

Schlussbericht vom 21.11.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 20685 N/1

Thema

Entwicklung eines Systems zur automatisierten und kontinuierlichen Überwachung von Schüttgutlagerstätten unter Anwendung zukunftsweisender Konzepte wie „Internet der Dinge“, „Industrie 4.0“ und „Edge Computing“

Berichtszeitraum

01.02.2020 – 31.07.2022

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. – IFL

Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt

Forschungseinrichtung(en)

Universität Stuttgart, Institut für Fördertechnik und Logistik – IFT

Holzgartenstraße 15 B, 70174 Stuttgart

Gefördert durch:

Projektergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden sieben Arbeitspakete bearbeitet. Die Ziele dieser Arbeitspakete und die entsprechend durchgeführten Arbeiten und dabei erzielten Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

AP 1 – Konzeptionierung des Systems und der Sensormodule

Ziele des ersten Arbeitspaketes waren die Bestimmung der essentiellen Anforderungen an das System, Identifizierung von relevanten Messgrößen und die Definition einer geeigneten Systemarchitektur sowie einer geeigneten Kommunikationsstrategie.

Die im Rahmen des AP 1 für das System definierten Anforderungen sind in drei Kategorien aufgeteilt, konstruktive Anforderungen, softwaretechnische Anforderungen sowie betriebswirtschaftliche Anforderungen. Diese sind im Folgenden nach Kategorien geordnet aufgelistet:

Konstruktive Anforderungen

- runde Form für optimale Fließfähigkeit im Schüttgut
- kleine Baugröße der Sensormodule, Kantenlänge unter 100 mm
- möglichst Schutzklasse IP66 (staub- und wasserdicht)
- Akku- (Lithium-Polymer) oder batteriebetrieben (Knopfatterie)
- einfacher Aufbau der Sensormodule
- Steck-Verbindungen zum Anschließen der Sensoren innerhalb des Moduls
- Reset-Taster zum Rekonfigurieren des Sensormoduls
- Ein-/Aus-Schalter für die Spannungsversorgung der Sensormodule

Softwaretechnische Anforderungen

- Datenerfassung der Sensoren innerhalb des Sensormoduls
- Sensormodule in Schlafmodus versetzen, wenn keine Daten abgefragt werden
- Erzeugung einer Maschentopologie (ZigBee, WirelessHART, ...)
- Kommunikation über lizenzfreies Frequenzband (868 MHz oder 2,4 GHz)
- einfache Integration des Mesh-Netzwerks in die bestehende Infrastruktur
- Datenserver zur Auswertung und zum Speichern der Messwerte
- geringer Energieverbrauch, um eine Akkulebensdauer von > 1 Jahr zu erzielen
- eine Software für Mikrocontroller zum Anschließen mehrere Typen von Sensoren
- Auswertesoftware zur Darstellung der Messwerte

Betriebswirtschaftliche Anforderungen

- geringe Investitionskosten
- kurze Amortisationszeit
- hoher „Return on Investment“
- geringe Wartungskosten für den Betreiber
- einfache Erweiterbarkeit des Sensorsystems
- einfache Austauschbarkeit einzelnen Komponenten des Sensornetzes
- kostengünstige Herstellung der Sensormodule

Auf Basis dieser Anforderungen wurden die Sensormodule im weiteren Verlauf des Projektes entwickelt und evaluiert.

Folgende Messgrößen wurden als relevant für die Überwachung des Schüttguts und der Sensormodule ermittelt:

- Temperatur
- CO₂-Konzentration
- Geräusentwicklung
- Beschleunigung
- Batteriespannung

Die Temperatur und CO₂-Konzentration geben Aufschluss über bakteriellen Verderb von Getreide und sind daher essentiell für die Überwachung von Getreidelagerstätten. Die Geräusentwicklung kann darüber hinaus Hinweise zu Schädlingsbefall liefern, so wurde sogar die Möglichkeit der Bestimmung der Schädlingsart auf Basis der Fressgeräusche nachgewiesen.¹

Beschleunigungswerte sowie die Batteriespannung dienen nicht unmittelbar der Überwachung des Schüttguts, sondern der Selbstdiagnose des Überwachungssystems. Während die Beschleunigungswerte Aufschluss über die Handhabung der Sensoreinheiten und deren Platzierung im Schüttgut liefern können, dient die Batteriespannung dazu, frühzeitig Ausfälle von Sensoreinheiten aufgrund von Energiemangels vorherzusehen und dem entgegenzuwirken.

Das System basiert auf einer drahtlosen Datenübertragung mit einer Maschentopologie, auch als Mesh-Netzwerk bezeichnet, die sich durch eine hohe Anzahl von Verbindungen zwischen Geräten in Reichweite auszeichnet. Anders als beispielsweise eine Baumstruktur führen die verschiedenen Querverbindungen zu einer wesentlich verbesserten Robustheit des Netzwerks gegenüber Ausfall einzelner Geräte. Diese höhere Robustheit der Maschentopologie gegenüber einer Baumtopologie ist in Abbildung 1 illustriert.

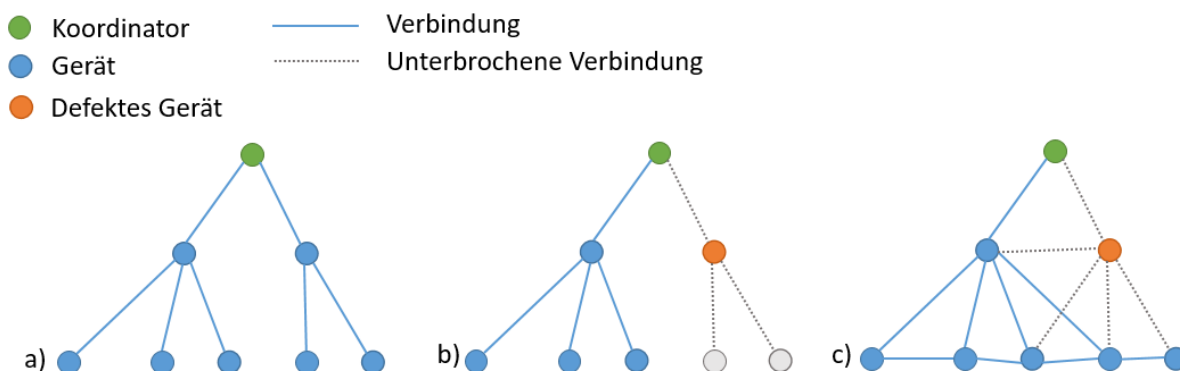


Abbildung 1: Illustration der Robustheit gegenüber Geräteausfall bei Baum- und Maschentopologie. a) Baumtopologie b) Baumtopologie mit defektem Gerät c) Maschentopologie mit defektem Gerät

