

# 1 Einleitung

Bei der Automatisierung der Mähdrescher zur Steigerung der Maschineneffizienz gehören die Kornverluste zu den wichtigsten Prozessgrößen. Die Erfassung der Kornverluste, insbesondere der Abscheideverluste, ist jedoch eine große Herausforderung und Gegenstand vergangener und aktueller Forschung.

## 1.1 Herausforderungen der Mähdrescher

Die Weltbevölkerung ist von 5,7 Milliarden Menschen im Jahr 1994 auf 8,1 Milliarden Menschen im Jahr 2024 angestiegen. Gleichzeitig sieht sich die Menschheit mit den Folgen des Klimawandels konfrontiert. Beide Faktoren stellen die weltweite Landwirtschaft vor große Herausforderungen [36, 37, 62].

Getreide ist weltweit die wichtigste Versorgungsgrundlage, da es universell eingesetzt werden kann. Es dient sowohl zur Ernährung der Bevölkerung, als auch als Futtermittel für den Viehbestand und als Grundstoff für die industrielle Weiterverarbeitung. Innerhalb der EU sind Frankreich und Deutschland die größten Erzeugerländer für Getreide. Während Mais weltweit die ertragsreichste Getreideart ist, werden jedoch sowohl weltweit als auch deutschlandweit die größten Anbauflächen für Weizen genutzt. In Deutschland ist Weizen die zweitertragsreichste Getreideart [5, 6, 36, 37, 156].

Bis auf 2018 aufgrund eines sehr trockenen Sommers und 2023 aufgrund eines sehr trockenen Frühjahrs sind in Deutschland bei einigen Getreidearten, insbesondere Körnermais und Winterweizen, jährlich steigende Ernteerträge zu verzeichnen. Dabei gibt es sehr starke Schwankungen zwischen den einzelnen Bundesländern. Während die Anbaufläche für Getreide in Deutschland in den vergangenen Jahren zurückging,

konnten die Erntemenge von Getreide in Deutschland gesteigert werden [6, 36, 37, 84].

Aufgrund der zunehmenden Flächenerträge und der steigenden Arbeitskosten, ist eine Steigerung der Durchsatzleistung und der Effektivität der Erntemaschinen erforderlich. Die Leistung eines Mähdreschers wird dabei unter anderem am Nenndurchsatz bei Einhaltung zulässiger Kornverluste, dem Beschädigungsgrad der Körner bei Einhaltung zulässiger Grenzwerte, dem energetischen Aufwand, den Einsatzmöglichkeiten für verschiedene Druschfruchtarten, -sorten und -zustände, dem Instandhaltungsaufwand und der Erfüllung ergonomischer Forderungen bemessen. Auch bei steigender Durchsatzleistung sollte eine weitere Abnahme des relativen Material- und Energieaufwands, sowie der Kornverluste gewährleistet sein [54, 121, 156, 203].

International ist ein starker Wettbewerb um die durchsatzleistungsstärksten Mähdrescher zu beobachten: Mit einem CLAAS LEXION 8900 TT, einem Mähdrescher mit Hybridsystem aus Tangentialdreschwerk und einer Axialabscheideeinrichtung, dessen Dreschtrommeldurchmesser gegenüber seinen Vorgängern vergrößert wurde, konnten im Jahr 2020 in der Spitze 120 Tonnen Weizen pro Stunde geerntet werden [43, 178]. AGCO wirbt mit dem im Jahr 2021 vorgestellten Fendt Ideal 9T, der ein Axialdreschwerk hat, mit 140 Tonnen Weizen pro Stunde, von denen 60 Tonnen pro Stunde auf Weizenkörner zurückzuführen seien, bei einem Kornverlust mit weniger als 1 % [2, 3]. Mit den John Deere Modellen X9 1000 und X9 1100, ebenfalls Mähdrescher mit Axialdreschwerk, bei denen durch neue Konstruktionen die Siebflächen vergrößert werden konnten, wirbt Deere & Company seit 2021, 100 Tonnen Weizenkorn pro Stunde mit nur 1 % Kornverluste ernten zu können [57, 60, 187]. Case New Holland hat mit dem im Jahr 2023 vorgestellten New Holland CR 11, ebenfalls ein Mähdrescher mit Axialdreschwerk, die Antriebssysteme neu konzeptioniert, wodurch sie einige Aggregate vergrößern konnten und mit 135 Tonnen Weizen pro Stunde werben [45, 72]. Damit konnten die Leistungen der Mähdrescher in den vergangenen 50 Jahren um ein Vielfaches gesteigert werden, wie auch ein Vergleich zu Werbezwecken zwischen einem CLAAS LEXION 620 aus dem Jahr 2017 und einem CLAAS COLUMBUS aus dem Jahr 1967 zeigt [66, 128].

