diese im Prinzip wie die FAO-Zahl, jedoch wird beim Körnermais der TS-Gehalt der Körner und beim Silomais der TS-Gehalt der Gesamtpflanze berücksichtigt. Eine Differenz von $1\text{ }\%$ -Punkt TS-Gehalt entspricht dabei 10 Reifeeinheiten [2]. Aufgelistet werden die Reifezahlen zusammen mit den übrigen Sortenmerkmalen in der „Beschreibenden Sortenliste“ des Bundessortenamtes.

2.1.2 Zucht

Durch sein einhäusig-getrenntes Geschlecht ist der Mais besonders geeignet zur Hybridzucht. Bei diesem, von den beiden Amerikanern EAST und SHULL in den Jahren 1905 bis 1910 entwickelten Zuchtverfahren, entsteht eine Hybridsorte durch das systematische Kreuzen von genetisch verschiedenen Komponenten. Diese können offen bestäubte Populationen, Inzuchtlinien oder selbst Hybriden sein. Durch die Auswahl von Hybridpartnern mit stark unterschiedlichem Genpool wird versucht, in der für den

endgültigen Anbau vorgesehenen Pflanzengeneration einen möglichst großen Heterosiseffekt, d.h. eine Mehrleistung der heterozygoten Pflanzengeneration gegenüber der homozygoten Elterngeneration zu erreichen. Die heterozygoten Sorten spalten jedoch in den folgenden Generationen wieder auf und verlieren ihre Mehrleistung, weshalb Hybridsorten nicht nachgebaut werden können. In Europa, wo die Hybridzucht seit etwa 1945 angewendet wird, sind die Hybridpartner zumeist Inzuchtlinien aus frühreifen, europäischen Hartmais-Typen (dents) und ertragreichen, nordamerikanischen Zahnmais-Typen (flints). Bei üblichen Zuchtverfahren schlecht kombinierbare Eigenschaften wie Frühreife und Ertrag können so miteinander in Verbindung gebracht werden.

Aus den gewählten Hybridpartnern werden zunächst Inzuchtlinien hergestellt. Bei diesem als Selbstung bezeichneten Vorgang kreuzt man die Pflanzen der Ausgangspopulation immer wieder mit sich selbst und führt dabei eine ständige Selektion durch, bis nach etwa sechs Inzuchtzyklen eine hinreichend homogene Inzuchtlinie entstanden ist. Durch die intensive Inzucht bei diesem Vorgang treten neben großen Leistungsdepressionen auch Mängel wie Missbildungen, starke Lagerneigung, erhöhte Anfälligkeit für Krankheiten usw., die sonst in der Ausgangspopulation versteckt sind, auf.

Parallel dazu werden die Inzuchtlinien bereits auf ihre Kombinationsfähigkeit geprüft. Dies ist nötig, weil die Merkmalsausprägung der Inzuchtlinien nur unzureichend auf die Merkmalsausprägung der daraus entstehenden Hybriden schließen lässt, insbesondere beim wichtigsten Zuchtziel, dem Ertrag. Die Inzuchtlinien werden dazu mit einem sogenannten Tester gekreuzt und über zwei Jahre auf Ertrag, Standfestigkeit, Frühreife usw. geprüft. Aufgrund der Ergebnisse dieser Prüfungen werden die Inzuchtlinien nochmals stark selektiert. Nachdem auf diese Weise die Anzahl der Inzuchtlinien stark genug reduziert werden, können mit den verbleibenden Linien diallele Kreuzungen hergestellt, d.h. jede Linie wird mit jeder gekreuzt. Nach einer weiteren mindestens zweijährigen Leistungsprüfung dieser diallelen Kreuzungen lassen sich die besten Einfachhybridkombinationen bestimmen.

Aus den im Dialleltest ermittelten Leistungen der Inzuchtlinien wird dann mittels einer von JENKINS 1934 entwickelten Methode im Computermodell die Leistung der Doppelhybriden vorhergesagt. Dies ist nötig, weil die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten bei Doppelhybriden schnell unüberschaubare Größenordnungen erreicht. So sind aus 10 Inzuchtlinien bereits 630, aus 100 Inzuchtlinien mehr als 11,7 Millionen Doppelkreuzungen möglich. Die mit Hilfe des Computers bestimmten aussichtsreichsten Doppelhybridkombinationen werden abschließend über mehrere Jahre an mehreren Orten auf ihre Eignung als neue Hybridsorte getestet.

Neben den genannten Einfachhybriden und den aus zwei Einfachhybriden erstellten Doppelhybriden werden außerdem die Kreuzungstypen Dreiwegehybride und Topcrosshybride verwendet. Bei der Dreiwegehybride wird eine Einfachhybride in der

zweiten Generation mit einer dritten Inzuchtlinie, bei der Topcrosshybride mit einer offen bestäubenden Sorte gekreuzt.

Die größte praktische Bedeutung haben Einfachhybriden. Neben den deutlich geringeren Produktionskosten der aus zwei Inzuchtlinien erstellten Einfachhybriden gegenüber den auf vier Inzuchtlinien beruhenden Doppelhybriden sind die Gründe dafür eine bessere Uniformität und eine höhere Ertragsleistung der Einfachhybriden gegenüber den Doppelhybriden [26].

Nicht zuletzt aus den Zuchtfortschritten der Hybridzucht resultiert eine Ertragszunahme in Deutschland von etwa 30 dt ha⁻¹ in den fünfziger Jahren auf fast 90 dt ha⁻¹ Ende der neunziger Jahre, obwohl sich der Körnermaisbau im gleichen Zeitraum in klimatisch immer ungünstigere Regionen ausbreitete [11].

2.1.3 Anbauverfahren

Der Mais stellt keine besonderen Ansprüche an die Fruchtfolge und ist aufgrund seiner Selbstverträglichkeit in alle Fruchtfolgen gut zu integrieren. In spezialisierten Betrieben erreicht Mais in der Fruchtfolge nicht selten einen Anteil von bis zu 100 %. Auf staunassen Standorten oder Böden, die zur Verdichtung neigen, sollte der Anteil aber nicht über 30 % liegen. Die typischen Fruchtfolgekrankheiten der Hauptgetreidearten Halmbruch und Schwarzbeinigkeit überträgt der Mais nicht, bei nachfolgendem Winterweizenanbau kann es jedoch zu erhöhtem Ährenfusariendruck kommen. Dem ist durch sorgfältige, gleichmäßige Zerkleinerung und Einarbeitung des (Körner-) Maisstrohes entgegenzuwirken [23].

Körnermais hinterlässt etwa 100-125 dt TS je ha an Ernterückständen mit einem für den Abbau vergleichsweise günstigen C/N-Verhältnis von 60:1. Diese Menge ist mit der Humuszufuhr einer Stallmistdüngung von 250-350 dt ha⁻¹ zu vergleichen. Für die Folgefrucht können aus den Ernterückständen 30 kg ha⁻¹ P₂O₅, 140 kg ha⁻¹ K₂O und 30 kg ha⁻¹ MgO angerechnet werden [23].

Das bei der konventionellen Bodenbearbeitung zu Mais übliche Verfahren ist auf schweren Böden die Herbst- und auf leichteren Böden die Frühjahrsfurche. Bei der konservierenden Bodenbearbeitung wird im Frühjahr nach einer abfrierenden Zwischenfrucht nur eine flache Bodenbearbeitung z.B. mit dem Grubber vorgenommen, oder der Mais wird als Mulchsaat direkt, ohne weitere Saatbettbereitung ausgesät. Die Aussaat findet in Deutschland nach ausreichender Bodenerwärmung in der zweiten Aprilhälfte statt. Die Saattiefe soll je nach Bodenart 4 cm auf schweren Böden bis 6 cm auf leichteren Böden betragen [23][23]. Als Sämaschinen kommen heute mechanische oder pneumatische Einzelkorngeräte mit einem Reihenabstand von 75 cm zum Einsatz. Bei einer anzustrebenden Bestandesdichte von 6-12 Pflanzen m⁻², ergibt sich, je nach Keimbedingungen und Reifegruppe, ein Abstand von 22-11 cm in der Reihe [33].

In einem Arbeitsgang mit der Aussaat wird üblicherweise eine NP-Unterfußdüngung ausgebracht, z.B. Diammonphosphat im konventionellen Landbau oder Gesteinsmehle in Kombination mit Rohphosphat im ökologischen Landbau. Dabei wird der Dünger je etwa 4-5 cm seitlich bzw. unterhalb des Saatkornes abgelegt, die Aufwandmenge errechnet sich dabei nach dem P-Bedarf. Sinnvoll ist diese Maßnahme aufgrund des schlechten Aneignungsvermögens des Maises für den Nähstoff Phosphor, bei gleichzeitig hohem Bedarf während der Jugendentwicklung 50-70 Tage nach dem Auflaufen. Die restliche N-Menge kann auf leichten Böden in einer zweiten Gabe, auf allen anderen Böden bereits vor der Saat, gegeben werden. Die K- und ggf. Mg-Düngung erfolgt ebenfalls zur Saat. Zur Bestimmung der Aufwandmengen müssen die Bodenanalysen, die Düngewirkung der Vorfrucht und die Bodenart berücksichtigt werden. Dabei gelten als Grundlage für die Berechnung die in Tabelle 1 dargestellten Nährstoffentzüge [23].

Tabelle 1: Nährstoffentzug von Körnermais

Frucht bzw. Nutzung	Nährstoffentzug in kg 10 dt ⁻¹			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Korn (86 % TS)	12-16	6-11	4-6	2-3
CCM (53% TS)	15-17	6	17	3
LKS (50% TS)	13-15	6	16	4
Stroh	5-9	5-7	15-25	2-4

verändert nach [23] und [33]

Wie bei allen anderen „Hackfrüchten“ erfolgt die Unkrautregulierung im Mais chemisch (konventionell), mechanisch (ökologisch) oder kombiniert (integriert). Kombinierte Verfahren helfen Pflanzenschutzmittel einzusparen und die Vorteile von chemischer (Sicherheit) und mechanischer Unkrautregulierung (Durchlüftung des Bodens, Einarbeitung von Dünger) zu vereinen. Die rein chemische Unkrautregulierung ist jedoch die billigste und sicherste Variante und deshalb am weitesten verbreitet.

Im ökologischen Landbau wird zur Unkrautregulierung im Körnermais hauptsächlich gestriegelt und gehackt. Der Striegel kann vor dem Auflaufen und wieder ab dem 4-Blattstadium des Maises eingesetzt werden. Der Einsatz der Maschinenhacke ist ab dem Auflaufen bis zum Reihenschluss möglich. Ebenfalls ab dem 4-Blattstadium kann mit der Maschinenhacke in der Reihe angehäufelt werden, um das Beikraut dort zu verschütten. Das Hacken mit der Hand sollte auf Grund der hohen Kosten nur in Ausnahmefällen nötig sein [25].

Gegen pilzliche Schaderreger im Mais steht außer der Saatgutbeize kaum ein chemisches oder sonstiges Bekämpfungsmittel zur Verfügung. Durch die Auswahl widerstandsfähiger Sorten und eine harmonische Fruchtfolge lässt sich den im Mais vorkommenden

Krankheiten Beulenbrand (*Ustilago maydis*) und Wurzel-, Stängel- und Kolbenfäule (meist verursacht durch *Fusarium*-Arten) jedoch vorbeugen [33].

Der Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*) ist der bedeutendste tierische Schädling in Deutschland. Seine Raupen fressen an Stängeln und Kolbenspindeln, was neben gewissen Ertragseinbußen zu indirekten Schadwirkungen durch das Eindringen von Fäulnisregenern führt. Die Kolben verfaulen dadurch innerlich und die gesamte Pflanze kann durch die geschwächten Stängel umknicken. Die biologische Bekämpfung des Maiszünslers kann durch den Einsatz von Schlupfwespen (*Trichogramma evanescens*) oder Bt-Präparaten erfolgen. Gentechnisch veränderte Pflanzen können den Wirkstoff selbst herstellen, sie werden im Allgemeinen als Bt-Mais bezeichnet. Zur chemischen Bekämpfung werden üblicherweise synthetische Pyrethroide eingesetzt. Vorbeugend ist auf eine gleichmäßige Zerkleinerung und Einarbeitung der Ernterückstände zu achten.

Im ökologischen Landbau spielt zudem Vogelfraß eine wesentliche Rolle für die Bestandesetablierung, da hier bei der Saatgutbeizung keine Vergällungsmittel eingesetzt werden dürfen.

2.2 Erntetechnik

In Kapitel 2.2.1 wird die Entwicklung der Erntetechnik von etwa 1900 bis 1970 beschrieben, in Kapitel 2.2.2 soll die heute übliche Erntetechnik dargestellt werden.

2.2.1 Entwicklung der Erntetechnik

In den USA, dem Ursprungsland des mechanisierten Maisanbaus wurden um die Jahrhundertwende die ersten Maispflücker entwickelt. Vorher war auch hier die Handerte üblich. Mit dem Einzug der Traktoren in die Landwirtschaft setzten sich in den dreißiger Jahren die ersten zapfwellengetriebenen, angehängten Maispflücker durch. Diese Maschinen pflückten und sammelten die Kolben lediglich. Nur kurze Zeit später wurde mit den ersten Pflückreblern der Übergang zur Körnerernte gebracht. Pflücken und Trennen von Spindel und Körnern erledigten diese in einem Arbeitsgang. Mangels geeigneter Trocknungstechnik konnte sich dieses Verfahren zunächst jedoch nicht durchsetzen, das Trocknen der ganzen Kolben an der Luft war das unter den technischen Voraussetzungen jener Zeit geeignetere Verfahren. Versuche mit dem Mähdrescher und nur geringfügig modifizierten Standartschneidwerk wurden zu dieser Zeit ebenfalls durchgeführt. Dabei musste allerdings die gesamte Maispflanze vom Mähdrescher verarbeitet werden, weil Pflückvorsätze für den Mähdrescher noch nicht entwickelt waren. Grundsätzlich war dies eine geeignete Möglichkeit zur Körnermaisernte. Die enormen Mengen an Maisstroh stellten jedoch eine erhebliche Belastung für die Maschine dar, so dass dieses Ernteverfahren in der Form nicht weiterentwickelt wurde.

Nach dem zweiten Weltkrieg setzte sich der Pflückrebler durch. Er wurde hauptsächlich als zweireihige Aufbaumaschine für den Schlepper gebaut. Erst in den fünfziger Jahren

wurden die ersten Maispflückvorsätze für den Mähdrescher entwickelt, so dass nur noch der Kolben mit den Lieschblättern von den Trennorganen des Dreschers verarbeitet werden musste. Als Vorteile der Kombination von Pflücker und Mähdrescher sind die bessere Auslastung des Mähdreschers, die vergleichsweise gute Arbeitsqualität und die hohe Flächenleistung zu nennen, so dass sich dieses Ernteverfahren in den USA schnell durchsetzte. In Europa, wo der Körnermaisbau schon immer eine wesentlich geringere Bedeutung als in den USA gehabt hat, verlief die Mechanisierung der Körnermaisernnte in ähnlichen Schritten, jedoch mit einer gewissen Verzögerung. Im Folgenden werden die genannten Ernteverfahren vorgestellt.

Bei der Handernnte wurden die Kolben mit dem Messer von der Pflanze getrennt oder einfach abgerissen. Geübte Arbeiter benötigten so für einen ha 17-20 Tage. Zum Trocknen entfernte man die Lieschblätter und hängte die Kolben auf. Das Entrebeln der Kolben erfolgte ebenfalls von Hand oder mit einfachen Tischmaschinen [18].

Die erste Mechanisierungsstufe stellten die Kolbenpflücker dar. Bei diesen trennten zwei gegenläufig rotierende Profil-Pflückwalzen die Kolben vom Stängel und entlieschten sie teilweise. Auf einen nachfolgenden Entlieschtisch gefördert, wurden die Kolben entgültig von den Lieschblättern getrennt. Zum Einsatz kamen dabei gegenläufig rotierende, gerippte oder gummibeschichtete Stahlwalzen. Beide Baugruppen sind in Abbildung 1 dargestellt.

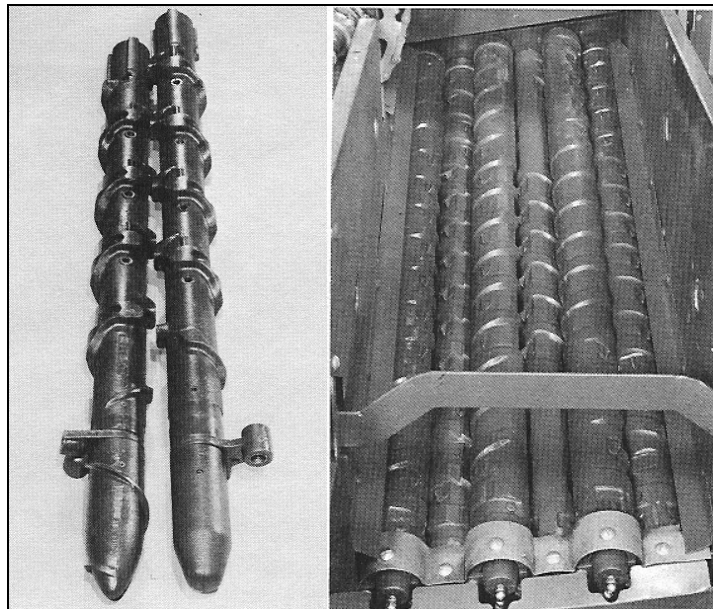


Abbildung 1: Pflückwalzen und Entlieschtisch eines Kolbenpflückers [22]

Über weitere Fördereinrichtungen gelangten die Kolben auf einen nachfolgenden Wagen oder einen aufgebauten Bunker. Die technischen Ausführungen reichten vom verhältnismäßig langen Zug aus Schlepper, angehängtem Pflücker und nachfolgenden Sammelwagen über Dreipunkt-Anbaupflücker mit nachfolgendem Sammelwagen, gezogenen Bunkerpflückern bis zu aufgebauten Pflückern mit Überkopfbunkern oder Bunkern auf der Ladefläche von Unimog oder Geräteträger. Die einfachste und wendigste Lösung stellte dabei der gezogene Bunkerpflücker (Abbildung 2) dar, der im Aufbau einem modernen Kartoffelroder ähnelte.



Abbildung 2: Gezogener Maispflücker mit aufgebautem Bunker [16]

Für einreihige Pflücker waren Motorleistungen von 30-45 PS notwendig, der Zeitbedarf lag bei 5-7 Akh ha⁻¹. Mit Ernteverlusten von 6-10 % musste gerechnet werden, die Strohzerkleinerung erfolgte in einem separaten Arbeitsgang [26].

Die geernteten Maiskolben wurden entweder sofort in stationären Maschinen gedroschen und getrocknet oder in speziellen Trockengestellen an der Luft gelagert und getrocknet. Das Trennen von Korn und Spindel erfolgte dabei erst zu einem späteren Zeitpunkt.

Eine deutliche Verkürzung der Erntekette brachte der Pflückrebler. Hier wurden die Kolben ebenfalls wie beim oben genannten Maispflücker mittels Profil-Pflückwalzen gepflückt, danach jedoch direkt in eine Rebeleinrichtung gefördert. Diese bestand aus einem rundum geschlossenen Dreschkorb und einer mit Stiften und/oder Schlägerleisten bestückten Trommel. Die Kolben wurden kontinuierlich durch die Rebelvorrichtung gefördert und dabei schonend entkörnt. Die nachfolgende Reinigungseinrichtung aus Schüttlern, Sieben und Gebläse konnte aufgrund der nur geringen NKB-Anteile im Dreschgut relativ klein bemessen werden und das Erntegut schnell in den aufgebauten

Tank gefördert werden. Einen Überblick über die Anordnung von Rebel- und Reinigungseinrichtung für einen zweireihigen Pflückrebler gibt Abbildung 3.