Teil a) von Abbildung 1 zeigt eine Baumstruktur, in der der Koordinator mit zwei Geräten direkt und über diese mit weiteren nachfolgenden Geräten verbunden ist. Fällt ein Gerät aus, wie in Teil

¹ K. M. Coggins und J. Principe, "Detection and classification of insect sounds in a grain silo using a neural network," 1998 IEEE International Joint Conference on Neural Networks Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98CH36227), 1998, pp. 1760-1765 vol.3

b) dargestellt, sind die damit verbundenen nachfolgenden Geräte von der Kommunikation mit dem Koordinator abgeschnitten, obwohl bei diesen kein Defekt vorliegt. Die Maschentopologie in Teil c) ermöglicht durch die vielen Querverbindungen alternative Kommunikationswege, so dass der Ausfall nur das tatsächlich defekte Gerät betrifft und nicht weitere nachfolgende.

Die Fähigkeit solcher Kommunikationsprotokolle, bei Ausfall eines Geräts wie in Teil c) von Abbildung 1 die Kommunikation über alternative Wege wiederherzustellen, wird als Selbstheilung bezeichnet. Für die hohen Robustheitsanforderungen an eine Schüttgutüberwachung ist ein solches Kommunikationsprotokoll entsprechend besonders geeignet.

Als konkretes Kommunikationsprotokoll wurde ZigBee PRO ausgewählt, eine Spezifikation für drahtlose Netzwerke, die sich durch einen geringen Energieverbrauch auszeichnet und damit besonders für Anwendungen für Sensornetze oder Hausautomation geeignet ist. ZigBee PRO verwendet ein Mesh-Netzwerk und verfügt über die zuvor dargestellte Selbstheilungsfähigkeit. Ein ZigBee-Netzwerk besteht grundsätzlich aus genau einem Koordinator sowie mehreren Router-Geräten und Endgeräten. Router-Geräte sind Elemente im Netzwerk, die nicht nur eigene Daten senden, sondern auch als Zwischenstelle für die Datenübertragung zwischen Koordinator und Endgeräten fungieren. In der Schüttgut-Anwendung spielen solche Router-Geräte eine besonders wichtige Rolle, da die Reichweite einer einzelnen ZigBee PRO-Verbindung nicht ausreicht, um vom Koordinator ein Endgerät weit innerhalb der Schüttgutlagerstätte zu erreichen.

Die Kommunikationsstrategie sieht dementsprechend einen ZigBee-Koordinator vor, der außerhalb der Lagerstätte platziert ist und die von den Sensoren empfangenen Daten in einer Datenbank abspeichern kann. Innerhalb des Schüttguts werden Sensoreinheiten verteilt, die mit als Router konfigurierten ZigBee-Modulen ausgestattet sind und so eigene Messwerte und die von nachfolgenden Geräten zum Koordinator übertragen können.

Ein Messzyklus besteht aus der Anfrage des Koordinators an jedes einzelne Modul im Netzwerk, Messdaten zu liefern, und der entsprechenden Antwort der einzelnen Module. Um den Energieverbrauch möglichst gering zu halten, befinden sich die Module zwischen diesen Anfragen im Energiesparzustand und werden durch die Anfrage aufgeweckt. Der Messzyklus ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

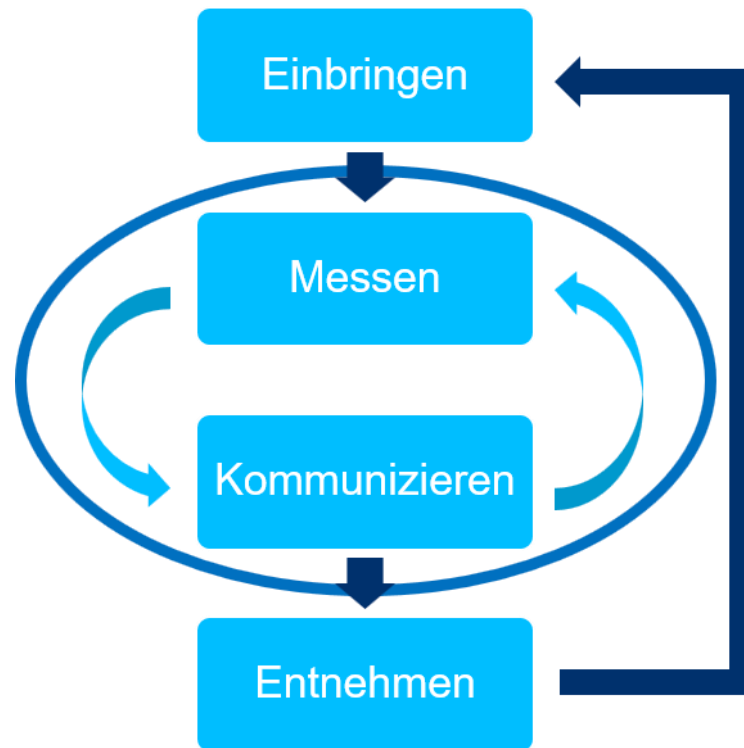


Abbildung 2: Messzyklus der Sensoreinheiten im Schüttgut

Mit der technischen Umsetzung dieser Kommunikationsstrategie beschäftigt sich das zweite Arbeitspaket.