Grundsätzlich lässt sich die Leistung eines Mähdreschers durch die Vergrößerung der Aggregate und der Erhöhung der Breiten der Vorsätze erzielen. Jedoch sind heute die gesetzlich vorgegebenen äußeren Abmessungen für beispielsweise Straßenverkehrszulassungen oft bereits erreicht. Eine Erhöhung der Durchsatzleistung eines Mähdreschers kann auch der Einbau von Aggregaten mit rotierenden Elementen wie beispielsweise der Einsatz von Axialabscheideaggregaten statt Hordenschüttlern bewirken [35, 54, 149, 152, 203, 219, 220].

Die Automatisierung der Mähdrescher trägt ebenfalls maßgeblich zur Maschineneffizienz bei. Neben den getreideartspezifischen Maschinenausrüstungen und -einstellungen muss eine Erntemaschine laufend den aktuellen Erntebedingungen angepasst werden. Der Bestand kann aufgrund unterschiedlicher Bewässerungs- und Beleuchtungsbedingungen und der Bewirtschaftung während der Wachstums- und Reifephasen heterogen sein. Des Weiteren kann es über den Tagesverlauf während des Ernteeinsatzes zu unterschiedlichen Witterungsbedingungen kommen. Das Getreide kann dabei unter anderem in seinem Reifestadium, seiner Strohlänge, der Korngrößen, im Kornanteil (Korn-Stroh-Verhältnis), im Korn- bzw. Halmertrag, der Korn- und Strohmasse, der Korn- und Strohfestigkeit, sowie der Korn- und Strohfeuchte variieren. Gleichzeitig kann das Erntematerial auch einen Beimengungsanteil durch Beikraut und Grüngut haben [49, 54, 95, 109, 121, 149, 169, 186, 219].

Der Mähdrescher kann mit verschiedensten Maschineneinstellungen auf die Erntebedingungen optimiert werden. Neben mechanischen Umbauten wie verschiedenen Siebtypen oder dem Ein- und Ausbau von Klappen oder Blindkörben, die nur im Stillstand erfolgen können, können während des Ernteeinsatzes verschiedene Drehzahlen, Korbabstände, Sieböffnungen und einzelne Klappenöffnungen laufend eingestellt werden. Das Ermitteln der effizienten Maschineneinstellungen erfordert ein hohes Maß an Fahrerfahrung. Ziel der Automatisierung ist es, auf Grundlage von Prozessgrößen den Mähdrescher laufend optimal einzustellen. Dadurch soll der Fahrer entlastet werden [16, 17, 18, 20, 21, 25, 28, 49, 54, 64, 95, 99, 143, 144, 149, 181].

Zu den Prozessgrößen gehören der Durchsatz des Erntematerials, der Korndurchsatz und die Parameter der Erntequalität (Abbildung 1.1),