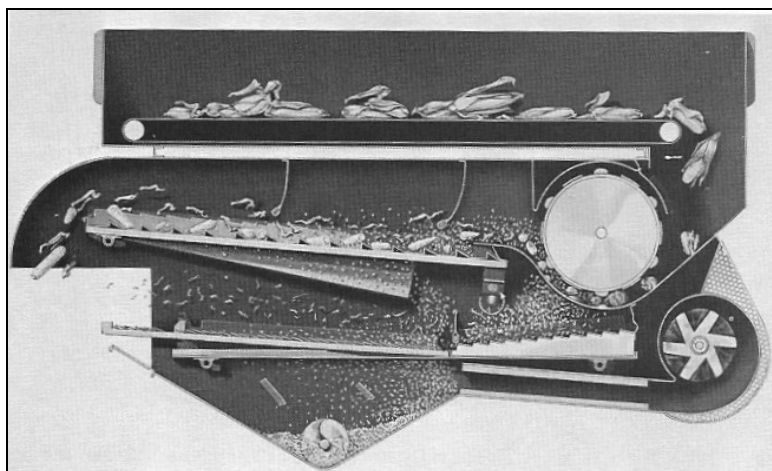


Abbildung 3: Aufbau der Rebel- und Reinigungseinrichtung eines zweireihigen Pflückreblers [22]

Die Ausführung dieser nur für die Maisernte einsetzbaren Pflückrebler war ein- oder zweireihig, gezogen oder aufgebaut. Für eine Flächenleistung von 1,5-2 ha je Tag bei einreihiger und 2,5-3 ha je Tag bei zweireihiger Ausführung waren 35-40 PS bzw. mehr als 50 PS nötig [26]. Erstmals wurden auch Strohschlägler angebracht, die den separaten Arbeitsgang der Strohzerkleinerung überflüssig machten. Für sie waren noch mal 5-10 PS je Reihe zu veranschlagen. Analog zum Getreidemähdrescher wurden Pflückrebler auch als selbstfahrende Arbeitsmaschinen gebaut. Ihr Kolbendurchsatz war wegen der meist doppelt angeordneten Rebel- und Trennorgane sehr hoch. Durch ihre kompakte Bauweise waren sie sehr wendig und hangstabil. Diese Spezialmaschinen lohnten sich jedoch nur in Großbetrieben oder bei überbetrieblichem Maschineneinsatz. Das Erntegut bestand nun nur noch aus relativ feuchten Maiskörnern und musste zur Lagerung sofort getrocknet werden.

Die Bedeutung der Kolbenpflücker und Pflückrebler nahm in Deutschland ab Mitte der fünfziger Jahre zugunsten des Mähdreschers ab. Bereits 1970 wurden 80 % des Körnermaises in Westdeutschland mit dem Mähdrescher geerntet [16]. Unterschieden werden konnte dabei zwischen dem Mähdrusch- und dem Pflückdruschverfahren. Beim Mähdruschverfahren wurde das Getreideschneidwerk mit Torpedoblechen und Einzugsketten ausgerüstet und die Haspel abgebaut. Die gesamte Maispflanze wird mit dem Messerbalken abgetrennt und über die bekannten Einzugs- und Fördereinrichtungen den Trennorganen zugeführt. Beim Pflückdruschverfahren wurde ein spezieller Pflückvorsatz an den Mähdrescher angebaut und nur noch die Kolben in die Maschine aufgenommen. Der Aufbau der Pflückvorsätze war wie der der oben genannten

Maispflücker und Pflückrebler, er bestand im Wesentlichen aus zwei Profil-Pflückwalzen je Reihe. Bei langen, schlanken und mit der Spitze bereits nach unten hängenden Kolben kommt es bei diesen jedoch zu zum Teil erheblichen Aufnahmeverlusten durch Ausrebeln von Maiskolben. Aus diesem Grund wurde in den USA ein neues Pflückprinzip entwickelt, bei dem die Maispflanze von zwei ineinandergreifenden Reißwalzen zwischen zwei darüber angeordneten Pflückschienen hindurchgezogen wird. Die Kolben werden dabei nicht mehr abgequetscht sondern vom Stängel abgerissen (Abbildung 4) und kommen nicht mehr mit den rotierenden Walzen in Berührung, wodurch die Aufnahmeverluste von 4-5 % (Pflückwalzen) auf etwa 3 % (Pflückschienen) wesentlich reduziert werden konnten [16].

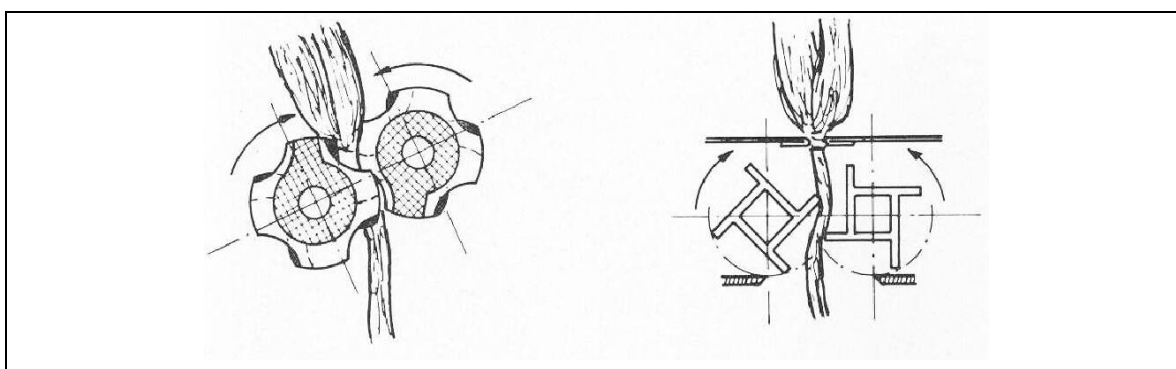


Abbildung 4: Arbeitsweise von Profil-Pflückwalzen und Pflückschienen mit darunter liegenden Durchziehwalzen [16].

Maispflückvorsätze wurden in 1-6reihiger Ausführung für gezogene und selbstfahrende Mährescher angeboten. Bei allen Varianten ließ sich der Pflückspalt passend zum jeweiligen Kolbendurchmesser einstellen, bei einigen Ausführungen konnte sogar der Abstand der Durchziehwalzen zueinander an die Erntebedingungen angepasst werden. Durch diese Einstellmöglichkeiten und einen um 10° geringeren Anstellwinkel ($20-25^\circ$) als bei den Pflückwalzen (35°) war eine deutlich größere Flexibilität und Funktionssicherheit des Pflückvorsatzes, auch bei lagernden Beständen gegeben [16].

Der Arbeitszeitbedarf für die Körnermaisernte mit einem selbstfahrenden 100 PS starken Mährescher mit vierreihigem Maispflückvorsatz betrug $1,5-2 \text{ Akh ha}^{-1}$ [26], die Körnerverluste betragen insgesamt etwa 5 %, wobei etwa 2 % auf die Aufnahmeorgane entfallen [21].

2.2.2 Heutiger Stand der Erntetechnik

Die Universalerntemaschine für Körnerfrüchte und damit auch für Körnermais ist heute der Mährescher. Alle namhaften Mährescherfabrikate können für die Ernte von Körnermais ausgerüstet werden. An den üblicherweise zur Getreideernte ausgelegten Maschinen wird dafür das Standardschneidwerk gegen einen Maispflückvorsatz

ausgetauscht. Maispflückvorsätze werden von verschiedenen Firmen in 4-12reihiger Ausführung angeboten oder sind direkt vom Mähdrescherhersteller zu beziehen. Über die Reihenzahl des Pflückvorsatzes entscheidet neben der möglichen Durchsatzleistung des Mähdreschers und dem Gewicht des Vorsatzes (zulässige Achslast der Vorderachse) auch die Reihenzahl der eingesetzten Aussaattechnik. Gerade in schwierigen Lagen wie hangigen oder stark unebenen Flächen sollten Drill- und Erntetechnik aufeinander abgestimmt werden. Die Breite des Pflückvorsatzes errechnet sich normalerweise aus der Reihenanzahl mal den üblichen Reihenabstand von 75 cm. Pflückvorsätze mit fünf und mehr Reihen sind deshalb mit über 3 m für den Straßentransport zu breit. Sie müssen entweder eingeklappt oder zum Transport abgebaut werden. Klappmechanismen sind bei bis zu 8-reihigen Pflückvorsätzen (3 m Transportbreite) üblich, sie werden heute jedoch sogar für bis zu 12-reihige Pflücker gebaut, wobei diese mit einer Transportbreite von 4,80 m ebenfalls für den Straßentransport zu breit sind [5].

Aufgebaut sind die Pflückaggregate heute ausschließlich nach dem in Kapitel 2.2.1 beschriebenen System mit zwei Pflückschienen und darunter liegenden Durchziehwalzen. In Europa verwendete Pflückvorsätze erledigen die Zerkleinerung des Maisstrohes ebenfalls in einem Arbeitsgang. Unterschiede gibt es jedoch in der Technik der Strohzerkleinerung und des Pflanzeneinzugs. Während die Strohzerkleinerung bei den Maispflückern der Firmen Claas, Kemper, Grevac, Capello und Olimag durch Unterflurhäcksler erfolgt, hat die Firma Geringhoff eigene Systeme zur Strohzerkleinerung entwickelt. Unterflurhäcksler bestehen aus horizontal rotierenden Messern dicht unter den Durchziehwalzen oder sind wie die bekannten Feldschlägler aus einer kurzen mit Schlegeisen bestückten Welle je Reihe ausgeführt. Bei den von Geringhoff entwickelten Systemen ist die Strohzerkleinerung direkt mit dem Pflückvorgang verbunden. Die Durchziehwalzen sind dabei entweder durch einen Rotor ersetzt, der in Verbindung mit einem feststehenden Messer das Durchziehen und Zerkleinern in einem Arbeitsgang erledigt (System PCA), oder den Pflückwalzen ist eine dritte, rotierende Messerwalze zugeordnet (System Rota-Disk). Diese greift mit der größeren zweier unterschiedlich großen Pflückwalzen zusammen und zerschneidet das Pflanzenmaterial direkt beim Durchziehen. Eine Gegenüberstellung beider Systeme ist in Abbildung 5 illustriert.

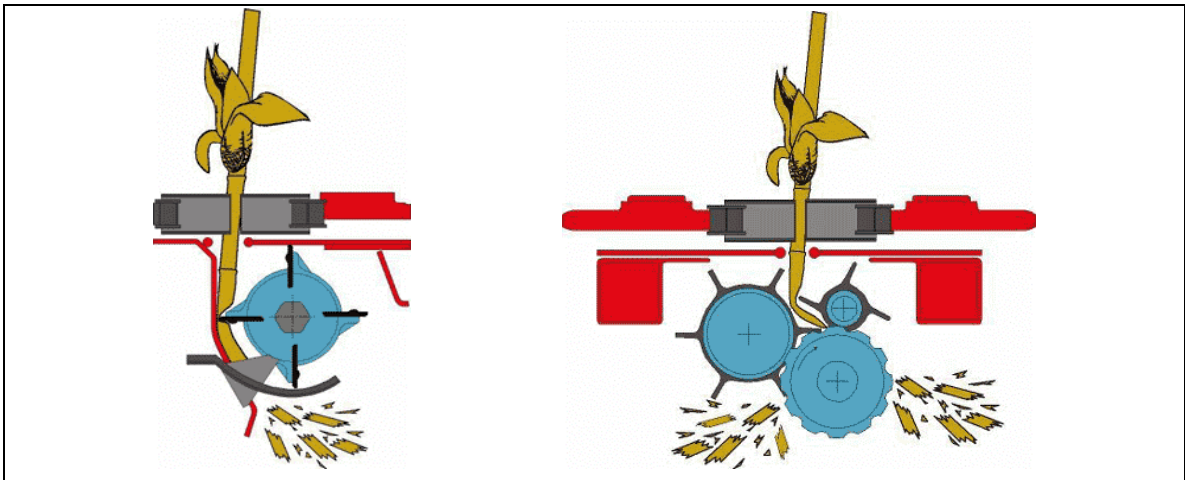


Abbildung 5: Arbeitsweise der Systeme PCA (l.) und Rota-Disk (r.) der Firma Geringhoff [5]

Als Einzugsorgan dienen normalerweise zwei mit Fingern bestückte Einzugsketten, die oberhalb der Pflückplatte laufen und die Kolben zur Querförderschnecke bringen. Bei diesem Aufbau müssen die Pflanzen jedoch möglichst zentral in das jeweilige Pflückaggregat gelangen.

Eine Besonderheit stellt das im Gegensatz dazu weitgehend reihenunabhängige System „Cornstar“ der Firma Kemper (Abbildung 6) dar. Der eigentliche Pflückvorgang erfolgt hier wie bei den anderen Systemen auch durch zwei Pflückplatten und darunter liegenden Durchziehwalzen. Die sonst üblichen Einzugsketten sind jedoch durch einen rotierenden Fingerrotor ersetzt. Dieser führt die Pflanzen mit einer kurzen Schnecke zusammen dem Pflückspalt zu und transportiert die Kolben anschließend zur Querförderschnecke.



Abbildung 6: Reihenunabhängiger Maispflückvorsatz Cornstar [7]

Am Mähdrescher selbst müssen verschiedene Einstellungen vorgenommen werden, damit ein sauberer Ausdrusch bei möglichst geringen Bruchkornanteilen erreicht wird. Um die relativ sperrigen Maiskolben zum Dreschkorb zu fördern, sollte im Schrägförderer der Abstand von Förderleisten und Kanalboden vergrößert werden. Claas gibt für seine Mähdrescher vor, den Eingang des Dreschkorbes auf etwa 31 mm zu erweitern und die Trommeldrehzahl auf 650 min^{-1} zu verringern, um einen schonenden Ausdrusch der Maiskolben zu ermöglichen [3]. WACKER [30] stellt in seinen Untersuchungen jedoch fest, dass der Dreschspalt im Gegensatz zur Trommeldrehzahl nur geringen Einfluss auf den Bruchkornanteil hat. Nach seinen Angaben ist deshalb ein möglichst enger Dreschspalt zu wählen und die Trommeldrehzahl nur so hoch einzustellen, dass der Ausdrusch ausreichend ist. Durch die so erreichbare frühe Abscheidung kann eine weitere mechanische Belastung der Maiskörner vermieden und der Bruchkornanteil gering gehalten werden.

Damit keine unausgedroschenen Maiskolben in der offenen Trommel gefördert werden, wird diese weiterhin mit Abdeckblechen verschlossen. Die Siebe sind für die im Vergleich zu Getreide großen Maiskörner auf 13 mm zu öffnen, die Untersiebe können aufgrund der guten Trenneigenschaften des Maises normalerweise ganz ausgebaut werden. Somit fällt auch die Überkehr weg und belastet die Trennorgane nicht noch einmal. Die Gebläsedrehzahl kann aufgrund der recht großen und schweren Maiskörner auf 1400 min^{-1} erhöht werden und die Drosselklappe für die Vorabscheidung weit geöffnet werden [3]. Bruchkorn wird so bereits weitestgehend auf dem Feld abgeschieden und gelangt gar nicht erst in den Korntank. Alle diese Einstellmöglichkeiten sind beim modernen Mähdrescher vom Fahrerstand aus zu bedienen, um während der Arbeit ständig auf sich ändernde Eigenschaften des Erntegutes reagieren zu können.

Der Häcksler wird durch den geringen Anteil an NKB nur gering belastet. Bei großen Arbeitsbreiten bereitet jedoch auch beim Mais die gleichmäßige Verteilung der NKB Probleme. Um den Mähdrescher noch besser an die Anforderungen der Körnermaisernte anzupassen, können spezielle Dreschkorbeinsätze und Siebe eingebaut werden. Dies ist besonders dann sinnvoll, wenn feuchtes Bruchkorn die üblichen Lamellensiebe verklebt. Im Allgemeinen sind alle Bauteile des Mähdreschers durch das feuchte Erntegut bei der Körnermaisernte erheblicher Korrosion ausgesetzt.

Die oft bereits relativ schwierigen Bodenbedingungen bei der spät im Jahr gelegenen Körnermaisernte erfordern große, tragfähige Bereifungen. Terra- oder Zwillingbereifungen sind normalerweise zu breit für den Straßenverkehr, so dass auf Gummi-Raupenfahrwerke mit großen Aufstandsflächen zurückgegriffen werden muss. Zu berücksichtigen ist dabei auch das hohe Eigengewicht der Pflückvorsätze, was die Vorderachse zusätzlich belastet [11].

2.2.3 Elektronische Informations- und Regelsysteme am Mähdrescher

Die Ausrüstung der Mähdrescher mit umfangreichen elektronischen Informationseinrichtungen wurde mit der Einführung der Fahrerkabine zu einer unbedingten Notwendigkeit. Ohne die ihn komplett einschließende Kabine konnte der Mähdrescherfahrer mit seinen Sinnesorganen die Hauptkontrolle über die wichtigsten Funktionen übernehmen. Elektronische Anzeigeeinstrumente beschränkten sich zu jener Zeit auf Kühlwassertemperatur- und Öldruckanzeige sowie die Drehzahlüberwachung von Dreschtrommel und Reinigungsgebläse [31].

Als in den achtziger Jahren Fahrer cabins zum Standard bei der Mähdrescherausrüstung wurden, mussten neue Überwachungssysteme für die Funktionssicherheit der Maschine sorgen. Einfache Magnet- oder Hallsensoren übernahmen von nun an die Drehzahlüberwachung aller wichtigen Wellen am Mähdrescher, in erster Linie die der Motor-, Trommel-, Gebläse- und Häckslerdrehzahl. Einfache Elektronikbauteile glichen diese Werte ständig mit voreingestellten Sollwerten ab und warnten den Fahrer bei Über- bzw. Unterschreitung dieser Werte. Hinzu kam ebenfalls die über den Schüttlern angebrachte sog. Strohstauklappe, welche bei zu großer Strohaufgabe auf den Schüttlern nach oben schwenkt und einen Kontaktschalter betätigt, der wiederum mit einer Warnanzeige in der Fahrerkabine verbunden ist. Der Schritt von der reinen Informations- zur Warneinrichtung war somit getan. Eine weitere Hilfe bei der Einstellung der Maschine im optimalen Leistungsbereich brachten die bereits Mitte der siebziger Jahre entwickelten Körnerverlustsensoren. Diese sind hinter dem Schüttler und hinter den Sieben angebracht und bestehen aus einem Sensorblech mit direkt darunter angeordnetem Mikrofon. Vom Mikrofon werden die Schallwellen erfasst, die durch auf das Sensorblech auftreffende Körner erzeugt werden. Weil auf das Sensorblech außer Körnern auch Strohteile, Bruchkörner, Unkrautsamen usw. auftreffen, muss das Signal nach Tonhöhe der relevanten Verlustkörner gefiltert werden, so dass nur noch die spezifischen Schallimpulse dieser Körner verbleiben. Das so gefilterte Signal wird digitalisiert und kann nun ins Verhältnis zu Fahrgeschwindigkeit und Arbeitsbreite gebracht werden [10, 14]. Um auch die Menge und Zusammensetzung der Überkehr ständig kontrollieren zu können, entwickelte die Firma Claas ein sog. Überkehr-Grainmeter [12]. Ein repräsentativer Anteil der Überkehrmenge passiert dabei einen Röhrensensoren, der nach dem von den Verlustsensoren bekannten Prinzip den Körperschall des auftreffenden Überkehrkörnerstroms erfasst.

Einen weiteren großen Schritt in der Bedienung des Mähdreschers brachte die zentrale Einstellung von Dresch- und Reinigungsaggregaten aus der Fahrerkabine. Wichtige Einstellungen wie Trommeldrehzahl, Dreschspalt, Sieböffnung und Gebläsedrehzahl können zentral vorgenommen werden und sogar z.T. während der laufenden Arbeit verändert werden. Mit dem Bordcomputer können Fruchtartenspezifische Einstellungen

vorgegeben und gespeichert werden. Die Verknüpfung der Kontroll- und Regelsysteme schaffte somit ein Optimierungssystem für den Mähdrescher [31].

Eine echte Entlastung des Mähdrescherfahrers stellt jedoch erst die automatische Umsetzung der erfassten Messgrößen in Regelimpulse dar. Automatische Durchsatzregelungen wie z.B. das System HarvestSmart von John Deere [6] regulieren die Fahrgeschwindigkeit nach voreingestelltem Körnerverlustniveau oder nach Dreschtrommel- und Motorauslastung (Durchsatz). Problematisch ist jedoch die statische Vorgabe eines erlaubten absoluten Körnerverlustniveaus, ohne dieses in Beziehung zum aktuellen Durchsatz der Maschine zu stellen [19]. Wechselhafte Erntebedingungen führen zu wechselndem Durchsatz und damit zu unterschiedlichen zu tolerierenden Verlusten. Sinnvollerweise sollte deshalb der Verlust prozentual auf den Durchsatz bezogen werden. Ansätze zur Messung des Gutedurchsatzes sind bereits vorhanden. Sie stützen sich beispielsweise auf das Antriebsdrehmoment oder die Auslenkung der Einzugsschnecke [10], auf das Antriebsdrehmoment der Dreschtrommel [6], die Messung des Luftdruckes unter den Schüttlern [27] oder auf den am Elevator gemessenen Mengenfluss.

Des Weiteren wurden zur Entlastung des Fahrers und zur besseren Ausschöpfung der Maschinenkapazität automatische Lenksysteme entwickelt. Dies ist nötig, weil der Fahrer gerade bei den großen Schneidwerksbreiten kaum noch eine Chance hat, „an der Kante entlang zu schauen“. Entwickelt wurden automatische Lenksysteme zuerst für Maishäcksler. Bedingt durch den hohen und dichten Pflanzenbestand bei gleichzeitig hoher Fahrgeschwindigkeit der modernen Maschinen war hier die Notwendigkeit am größten. Die Lenkimpulse werden beim Mais durch bewegliche Bügel gegeben, welche an den Reihen der Maispflanzen entlang gleiten. Dieses System funktioniert nur bei relativ kräftigen Reihenpflanzen, nicht jedoch bei Getreide, Raps, etc. Für diesen Einsatzbereich wurde als erstes von Claas ein Lenkautomat entwickelt. Hier wird mit einem Laserentfernungsmesser die Kante des Bestandes abgetastet und der Höhenunterschied zwischen Bestand und Stoppel erkannt [13]. Bei lagerndem Bestand kann der Laser die Kante jedoch nicht erkennen, weshalb John Deere einen ebenso genau arbeitenden, GPS-gestützten Lenkautomaten entwickelt hat [6].