AP 2 – Entwicklung und Fertigung von Experimentalprototypen

Die Entwicklung und Fertigung von Experimentalprototypen beinhaltete eine Analyse verfügbarer Sensoren sowie die Auswahl geeigneter Elektronikkomponenten wie Mikrocontroller und Akku. Darüber hinaus gehörten Entwurf und Fertigung des Gehäuses sowie die Programmierung des Mikrocontrollers zu dem Arbeitspaket.

Sensoranalyse

Auf Grundlage der zuvor definierten Anforderungen und relevanten Messgrößen wurden eine Reihe verfügbarer Sensoren untersucht. Temperatursensoren können grundsätzlich in zwei Funktionsprinzipien aufgeteilt werden, solche, die Kontakt zum Messobjekt haben und sich mit diesem im thermischen Gleichgewicht befinden und solche, die berührungslos die Wärmestrahlung des Messobjektes erfassen. Für den vorliegenden Anwendungsfall von Sensorelementen in Schüttgut sind Temperatursensoren mit Kontakt zum Messobjekt gut geeignet, da sie einfach auszuwerten sind und ihre Messgenauigkeit unabhängig vom umgebenen Material ist. Da der Sensor direkten Kontakt zum Schüttgut haben muss, wurde bei der Auswahl eines konkreten Temperatursensors vor allem Wert auf Robustheit und eine einfache Abdichtung der nötigen Durchdringung des Elektronikgehäuses gelegt. Diese Anforderungen werden beispielsweise vom Dallas DHS18B20 erfüllt, einem PT1000-Temperatursensor, der in einem zylindrischen Edelstahlgehäuse eingefasst ist.

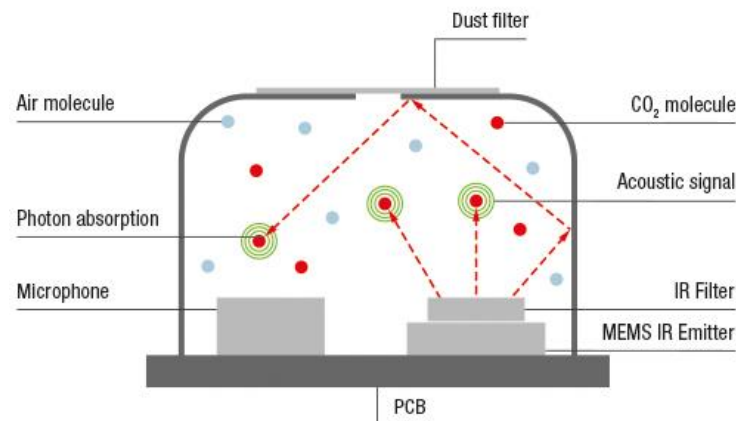


Abbildung 3: Funktionsprinzip des photoakustischen CO₂-Sensors²

Die Messung der CO₂-Konzentration gestaltet sich aufwendiger als die Temperaturmessung, da das umgebende Gas Zugang zu einer Messkammer haben muss. Entsprechend muss auch hier eine Gehäuseöffnung geschaffen werden, durch die der Sensor der Umgebungsluft im Schüttgut ausgesetzt werden kann. Verwendet wurde ein Sensor basierend auf der photoakustischen Spektroskopie (Abbildung 3). Dieser Sensor zeichnet sich im Vergleich mit üblichen, auf Infrarotspektroskopie basierenden Sensoren, durch eine wesentlich geringere Baugröße aus und eignet sich dadurch besonders für die Integration in das projektierte Sensorsystem. Das Messprinzip verwendet ähnlich wie die Infrarotspektroskopie einen Infrarot-Laser, die Auswertung erfolgt aber nicht optisch, sondern durch ein Mikrofon, welches die Schwingungen der vom Laser angeregten CO₂-Moleküle erfasst. Zum Betrieb des Lasers benötigt der Sensor eine 12V-Spannungsversorgung, was bei der weiteren Auswahl der Komponenten berücksichtigt wurde. Die Messkammer des CO₂-Sensors ist mit einer Membran verschlossen, die unter Umständen durch die widrigen Bedingungen bei der Einbringung in Schüttgut beeinflusst oder beschädigt wird. So tritt in einem Getreidelager eine hohe Staubbelastung auf, wodurch die Membran zugesetzt werden kann. In welchem Grad das Gasgemisch in der Messkammer im Falle einer zugesetzten Membran noch die Umgebungsluft repräsentiert muss daher in Langzeitversuchen ermittelt werden. Ohne gesicherte Erkenntnisse zu diesem Einfluss sinkt die Belastbarkeit der Messwerte mit zunehmender Staubbelastung ab. Darüber hinaus besteht das Risiko einer Beschädigung der Membran durch das Schüttgut selbst. So kann zum einen Schüttgut und Schmutz in die Messkammer eindringen und so zu unplausiblen Messwerten führen. Zum anderen stellt der Betrieb eines Lasers und damit einer Zündquelle in einer staubbelasteten Umgebung ein Explosionsrisiko dar, welches vor dem Hintergrund des sicheren Betriebs des Sensorsystems in Schüttgutlagerstätten berücksichtigt werden muss.

Die Messung von Temperaturen und der CO₂-Konzentration in der Umgebungsluft eignet sich grundsätzlich gut für Einzelmessungen mit vergleichsweise großen zeitlichen Abständen. Jeder Datensatz besteht entsprechend nur aus einem einzelnen Zahlenwert pro Messung. Im Gegenzug dazu sind die Erfassung von Geräuschen sowie der Beschleunigung auf die Messung über einen bestimmten Zeitraum angewiesen. Erst eine Messung über beispielsweise 5

² Bildquelle: Sensirion

Sekunden mit einer geeigneten Abtastrate erlaubt beispielsweise eine Spektralanalyse der Geräuschemessung und darüber eine Bestimmung der verursachenden Schädlinge. Eine solche Messung erzeugt allerdings eine entsprechend hohe Datenmenge, die im Rahmen der Kommunikationsstrategie über die drahtlose Verbindung zum Koordinator übertragen werden muss. Mit zunehmender Nähe einer gegebenen Sensoreinheit zum Koordinator steigt die Anzahl der nachgeordneten Sensoreinheiten, deren Daten von dieser übertragen werden müssen. Die Untersuchungen während des Arbeitspaketes 2 verdeutlichten, dass die von einer einzelnen Sensoreinheit erzeugten Datenmengen möglichst gering gehalten werden sollten. Dieses Ziel steht der Verwendung von solchen Sensoren, die größere Datenmengen erzeugen, entgegen. In den entwickelten Experimentalprototypen wurden Sensoren für Geräuschemessung und Beschleunigung daher nicht eingesetzt.