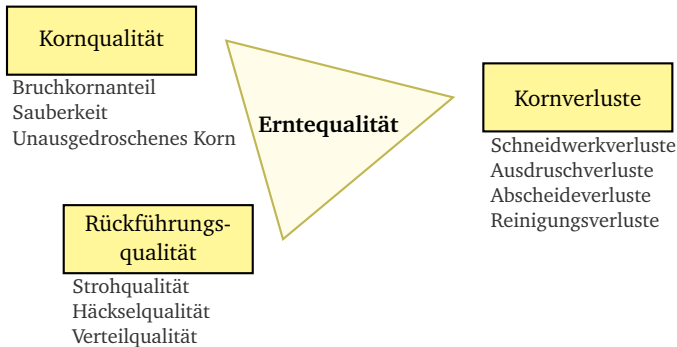


**Abb. 1.1:** Parameter der Erntequalität zusammengefasst nach Eggerl, Bärdecker et al. und Miu [54, 67, 149].

zu der die Kornverluste, die Kornqualität<sup>1</sup> und die Rückführungsqualität gehören. Die Kornverluste setzen sich dabei aus den Schneidwerk-, Ausdrusch-, Abscheide- und Reinigungsverlusten zusammen. Unter der Kornqualität werden der Bruchkornanteil, die Sauberkeit und der Anteil unausgedroschener Körner zusammengefasst. Bei der Rückführungsqualität werden bei Schwadablage die Strohqualität und die Gleichmäßigkeit der Ablage des Strohs und bei der Verteilung des Strohs zur Humusbildung auf dem Feld die Häckselqualität und die Gleichmäßigkeit der Strohverteilung betrachtet. Die Zusammenhänge zwischen den Maschinenparametern mit den Prozessgrößen und den Prozesseigenschaften des Ausdruschs und der Abscheidung sind dabei sehr komplex, da es viele Einflussfaktoren gibt, der konkrete Einfluss eines Faktors meistens unbekannt ist, die Einflussfaktoren kontinuierlich variieren, die Größen der Einflussfaktoren schwierig erfassbar oder unbekannt sind und die Prozessgrößen in ihrer Optimierung widersprüchlich sind [49, 50, 54, 67, 95, 149, 175, 202].

<sup>1</sup>Mit Kornqualität ist die vom Mähdröschler beeinflussbare Kornqualität gemeint. Die Kornqualität der Körner selbst wie Proteingehalt ist für die Betrachtungen der Prozessoptimierung des Mähdröschers während des Ernteeinsatzes auf dem Feld nicht relevant und wird dementsprechend im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt [67, 121, 149, 175, 202].

## 1.2 Kornverluste und Abscheideverlauf der Abscheidung

Die Kornverluste gehören zu den wichtigsten Prozessgrößen der Automatisierung, da die Maschineneffizienz durch die Ermittlung der Kornverluste enorm gesteigert werden kann. Während mechanisch erfassbare Regel-, Prozess- oder auch Störgrößen wie der Durchsatz des Erntematerials, die Schnitthöhen, die Lenkung, der Hangausgleich oder der Energieverbrauch einfacher erfasst werden können, steht die Ermittlung der Kornverluste vor großen Herausforderungen [26, 49, 54, 67, 95, 149, 175].

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Ermittlung der Abscheideverluste untersucht werden. Die Abscheideverluste sind die Kornanteile, die mit dem Stroh aus dem Abscheideaggregat auf das Feld gegeben werden [49, 54, 67, 95].

Die weitverbreitetste und sehr robuste Methode zur Erfassung der Kornverluste ist die Ermittlung auf Grundlage der Messung des abgeschiedenen Kornmaterials am Ende der Abscheideeinrichtung. Die dabei von Mähdrescher-Herstellern eingesetzte Messtechnik zur Korndetektion ist die Messung von Kornaufprall auf eine Prallfläche durch Körperschallmessungen mithilfe von piezoelektrischen oder akustischen Sensoren. Dabei findet eine Auswertung der Amplituden des Körperschalls statt, wodurch einzelne Körner detektiert werden können. Durch die unterschiedliche Dichte von Korn und Nichtkornbestandteilen (NKB), was zu verschiedenen Körperschallsignalen führt, lassen sich Korn und NKB bei der Signalauswertung voneinander differenzieren. [8, 24, 42, 55, 68, 76, 78, 83, 85, 98, 100, 109, 118, 133, 134, 168, 170, 215].

Die Messungen der einzelnen Sensoren können dabei direkt als Eingangssignal für Modelle der Maschinenoptimierung eingesetzt werden. Des Weiteren können Modelle zur Kornverlustvorhersage auf Grundlage der Maschineneinstellungen und Materialeigenschaften als Referenzmodelle zur Plausibilisierung von Sensorwerten eingesetzt werden [85, 95, 125, 215].