Als weitere automatisierte Teilfunktionen des Mähdreschers sind die Schnitthöhenregelung und Seitenneigungsverstellung des Schneidwerkes, die Anpassung der Haspeldrehzahl an die Fahrgeschwindigkeit und der Hangausgleich für die Reinigungsanlage zu nennen [13].

Einen wichtiger Aspekt der Datenerfassung beim Mähdrusch stellt weiterhin die Ertragsfassung bzw. Kartierung dar. Als erstes Ertragsmesssystem kam das Ende der achtziger Jahre von CLAYDON entwickelte Yield-O-Meter auf den Markt. Am Kopf des Körnerelevators wurde dazu ein Zellenrad mit darüber liegendem Pufferbereich angeordnet. Aus dem Volumen der Zellen und der Drehzahl des Zellenrades kann so der Volumenstrom am Elevatorkopf berechnet werden. Multipliziert mit dem manuell

bestimmten Hektolitergewicht ergibt sich der Ertrag, der nun noch mit Hilfe der Größen Schneidwerksbreite und Fahrgeschwindigkeit auf die Fläche bezogen wird. Ein weiteres System zur Bestimmung des Volumenstroms wurde von DIEKHANS entwickelt. Lichtschranken ermitteln dabei die Schütthöhe des Erntegutes auf den Elevatorpaddeln, aus der dann das Volumen errechnet wird. Das zweite auf den Markt gebrachte Ertragsmesssystem war das Flowcontrol von Massey Ferguson. Das Flowcontrol ermittelte nicht mehr den Volumenstrom, sondern gleich den Massenstrom. Ebenfalls am Kopf des Körnerelevators ist dazu auf der einen Seite eine schwach radioaktive Strahlungsquelle angebracht, deren Strahlung auf der anderen Seite des Körnerstroms von einem Detektor aufgenommen wird. Aus der durch das Dreschgut verursachten Dämpfung der definierten Strahlung errechnet sich der Massenstrom im Elevator. Weitere Messsysteme zur Massenstromermittlung arbeiten mit Kraftaufnehmern am Elevatorauswurf. Das Erntegut trifft hier entweder auf Zinken oder Prallplatten. Die Kraft des auftreffenden Gutstromes wird von DMS-Kraftmesselementen oder Federelementen mit elektrischen Wegaufnehmern erfasst [11]. Wichtig bei der Massenstromerfassung ist die Berücksichtigung der Kornfeuchte, weil diese das Gewicht des Erntegutes beeinflusst. Auch hier stehen bereits Sensoren zur Verfügung, die den Feuchtigkeitsgehalt des Erntegutes am Elevatorauswurf permanent erfassen [6, 13].

In Verbindung mit heute weitestgehend kostengünstig verfügbaren D-GPS-Ortungssystemen und geeigneten Bordcomputern kann der Ertrag auf die jeweilige Drescherposition bezogen und Ertragskarten für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung erstellt werden. Durch den großen zeitlichen Abstand zwischen der Aufnahme am Schneidwerk und der Ankunft des Erntegutes im Korntank ist diese Form der Ertragskartierung jedoch mit einigen Fehlerquellen behaftet. Als wichtigster Faktor sind hier die Verluste zu nennen, welche gar nicht mit erfasst werden und die Ertragsmessung so verfälschen. Im Einzelnen können dies Aufnahmeverluste sowie Schüttler- und Siebverluste sein. Ein weiteres Problem stellt die Dauer des Ernteguttransportes im Mähdrescher dar. Wenn das aufgenommene Erntegut am Sensor ankommt, hat sich die Maschine bereits auf dem Acker fortbewegt und die gemessene Erntemenge ist nicht mehr der aktuellen Position zuzuordnen. Dieses als „transportation delay“ bezeichnete Phänomen wird von den heutigen Ertragsmesssystemen durch einen konstanten Zeitausgleichsfaktor berücksichtigt. Bei sich änderndem Delay, z.B. durch sich ändernde Guteigenschaften, Veränderungen in der Überkehrmenge oder unterschiedliche Hangneigungen ist dieser Zeitfaktor jedoch nicht ausreichend. Des Weiteren erfolgt in den Transporteinrichtungen aus Schnecken und Elevatoren eine „Glättung“ von Ertragsschwankungen [28].

Um diese Fehler zu korrigieren, sind zwei Wege denkbar: Entweder man rechnet alle erfassbaren Größen, von den Verlusten über die Überkehrmenge bis hin zur Hangneigung

etc. mit ein, oder man versucht die Ertragsmessung weiter nach vorne zu verlegen, z.B. unter die Siebe, an die Dreschtrommel oder ganz nach vorne, an die Aufnahmeorgane.

3 MATERIAL UND METHODEN

An dieser Stelle soll das in dieser Arbeit verwendete pflanzliche und technische Material, sowie die Untersuchungsmethoden beschrieben werden.

3.1 Pflanzenmaterial

Sowohl für die Laborversuche wie für die Feldversuche wird Mais der Sorte Agadir verwendet. Die Sorte Agadir wird in der „Beschreibenden Sortenliste“ [2] als eine Dreiwegehybride mit Hartmais ähnlichem Korntyp beschrieben. Mit einer Siloreifezahl von 230 stellt sie eine mittelfrühe Sorte dar. Ihre Neigung zu Lager und Bestockung wird als eher gering eingestuft, die Pflanzenlänge wird als durchschnittlich bewertet.

Für die Laborversuche werden am 26. Oktober und am 10. November 2005 jeweils ca. 200 Pflanzen etwa 10 cm über dem Boden geschnitten. Der TS-Gehalt der Kolben der am ersten Termin geernteten Pflanzen beträgt 65,2 %, die Kolben der Pflanzen vom zweiten Termin haben einen TS-Gehalt von 63,8 %. Bei den am 23. und 24. November 2005 durchgeführten Feldversuchen weisen die Kolben einen TS-Gehalt von 60,5 % auf. Bestimmt wird der TS-Gehalt durch Trocknung bei 105 °C für mindestens 24 h im Trockenschrank. Die Pflanzen sind an allen Ernteterminen offensichtlich gesund und lagern nicht. Das Bestandesbild ist jedoch sehr heterogen. Es können Pflanzenlängen zwischen ca. 1 m und 3 m sowie Kolbengewichte zwischen 65 g und 312 g festgestellt werden.

3.2 Laborversuche

In den Laborversuchen soll ein geeignetes System zur Erfassung des Materialflusses bzw. der Erntemenge am Maispflückvorsatzen des Mähdreschers oder Maishäckslers gefunden und überprüft werden. Der Einfluss von Kolbengröße (Gewicht), Kolbenfeuchte und Einzugs geschwindigkeit auf die Messsignale soll ebenfalls untersucht werden und aus diesen Ergebnissen eine Aussage zur möglichen Umsetzung dieser Idee getroffen werden.

Um dies zu untersuchen, wird ein einfaches Pflückaggregat (System Mais-Star der Firma Geringhoff), welches auf einem Grundrahmen aufgebaut ist und mit einem Getriebemotor betrieben wird, verwendet (Abbildung 7). Beim Pflückaggregat sind lediglich aus Sicherheitsgründen die Einzugsketten entfernt worden. Die Motorleistung beträgt 1,1 kW und die Motordrehzahl 1420 min^{-1} bei 50 Hz. Motor und Pflückaggregat sind durch Getriebe (Übersetzung 22:1) und Kettenantrieb (Übersetzung 1:2) mit einer Gesamtübersetzung von 11:1 miteinander verbunden, am Pflückaggregat liegt also eine

Drehzahl von 129 min^{-1} an. Mit einem vorgeschalteten Frequenzumwandler (Danfoss, Variable Speed Drive VLT, Type 3008) kann die normale Netzfrequenz im Bereich von 0-120 Hz variiert und die Motordrehzahl so zwischen $0-3408 \text{ min}^{-1}$ eingestellt werden. Es ergibt sich folglich eine mögliche Drehzahl am Pflückaggregat von $0-309 \text{ min}^{-1}$, was einer Einzugschwindigkeit zwischen $0-4,15 \text{ m s}^{-1}$ entspricht.

Die zu untersuchenden Sensoren sind über oder unter der Pflückplatte montiert und zur Datenerfassung an den PC angeschlossen.

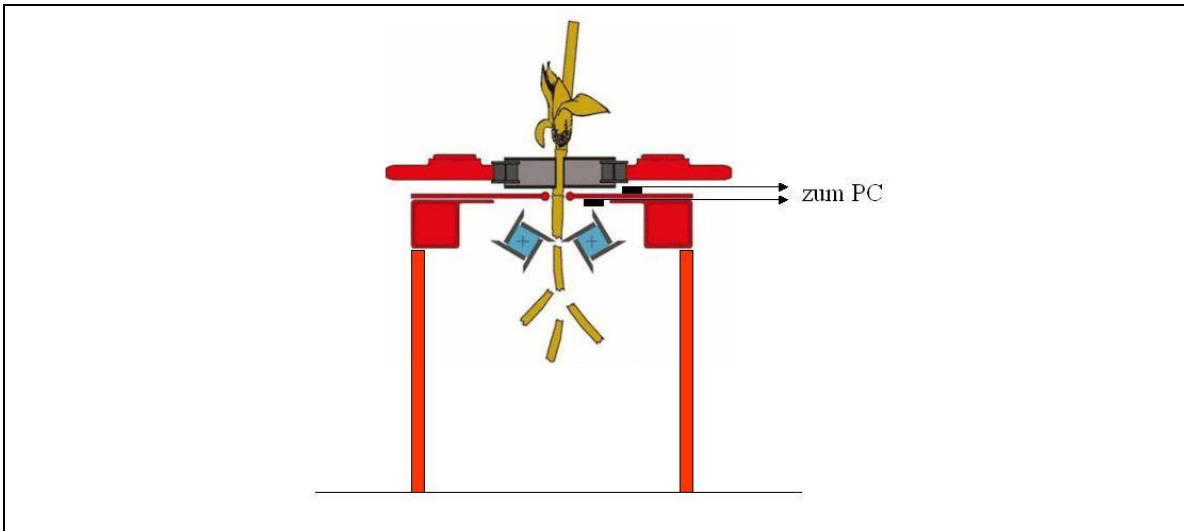


Abbildung 7: Versuchsaufbau Laborversuche, verändert nach [5].

Verbunden werden Sensoren und PC über eine externe Schnittstelle zur Datenerfassung (LabJack U12 der Firma Meilhaus Elektronik) oder die interne Soundkarte des PCs. Die mit dem LabJack U12 aufgenommenen Daten werden mit einer Elektronik-Laborsoftware (ProfiLab 3.0 der Firma ABACOM-Ingenieurgesellschaft) erfasst und in eine Textdatei geschrieben, die mit der Soundkarte aufgenommenen Signale sichert das freie Musikbearbeitungsprogramm Audacity (Bezugsquelle: <http://audacity.sourceforge.net>, Stand 15.10.2005) als wav-Dateien. Beispielhaft ist in Abbildung 8 ein Ausschnitt aus einer mit dem Mikrofon aufgenommenen wav-Datei dargestellt. Deutlich zu erkennen ist in dieser Abbildung der durch den auftreffenden Maiskolben angeregte Ausschlag .



Abbildung 8: Ausschnitt eines auftreffenden Maiskolbens aus einer mit dem Mikrofon aufgenommenen wav-Datei

3.2.1 Sensoren

Zunächst werden unterschiedliche Sensoren auf ihre Eignung für die geforderte Anwendung untersucht. Im Einzelnen sind dies:

Körnerverlustsensor der Firma LH-Agro Typ Walker Pad

Dieser Sensor, der normalerweise als Körnerverlustsensor hinter den Schüttlersieben montiert ist, besteht aus einer Sensorplatte mit darunter angeordneter Platine, auf der das Mikrofon und die Messtechnik aufgelötet sind. Das von den aufprallenden Körnern ausgelöste akustische Signal wird bereits auf der Platine herausgefiltert und digitalisiert. Um auch bei unterschiedlich großen Körnern des Erntegutes eine genaue Anzeige realisieren zu können, ist in der Schaltung ein Potentiometer eingebaut, mit dem die Signalhöhe kalibriert werden kann. Für den Einsatz am Maispflücker ist die Platine von der Sensorplatte demontiert und direkt unter der Pflückplatte angebracht worden.

Die Impulse der auf die Pflückplatte auftreffenden Maiskolben werden jedoch von diesem Sensor nicht erfasst bzw. von der Schaltung nicht herausgefiltert, so dass der Körnerverlustsensor nicht für weitere Untersuchungen benutzt wird. Es ist auch nicht möglich, den Sensor entsprechend zu kalibrieren. Mit dem PC wird der Körnerverlustsensor über den LabJack U12 und die ProfiLab 3.0 Software verbunden.

Vibrationssensor für Alarmanlagen

Ein Alarmsensor für stationäre Alarmanlagen der Firma Conrad Elektronik wird ebenfalls mit dem LabJack U12 und der ProfiLab 3.0 Software untersucht. Für die Anwendung in Alarmanlagen müssen Sensoren bereits auf kleinste Erschütterungen oder Lageänderungen reagieren. Ein analoges Signal wird nicht benötigt, es genügt eine Schaltfunktion des

Sensors. Aufgebaut ist der Sensor aus zwei zwischen zwei Metallplättchen gelagerten Metallkugeln.

Bei geringster Erschütterung oder Lageänderung verlieren die Kugeln den Kontakt zu den Metallplättchen und der im Ruhezustand des Sensors geschlossene Schaltkreis wird unterbrochen. Ausreichend sind dafür Beschleunigungen von 0,1 G horizontal oder 1 G vertikal. Der untersuchte Sensor ist deshalb für den Einsatz am Maispflücker nicht geeignet. Auf Grund seiner hohen Empfindlichkeit gibt er bereits beim Leerlauf der Maschine permanent Schaltimpulse ab, die für eine weitere Auswertung nicht geeignet sind.

Piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer

Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer machen sich den Umstand zu Nutzen, dass bestimmte kristalline Stoffe bei mechanischer Belastung an ihrer Oberfläche elektrische Ladungen abgeben. Bekannt sind dafür z.B. Quarz, Bariumtitanat oder Bleizirkoniumtitanat [20]. Das Ionenkristallgitter dieser Stoffe weist piezoelektrische (polare) Achsen auf. Wirkt nun in Richtung dieser Achsen ein Druck auf den Kristall ein, so werden diese Ladungen getrennt und an der Oberfläche abgegeben. Die erzeugte Ladung verhält sich dabei proportional zum einwirkenden Druck. Um einen Piezokristall als Vibrationssensor nutzen zu können, spannt man eine oder mehrere Kristallscheiben zwischen einer Basis und einer sogenannten seismischen Masse ein. Wird der so aufgebaute Sensor nun beschleunigt, bewirken die auf die seismische Masse einwirkenden Trägheitskräfte einen Druck auf die Scheibe(n). Dieser Druck ist dabei genau proportional der Beschleunigung der Masse und die gemessene Ladung somit genau proportional der Beschleunigung. Der nutzbare Frequenzbereich eines solchen Beschleunigungsaufnehmers wird nach unten durch den Störpegel des gesamten Messsystems und nach oben dadurch begrenzt, dass ab einer bestimmten Frequenz die Beschleunigung der Masse gleich der des gesamten Aufnehmers ist.

Für die Versuche wird ein einfacher Piezokristallsensor der Firma Reichelt Elektronik (Typ PKS1) verwendet, der über den LabJack U12 und die ProfiLab 3.0 Software mit dem Rechner verbunden wird. Die technischen Daten dieses Sensors sind Abbildung 9 zu entnehmen. Um eine möglichst feste Verbindung mit der Pflückplatte herzustellen, die eine sichere Übertragung der Schwingungen der Pflückplatte auf den Sensor gewährleistet, ist der Sensor mit zwei Schrauben M4 an der Platte befestigt.

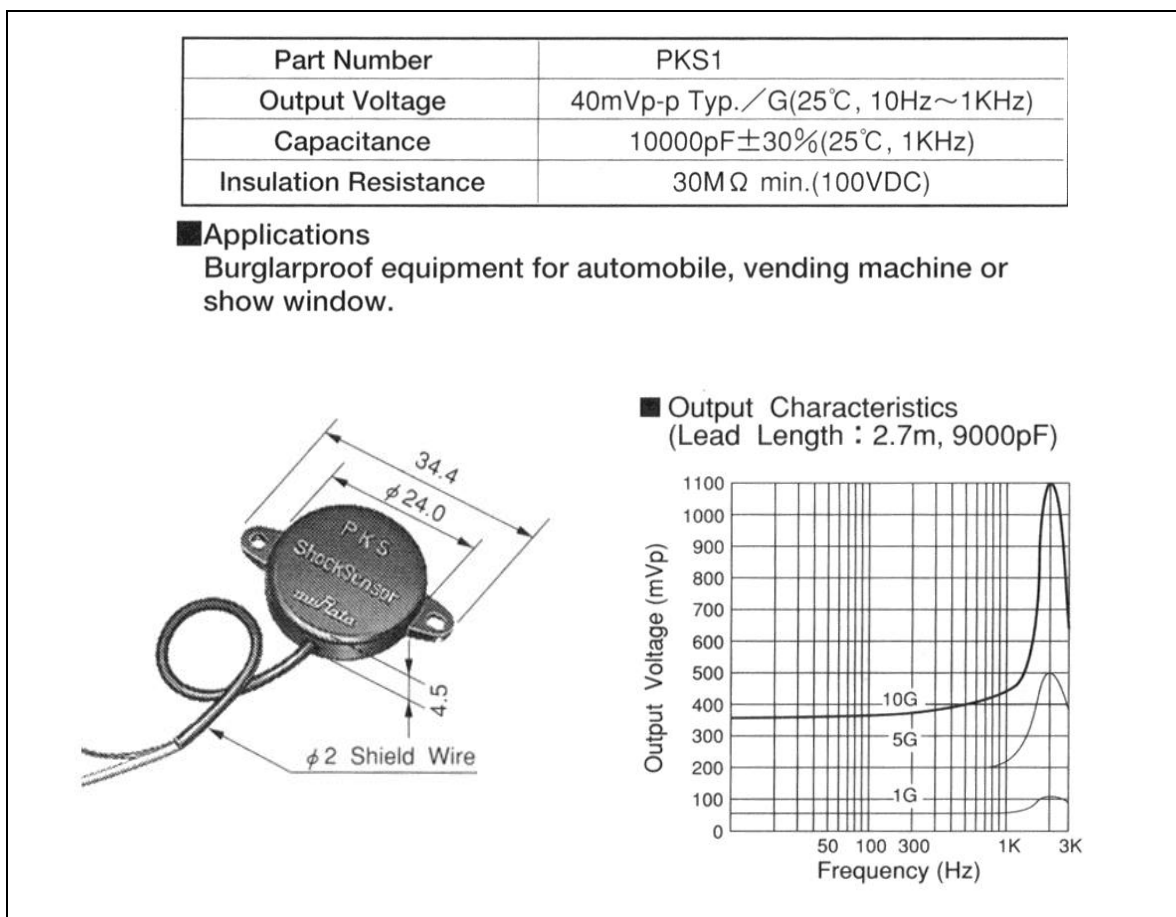


Abbildung 9: Datenblatt des Piezokristallsensors PKS1, verändert nach [4]

Kondensator-Mikrofonkapsel mit Vorverstärker

Aus der Überlegung heraus, dass Körperschall als hörbarer Luftschall abgestrahlt wird, soll das mit dem menschlichen Ohr deutlich hörbare Geräusch, welches beim Auftreffen des Maiskolbens auf die Pflückplatte bzw. beim Ablösen des Kolbens entsteht, aufgenommen werden. Dazu werden Versuche mit einem elektroakustischen Mikrofon durchgeführt.