Die Messung der Batteriespannung spielt eine wichtige Rolle bei der Selbstdiagnose des Systems, sowie insbesondere im Stadium des Experimentalprototypen beim Gewinnen von Erkenntnissen bezüglich des Langzeiteinsatzes im Schüttgut. Über einen Spannungsteiler wird die Ausgangsspannung des Akkus direkt vom Mikrocontroller erfasst und als Messwert übermittelt.

Elektronikkomponenten

Als Mikrocontroller wird ein Arduino Pro Mini, basierend auf dem ATmega328P Mikrochip von Atmel, eingesetzt. Dieser Mikrocontroller zeichnet sich durch einen geringen Energiebedarf und eine geringe Baugröße aus. Zur Stromversorgung wird ein Lithium-Polymer-Akku mit einer Ausgangsspannung von 3,7 V verwendet. Dieser lässt sich mit einem passenden Laderegler laden, der mit auf der Platine untergebracht wird. Das Funkmodul wird dem Kommunikationsprotokoll ZigBee entsprechend ausgewählt, die erste Generation des Experimentalprototypen verwendet dabei 2,4 GHz als Funkfrequenz. Erkenntnisse zur Reichweite aus der Erprobung dieses Experimentalprototypen (vgl. Abschnitt AP 3), machten eine weitere Iterationsschleife erforderlich. Die resultierende zweite Generation des Experimentalprototypen verwendet 868 MHz als Funkfrequenz, was zu einer Verbesserung der Reichweite gegenüber der ersten Generation führt.

Als Antenne wird eine Platinenantenne verwendet, dabei wurden vier verschiedene Antennen verglichen und anhand ihrer Übertragungsqualität bewertet.

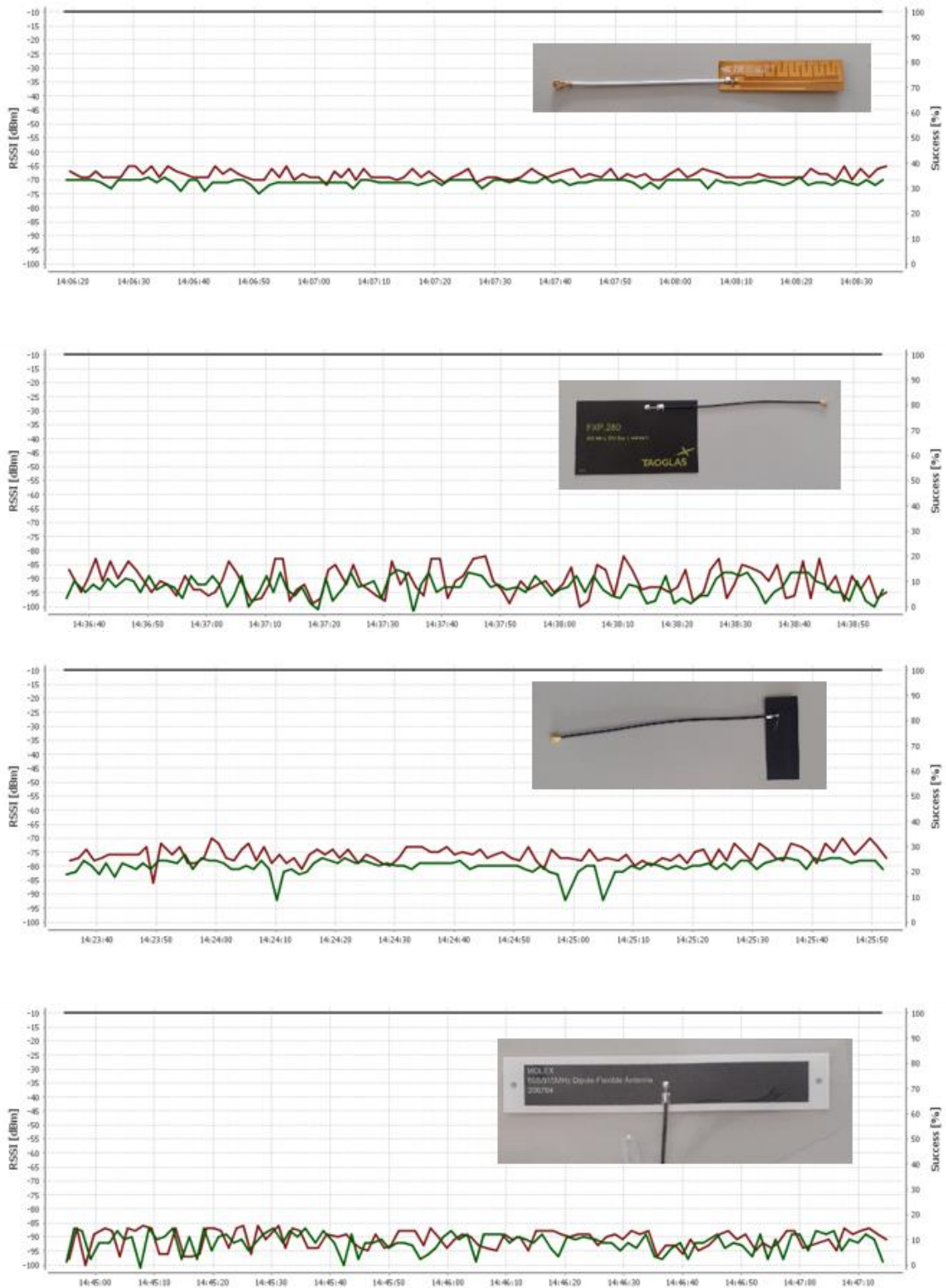


Abbildung 4: Vergleich der Signalqualität verschiedener Antennen für 868 MHz. Die vertikale Achse stellt jeweils die Signalqualität in dBm dar, die horizontale Achse die Zeit.