Da sich mit sich ändernden Erntebedingungen das Verhältnis zwischen den gemessenen abgeschiedenen Körnern und den tatsächlichen

Kornverlusten ändert, muss eine regelmäßige Kalibrierung der Sensoren stattfinden. Die Wichtigkeit der Kalibrierung wird oft unterschätzt. Empfohlen ist eine Kalibrierung mindestens alle vier Stunden, da sich die Erntebedingungen auch über den Tagesverlauf aufgrund der sich ändernden Witterungsbedingungen ändern. Dabei werden Schalen ausgeworfen, die sehr zeit- und arbeitsintensiv ausgewertet werden müssen. Die Kalibrierung sollte dabei zu einer möglichst genauen Kornverlustermittlung führen. Bei einer Unterschätzung der Kornverluste kann es neben den monetären Ertragsverlusten durch das Aufkeimen der Verlustkörner auch zu Schwierigkeiten bei der Bodenbearbeitung und der Folgefrucht führen. Eine Überschätzung kann für eine enorme Reduzierung der Druschleistung des Mähdreschers sorgen, die zu Frustration von Landwirt und Fahrer aufgrund zu geringer Leistung des Mähdreschers führen kann [54, 67, 68, 109, 186].

Huisman begründete die regelmäßige Kalibrierung mit verschiedenen Abscheideverläufen für die unterschiedlichen Erntebedingungen. Dabei könnten unterschiedliche Abscheideverläufe den gleichen Messwert eines Sensors am Ende der Abscheideeinrichtung aufweisen. Aus diesem Grund wurden verschiedene analytische ein- und mehrdimensionale Modelle zur Erfassung des Abscheideverlaufs aufgestellt, um die Kornverluste in Hordenschüttlern, Rotoraggregaten und Reinigungen präziser zu ermitteln. Dabei ist der Abscheideverlauf des Rotoraggregats noch am wenigsten untersucht worden [31, 39, 109, 123, 133, 134, 203, 205].

### 1.3 Zielsetzung

Zur Definition der Zielsetzung werden zunächst die Theorien von Huisman, Bjork, Beck und Böttinger zusammengefasst und präzisiert (Abbildung 1.2) [22, 31, 39, 109]:

Ein Ensemble aus Materialeigenschaften, Maschineneinstellungen und Verschleißigenschaften der Maschine bedingt einen eindeutigen abstrakten Trennprozess. Aufgrund der eindeutigen Zuordnung ließen sich die Menge an verschiedenen abstrakten Trennprozessen als Funktionsmenge einer Funktion mit den Materialeigenschaften, Maschineneinstel-

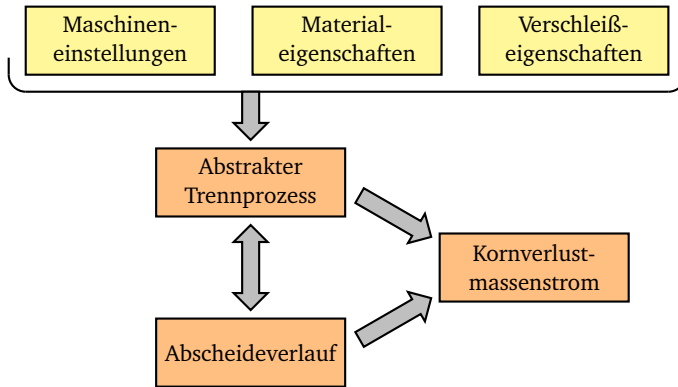


**Abb. 1.2:** Theoretische Grundlage zum funktionalen Zusammenhang zwischen Abscheideverlauf und Kornverlustmassenstrom. Unidirektionale Pfeile stehen dabei für eindeutige Zuordnungen, bidirektionale Pfeile für eineindeutige Zuordnungen.

lungen und Verschleißigenschaften als Definitionsmenge beschreiben. Aus dem abstrakten Trennprozess lassen sich allerdings nicht eindeutig Materialeigenschaften, Maschineneinstellungen oder Verschleißigenschaften der Maschine herleiten. Jedem abstrakten Trennprozess lässt sich ein eindeutiges Kornverlustniveau zuordnen.

Der abstrakte Trennprozess hat über die Abscheidelänge oder -fläche einen Abscheideverlauf. Die Zuordnung zwischen abstraktem Trennprozess und Abscheideverlauf wird als eineindeutig angenommen. Es sollen somit keine zwei Abscheideverläufe für den selben abstrakten Trennprozess oder umgekehrt existieren. Mit dem Abscheideverlauf lässt sich somit der abstrakte Trennprozess beschreiben, womit Einflüsse durch Materialeigenschaften, Maschineneinstellungen und Verschleißigenschaften der Maschine mit erfasst sind. Daraus lässt sich nun schließen, dass wie beim abstrakten Trennprozess zu jedem Abscheideverlauf ein eindeutiges Kornverlustniveau zugeordnet werden kann. Dadurch lässt sich eine Funktion mit der Menge an möglichen Abscheideverläufen als Definitionsmenge und der Menge an möglichen Kornverlustniveaus als Funktionsmenge aufstellen.