Kondensatormikrofone arbeiten nach dem elektrostatischen Prinzip. Aufgebaut sind sie folglich als Kondensator, bestehend aus einer beweglichen Membranelektrode und einer starren Gegenelektrode. Die auf die Membran treffenden Schallwellen bringen diese in Bewegung, wodurch sich der Abstand zwischen Elektrode und Gegenelektrode und dadurch die Mikrofonkapazität verändert. Bei älteren Kondensatormikrofonen musste an die Membran eine Polarisations-Gleichspannung von etwa 50-200 V angelegt werden, moderne Kondensatormikrofone arbeiten mit sogenannten Elektreten [20]. Elektrete sind dünne Folien aus z.B. Polycarbonaten, Polyhalogen-Kohlenwasserstoffen usw., die bei ihrer Herstellung auf hohe Temperatur (über 120 °C) gebracht werden und dann in einem starken elektrischen Gleichspannungsfeld langsam abkühlen. Dadurch erhalten sie eine permanente elektrische Polarisierung, die einer Vorspannung von etwa 150-200 V entspricht [29]. Diese Elektret-Folie dient entweder als Membran oder wird auf die starre

Gegenelektrode aufgeklebt (Backelektret) und stellt das sonst von der Polarisationsspannung erzeugte elektrische Feld zur Verfügung. Auf Grund des geringen kapazitiven Generatorwiderstandes eines Elektret-Mikrofons müsste der Eingangswiderstand des nachfolgenden Verstärkers sehr hoch sein, weshalb zur Erzielung einer geringen Ausgangsimpedanz und zur Vermeidung von Störungseinflüssen über das Mikrofongabel bereits im Mikrofongehäuse ein Feldeffekttransistor (FET) als erste Verstärkerstufe untergebracht ist. Elektret-Mikrofone übertragen einen sehr weiten Frequenzbereich. Der Frequenzgang ihres elektroakustischen Übertragungsmaßes verläuft nahezu linear. Außerdem sind Elektret-Mikrofone wegen ihrer geringen Masse sehr unempfindlich gegenüber Körperschall [20].

Für die Versuche dieser Diplomarbeit wird eine Subminiatur-Backelektret-Messmikrofonkapsel von PANASONIC verwendet, deren Signal sofort mit einem Vorverstärker der Firma Conrad Elektronik verstärkt und dann an die Soundkarte des PCs weitergeleitet. Die technischen Daten von Messmikrofon und Vorverstärker sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Technische Daten von Messmikrofon und Vorverstärker

	Backelektret-Messmikrofon	Mono-Mikrofon-Vorverstärker
Frequenzbereich	20-16000 Hz	50-20000 Hz
Empfindlichkeit	5,6 mV/Pa/1 KHz	0,2-2 mV
Ausgangsimpedanz	2 KOhm	
Signal/Rauschabstand	>58 dB	
Koppelkondensator	0,1-4,7 μ F	
Stromversorgung	1,5-10 V	9-15 V
Stromaufnahme	0,5 mA	2,5 mA

Quellen: [8] und [9]

Zur Aufnahme der Signale wird das Mikrofon bzw. dessen Vorverstärker an den Mikrofoneingang des PCs angeschlossen und die Signale mit dem Musikprogramm Audacity aufgezeichnet. Die einfache Anordnung des Mikrofons ober- oder unterhalb der Pflückplatte führt jedoch nicht zum Erfolg. Das Mikrofon übersteuert auf Grund des hohen Schallpegels am Pflückaggregat. Versuche, das Mikrofon mit Schaumstoff oder Gummi zu bedämpfen, ändern daran kaum etwas. Selbst die Unterbringung des Mikrofons in einem mit Schaumstoff ausgelegten Gummikasten bringt kaum eine Verbesserung. Erst durch das Abkleben der Mikrofonöffnung mit Gewebeband kann die nötige Dämpfung erreicht werden. Jetzt ist es jedoch nötig, den Schall, der von der Pflückplatte ausgeht, zu bündeln bzw. zu kanalisieren und dem Mikrofon zuzuführen. Versuche, dies mit einem einfachen Gummischlauch zu erreichen, in den das Mikrofon von hinten eingeschoben wird, führen dabei nicht zum Erfolg. Erst mittels eines medizinischen Stethoskopes (Littmann Cardiology II) kann die richtige Lenkung des Schalls erreicht werden. Direkt auf der

Pflückplatte angebracht ist der Schalldruck allerdings wiederum zu groß. Mit geringem Abstand über der Pflückplatte lassen sich jedoch gut verwertbare Signale empfangen. Das abgeklebte Mikrofon wird dazu in den abgeschnittenen Hörschlauch des Stethoskopes gesteckt und von hinten ebenfalls mit Gewebeband abgeklebt.

3.2.2 Übertragungsverhalten der Pflückplatte

Nachdem nun die Eignung der Sensoren für die weiteren Versuche festgestellt worden ist, wird zunächst das Übertragungsverhalten der Pflückplatte untersucht. Dazu werden an der Kante der Pflückplatte, an der die Kolben abgerissen werden, insgesamt 15 Messpunkte markiert. Der erste Messpunkt wird 5 cm von der Hinterkante der Pflückplatte aus angerissen, die weiteren Messpunkte folgen im Abstand von jeweils 5 cm. Messpunkt Nr. 15 befindet sich folglich 75 cm von der Hinterkante der Pflückplatte. Diese Punkte werden nun je 10 mal mit einem 200 g schweren Schlosserhammer gleichmäßig angeschlagen, wozu der Hammer jeweils aus einer Höhe von 10 cm auf die Kante fallen gelassen wird. Die Messwerte werden mit dem Mikrofon über das Programm Audacity aufgenommen und die Lautstärke (dB) bestimmt. Aus den zehn Werten jedes Messpunktes wird der Mittelwert gebildet und die Mittelwerte aller Messpunkte miteinander verglichen.

3.2.3 Einfluss von Sensorposition und Pflanzeigenschaften

Im weiteren Verlauf der Arbeit ist nun der Einfluss der Position des Sensors, der Lagerung der Pflückplatte, der Kolbengröße, der TS-Gehalte der Kolben und der Einzugsgeschwindigkeit auf die Signalstärke von Piezokristallsensor und Messmikrofon untersucht worden. Dazu werden die Pflanzen dem laufenden Pflücker senkrecht von oben manuell zugeführt. Die Pflanzen werden vom Rotor durchgezogen und der Kolben abgelöst. Meist bleibt der Kolben auf den Pflückplatten liegen und muss von Hand entfernt werden. Eventuell vorhandene, normalerweise stark zurückgebliebene Zweitkolben werden vor den Versuchen abgeschnitten, so dass der Extremwert der Messungen eindeutig dem Hauptkolben zuzuordnen ist. Die Aufzeichnung der Signale erfolgt beim Piezokristallsensor für jeden Kolben einzeln über den LabJack U12 als Schnittstelle mit der Laborsoftware ProfiLab 3.0. Die mit der Laborsoftware simulierte Schaltung (Abbildung 10) rechnet dabei aus den eingehenden Messwerten das durchschnittliche Offset (d.h. die von der Messtechnik selbst verursachte Spannungsschwankung, in diesem Fall zwischen 1,431 V und 1,445 V; durchschnittlich 1,435 V) heraus und richtet sie anschließend mathematisch gleich. Dies geschieht durch das Quadrieren der Werte. Die so aufbereiteten Messwerte werden dann mit einer Abtastrate von 1000 Hz in eine txt-Datei geschrieben.

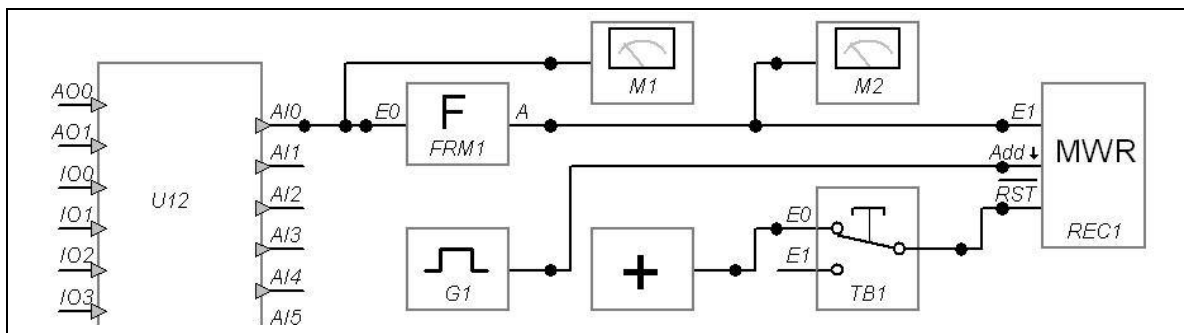


Abbildung 10: Blockschaltbild der Messwerterfassung mit dem Piezokristallsensor (U12:
 LabJack U12; **M1** und **M2**: Anzeigegeräte (V); **FRM1**: Formel $[(\text{Eingang} - 1,435 \text{ V})^2 = \text{Ausgang}]$; **REC1**:
 Messwertrecorder; **G1**: Taktgenerator (1 kHz) für **REC1**; **TB1**: Reset-Taster für **REC1**)

Die Messwerte des Mikrofons werden hingegen für alle 10 Kolben eines Versuchs über die Soundkarte des PCs und die Musiksoftware Audacity als wav-Dateien aufgezeichnet. So dauert ein zehn Pflanzen umfassender Versuch etwa 4 min mit dem Piezokristallsensor und 2 min mit dem Messmikrofon. Zur Auswertung wird für den Piezokristallsensor die maximale Spannung (V) aus der Datentabelle abgelesen und für das Messmikrofon mit der Musiksoftware die maximale Amplitude (dB) der wav-Datei bestimmt.

Als erstes wurden die Sensoren, die sich in den Vorversuchen als geeignet erwiesen hatten, jeweils im vorderen Drittel, in der Mitte und im hinteren Drittel der Pflückplatte montiert. In jeder Position wurden zehn Pflanzen gepflückt und die maximale Signalstärke je Kolben ermittelt.

Die Position, in der die Signale insgesamt am stärksten sind, wird dann beibehalten und im nächsten Schritt die Lagerung der Pflückplatte verändert. Dazu werden 2 mm starke Gummischeiben als Dämmung für die Auflage der Pflückplatte verwendet. Die Varianten sind dabei keine, eine (2 mm) oder zwei (4 mm) Gummiplatten als Unterlage. Das Signal ist bei beiden Sensoren ohne Gummiunterlage am größten, so dass in den weiteren Versuchen keine Gummiunterlage zum Einsatz kommt. Es zeigt sich jedoch bei den Versuchen mit dem Messmikrofon, dass bei der Verwendung einer Unterlage, die einen Abstand zwischen Pflückplatte und Abdeckplatte bedingt, weniger Störgeräusche („Scheppern“) beim Pflückvorgang zu hören sind. Die Gummischeiben werden deshalb für die weiteren Versuche mit dem Messmikrofon durch drei Unterlegscheiben M12 ersetzt, die die Pflückplatte und die Abdeckplatte auf einen Abstand von 2,3 mm halten, aber keinen Schall schlucken.

Für die Versuchsreihe Kolbengröße werden für jeden Sensor 30 Kolben ausgewählt und nach ihrer Größe in drei Klassen zu je zehn Kolben sortiert. Nach dem Pflücken mit der Versuchsmaschine werden sie einzeln gewogen und das arithmetische Mittel jeder Größenklasse dem jeweiligen Messwert zugeordnet.

Um Pflanzen mit unterschiedlicher Kolbenfeuchte zur Verfügung zu haben, ist eine Trocknung im Trockenschrank nötig. Es werden von den für die Versuche geschnittenen

Pflanzen je Sensor 30 Pflanzen ausgewählt, zehn sofort für die Versuche benutzt, zehn Pflanzen bei 105 °C für 6 h im Trockenschrank gelagert und zehn Pflanzen für 20 h bei 105 °C getrocknet, bevor sie ebenfalls mit der Versuchsmaschine gepflückt werden. Von jedem Durchgang werden die Kolben zur Bestimmung des TS-Gehaltes anschließend bei 105 °C für mindestens 24 h endgültig getrocknet. Die ermittelten TS-Gehalte der Kolben für die Versuche mit dem Piezokristallsensor liegen bei den frisch geernteten Pflanzen vom 26. Oktober 2005 bei 65,2 %, bei den 6 h getrockneten Pflanzen bei 77,3 % und die 20 h getrockneten Pflanzen weisen einen TS-Gehalt der Kolben von 94,7 % auf. Die Kolben der am 10. November 2005 geschnittenen Pflanzen für die Versuche mit dem Messmikrofon weisen frisch einen TS-Gehalt von 63,8 % auf, nach 6 h im Trockenschrank haben sie einen TS-Gehalt von 81,7 % und nach 20 h im Trockenschrank einen TS-Gehalt von 93,4 %. Die ermittelten TS-Gehalte werden abschließend dem jeweiligen Messwert zugeordnet.

Die Einzugsgeschwindigkeit kann durch die Umwandlung der Netzfrequenz variiert werden. Mit jedem Sensor werden je zehn Pflanzen mit einer Frequenz von 120 Hz, 100 Hz und 80 Hz gepflückt, was einer Einzugsgeschwindigkeit von $4,15 \text{ m s}^{-1}$, $3,46 \text{ m s}^{-1}$ und $2,77 \text{ m s}^{-1}$ entspricht.

3.2.4 Frequenzanalyse

Schallaufnahmen, wie die in den Versuchen mit dem Messmikrofon aufgezeichneten wav-Dateien, haben normalerweise keinen rein sinusförmigen Verlauf, sondern stellen eine Überlagerung mehrerer rein sinusförmiger Teilschwingungen dar [29]. Um derartige Schallereignisse genauer zu untersuchen, führt man eine Frequenzanalyse durch, die nach ihrem Erfinder J. B. FOURIER als Fast-Fourier-Transformation (FFT) bezeichnet wird. Dabei wird die Schwingungskurve in eine Summe von Einzelschwingungen zerlegt, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der tiefsten vorkommenden Frequenz, der sogenannten Grundfrequenz sind. In der praktischen Durchführung mit dem Musikbearbeitungsprogramm wird jedoch nicht jede einzelne Sinuskurve bestimmt, sondern die Kurven in Frequenzbereiche zusammengefasst. Abschließend wird für jeden Frequenzbereich die Amplitude ermittelt und graphisch dargestellt. Die numerischen Amplituden-Werte für jeden Frequenzbereich können exportiert werden, so dass sie mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel weiter bearbeitet werden können.

In dieser Arbeit wird der Bereich in einer Länge von jeweils ca. 0,2 s um den Aufprall des Maiskolbens analysiert. In diese Untersuchung fließen die Ergebnisse von 30 Kolben der Versuchsreihe „Kolbengröße“ ein. Die Ergebnisse für jeden Kolben werden gespeichert und zum Schluss für alle 30 Kolben gemittelt. Gleiches wird mit dem Leerlaufgeräusch der 3 Versuchsreihen durchgeführt. Durch die Subtraktion beider Frequenzkurven voneinander kann der Frequenzbereich bestimmt werden, in dem die Anregung durch die auftreffenden Maiskolben am größten ist.

3.3 Feldversuche

Um die im Labor entwickelten Ansätze unter Praxisbedingungen testen zu können, ist der Bau einer (Feld-)Versuchsmaschine nötig. Der Aufbau der Versuchsmaschine auf Basis eines Rota-Disk Maispflückvorsatzes (Abbildung 5) der Firma Geringhoff, ist aus Abbildung 11 zu ersehen. Ein einzelnes Rota-Disk-Aggregat wird auf den Rahmen eines gebrauchten Maishäckslers (Fahr MH500) montiert, von dem vorher bis auf das Winkelgetriebe alle weiteren Teile demontiert worden sind. Das vorhandene Winkelgetriebe mit einer Übersetzung von 1:2,6 wird umgedreht, so dass nun eine Übersetzung von 2,6:1 gegeben ist. Winkelgetriebe und Pflückaggregat sind über eine handelsübliche Gelenkwelle direkt miteinander verbunden. Auf diese Weise liegt bei 1000 min^{-1} Zapfwelldrehzahl am Pflückaggregat eine Drehzahl von 385 min^{-1} an. Als Auffangbehälter dient ein hinter dem Pflückaggregat angeordneter Mörtelkübel, der zum Wiegen und Auszählen der Maiskolben entnommen werden kann. Da die zum Pflückvorsatz gehörenden Torpedobleche nicht vorhanden sind, werden die Leitbleche des Maishäckslers verwendet.



Abbildung 11: Aufbau der Versuchsmaschine für die Feldversuche

Als Sensoren werden die in den Laborversuchen untersuchten Sensoren in gleicher Weise wie bei den Laborversuchen an die Versuchsmaschine für die Feldversuche montiert. Die Durchführung der Versuche findet am 23. und 24. November 2005 auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen statt. Das Wetter an diesen Tagen ist bewölkt aber trocken, mit Tagestemperaturen von 3-4 °C. Pflanzendichte und durchschnittliche Kolbengröße auf dem untersuchten Feldstück sind sehr heterogen, so dass unterschiedliche Pflanzenbestände in die Untersuchungen einfließen können.

Insgesamt werden 30 Versuche durchgeführt, je Sensor zehn Versuche mit einer 20 m langen Reihe, drei mit 40 m langen und zwei mit 60 m langen Reihen. Die Länge der

Reihen wird mit dem Messrad bestimmt und durch Kunststoffstäbe markiert. Dann werden die Kolben an den stehenden Pflanzen gezählt, die Reihen beerntet und die Kolben wiederum von Hand gezählt, in Jutesäcke gefüllt und mittels Zugwaage gewogen. Während des Pflückvorganges werden, anders als bei den Laborversuchen, die Signale beider Sensoren mit dem Musikprogramm aufgezeichnet (siehe Kapitel 3.2) und als wav-Datei gespeichert. Ein Ausschnitt aus einer mit dem Mikrofon aufgezeichneten wav-Datei der Feldversuche ist in Abbildung 12 illustriert. Die Signale des Piezokristallsensors können so leichter aufgezeichnet werden, weil keine externe Schnittstelle nötig ist. Die Durchführung der Feldversuche ohne die Auswertung dauert insgesamt zwei Tage.

Auffällig ist die starke Abweichung der ermittelten Kolbenzahl vor und nach dem Pflückvorgang. Die Auszählung der geernteten Kolben ergibt häufig höhere Werte als die Auszählung der Kolben an den stehenden Pflanzen vor dem Pflücken. Vermutlich werden im teilweise sehr dichten Maisbestand kleinere Kolben übersehen. Zu ebenfalls vorkommenden niedrigeren Werten nach dem Pflücken tragen sicherlich die Aufnahmeverluste des Maispflückers bei. Für die Auswertung der Ergebnisse wird deshalb nur auf die nach dem Pflückvorgang ermittelten Kolbenzahlen zurückgegriffen, weil diese Zahl die Menge der normalerweise in den Mährescher aufgenommenen Kolben widerspiegelt.

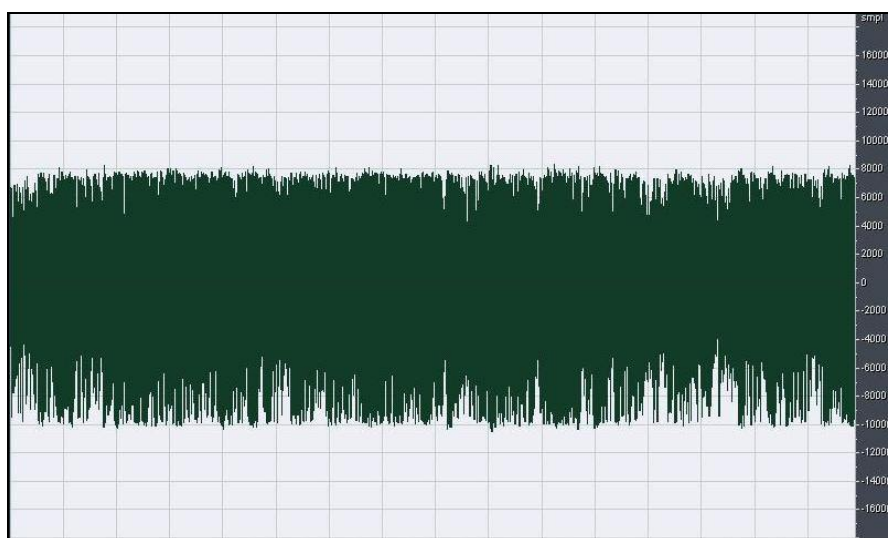


Abbildung 12: Ausschnitt aus einer mit dem Mikrofon aufgenommenen wav-Datei eines Feldversuches

Die bei den Versuchen mit dem Messmikrofon aufgezeichneten wav-Dateien durchlaufen anschließend im Musikbearbeitungsprogramm einen mathematischen Frequenzfilter (FFT-Filter), bei dem alle Sinusschwingungen, deren Frequenz außerhalb des angegebenen Frequenzbereich liegen, rechnerisch entfernt werden. In Abbildung 13 ist ein Ausschnitt aus einer gefilterten wav-Datei abgebildet. Es handelt sich dabei um den gleichen

Ausschnitt wie in Abbildung 12. Als Grundlage für diese Frequenzfilterung dient der Frequenzbereich (1-9 kHz, siehe Abbildung 21), in dem die größte Anregung durch die auftretenden Kolben zu verzeichnen ist (Vgl. Kap. 4.1.4).