Alle Komponenten sowie die den Anforderungen entsprechenden Bauteile, wie Reset-Taster und Schalter für Stromversorgung, sind auf einer Platine untergebracht, die insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Kompaktheit entworfen wurde.

Gehäuse und Fertigung

Das Gehäuse entspricht der gewünschten Kugelform, die für das Einbringen in den Schüttgutstrom sowie die Entnahme eine gute Fließfähigkeit aufweist. Der Entwurf basiert auf zwei verschraubten Halbkugeln, von denen eine als Aufnahme aller Komponenten dient, die andere als Deckel. Gehäuseöffnungen erlauben den Kontakt der Sensoren mit dem umgebenden Schüttgut. Zur Fertigung der Kugelhälften wurde in der ersten Generation der 3D-Druck von PLA (Polyactid) mit dem verbreiteten FDM-Verfahren eingesetzt.

Die resultierenden Gehäuseschalen weisen allerdings Schwächen bezüglich der Robustheit auf, weshalb im Rahmen der Iterationsschleife zur Reichweitenverbesserung auch eine Anpassung der Gehäusefertigung untersucht wurde. Hierzu wurden verschiedene Kunststoffe miteinander verglichen, um vor allem Optionen der spanenden Fertigung zu betrachten. Dieser Vergleich wurde anhand der Gesichtspunkte Druckfestigkeit, Wasseraufnahme sowie der Möglichkeit einer hygienischen Oberfläche in der Herstellung durchgeführt. Als Bewertungskriterium für die hygienische Oberfläche wird dabei das Vorhandensein einer lebensmittelrechtlichen Zulassung für den Werkstoff zugrunde gelegt. Verglichen wurden PEEK (Polyetheretherketon), PA66 (Polyamid 66) und POM-C (Polyoxymethylene-Copolymer) mit dem zuvor verwendeten PLA sowie Aluminium als Referenzwert für die Druckfestigkeit. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 1 aufgeführt.

	PLA	Aluminium	PEEK	PA66	POM-C
Druckfestigkeit	17 MPa	60-95 MPa	23 MPa	20 MPa	35 MPa
Lebensmittelr. Zulassung	Ja	-	Ja	Ja	Ja
Wasseraufnahme	0,5 – 50%	-	< 0,1%	2,8%	0,2%

Tabelle 1: Vergleich von potenziellen Kunststoffen für die Gehäusefertigung

Da alle untersuchten Kunststoffe in einer Ausführung mit lebensmittelrechtlicher Zulassung erhältlich sind, wurde die Auswahl anhand der Wasseraufnahme und Druckfestigkeit getroffen. Dabei zeichnet sich besonders POM-C durch die hohe Druckfestigkeit von 35 MPa aus. Eine als Frästeil entworfene Gehäuseschale konnte aufgrund der komplexen Formgebung und Einspannung jedoch nicht in der institutseigenen Werkstatt gefertigt werden. Eine Fertigung durch eine externe Beauftragung ließ sich aufgrund von langen Lieferzeiten in der Projektlaufzeit nicht mehr rechtzeitig umsetzen. Für die zweite Generation des Experimentalprototyps wurde daher wieder auf den 3D-Druck aus PLA zurückgegriffen.

Programmierung

Die Programmierung des Experimentalprototypen beinhaltet sowohl die Software der Mikrocontroller in jeder einzelnen Sensorkugel als auch die des Koordinators, der die Kommunikation initiiert, die Messdaten abfragt und in einer Datenbank abspeichert. Die Mikrocontroller der Sensorelemente wurden über die Arduino-Entwicklungsumgebung in C++ programmiert. Für die verwendeten XBee-Module steht hier eine Bibliothek zur Verfügung, die

die Entwicklung der benötigten Software wesentlich vereinfacht. Der Koordinator ist in Python programmiert, auch hier steht eine XBee-Bibliothek zur Verfügung. Die empfangenen Daten werden in einer SQL-Datenbank gespeichert.

Nach der Initialisierung stellt der Koordinator den Kontakt mit jedem Funkmodul im Netzwerk her. In regelmäßigen Abständen initiiert der Koordinator nun eine Abfrage von Messwerten. Dies kann, muss aber nicht, mit derselben Messrate der Sensorkugeln geschehen. So können die Sensorkugeln in der aktuellen Softwarekonfiguration bis zu 20 Messwerte bis zur Abfrage durch den Koordinator zwischenspeichern und direkt nacheinander an den Koordinator übermitteln, selbst wenn die Werte in größeren Abständen erfasst wurden. Übermittelt werden von jeder Sensorkugel die Netzwerk-ID, die Messwerte und die aktuelle Batteriespannung. Diese werden anschließend mit Zeitstempel in der Datenbank abgespeichert, bevor die nächste Sensorkugel abgefragt wird. Anschließend wartet das Programm eine festgelegte Zeit, bis neue Messwerte vorhanden sind und beginnt mit einer neuen Abfrage.

Als Ergebnis der in diesem Abschnitt vorgestellten Schritte der Sensorentwicklung wurden zwei Generationen von Experimentalprototypen entwickelt. Die erste Generation mit 3 Sensorkugeln wurde hauptsächlich für die Ermittlung von Reichweiten und grundlegenden Erkenntnissen der Funktionsfähigkeit und Machbarkeit verwendet. Die überarbeitete, zweite Generation beinhaltet 5 Standardkugeln, die Temperaturen messen können, sowie eine Sonderkugel, die zusätzlich die CO₂-Konzentration der Umgebungsluft erfassen kann. Aufgrund der genannten Herausforderungen, die mit der Integration des CO₂-Sensors verbunden sind, wurde dieser vornehmlich als Machbarkeitsstudie in eine einzelne Kugel verbaut. Im folgenden Arbeitspaket wurden mit den beiden Generationen von Experimentalprototypen verschiedene Versuche durchgeführt.

AP 3 – Durchführung von Experimenten

Im Arbeitspaket 3 wurde der in AP 2 entwickelte Experimentalprototyp in Schüttgut erprobt. Ziele der Versuche waren vor allem die Ermittlung der Reichweite in Getreide sowie der Erfassungsbereich der Sensoren.