Ziel der Arbeit ist die Aufstellung und die empirische Untersuchung verschiedener Regressionsmodelle zur Ermittlung der Kornverluste eines Rotoraggregats eines Mähdreschers auf Grundlage seines Abscheideverlaufs. Dabei sollen sowohl analytische Modelle, als auch Modelle des Maschinellen Lernens betrachtet werden.

Die Zielgröße ist der Kornverlustmassenstrom in Tonnen pro Stunde. Der Abscheideverlauf soll mittels eines zweidimensionalen Sensornetzwerks unterhalb des Rotoraggregats erfasst werden. Maschineneinstellungen und Materialeigenschaften sollen ausschließlich bei den Versuchsplänen der Datenaufzeichnung relevant sein, jedoch nicht zur Kornverlustvorhersage herangezogen werden. Nach der Theorie des Abscheideverlaufs sollten diese bereits mit dem Abscheideverlauf abgebildet sein. Des Weiteren sollen mit Ausschluss der Maschineneinstellungen positive Rückkopplungen mit der Automatisierung ausgeschlossen werden.

Zudem wird sich im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich auf die Fruchtart Weizen konzentriert. Dabei sollen jedoch möglichst verschiedene Erntebedingungen mit verschiedenen Materialeigenschaften wie der Korngrößen, dem Kornanteil, der Korn- und Strohmasse, der Korn- und Strohfestigkeit oder der Korn- und Stroheuchte, mit verschiedenen Maschineneinstellungen, insbesondere verschiedener Rotordrehzahlen und Klappenstellungen, und mit verschiedenen Witterungsbedingungen abgedeckt werden.

Nach einer Einführung in die Grundlagen des Trennprozesses und der Sensorik in Kapitel 2 wird zunächst in Kapitel 3 das Sensornetzwerk zur Erfassung des Abscheideverlaufs definiert und sowohl die Datenaufzeichnung als auch die Datenaufbereitung beschrieben (Abbildung 1.3). In diesem Zusammenhang werden erste Beobachtungen und strukturelle Auffälligkeiten in den Daten dargelegt, die als Grundlage zur Entwicklung der Abscheidemodelle herangezogen werden.

In den Kapiteln 4 und 5 werden die analytischen Abscheidemodelle und die Abscheidemodelle mit Maschinellern zunächst getrennt voneinander aufgestellt und deren Anwendungen und Berechnungen definiert. In Kapitel 6 werden die Bewertungsmetriken vorgestellt und die Ergebnisse der Modelloptimierungen und der Vorhersagen der analytischen Abscheidemodelle und der Modelle mit Maschinellern

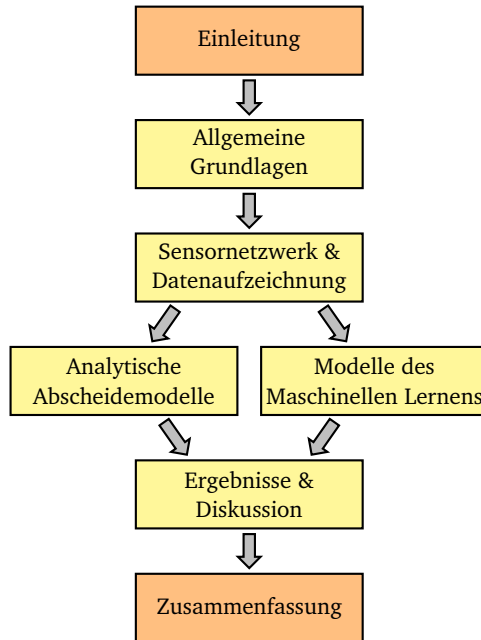


**Abb. 1.3:** Aufbau der Arbeit

strukturiert, eingeordnet und diskutiert. Mit der Zusammenfassung in Kapitel 7 werden alle Beobachtungen, die grundlegenden Entwicklungsentscheidungen und die zentralen Erkenntnisse und Ergebnisse dieser Arbeit noch einmal strukturiert dargestellt und anschließend ein Ausblick auf die mit dieser Arbeit anschließenden Herausforderungen und Aufgaben gegeben.