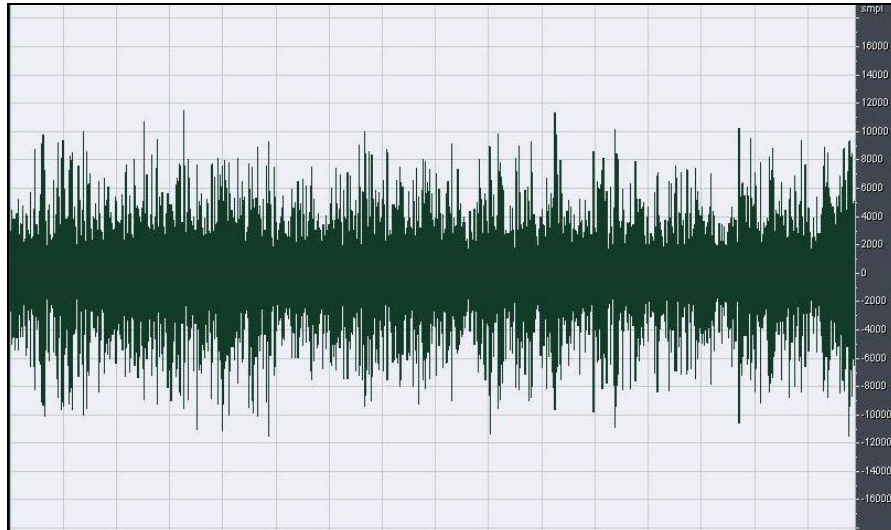


Abbildung 13: Ausschnitt aus Abbildung 12 nach dem Herausfiltern der Frequenzen unterhalb von 1000 Hz und oberhalb von 9000 Hz

Abschließend wird das gefilterte Signal über den Köpfhörerausgang des PCs und die LabJack U12-Schnittstelle in das Laborprogramm ProfiLab 3.0 eingespielt. Dort durchläuft es eine Schaltung, die das Signal gleichrichtet und das Summenintegral zu einer bestimmten Zeitbasis bildet. Der Aufbau dieser Integrationsschaltung ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Werte werden dann in Beziehung zur jeweils ermittelten Erntemenge gesetzt und graphisch dargestellt.

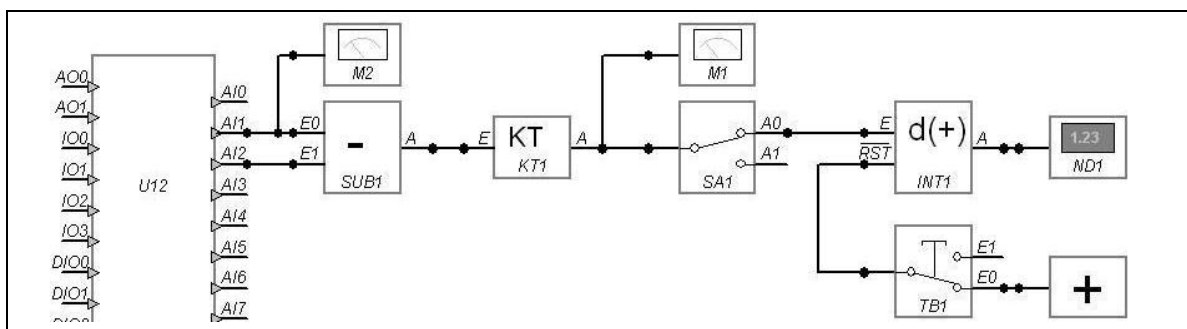


Abbildung 14: Blockschaltbild der Integrationsschaltung (U12: LabJack U12; M1 und M2: Anzeigergeräte (V); SUB1: Subtrahierer (Signal-Offset); KT1: Korrekturtabelle/Gleichrichter; SA1: Ein/Aus-Schalter; INT1: Integrierer; ND1: Numerische Anzeige für INT1; TB1: Reset-Taster für INT1)

Die mit dem Piezokristallsensor aufgenommenen wav-Dateien werden ebenfalls über den Mikrofonausgang und die LabJack U12-Schnittstelle in das Laborprogramm ProfiLab 3.0

eingegeben, jedoch ohne sie vorher zu filtern. Im Laborprogramm durchlaufen sie die gleiche Integrationsschaltung wie die Daten des Mikrofons. Die Werte werden abschließend ebenfalls in Beziehung zur jeweils ermittelten Erntemenge gesetzt und graphisch dargestellt.

4 ERGEBNISSE

Im vierten Kapitel der Arbeit sollen die Ergebnisse dieser Diplomarbeit erläutert werden. Im ersten Teil werden die Ergebnisse der Laborversuche und im zweiten Teil die der Feldversuche dargestellt.

4.1 Laborversuche

Dieser Teil der Arbeit gliedert sich in die Kapitel Sensoren (Kap. 4.1.1), Übertragungsverhalten der Pflückplatte (Kap. 4.1.2), Einfluss von Sensorposition und Pflanzeigenschaften (Kap. 4.1.3) und Frequenzanalyse (Kap. 4.1.4).

4.1.1 Sensoren

In der Zeit vom 10. Oktober bis zum 21. Oktober 2005 werden verschiedene Sensoren auf ihre Eignung für den Einsatz am Maispflückvorsatz untersucht. Als tauglich erweisen sich der Piezokristallsensor und das Messmikrofon in Verbindung mit einem Stethoskop. Der Körnerverlustsensor und der Vibrationssensor sind nicht geeignet (Vgl. Kap. 3.2.1) und werden deshalb nicht weiter verwendet.

4.1.2 Übertragungsverhalten der Pflückplatte

Nachdem für den gewünschten Anwendungszweck geeignete Sensoren gefunden worden sind, wird zunächst das Übertragungsverhalten der Pflückplatte untersucht. Wie aus Abbildung 15 ersichtlich, zeigen sich dabei im Bereich der ersten 8 Messpunkte, d.h. 0 cm bis 40 cm von der Hinterkante der Pflückplatte nur sehr geringe relative Abweichungen vom Durchschnitt (= 36,8 dB) der mit dem Mikrofon gemessenen Werte. Abweichungen deutlich über 1 %-Punkt treten erst im vorderen Bereich der Pflückplatte auf. Insgesamt sind die Abweichungen jedoch nicht über 2 %-Punkte groß. Die Abweichung der jeweils zehn Messwerte eines Punktes untereinander zeigt einen Variationskoeffizienten zwischen 0,03 % am Messpunkt 13 und 1,89 % am Messpunkt 14.

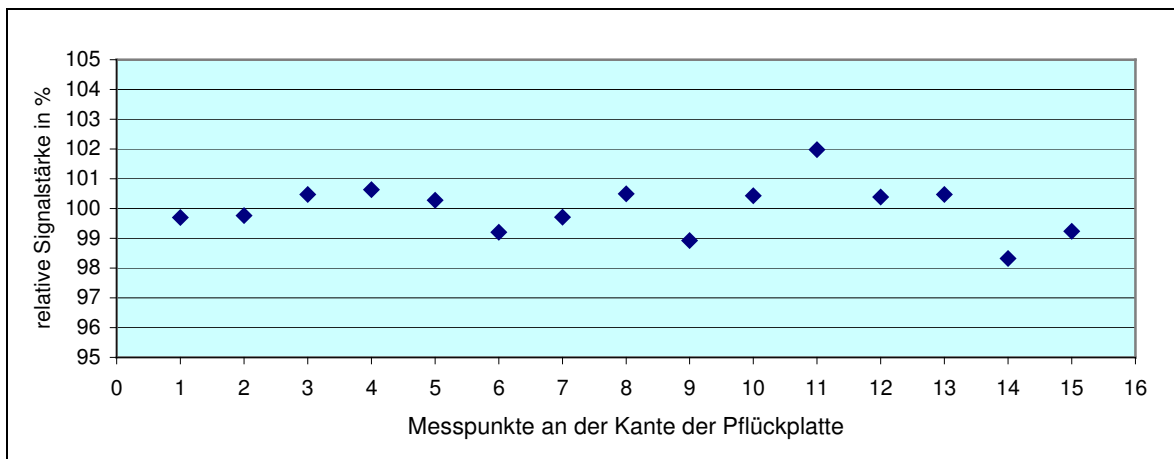


Abbildung 15: Relatives Übertragungsverhalten der Pflückplatte (100 % = 36,8 dB; entspricht der durchschnittlichen Signalstärke; gemessen mit dem Mikrofon)

4.1.3 Einfluss von Sensorposition und Pflanzeigenschaften

Die bei den Untersuchungen zum Einfluss von Sensorposition und Pflanzeigenschaften auf die Signalstärke ermittelten Messwerte für den Piezokristallsensor weisen eine insgesamt sehr große Streuung auf. In einzelnen Versuchen sind die Maximalwerte um das tausendfache größer als die kleinsten Werte. Die Spitzenwerte betragen über 2 V, während die durch die Vibration der Maschine verursachten Spannungen dagegen unter 0,0001 V liegen.

Bei den Versuchen mit dem Mikrofon ist die Streuung dagegen eher gering. Die größte gemessene Lautstärke beträgt 42,7 dB bei einer gemessenen Leerlauf lautstärke der Pflückmaschine von durchschnittlich etwa 22 dB. Für alle Versuche wird das arithmetische Mittel bestimmt und zur Einschätzung der Streuung der Messwerte jeweils die Standardabweichung und der Variationskoeffizient berechnet.

Zum Vergleich der Versuchsergebnisse untereinander wird ein einfacher Mittelwertvergleich durchgeführt. Eine Varianzanalyse ist auf Grund des geringen Stichprobenumfanges in dieser Arbeit von $n = 10$ Pflanzen pro Versuch und der relativ großen Streuung der Ergebnisse nicht möglich.

Einfluss der Sensorposition auf die Signalstärke

In den Versuchen wird zuerst der Einfluss der Sensorposition auf die Signalstärke untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 dargestellt. Sowohl mit dem Piezokristallsensor als auch mit dem Mikrofon ist die Signalstärke im mittleren Bereich der Pflückplatte am geringsten. Die gemessenen Werte betragen hier im Mittel nur 0,022 V mit dem Piezokristallsensor und 38,8 dB mit dem Mikrofon. Die höchsten Werte mit dem Piezokristall können im vorderen Bereich gemessen werden, sie betragen durchschnittlich

0,29 V. Die höchsten mit dem Mikrofon gemessenen Werte sind dagegen im hinteren Bereich festzustellen. Die mittlere Signalstärke beträgt hier 40,3 dB.

Für die weiteren Untersuchungen wird der Piezokristallsensor deshalb im vorderen Bereich der Pflückplatte und das Mikrofon im hinteren Bereich der Pflückplatte angebracht.

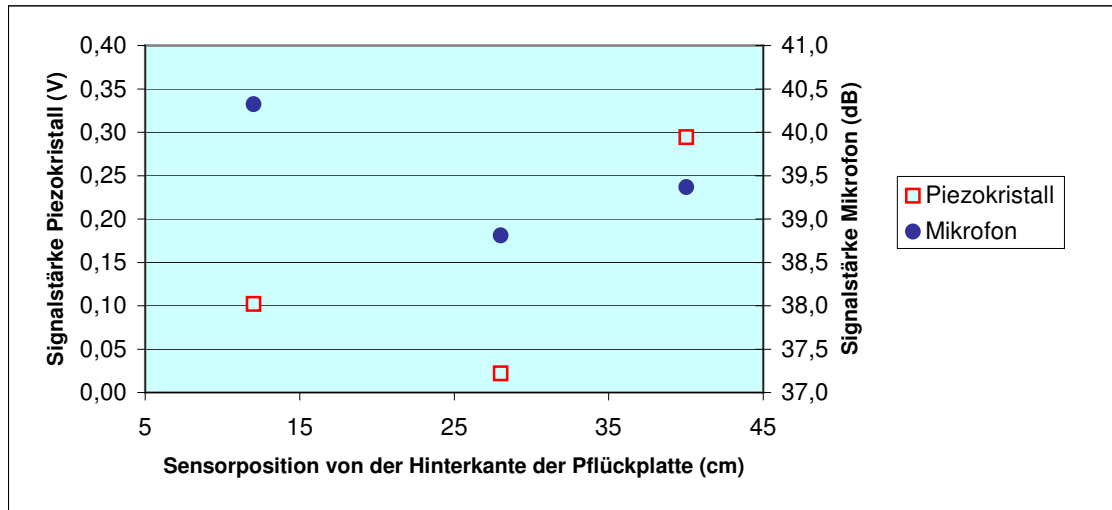


Abbildung 16: Arithmetisches Mittel der Signalstärke in Abhängigkeit von der Sensorposition

Einfluss der Lagerung der Pflückplatte auf die Signalstärke

Im nächsten Schritt wird die Lagerung der Pflückplatte variiert und die Signalstärke gemessen. Es werden drei Varianten untersucht, eine ohne, eine mit 2 mm starker und eine mit 4 mm starker Gummilagerung der Pflückplatte. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 zusammengefasst. Bei beiden Sensoren zeichnet sich eine negative Korrelation zwischen Signalstärke und Stärke der Gummilagerung ab. Die höchsten Werte sind ohne jegliche Gummiunterlage festzustellen. Ihr Mittelwert beträgt 0,297 V bei der Messung mit dem Piezokristallsensor und 40,2 dB mit dem Mikrofon. Die niedrigsten Werte mit dem Piezokristallsensor sind bei einer Gummiunterlage von 4 mm festzustellen. Sie betragen in diesem Fall in Mittel 0,032 V. Mit dem Mikrofon können die kleinsten Messwerte bei einer Gummiunterlage von 2 mm festgestellt werden, mit zunehmender Stärke der Gummilagerung steigen sie wieder leicht an. Im Mittel betragen die mit dem Mikrofon gemessenen Werte 39,2 dB bei 2 mm starker und 39,7 dB bei 4 mm starker Gummiunterlage. Für die mit dem Piezokristallsensor gemessenen Werte deutet sich eine negative Korrelation von Gummilagerung und Signalstärke mit einem Korrelationskoeffizienten von $R^2 = 0,8126$ an. Bei der Messung mit dem Mikrofon zeichnet sich mit einem Korrelationsfaktor von $R^2 = 0,3102$ dagegen keine eindeutige lineare Korrelation ab.

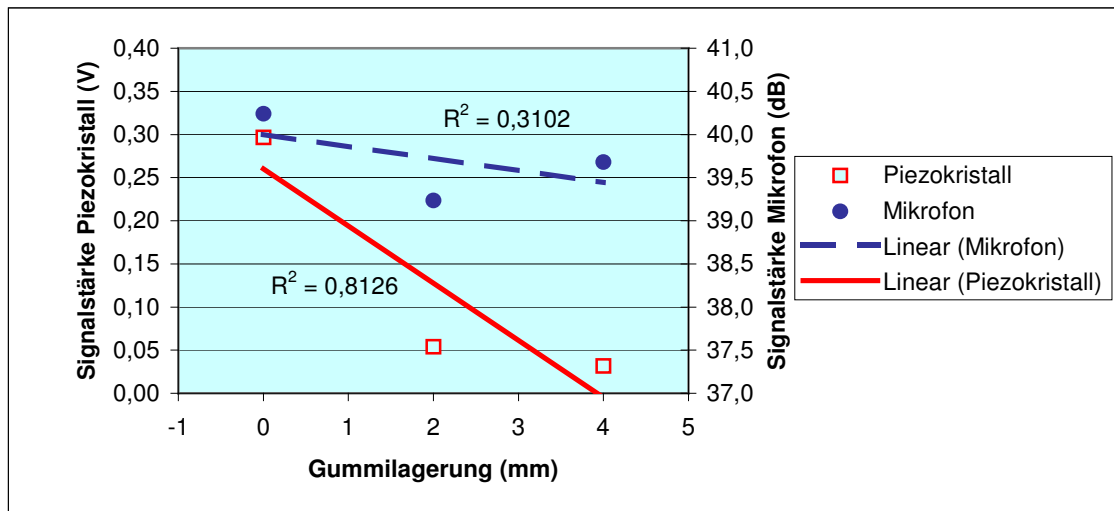


Abbildung 17: Arithmetisches Mittel der maximalen Signalstärke in Abhängigkeit von der Stärke der Gummilagerung der Pflückplatte

Des Weiteren nimmt der Variationskoeffizient der Messwerte beider Sensoren von der Variante ohne Gummilagerung zu den Varianten mit Gummilagerung stark zu. Am stärksten ist dieser Anstieg bei den Ergebnissen des Piezokristallsensors zu beobachten. Hier steigt der Variationskoeffizient von 114 % auf 253 %. Die weiteren Untersuchungen werden deshalb alle ohne Gummilagerung der Pflückplatte durchgeführt.

Einfluss des Kolbengewichtes auf die Signalstärke

Mit den auf Basis der Ergebnisse der beiden vorangegangenen Untersuchungen festgelegten Einstellungen wird im folgenden Versuch das Kolbengewicht variiert. Die Gewichte der einzelnen Kolben liegen zwischen 65 g und 222 g. Der Mittelwert für die zehn Kolben eines Versuches wird dem jeweiligen Ergebnis zugeordnet. Alle Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Abbildung 18 zusammengefasst. Die gemittelten Messwerte liegen zwischen 0,19 V (Piezokristall) bzw. 37,2 dB (Mikrofon) für die zehn leichtesten Kolben und zwischen 0,366 V bzw. 40,3 dB für die zehn schwersten Kolben der jeweiligen Versuchsreihe.

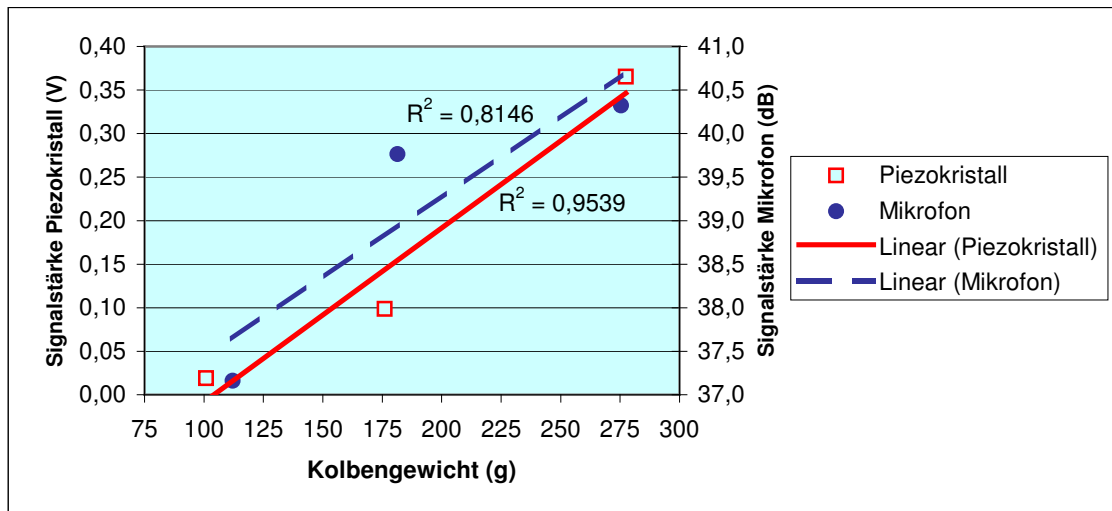


Abbildung 18: Arithmetisches Mittel der maximalen Signalstärke in Abhängigkeit vom Kolbengewicht

Für beide Sensoren deutet sich eine positive Korrelation zwischen Kolbengewicht und Signalstärke an. Die errechneten Korrelationskoeffizienten der Mittelwerte betragen $R^2 = 0,9539$ für die Werte des Piezokristallsensors und $R^2 = 0,8146$ für die mit dem Mikrofon ermittelten Werte.

Das arithmetische Mittel der Gewichte sowie die Standardabweichung in einzelnen Größenklassen dieses Versuches sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Das mittlere Gewicht in den einzelnen Klassen beträgt bei den in den Versuchen mit dem Piezokristallsensor verwendeten Kolben 100,9 g, 176,0 g und 277,4 g mit einer Standardabweichung zwischen 20,3 g und 32,3 g. Die Kolben der in den Versuchen mit dem Mikrofon gepflückten Pflanzen wiegen im Mittel 112,1 g, 181,4 g und 257,4 g. Die Standardabweichung liegt in diesem Fall zwischen 20,0 g und 31,2 g.

Tabelle 3: Arithmetisches Mittel (MITTEL) und Standardabweichung (STABW) der Kolbengewichte im Versuch „Einfluss des Kolbengewichtes auf die Signalstärke“

Größenklasse	klein		mittel		groß	
	MITTEL	STABW	MITTEL	STABW	MITTEL	STABW
Piezokristallsensor	100,9	20,7	176,0	20,3	277,4	32,3
Mikrofon	112,1	24,9	181,4	20,0	257,4	31,2

Einfluss des TS-Gehaltes der Maiskolben auf die Signalstärke

Die zweite Pflanzeigenschaft, die im Rahmen dieser Diplomarbeit variiert wird, ist der TS-Gehalt der Maiskolben. Dafür wird ein Teil der Pflanzen vor dem Pflücken im Trockenschrank angetrocknet. Der nach den Versuchen bestimmte TS-Gehalt der Maiskolben jedes einzelnen Versuches und die jeweiligen Messwerte sind aus Abbildung

19 zu entnehmen. Bei den Untersuchungen mit dem Piezokristallsensor liegen die gemittelten Messwerte der einzelnen Versuche zwischen 0,311 V und 0,321 V und die TS-Gehalte der Maiskolben zwischen 65,2 % und 94,7 %.