Aufgrund der SARS-CoV-2-Pandemie, in deren Verlauf das Projekt stattgefunden hat, war insbesondere die Durchführung von Experimenten mit Herausforderungen verbunden. Maßnahmen wie verpflichtendes Homeoffice für die Beschäftigten des IFT, Kontaktbeschränkungen zu Nicht-Institutsangehörigen sowie ein Verbot von Dienstreisen durch die Universitätsleitung in der ersten Hälfte der Projektlaufzeit erschwerten die Bearbeitung des AP 3. Die Versuche mit der ersten Generation des Experimentalprototypen konzentrieren sich daher vor allem auf Reichweitentests, die am IFT mit Kunststoffgranulat durchgeführt werden konnten. In kleinem Umfang war zudem ein Test in Weizen möglich. Dadurch konnten wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, die zur zweiten Iterationsschleife von AP 2 und damit einer wesentlich verbesserten zweiten Generation des Experimentalprototypen geführt haben.

Anhand von einer Untersuchung der Reichweite zwischen Koordinator und verschiedenen Sensorkugeln in Luft wurden erste Einblicke in das Funkverhalten zwischen den verwendeten Modulen ermöglicht. Zur besseren statistischen Belastbarkeit wurde dieser Versuch mit drei Funkmodulen gleicher Bauart durchgeführt, dabei wurde die Entfernung zwischen Koordinator und Sensorkugel schrittweise erhöht und die Signalqualität sowohl in Sende- als auch in Empfangsrichtung aufgezeichnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 gezeigt.

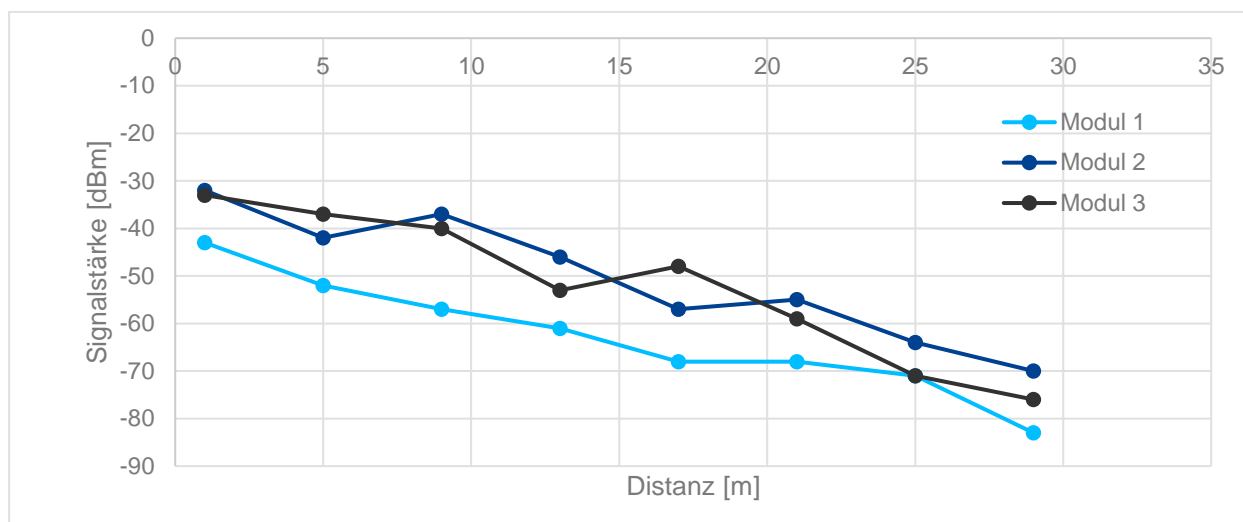


Abbildung 5: Signalqualität der Kommunikation zwischen Koordinator und Funkmodulen.

Um die Erprobung der Übertragungsqualität der Funkmodule noch anwendungsnäher zu gestalten, wurden die Sensorkugeln in einem Folgeversuch in der IFT-Schüttgutversuchsanlage in Kunststoffgranulat eingebracht. Die Ergebnisse in Abbildung 6 zeigen zunächst ein besseres Übertragungsverhalten mit Kunststoffgranulat als ohne, dies ist auf mögliches Reflexionsverhalten durch die Granulatbehälter zurückzuführen. In einem weiteren Versuch wurde das Übertragungsverhalten in trockenem und feuchtem Kunststoffgranulat erprobt. Dabei wurde trockenes Granulat sowie feuchtes Granulat mit einem Masseanteil von 10% sowie 20% untersucht. Da Getreidekörner immer eine Restfeuchtigkeit aufweisen und dieser Wassergehalt zu einer Dämpfung elektromagnetischer Wellen führt, waren insbesondere diese Versuche von besonderem Interesse für die Evaluierung der Experimentalprototypen. Abbildung 7 zeigt die Messergebnisse dieser Versuche.