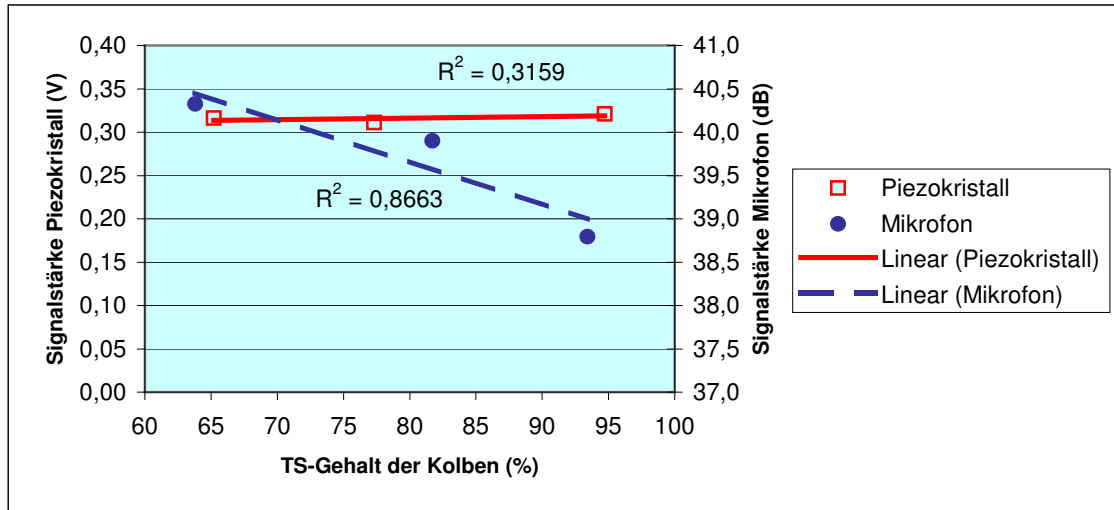


Abbildung 19: Arithmetisches Mittel der maximalen Signalstärke in Abhängigkeit vom TS-Gehalt der Kolben

Es deutet sich in den Versuchen mit dem Piezokristallsensor keine Korrelation zwischen dem TS-Gehalt der gepflückten Maiskolben und der durchschnittlichen Signalstärke an. Bei den Untersuchungen mit dem Mikrofon scheinen die durchschnittlichen Messwerte und der TS-Gehalt der Maiskolben negativ zu korrelieren. Der Korrelationskoeffizient beträgt in diesem Fall $R^2 = 0,8663$. Die Messwerte liegen im Mittel zwischen 40,3 dB bei einem TS-Gehalt von 64,8 % und 38,8 dB bei einem TS-Gehalt von 93,4 %.

Einfluss der Einzugsgeschwindigkeit auf die Signalstärke

Zum Abschluss dieser Versuche wird der Einfluss der Einzugsgeschwindigkeit auf die Signalstärke untersucht. Mit jedem Sensor werden jeweils zehn Pflanzen mit einer Einzugsgeschwindigkeit von 2,77 m/s, 3,46 m/s und 4,15 m/s gepflückt. Die mittlere Signalstärke in Abhängigkeit von der Einzugsgeschwindigkeit dieser sechs Versuche ist in Abbildung 20 dargestellt. Sie beträgt zwischen 0,068 V (Piezokristallsensor) bzw. 40,2 dB (Mikrofon) bei langsamer Einzugsgeschwindigkeit und 0,344 V bzw. 40,3 dB bei schnellem Einzug der Maispflanze.

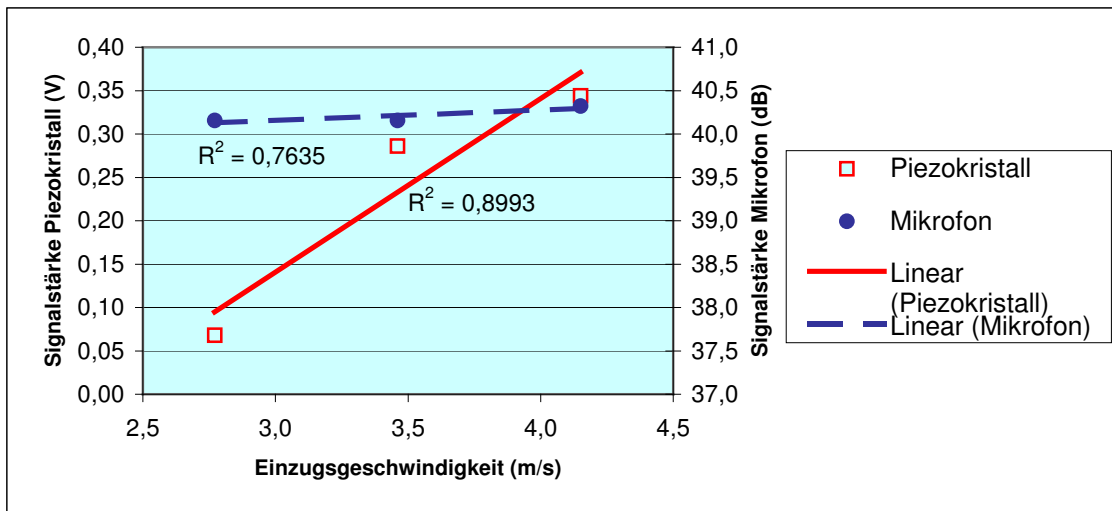


Abbildung 20: Arithmetisches Mittel der maximalen Signalstärke in Abhängigkeit von der Einzugsgeschwindigkeit

Für beide Sensoren deutet sich eine positive Korrelation zwischen Einzugsgeschwindigkeit und Signalstärke an. Der Korrelationskoeffizient beträgt für die Messergebnisse des Piezokristallsensors $R^2 = 0,8993$ und für die des Mikrofons $R^2 = 0,7635$. Aus den Steigungen der beiden Trendlinien lässt sich jedoch ablesen, dass der Einfluss der Einzugsgeschwindigkeit auf die Signalstärke des Piezokristallsensors vermutlich stärker ist als auf die Signalstärke des Mikrofons. Die Steigung der Trendlinie der Messwerte des Piezokristallsensors verläuft nämlich deutlich steiler als die der Messwerte des Mikrofons.

4.1.4 Frequenzanalyse

Die gemittelten Amplituden-Frequenzspektren des Aufprallgeräusches aller 30 in diese Untersuchung einfließenden Maiskolben sowie die gemittelten Amplituden-Frequenzspektren des Grundrauschens, d.h. das Leerlaufgeräusch der Versuchsmaschine dieser 3 Versuchsreihen ist in Abbildung 21 dargestellt. Zusätzlich ist die Differenz zwischen beiden Kurven eingezeichnet. (Das Frequenzspektrum zeigt die anteiligen Amplituden bzw. die Lautstärke (y-Achse) der enthaltenen Frequenzen (x-Achse) eines Schallereignisses [20]).

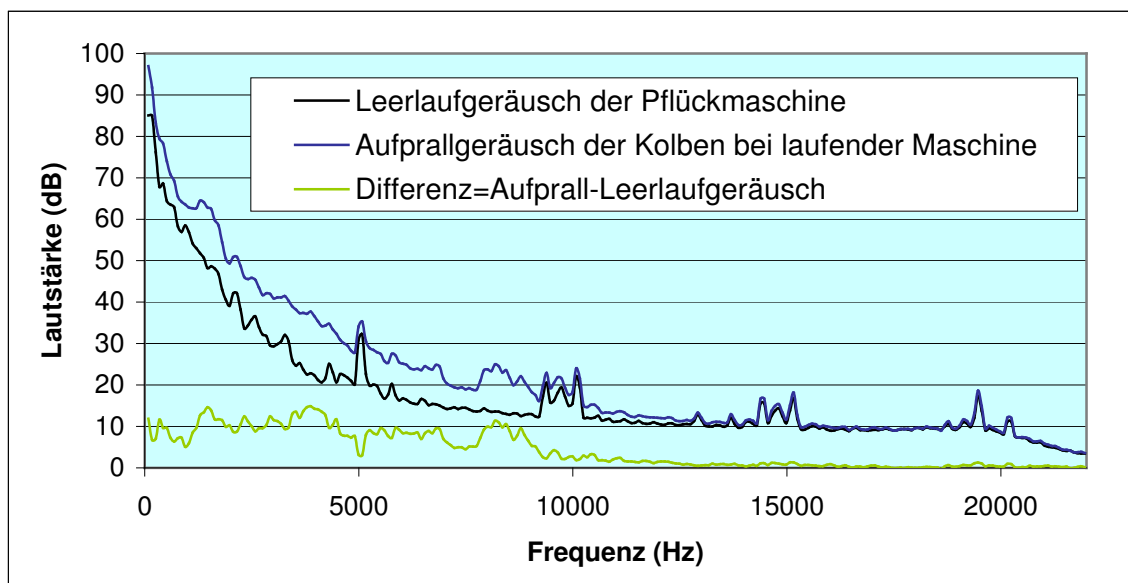


Abbildung 21: Frequenzspektren von Kolbenaufprall- und Leerlaufgeräusch

Die maximale Differenz beider Kurven liegt im Bereich zwischen ca. 1.000 Hz und 9.000 Hz. Oberhalb von ca. 10.000 Hz verlaufen beide Kurven auf nahezu gleicher Höhe. Insgesamt nimmt die Lautstärke von den hohen zu den tiefen Frequenzen ab. Besonders ins Auge fallen gleichmäßig auftretende Peaks, die sich alle 5.000 Hz wiederholen. Ein solcher Peak führt auch zu einem Einbruch der Differenz zwischen Leerlauf- und Aufprallgeräusch um 5.000 Hz.

4.2 Feldversuche

Die Erntemengen aller 30 Feldversuche in Abhängigkeit von der jeweiligen Anzahl der nach dem Pflückvorgang ausgezählten Kolben ist Abbildung 22 dargestellt.

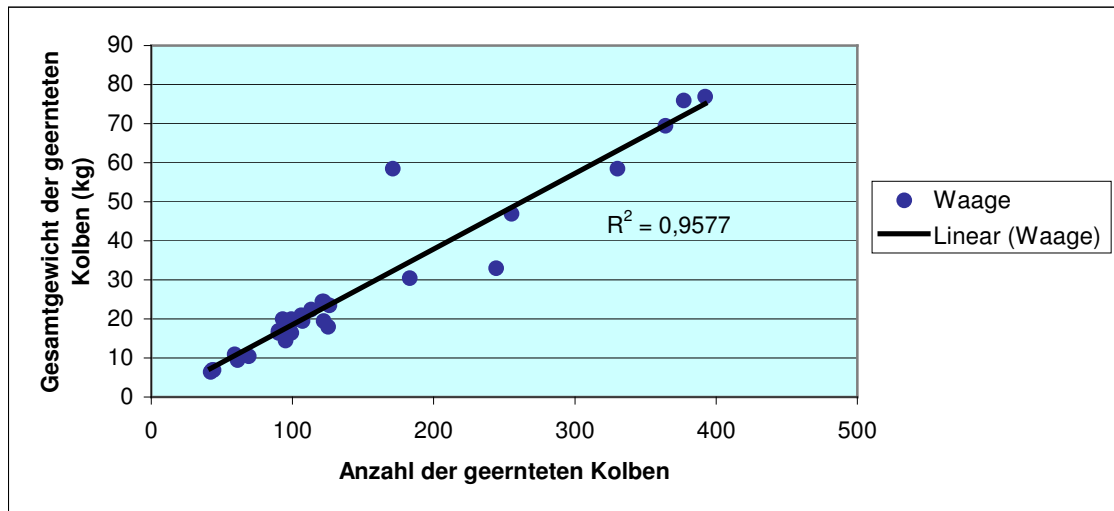


Abbildung 22: Gesamtgewicht in Abhängigkeit von der Anzahl der geernteten Kolben aller Feldversuche

Eine positive Korrelation zwischen der Anzahl der geernteten Kolben und ihrer Gesamtmasse wird aus diesen Ergebnissen deutlich. Der Korrelationsfaktor beträgt in diesem Fall $R^2 = 0,9577$. Das mittlere Einzelkolbengewicht in den einzelnen Versuchen liegt zwischen 135 g und 342 g, wobei sich 28 der 30 mittleren Werte zwischen 144 g und 215 g bewegen. Die Gesamt-Erntemenge in den Feldversuchen liegt zwischen 42 Kolben mit einem Gesamtgewicht von 6,5 kg in einer 20 m langen Versuchsreihe und 392 Kolben mit einem Gewicht von insgesamt 77 kg bei einem 60 m langem Versuch.

Auffällig sind zwei Werte, die weiter entfernt von der Trendlinie als alle anderen Punkte liegen. Da beide der mit dem Mikrofon aufgenommenen Versuchsreihe zuzuordnen sind, wird der Korrelationsfaktor für die Werte des Piezokristallsensor und für die Werte des Mikrofon getrennt ausgerechnet. Er beträgt dann für den Piezokristallsensor $R^2 = 0,9945$ und für das Mikrofon $R^2 = 0,9342$.

Piezokristallsensor

Das Summenintegral der Signalstärke der in den Feldversuchen mit dem Piezokristallsensor aufgenommen wav-Dateien ist in Abbildung 23 in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht der geernteten Kolben und in Abbildung 24 in Abhängigkeit von der Anzahl der geernteten Kolben dargestellt. Das Summenintegral der Signalstärke liegt zwischen 2212 V und 16050 V und die entsprechenden Erntemengen betragen zwischen 42

geernteten Kolben mit einem Gesamtgewicht von 6,5 kg und 264 geernteten Kolben mit einem Gesamtgewicht von 69,5 kg (Abbildung 22).

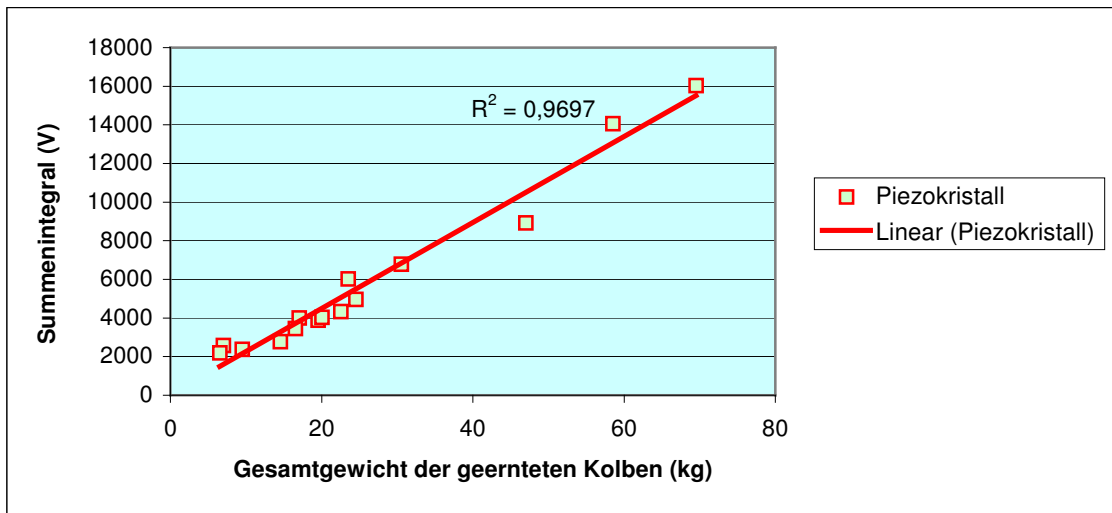


Abbildung 23: Summenintegral der Signalstärke des Piezokristallsensors in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht der geernteten Kolben

In beiden Fällen ist eine positive Korrelation zwischen der Erntemenge und der integrierten Signalstärke zu beobachten. Der Korrelationskoeffizient beträgt $R^2 = 0,9697$ für die Abhängigkeit der Signalstärke vom Gesamtgewicht und $R^2 = 0,9693$ für die Abhängigkeit der Signalstärke von der Anzahl der geernteten Kolben in diesen Versuchen.

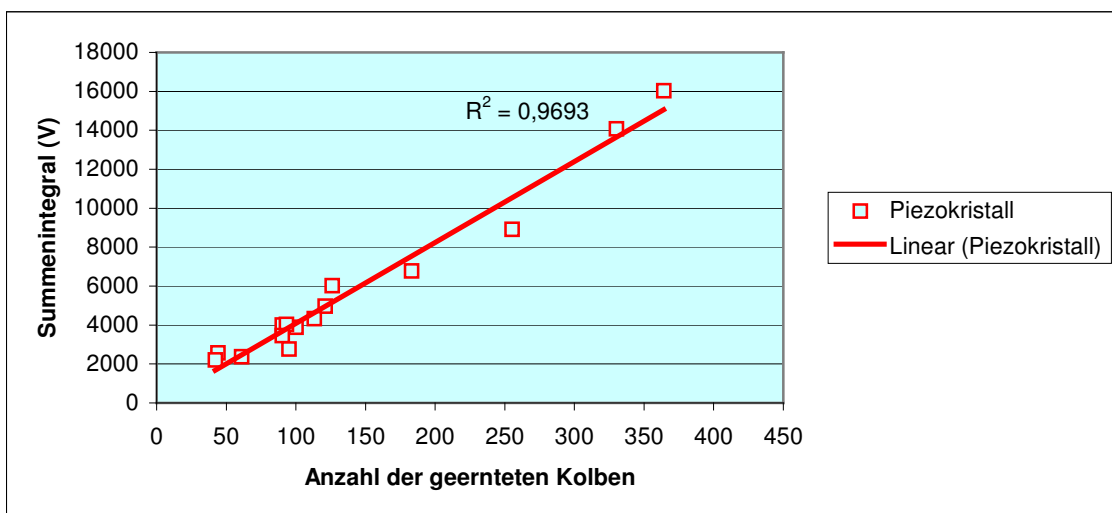


Abbildung 24: Summenintegral der Signalstärke des Piezokristallsensors in Abhängigkeit von der Anzahl der geernteten Kolben

Mikrofon

Das Summenintegral der in den Feldversuchen mit dem Mikrofon aufgenommenen Messergebnisse ist in Abbildung 25 in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht der geernteten Kolben und in Abbildung 26 in Abhängigkeit von der Anzahl der geernteten Kolben dargestellt.

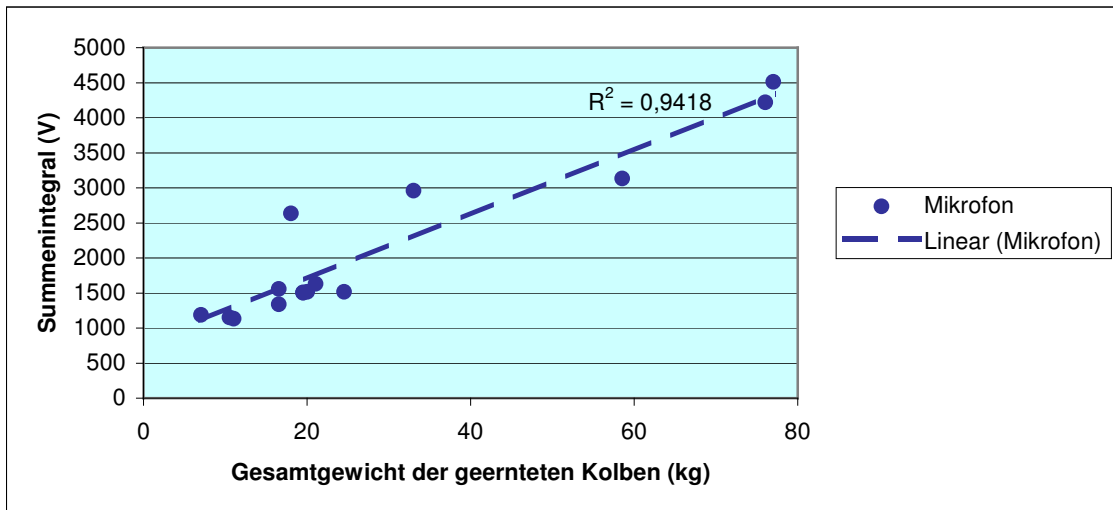


Abbildung 25: Summenintegral der Signalstärke des Mikrofons in Abhängigkeit von der Gesamtmasse der geernteten Kolben

Das Integral liegt hier zwischen 1190 V und 4516 V und die entsprechenden Erntemengen zwischen 43 geernteten Kolben mit einem Gesamtgewicht von 7 kg und 392 geernteten Kolben mit einem Gewicht von 77 kg (Abbildung 22).