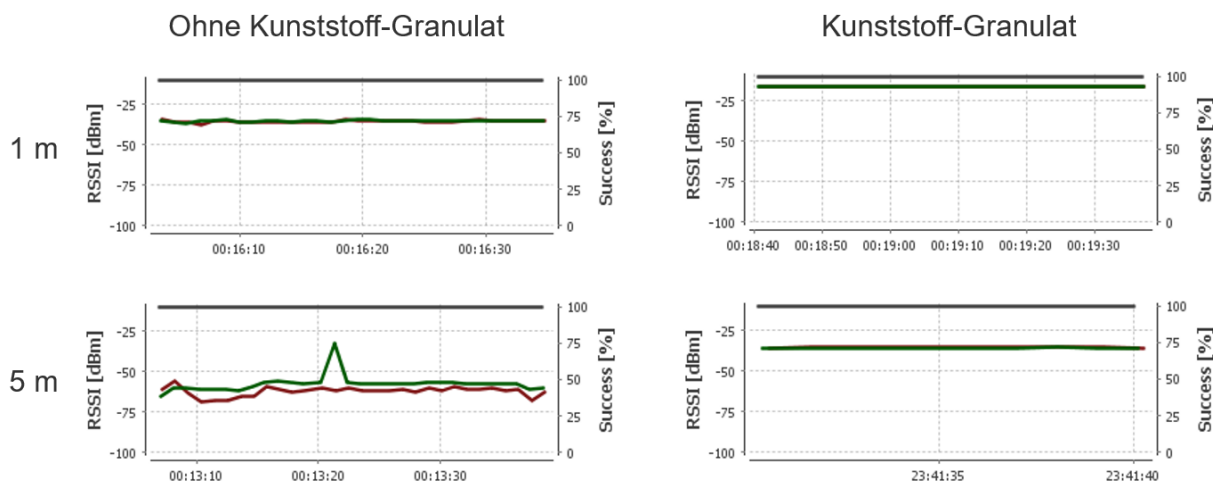


Abbildung 6: Vergleich der Signalqualität (Senden und Empfangen) mit und ohne Kunststoffgranulat.

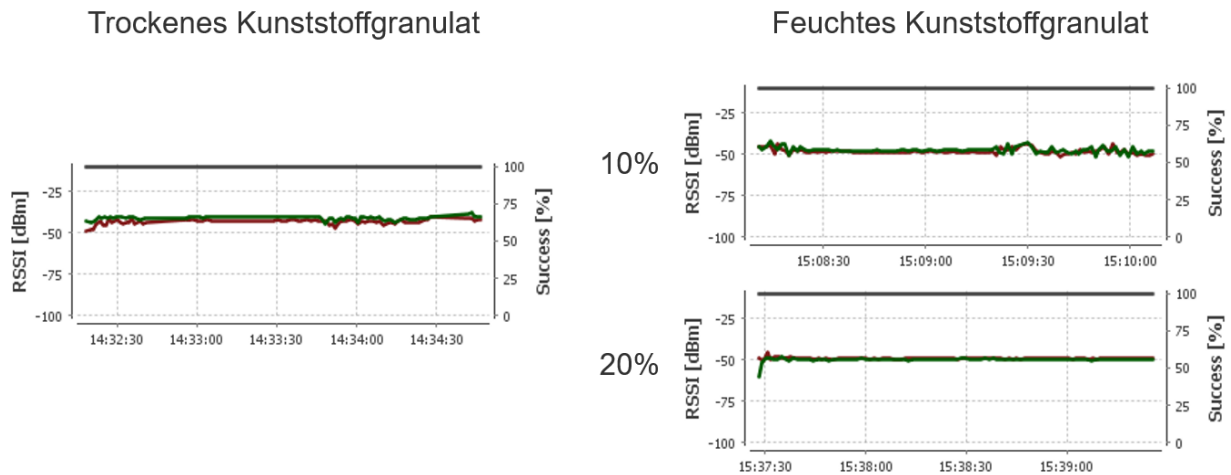


Abbildung 7: Vergleich der Signalqualität (Senden und Empfangen) zwischen trockenem und feuchtem Kunststoffgranulat.

Aus dem Vergleich in trockenem und feuchtem Kunststoffgranulat kann eine geringfügige Verschlechterung der Signalqualität abgeleitet werden.

Zur Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Getreide wurden zusätzlich noch Versuche in Getreide durchgeführt, dazu wurde die erste Generation des Experimentalprototypen noch in einem Weizensilo erprobt. Von besonderem Interesse war bei diesem Versuch die Reichweite in Getreide. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 8 gezeigt. Als Ergebnis ergab der Versuch eine Reichweite von unter 2 Metern, während eine Verbindung vom Koordinator zu den Kugeln 1 und 2 aufgebaut werden konnte, war Kugel 3 nicht erreichbar. Eine Reichweite von unter 2 Metern ist als ungeeignet für die Anwendung zu bewerten, da der Abstand zwischen zwei Sensorkugeln wesentlich geringer als die maximale Reichweite sein sollte. Dadurch wird ein hinreichender Überlapp der Kommunikationsreichweiten mehrerer benachbarter Kugeln erzielt, was erforderlich für den Mesh-Charakter des Kommunikationsprotokolls ist und die Grundlage für dessen hohe Robustheit darstellt. Im Falle einer Reichweite von 2 Metern ist also von einer sehr großen Anzahl von Sensorkugeln für ein Flachlager auszugehen. Dieses Verhalten wurde in der Nachbetrachtung des Versuchs auf den Wassergehalt der Getreidekörner zurückgeführt. Da die Dämpfung elektromagnetischer Wellen mit der Frequenz korreliert, führt die Frequenz von 2,4 GHz vermutlich zu einer starken Dämpfung und damit zu der geringen Reichweite. Aus diesem Grund wurde die zweite Generation des Experimentalprototyps mit der reduzierten Funkfrequenz von 868 MHz initiiert.

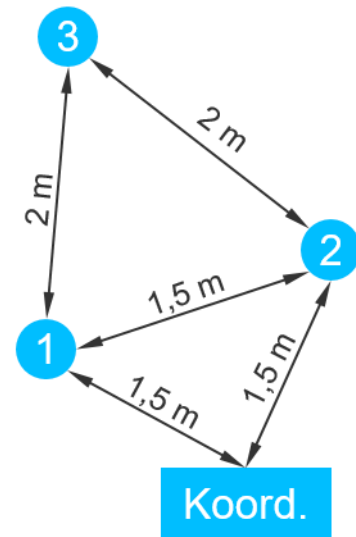


Abbildung 8: Versuchsaufbau des ersten Reichweitentests in Getreide. Das Foto links zeigt die Kugeln 2 und 3. Während des Versuchs waren die Kugeln ca. 25 cm tief im Weizen versenkt. Das Schema rechts zeigt die Anordnung der Kugeln und des Koordinators während des Versuchs.