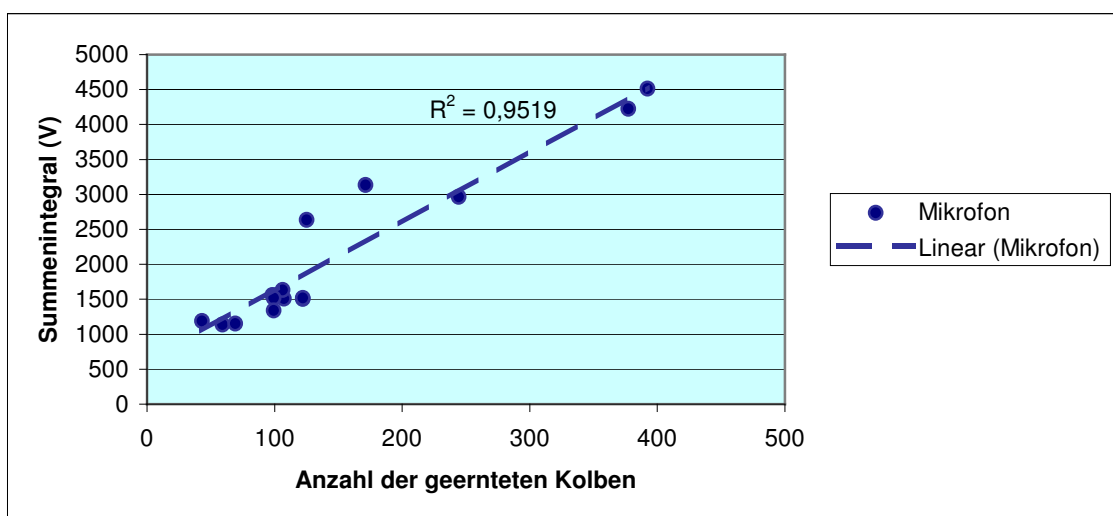


Abbildung 26: Summenintegral der Signalstärke des Mikrofons in Abhängigkeit von der Anzahl der geernteten Kolben

Wie bei den Versuchen mit dem Piezokristallsensor ist auch mit dem Mikrofon jeweils ist eine positive Korrelation zwischen der Erntemenge und der integrierten Signalstärke festzustellen. Der Korrelationskoeffizient ist jedoch etwas kleiner als bei den mit dem Piezokristallsensor aufgezeichneten Ergebnissen. Er beträgt bei den mit dem Mikrofon gemessenen Werten $R^2 = 0,9418$ für die Abhängigkeit der Signalstärke vom Gesamtgewicht und $R^2 = 0,9519$ für die Abhängigkeit der Signalstärke von der Anzahl der geernteten Kolben.

5 DISKUSSION

Im folgenden Teil sollen die Ergebnisse dieser Diplomarbeit diskutiert werden. In Kapitel 5.1 wird dabei auf die Erkenntnisse aus den Laborversuchen und in Kapitel 5.2 auf die der Feldversuche eingegangen.

5.1 Laborversuche

Die Diskussion der Ergebnisse der Laborversuche wird wie schon in den vorangegangenen Kapiteln dieser Arbeit in die Abschnitte Sensoren (Kap. 5.1.1), Übertragungsverhalten der Pflückplatte (Kap. 5.1.2), Einfluss von Sensorposition und Pflanzeigenschaften (Kap. 5.1.3) und Frequenzanalyse (Kap. 5.1.4) gegliedert.

5.1.1 Sensoren

Als zentrales Element müssen zuerst geeignete Sensoren für die geforderte Anwendung gefunden werden. Zwei der vier untersuchten Sensoren sind zum Erfassen der auf die Pflückplatte auftreffenden Maiskolben wenig geeignet. Es sind dies der Körnerverlustsensor der Firma LH-Agro und der Vibrationssensor für Alarmanlagen.

DIEKHANS ermittelte in seiner Arbeit zur Entwicklung eines Körnerverlustsensors eine starke Anregung des Sensorbleches durch aufprallende Getreidekörner im Frequenzbereich von ca. 2.000 Hz bis 10.000 Hz [14]. Die Elektronik des in der Diplomarbeit verwendeten Körnerverlustsensors filtert also vermutlich auch diesen Frequenzbereich heraus. Obwohl die größte Anregung durch die aufprallenden Maiskolben ebenfalls im Frequenzbereich von ca. 1.000 Hz bis 9.000 Hz festgestellt wird (Abbildung 21), reagiert der Körnerverlustsensor nicht auf die Maiskolben. Es ist anzunehmen, dass die massive Pflückplatte die Impulse nicht in dem Maße auf den darunter angebrachten Körnerverlustsensor überträgt, wie dies das normalerweise verwendete dünne Sensorblech tun würde. Die große Masse der Pflückplatte, die zudem fest mit der Maschine verbunden ist, kann nicht so leicht in Schwingung versetzt werden wie das leichte Sensorblech. Die zusammen mit dem eigentlichen Mikrofon auf der Platine aufgelötete Elektronik bewertet die durch die Maiskolben verursachte Anregung vermutlich als zu gering und gibt sie nicht an den PC weiter. Um dies genauer zu untersuchen, wäre die Trennung von Mikrofon und

Elektronik auf der Platine nötig. Das Mikrofon könnte dann direkt mit der Datenerfassung verbunden und getestet werden.

Weitere Versuche mit dem Vibrationssensor für Alarmanlagen wären hingegen wenig sinnvoll. Der Vibrationssensor ist für die Verwendung an einer Arbeitsmaschine wie dem Mähdrescher viel zu empfindlich. Bereits durch die Erschütterungen im Leerlauf der Maschine wird der Vibrationssensor angeregt. Selbst wenn ein Sensor dieser Bauart so konzipiert würde, dass er wirklich nur auf die Maiskolben reagiert, gibt er doch nur einen Schaltimpuls und kein analoges Signal ab. Es kann folglich auch keinen Einfluss von z.B. der Kolbengröße auf die Signalstärke geben, lediglich eine zählende Funktion eines solchen Sensors wäre denkbar.

Als geeignet erweisen sich dagegen der Piezokristallsensor PKS1 und das Backelektret-Mikrofon.

Die vom Piezokristallsensor abgegebene Spannung steigt im Moment des Aufpralles eines Maiskolbens auf die Pflückplatte deutlich an. Es werden Spitzenwerte von über 2 V gemessen, während die durch die Vibration der Maschine verursachten Spannungen unter 0,001 V liegen. Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass die Messwerte von der simulierten Schaltung (Abbildung 10) zur Gleichrichtung quadriert werden. Die tatsächlich vom Piezokristallsensor abgegebene Spannung beträgt also die Quadratwurzel der Messwerte. Ein Nachteil des verwendeten Piezokristallsensors ist sein relativ kleiner nutzbarer Frequenzbereich. Wie aus Abbildung 9 ersichtlich, liegt dieser zwischen 0 Hz und etwa 1.000 Hz, während der größte durch die Maiskolben angeregte Frequenzbereich (Abbildung 21) bis etwa 9.000 Hz reicht. Der Piezokristallsensor erfasst also nur einen kleinen Ausschnitt der durch die Maiskolben angeregten Schwingungen der Pflückplatte. Piezokristallsensoren, die einen größeren Frequenzbereich abdecken, bestehen jedoch aus mehreren übereinanderliegenden Kristallschichten und sind deshalb aufwändiger in der Herstellung und somit auch deutlich teurer.

Das verwendete Mikrofon erfasst dagegen gleichmäßig den gesamten Frequenzbereich von 20 Hz bis 16.000 Hz. Es kann jedoch im Gegensatz zum Piezokristallsensor nicht direkt den Körperschall der Pflückplatte erfassen, sondern nur die mit Luft übertragenen Schallwellen. Um also die von der Pflückplatte ausgehenden Schallwellen und möglichst wenig Nebengeräusche zu empfangen, muss das Mikrofon dicht an die Pflückplatte herangebracht werden. Hier ist jedoch der Schalldruck so hoch, dass die Membran des Mikrofons bis zum Anschlag ausgelenkt wird, das Mikrofon „übersteuert“. Durch die in den Versuchen vor dem Mikrofon angebrachte Gewebeschicht werden die Schallwellen abgeschwächt. Die Kraft der auftreffenden Schallwellen ist nur für eine geringe Auslenkung der Gewebeschicht ausreichend, und die dahinter an die Membran des Mikrofons weitergegebenen Schallwellen sind entsprechend kleiner. Für weitere Untersuchungen wäre es demnach sinnvoll, ein entsprechend unempfindlicheres Mikrofon zu verwenden.

5.1.2 Übertragungsverhalten der Pflückplatte

Die Übertragung der mit dem Hammer verursachten Schwingungen zum auf der Pflückplatte angeordneten Mikrofon verläuft von der Hinterkante der Pflückplatte bis zum Messpunkt Nr. 8 (40 cm von der Hinterkante der Pflückplatte) sehr gleichmäßig, erst im vorderen Bereich werden größere Abweichungen festgestellt (Abbildung 15). Bedingt werden diese Abweichungen vermutlich dadurch, dass die Spitze der Pflückplatte nicht befestigt ist und somit im Gegensatz zum Rest der Pflückplatte frei schwingen kann. Der letzte Befestigungspunkt der Pflückplatte von der Hinterkante aus betrachtet liegt nämlich in etwa auf Höhe des Messpunktes Nr. 9, der erste im Bereich zwischen Messpunkt Nr. 1 und Nr. 2. Auch DIEKHANS [14] stellte bei seinen Untersuchungen einen Einbruch der Empfindlichkeit der Sensorplatte an den Befestigungspunkten und einen Anstieg der Empfindlichkeit außerhalb der Befestigungen fest. Für die weiteren Untersuchungen mit der Pflückplatte als Sensorblech sind diese Bereiche jedoch nur von untergeordneter Bedeutung, weil die Einzugswalzen des Pflückvorsatzes nur von der Hinterkante der Pflückplatte bis etwa unterhalb des Messpunktes Nr. 9 arbeiten. Der größte Anteil der während der Vorwärtsbewegung des Mähdreschers gepflückten Kolben wird also vermutlich im hinteren Bereich der Pflückplatte auftreffen, in etwa zwischen den beiden Befestigungspunkten. Da der Aufprallpunkt der Maiskolben sicherlich von verschiedenen Faktoren wie Fahrgeschwindigkeit oder Einzugsgeschwindigkeit beeinflusst wird, erscheint es sinnvoll, diesen Zusammenhang in weiteren Untersuchungen genauer zu beleuchten.

5.1.3 Einfluss von Sensorposition und Pflanzeigenschaften

Die relativ große Streuung der mit dem Piezokristallsensor ermittelten Messwerte lässt sich zum Einen mit den Eigenschaften der Schnittstelle der Messwertaufbereitung und zum Anderen aus der Art und Weise der Messwertaufbereitung begründen. Das Offset des LabJack U12 schwankt zwischen 1,431 V und 1,445 V, d.h. um insgesamt 14 mV. Wird dieser Wert zusätzlich quadriert, so können sich bereits Abweichungen von bis zu 196 mV ergeben. Im Vergleich zu den in allen Versuchen unter 400 mV liegenden durchschnittlichen Maximalwerten stellt eine derartig hohe Abweichung eine beachtliche Größe dar. Aus dem gleichen Grund ist die Aufzeichnung der von dem Mikrofon abgegebenen Signale mit der in Abbildung 10 dargestellten Schaltung in Verbindung mit dem LabJack U12 nicht möglich. Selbst ohne eine weitere Verrechnung der Werte sind die durch die Schnittstelle verursachten Spannungsschwankungen größer als die vom Mikrofon abgegebene Spannung. Das Signal des Mikrofons wird also vom Grundrauschen des LabJack U12 gänzlich überlagert.

Ein weiterer Grund für die größere Streuung der Messwerte des Piezokristallsensors könnte sein relativ kleiner nutzbarer Frequenzbereich sein (Abbildung 9). Während die auf die Pflückplatte aufprallenden Maiskolben den Frequenzbereich bis ca. 9.000 Hz stark anregen (Abbildung 21), kann der verwendete Piezokristallsensor nur Schwingungen im

Frequenzbereich bis etwa 1.000 Hz genau erfassen. Möglicherweise ist aber die Streuung der Werte in diesem Bereich größer als über den gesamten Frequenzbereich. Das würde auch die wesentlich geringere Streuung der mit dem Mikrofon ermittelten Werte erklären. Beim Mikrofon kommt jedoch noch hinzu, dass der Vorverstärker und die als Schnittstelle verwendete Soundkarte des PCs nur ein verhältnismäßig geringes Grundrauschen aufweisen, und die Messwerte zur Auswertung nicht weiter verrechnet werden müssen.

Einfluss der Sensorposition auf die Signalstärke

Die maximale Schwingungsamplitude einer zwischen zwei Punkten eingespannten Platte ist eigentlich in ihrer Mitte zu erwarten [29]. Die größten Messwerte müssten deshalb auch im mittleren Bereich der Pflückplatte zu ermitteln sein. Die in Abbildung 16 dargestellten tatsächlich gemessenen Werte zeigen aber genau das umgekehrte Bild, mit beiden Sensoren sind sie in der Mitte der Pflückplatte am kleinsten. Der Vergleich der Pflückplatte mit einer zwischen zwei Punkten eingespannten Platte ist jedoch nicht ganz treffend. Die Befestigungspunkte der Pflückplatte befinden sich beide seitlich an der Platte und außerdem kann die nach vorn überstehende Spitze der Pflückplatte relativ frei schwingen. Das genaue Schwingungsverhalten der Pflückplatte lässt sich folglich nicht so einfach erklären. Warum nun aber die Messwerte des Piezokristallsensors im vorderen und die Messwerte des Mikrofons im hinteren Bereich der Pflückplatte ihre Maximalwerte annehmen kann nicht erklärt werden. In den Ergebnissen dieser Versuchsreihe deutet sich keinerlei Gesetzmäßigkeit an. Um an dieser Stelle auszuschließen, dass diese Ergebnisse nur zufällig zustande gekommen sind, müsste der Umfang der Versuche deutlich vergrößert werden. Möglicherweise hat die Sensorposition aber auch gar keinen signifikanten Einfluss auf die Signalstärke. Auch DIEKHANS macht in seiner Veröffentlichung zur Entwicklung eines Körnerverlustsensors [14] zu diesem Punkt keine Angaben.

Einfluss der Lagerung der Pflückplatte auf die Signalstärke

Die Erwartung, mit einer dämpfenden Aufhängung der Pflückplatte auch eine Änderung der Schwingungsamplitude feststellen zu können, bestätigt sich. Mit beiden Sensoren deuten sich erheblich kleinere Messwerte bei der Verwendung von 2 mm starkem Gummi als Lagerung für die Pflückplatte gegenüber der fest verbundenen Variante an (Abbildung 17). Bei den Messwerten des Piezokristallsensors ist der Einbruch mit Gummiunterlage besonders stark, zwischen der Verwendung von 2 mm oder 4 mm Gummiunterlage scheint es aber keinen größeren Unterschied zu geben. Die durchschnittliche Signalstärke des Mikrofons steigt von der Variante mit 2 mm Gummiunterlage zu der Variante mit 4 mm Gummiunterlage sogar wieder leicht an. Dieser Effekt ist aber möglicherweise zufällig bedingt. Erklären lässt sich der negative Einfluss einer elastischen Lagerung der Pflückplatte auf die Signalstärke vielleicht mit einem Beispiel aus der Musik. So wird zur Verringerung der Lautstärke von Saiteninstrumenten ebenfalls elastisches Material,

zumeist Schaumstoff an die Saiten gedrückt. Die Schwingungen der Saiten werden dadurch gedämpft.

Der Einfluss von der Lagerung und möglicherweise von der Beschaffenheit der Pflückplatte auf ihr Schwingungsverhalten könnte ein interessanter Schwerpunkt weiterer Untersuchungen sein. Es wäre z.B. denkbar die Befestigungspunkte der Pflückplatte zu verschieben oder die Größe der Platte zu variieren. Auch andere Materialien zur Lagerung der Pflückplatte sind denkbar, in Analogie zu den Saiteninstrumenten z.B. harter Kunststoff. Außerdem könnte die Pflückplatte in Form und Material variiert werden. So haben beispielsweise die Dicke und die mechanische Masse einer Platte Einfluss auf ihr Schwingungsverhalten [29].

Einfluss des Kolbengewichtes auf die Signalstärke

Die in Abbildung 18 illustrierte Korrelation zwischen dem Gewicht der Kolben und der Höhe der Messwerte scheint für beide Sensoren deutlich positiv zu sein. Dies ist auch so zu erwarten, weil nach dem „Dynamischen Grundgesetz“ (Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung) die auf die Pflückplatte einwirkenden Kräfte proportional zur Masse der Maiskolben sein müssten. Diese Kräfte werden aber zusätzlich beeinflusst durch die Kraft, welche benötigt wird, um den Maiskolben vom Stängel abzulösen. Vermutlich werden die Ablösekräfte für große Kolben aber analog zu den Massenträgheitskräfte ebenfalls größer sein als die für kleinere Kolben. Die Korrelation zwischen dem Gewicht der Maiskolben und der Signalstärke wird auf diese Weise ebenfalls positiv beeinflusst. Je weiter die Pflückplatte durch die Summe beider Kräfte ausgelenkt wird, desto größer ist die Amplitude der dadurch hervorgerufenen Schwingungen.

Einfluss des TS-Gehaltes der Maiskolben auf die Signalstärke

Die zum Ablösen des Maiskolbens vom Pflanzenstängel benötigten Kräfte verändern sich vermutlich nicht mit dem TS-Gehalt des Maiskolbens. Auch WÖRZ konnte in seiner Diplomarbeit [32] keinen Zusammenhang zwischen dem TS-Gehalt und den Ablösekräften beim Mais feststellen. Die mit dem Piezokristallsensor aufgenommenen Messwerte deuten folglich auch keine Abhängigkeit zwischen dem TS-Gehalt der Maiskolben und der Signalstärke an, die in Abbildung 19 eingezeichneten Mittelwerte für alle drei untersuchten TS-Gehalte liegen zwischen 0,311 V und 0,321 V.

Bei den mit dem Mikrofon aufgezeichneten und ebenfalls in Abbildung 19 dargestellten Messwerten scheint es jedoch eine leicht negative Korrelation zwischen dem TS-Gehalt der Maiskolben und der Signalstärke geben. Die Messwerte fallen hier von durchschnittlich 40,3 dB bei einem TS-Gehalt von 63,8 % auf 38,8 dB bei einem Gehalt von 93,4 % TS. Die Abnahme der Kolbenmasse im Verlauf des Trocknungsvorganges könnte ein Grund dafür sein. Möglicherweise nehmen auch die mit dem Mikrofon aufgenommenen Nebengeräusche ab. Mit steigendem TS-Gehalt werden alle Pflanzenteile brüchiger, was dazu führt, dass bei Bündelung, Transport und Aufbereitung der

getrockneten Pflanzen ein Großteil der Blattmasse verloren geht. Der Anteil der durch die Blätter hervorgerufenen Nebengeräusche beim Pflückvorgang sinkt folglich mit zunehmendem TS-Gehalt.

Weiterhin liegt die Vermutung nahe, dass sich der von den auf die Pflückplatte auftreffenden Maiskolben angeregte Frequenzbereich mit dem TS-Gehalt der Kolben verschiebt. Eine Frequenzanalyse für verschiedene TS-Gehalte durchzuführen erscheint deshalb sinnvoll. Feuchte, weiche Kolben regen vermutlich eher den unteren Frequenzbereich an als trockene, harte Kolben, deren Impuls kürzer ausfallen wird. Dieser Zusammenhang hat sicherlich keine Auswirkungen auf die an dieser Stelle in der Diplomarbeit ermittelten Messwerte, bei der weiteren Entwicklungsarbeit sollte diese Vermutung aber berücksichtigt werden. Wird nämlich analog zu den üblichen Körnerverlustsensoren ein Kolbensensor mit direkt nachgeschalteter Frequenzweiche konzipiert, so ist zu bedenken, dass der TS-Gehalt des Erntegutes beim Mais nicht so einheitlich wie der beim Getreide ist. Man denke nur an die unterschiedlichen Verwendungsformen beim Mais wie LKS oder Körnernutzung. Ein Kolbensensor mit einer für die Ernte von relativ feuchtem LKS entwickelten Frequenzweiche liefert möglicherweise bei der Ernte von trockenem Körnermais nur unzureichende Messwerte.

Einfluss der Einzugsgeschwindigkeit auf die Signalstärke

Im Falle der veränderten Einzugsgeschwindigkeit am Pflückaggregat gilt wie bei der Variation der Kolbengewichte wieder das „Dynamische Grundgesetz“ (Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung). In diesem Fall verändert sich in der Gleichung jedoch nicht die Masse, sondern die Beschleunigung. Die auf die Pflückplatte einwirkende Kraft steigt folglich mit zunehmender Beschleunigung bzw. Einzugsgeschwindigkeit. In Abbildung 20 sind die ermittelten Messwerte dargestellt, sie bestätigen diese Vermutung. Bei beiden Sensoren deutet sich eine positive Korrelation zwischen der Einzugsgeschwindigkeit und der Signalstärke an. Dass diese Korrelation bei den Messwerten des Mikrofons nicht so deutlich wie bei denen des Piezokristallsensors zu erkennen ist, könnte mit den durch die Blätter verursachten Nebengeräuschen zusammenhängen. Diese werden vom Mikrofon mit aufgenommen und überlagern hier die Messwerte, während sie auf die Messwerte des Piezokristallsensors vermutlich keinen Einfluss haben. In der Versuchsreihe „Kolbengewicht“ konnte beobachtet werden, dass schwere Kolben meistens an großen, blattreichen Pflanzen sitzen. Leichte Kolben wachsen dagegen normalerweise an kleinen, eher blattarmen Pflanzen. Die durch das Pflückaggregat gezogene Blattmasse steigt also in der o.g. Versuchsreihe mit zunehmendem Kolbengewicht, während sie bei den Versuchen zur Einzugsgeschwindigkeit relativ konstant bleibt. Gleichermaßen verhält es sich also vermutlich auch mit den durch die Blattmasse verursachten Nebengeräuschen.

Bei der Wahl eines geeigneten Sensors sollte deshalb in diesem Zusammenhang die Frage gestellt werden, ob die gewünschte Erntemaschine mit konstanter Drehzahl arbeitet oder ob bei der laufenden Arbeit Drehzahlschwankungen auftreten. Treten

Drehzahlschwankungen auf, so ist es besser mit dem gegenüber diesen relativ unempfindlichen Mikrofon weiterzuarbeiten. Andernfalls müsste die Regelungstechnik einen aus der Motordrehzahl abgeleiteten Korrekturfaktor berücksichtigen. Üblicherweise werden moderne Erntemaschinen jedoch mit relativ konstanter Drehzahl gefahren, so dass von dieser Seite kein nennenswerter Einfluss zu erwarten ist.

5.1.4 Frequenzanalyse

Die Ergebnisse der Frequenzanalyse zeigen eine Anregung der Pflückplatte durch die auftreffenden Maiskolben über den gesamten untersuchten Frequenzbereich (Abbildung 21). Die größte Anregung ist jedoch im Frequenzbereich unterhalb von ca. 9.000 Hz festzustellen. Oberhalb von etwa 12.000 Hz ist die Anregung sehr gering. Dies lässt auf eine eher längere Impulsdauer der Maiskolben schließen. Bedingt ist diese Eigenschaft möglicherweise durch die den Maiskolben umhüllenden Lieschblätter. Beim Aufprall wird der Maiskolben durch die verformbare Lieschblatthülle gedämpft und es entsteht deshalb kein kurzer Impuls wie z.B. bei Getreidekörnern [14], sondern ein längerer Impuls im unteren Frequenzbereich. Außerdem weist der Körnermais bei der Ernte einen im Vergleich zu Getreide niedrigeren TS-Gehalt auf, wodurch der Maiskolben ebenfalls weicher ist. Bei steigendem TS-Gehalt verschiebt sich das angeregte Frequenzspektrum vermutlich (Vgl. Kap. 5.1.3). Weitere Untersuchungen sind an dieser Stelle nötig.

Im Verlauf der Kurve fallen außerdem vier Peaks ins Auge. Ihr gleichmäßiges Auftreten alle ca. 5.000 Hz legt die Vermutung nahe, dass es sich um von der Maschine verursachte Schwingungen handelt, wie sie z.B. von ineinander greifenden Zahnrädern verursacht werden.

5.2 Feldversuche

Aus den in Abbildung 22 gezeigten Ergebnissen ist eine Charakterisierung des Pflanzenbestandes auf der Versuchsfläche möglich. Die Abhängigkeit des Gesamtgewichtes von der Anzahl der in den Feldversuchen jeweils geernteten Maiskolben wird hier dargestellt. Es zeigt sich eine starke Korrelation zwischen beiden Größen, was eigentlich auf einen sehr gleichmäßigen Pflanzenbestand bezüglich der Kolbenausbildung schließen lässt. Tatsächlich aber sind die Einzelkolbengewichte der im Labor untersuchten, aus dem gleichen Feldbestand stammenden Pflanzen jedoch sehr heterogen. Allerdings sind für die Laborversuche auch extreme Kolbengrößen ausgewählt worden. Es ist also anzunehmen, dass die Kolbengewichte durchaus stärker variieren, als es die Ergebnisse der Feldversuche erwarten lassen. Und dass diese Extremwerte aber zumeist über die hohe Anzahl der Kolben eines Versuches ausgeglichen werden. Dies bestätigen auch zwei Extremwerte aus der Abbildung 22, die beide der Versuchsreihe mit dem Mikrofon zugeordnet werden müssen. Das Durchschnittsgewicht der Maiskolben liegt mit 135 g einmal deutlich unter und mit 342 g einmal deutlich über dem Durchschnitt aller Versuche

von 188 g je Kolben. Eine gewisse Schwankung der Kolbengewichte ist auf Grund der Botanik des Mais (Kap. 2.1.1) auch zu erwarten gewesen, schließlich schwankt die Anzahl der Körner je Kolben sowie die TKM beim Mais laut GEISLER [14] in einem relativ weiten Bereich.

Piezokristallsensor

Die mit dem Piezokristallsensor ermittelten Werte für die Abhängigkeit zwischen der Erntemenge in kg bzw. in Kolben und dem Summenintegral der Signalstärke zeigen eine sehr große Korrelation. Der nur sehr geringe Unterschied beider Korrelationskoeffizienten (Abbildung 23 und Abbildung 24) begründet sich durch äußerst hohe Korrelation von Kolbenmasse und Kolbenanzahl ($R^2 = 0,9945$) in der Versuchsreihe mit dem Piezokristallsensor. Es macht daher kaum einen Unterschied aus, ob das Summenintegral der Signalstärke auf die Kolbenmasse oder auf die Kolbenanzahl bezogen wird. Die Ergebnisse der Laborversuche (Abbildung 18) lassen in diesem Zusammenhang jedoch vermuten, dass die Kolbenmasse einen größeren Einfluss auf die Signalstärke hat. Versuche mit unterschiedlichen Kolbengewichten bei gleichmäßiger Anzahl von Maiskolben je Quadratmeter könnten an dieser Stelle zu genaueren Ergebnissen führen. In jedem Fall lässt sich jedoch sagen, dass der Piezokristallsensor für die Erfassung des Massenstromes am Maispflückvorsatz vermutlich sehr gut geeignet ist.

Mikrofon

Die durchschnittlichen Kolbengewichte der Versuchreihe mit dem Mikrofon streuen etwas stärker als die des Piezokristallsensors. So kann es auch zu einem Unterschied zwischen der in Abbildung 25 und der in Abbildung 26 dargestellten Abhängigkeiten, ausgedrückt durch die sich leicht unterscheidenden Korrelationskoeffizienten (R^2), kommen. Die Korrelation zwischen der Anzahl der geernteten Kolben und dem Summenintegral der Signalstärke scheint größer zu sein als die Korrelation zwischen dem Summenintegral der Signalstärke und dem Gesamtgewicht der geernteten Kolben. Trotzdem ist die Abhängigkeit der Signalstärke von der Erntemenge in beiden Fällen eindeutig.

Schaut man sich Abbildung 25 jedoch etwas genauer an, so fallen drei Werte im mittleren Bereich der Grafik auf. Dies sind die Ergebnisse der Versuche mit 40 m Länge. Sie liegen für sich betrachtet auf einer Geraden, die deutlich flacher als die Korrelationsgerade verläuft. Die Ergebnisse der zehn Versuche mit 20 m Länge, welche sich alle am unteren Ende der Korrelationsgeraden befinden, würden vermutlich für sich betrachtet ebenfalls eine deutlich flachere Trendlinie bilden. Dieser Zusammenhang legt die Vermutung nahe, dass im vorliegenden Fall die Länge der Versuche das Summenintegral der Signalstärke beeinflusst. Zur Begründung müssen hier vermutlich wieder die vom Mikrofon mit aufgenommenen Nebengeräusche angeführt werden. Unter der Voraussetzung, dass die Versuche mit konstanter Fahrgeschwindigkeit durchgeführt werden, wird der Einfluss der aufgenommenen Nebengeräusche bei einer Verlängerung der untersuchten Reihe ebenfalls

größer. Es kommt also möglicherweise zu einer Parallelverschiebung der Korrelationsgeraden für unterschiedlich lange Versuche.

In Abbildung 26 wird der vermutete Einfluss der Reihenlänge auf das Summenintegral der Signalstärke nicht ganz so deutlich wie in Abbildung 25, er lässt sich aber auch hier erahnen. Der Korrelationskoeffizient über alle Versuche ist in Abbildung 26 zwar größer als in Abbildung 25, betrachtet man die Korrelation zwischen dem Summenintegral der Signalstärke und der Kolbenanzahl (Abbildung 26) aber für die einzelnen Versuchslängen getrennt, so fallen diese Korrelationskoeffizienten vermutlich kleiner aus als die entsprechenden für die Korrelation von Signalstärke und Gesamtgewicht (Abbildung 25). Die Ergebnisse der Versuche mit dem Mikrofon deuten bei Differenzierung der Versuchslänge daher eine größere Abhängigkeit der Signalstärke vom Gesamtgewicht als von der Anzahl der Kolben an; obwohl der Korrelationskoeffizient über alle Versuche das Gegenteil versuchen lassen würde.

In weiterführenden Untersuchungen sollte folglich zur Variation der Erntemenge nicht die Länge der untersuchten Reihen, sondern der Pflanzenbestand verändert werden, um die Abhängigkeit von Signalstärke und Erntemenge genauer feststellen zu können.

Fazit

Beide Sensoren, sowohl der Piezokristallsensor als auch das Mikrofon, sind für die Entwicklung eines praxistauglichen Sensors zur Erfassung des Massenstromes am Pflückaggregat von Mährescher oder Feldhäcksler sehr gut geeignet. Die Vermutung, mit solchen Sensoren die Anzahl der geernteten Kolben bestimmen zu können, bestätigt sich nicht nur, es ist sogar möglich, mit ihnen das Gewicht der Erntemenge zu bestimmen.

Der TS-Gehalt der Maiskolben zeigt beim Piezokristallsensor nur keinen Einfluss auf die Messwerte, während die Messwerte des Mikrofons mit steigenden TS-Gehalten leicht negativ korrelieren. Bei schwankenden TS-Gehalten liefert der Piezokristallsensor also verlässliche Messwerte zur Bestimmung der Erntemenge in kg Kolben am Pflückvorsatz, während die Messwerte des Mikrofons leicht verfälscht werden. Bezüglich schwankender Drehzahlen am Pflückaggregat ist das Mikrofon dagegen unempfindlicher als der Piezokristallsensor. Hier kehrt sich das Bild also um, die Messwerte des Mikrofons liefern bei wechselnder Drehzahl für die Bestimmung der geernteten Maiskolben in kg genauere Daten als die des Piezokristallsensors.

Da gerade beim Körnermais mit schwankenden TS-Gehalten bei der Ernte gerechnet werden muss, moderne Erntemaschinen aber normalerweise mit konstanter Motordrehzahl gefahren werden, ist der Piezokristallsensor für die Ertragserfassung (in kg geernteter Maiskolben) und Durchsatzregelung bei der Körnermaisernte besser geeignet. Außerdem nimmt der Piezokristallsensor Nebengeräusche bzw. –Schwingungen nicht in dem Maße wie das Mikrofon auf.

Es ist zu erwarten, dass die beiden Sensoren auch zur Ertragserfassung für andere mit dem Pflückvorsatz geerntete Früchte, wie z.B. Sonnenblumen geeignet sind.

Beide Sensoren sind sehr einfach aufgebaut und lassen sich mit der am modernen Mähdrescher bereits vorhandenen Regelungs- und Ertragserfassungstechnik problemlos verknüpfen, weil sie im Prinzip wie die üblichen Körnerverlustsensoren arbeiten. Besonderes Augenmerk bei der technischen Weiterentwicklung sollte auf die sichere Datenübertragung zwischen den Sensoren und der Bordelektronik der Erntemaschine gelegt werden, zumal der Pflückvorsatz normalerweise für den Straßentransport abgebaut wird, und die Kabelverbindungen deshalb ebenfalls getrennt werden müssen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Diplomarbeit wurden die Möglichkeiten der Erfassung des Kolbendurchsatzes am Maispflückvorsatz des Mähreschers untersucht. Grundidee dabei war es, die durch die auf die Pflückplatte aufprallenden Maiskolben hervorgerufenen Vibrationen bzw. Geräusche zu erfassen und auszuwerten.

Im ersten Schritt wurden dazu an einem Laborversuchsstand verschiedene Sensoren auf ihre Eignung für die geforderte Anwendung untersucht. Als tauglich erwiesen sich ein Piezokristallsensor und ein Backelektretmikrofon. Ein handelsüblicher Körnerverlustsensor und ein Vibrationssensor für Alarmanlagen erwiesen sich als ungeeignet. Auch das Übertragungsverhalten der Pflückplatte wurde überprüft. Im Bereich der auftreffenden Maiskolben zeigte sich dabei eine gleichmäßige Übertragung der Schwingungen.

Im zweiten Schritt wurde der Einfluss von der Position des Sensors, der Lagerung der Pflückplatte, der Kolbengröße und des TS-Gehaltes der Kolben sowie der Einzugsgeschwindigkeit auf die Signalstärke dieser Sensoren überprüft. Um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erhalten, war der Versuchsumfang mit $n = 10$ Pflanzen je Versuch jedoch zu klein. In der Tendenz zeigten sich allerdings deutlich positive Korrelationen zwischen der Kolbengröße und der Signalstärke sowie zwischen der Einzugsgeschwindigkeit und der Signalstärke. Während die Position des Sensors und der TS-Gehalt der Maiskolben keinen eindeutigen Einfluss auf die Signalstärke andeuteten, ließ eine elastische Lagerung der Pflückplatte mit Gummi einen negativen Einfluss auf die Signalstärke vermuten.

Um die aus den Laborversuchen erworbenen Kenntnisse im Feldversuch überprüfen zu können, wurde abschließend eine Versuchsmaschine gebaut, mit der die beiden Sensoren Piezokristallsensor und Mikrofon im Feld untersucht wurden. Die ermittelte Signalstärke der einzelnen Versuche wurden dazu mit dem ebenfalls ermittelten Kolbenertrag in Beziehung gesetzt. Dabei zeigte sich eine starke Korrelation zwischen der gemessenen Signalstärke und dem Kolbenertrag. Besonders groß war diese bei den Ergebnissen der mit dem Piezokristallsensor durchgeführten Versuchen.

Beide Sensoren sind für die Ertragerfassung bei der Körnermaisernte sehr gut geeignet. Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich vermutlich auch auf andere mit dem Pflückvorsatz geerntete Früchte übertragen.

Weil sich die Schlussfolgerungen dieser Diplomarbeit auf Versuche mit Pflanzen einer Maissorte in einem Jahr stützen, müssen zur Optimierung der beschriebenen Sensoren weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Neben der technischen Weiterentwicklung sollte dabei auch der Einfluss verschiedener Sorten- und Reifebedingungen im Vordergrund stehen.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Anonym:** Bedeutung des Maisanbaus weltweit. Deutsches Maiskomitee, http://www.maiskomitee.de/fb_fakten/03_02_01.htm, Stand 22.09.2005.
- [2] **Anonym:** Beschreibenden Sortenliste Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen und Hackfrüchte 2003. Herausgegeben vom Bundessortenamt, Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, Hannover, 2003.
- [3] **Anonym:** Claas Dreschtabelle Mega 360/350. Harsewinkel, 2004.
- [4] **Anonym:** Datenblatt Piezokristallsensor PKS1. Reichelt Elektronik, www.reichelt.de, Stand 16.12.2005
- [5] **Anonym:** Geringhoff - Produkte. www.02.geringhoff.de, Stand 16.12.2005
- [6] **Anonym:** John Deere Landtechnik – Mähdrescher. www.deere.com/de_DE/products_ag/combines/index.html, Stand 21.11.2005.
- [7] **Anonym:** Mais-Pflückvorsatz X 45 - X 60 mit Rotationseinzug. Firmenprospekt der Firma Kemper, Stadtlohn, 2005.
- [8] **Anonym:** Mono-Mikrofon Vorverstärker, Bedienungsanleitung. Conrad Elektronik GmbH, Hirschau, 1999.
- [9] **Anonym:** Reichelt Elektronik, 07.1/05 Lieferprogramm. Eigenverlag, Sande 2005.
- [10] **Auernhammer, H.:** Elektronik an Traktoren und Maschinen – Einsatzgebiete, Funktionen, Entwicklungstendenzen. BLV-Verlagsgesellschaft, München, 1989.
- [11] **Auernhammer, H. und P. Nawroth:** Maisanbau 2000. Landtechnik-Schrift Nr. 8, Landtechnik Weihenstephan, 1997.
- [12] **Baumgarten, J. et al.:** Sensor zur Korndetektion in der Überkehr. Landtechnik Nr. 59 (2004), S. 196-197.
- [13] **Böttinger, S.:** Informations- und Regelsysteme am Mähdrescher. Landtechnik Sonderheft Nr. 55 (2000), S. 96-98.
- [14] **Diekmann, H. in H.D. Kutzbach** (Herausg.): Mähdrescher. VDI/MEG Kolloquium Landtechnik, Heft 6, VDI-Fachgruppe Landtechnik, Düsseldorf, 1988.
- [15] **Diepenbrock, W. et al.:** Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung – Grundwissen Bachelor. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2005.
- [16] **Estler, M.C. et al.:** Technik bei Anbau, Ernte und Konservierung von Mais. KTBL-Flugschrift Nr.19, Hellmut Neureuter-Verlag, München/Wolfratshausen, 1970.
- [17] **Geisler, G.:** Ertragsbildung von Kulturpflanzen. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1981.

- [18] **Glanze, P.:** Mechanised Produktion of Grain-maize. Technical fundamentals, Edition Leipzig, 1972.
- [19] **Graeber, E.:** Wirtschaftliche und technische Aspekte der Körnerverlust erfassung am Mähdrescher. Grundlagen der Landtechnik Bd. 25 (1975) Nr. 1, S. 15-17.
- [20] **Günther, B.C. et al.:** Technische Akustik – Ausgewählte Kapitel; Grundlagen, aktuelle Probleme und Messtechnik. Kontakt und Studium Bd. 18, expert verlag, Renningen-Malmsheim, 1994.
- [21] **Hunt, D.:** Farm Power and Machinery Management, Ninth Edition. Iowa State University Press, Ames/Iowa, 1995.
- [22] **Johnson, W.H. und B.J. Lamp:** Principles, Equipment and Systems for Corn Harvesting. Agricultural Consulting Associates, Wooster/Ohio, 1966.
- [23] **Lütke Entrup, N. und J. Oehmichen:** Lehrbuch des Pflanzenbaus, Band 2: Kulturpflanzen. Verlag Th. Mann, Gelsenkirchen, 2000.
- [24] **Nultsch, W.:** Allgemeine Botanik. Thieme Verlag, Stuttgart, 2001.
- [25] **Redelberger, H.:** Management-Handbuch für die ökologische Landwirtschaft, Verfahren – Kostenrechnungen – Baulösungen. KTBL-Schrift 426, Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 2004.
- [26] **Rintelen, P. et al.:** Mais – Ein Handbuch über Produktionstechnik und Ökonomik. BLV Verlagsgesellschaft, München, 1971.
- [27] **Segler, G. und T. Freye:** Entwicklung einer Meß- und Kontrolleinrichtung für den Gutdurchsatz der Reinigungsanlage im Mähdrescher. Grundlagen der Landtechnik Bd. 28 (1978) Nr. 4, S. 148-151.
- [28] **Steinmayr, T.:** Fehleranalyse und Fehlerkorrektur bei der lokalen Ertragsermittlung im Mähdrescher zur Ableitung eines standardisierten Algorithmus für die Ertragskartierung. Dissertation, Technische Universität München, 2002.
- [29] **Veit, I.:** Technische Akustik. Kamprath-Reihe, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1996.
- [30] **Wacker, P.:** Beschädigung von Maiskörnern bei der Getreideernte. Landtechnik Nr. 60 (2005), S. 84-85.
- [31] **Walz, H. :** Mähdrescher-ABC – Was man vom Mähdrusch wissen muß. Vogel-Verlag, Würzburg, 1972.
- [32] **Wörz, M.:** Untersuchungen zum Pflückverhalten von Körnermais. Diplomarbeit Allgemeine Agrarwissenschaften, Universität Hohenheim, 2003.
- [33] **Zscheischler, J. et al.:** Handbuch Mais – Umweltgerechter Anbau, Wirtschaftliche Verwertung. DLG-Verlag, Frankfurt (Main), 1990.

8 ANHANG

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe und unter Benutzung der angegebenen Literatur angefertigt habe.

Göttingen, den 16.01.2006

.....
Martin Becker