Die Erkenntnisse aus den Versuchen mit der ersten Generation verdeutlichten das Erfordernis einer abschließenden Erprobung in Getreide. Zwar können die Versuche in Kunststoffgranulat grundsätzliche Aussagen beispielsweise über die Funkverbindung liefern, ein Übertragen auf deren Verhalten in Getreide ist allerdings nur eingeschränkt möglich. Auf Empfehlung eines Mitglieds des projektbegleitenden Ausschusses wurde ein Landhandel in der Nähe Stuttgarts kontaktiert, der seine Getreidelagerstätten für eine solche Erprobung zur Verfügung stellte. Die weltweiten Lieferketten-Probleme infolge der SARS-CoV-2-Pandemie, insbesondere im Bereich der Halbleiterindustrie, führten allerdings zu einer Verzögerung der Fertigung der zweiten Generation des Experimentalprototypen, so dass die Erprobung erst in der sechsmonatigen Phase der kostenneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit ab Februar 2022 stattfinden konnte.

Bei der Erprobung des Experimentalprototypen besteht potenziell das Risiko, dass ein Kugelgehäuse durch die Belastung im Schüttgut beschädigt wird und so das Schüttgut durch Gehäuseteile wie zum Beispiel Kunststoffsplitter kontaminiert. Mit Beginn des russischen Angriffskrieges gegen die Ukraine und der daraus resultierenden globalen Getreidekrise wurde aus ethisch-sozialen Gründen daher auf einen Einsatz in den Lagerstätten des Landhandels verzichtet, um eine Kontaminierung von großen Mengen Getreide durch mögliche Schäden an den Sensorkugeln zu verhindern. Die Funktion des Systems wurde daher während der Getreideernte im Sommer 2022 auf einem landwirtschaftlichen Betrieb an einer geringeren Menge Getreide nachgewiesen.

Ziel dieses Funktionsnachweises war zum einen, die Reichweite der zweiten Generation in Getreide mit der angepassten Funkfrequenz zu ermitteln, zum anderen unter realen Bedingungen eine Messung durchzuführen und so die Eignung der Systemarchitektur, Kommunikationsstrategie sowie der technischen Umsetzung des Experimentalprototypen zu verifizieren. Dazu wurden die sechs Kugeln der zweiten Generation, fünf Standardkugeln mit Temperatursensoren sowie eine Sonderkugel mit einem zusätzlichen CO₂-Sensor, in eine Aufschüttung von einigen Tonnen Weizen eingebracht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 9 und Abbildung 10 gezeigt.

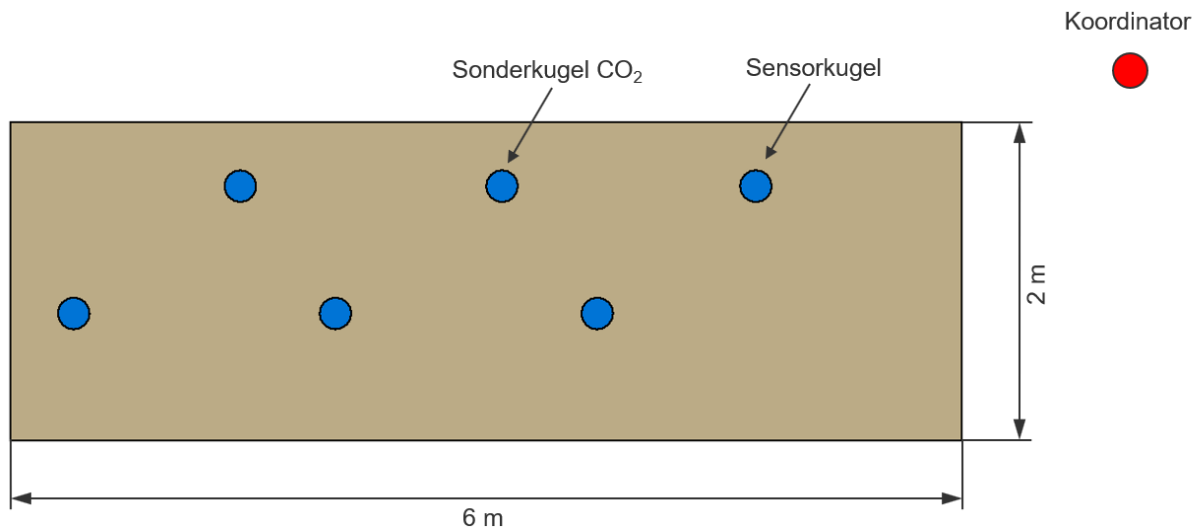


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Erprobung in Weizen



Abbildung 10: Versuchsaufbau der Erprobung in Weizen. Die Lage der Sensorkugeln an der Oberfläche dient lediglich der Veranschaulichung, im Versuch waren die Kugeln ca. 30-50 cm tief im Getreide versenkt.

Die erfolgreich aufgenommenen Messreihen validieren sowohl die Systemarchitektur und Kommunikationsstrategie als auch die ursprüngliche Motivation des Projektes, Getreide zur rechtzeitigen Erkennung von mikrobiellem Verderb zu überwachen. Eine der aufgenommenen Messreihen wurde über Nacht durchgeführt, bei einem Abfall der Außentemperatur von 22 °C auf 14 °C. Die Messwerte der Temperaturmessung verdeutlichen demgegenüber, wie das Getreide durch „atmen“ auch während der Lagerdauer weiterhin Wärme abgibt. Abbildung 11 zeigt die Temperaturmesswerte der sechs Kugeln, dabei sind pro Kugel jeweils die Messwerte der beiden Sensoren gemittelt worden. Trotz sinkender Außentemperaturen nehmen die im Getreide gemessenen Temperaturen zu und erreichen Spitzenwerte von ca. 13 °C über der Außentemperatur. Der Nachweis dieses Phänomens, welches zu verdorbenem Getreide führen kann, sowie die messtechnische Erfassung mit dem Experimentalprototypen bestätigt die erfolgreiche Umsetzung des Experimentalprototypen sowie die potenzielle Eignung eines solchen Systems zur Überwachung von Schüttgutlagerstätten. Das „Atmen“ des Getreides lässt sich ebenso in der CO₂-Messung nachweisen, die während desselben Versuchs von der Sonderkugel mit dem entsprechenden Sensor aufgezeichnet wurde. Die Daten dieser Messung sind in Abbildung 12 dargestellt.

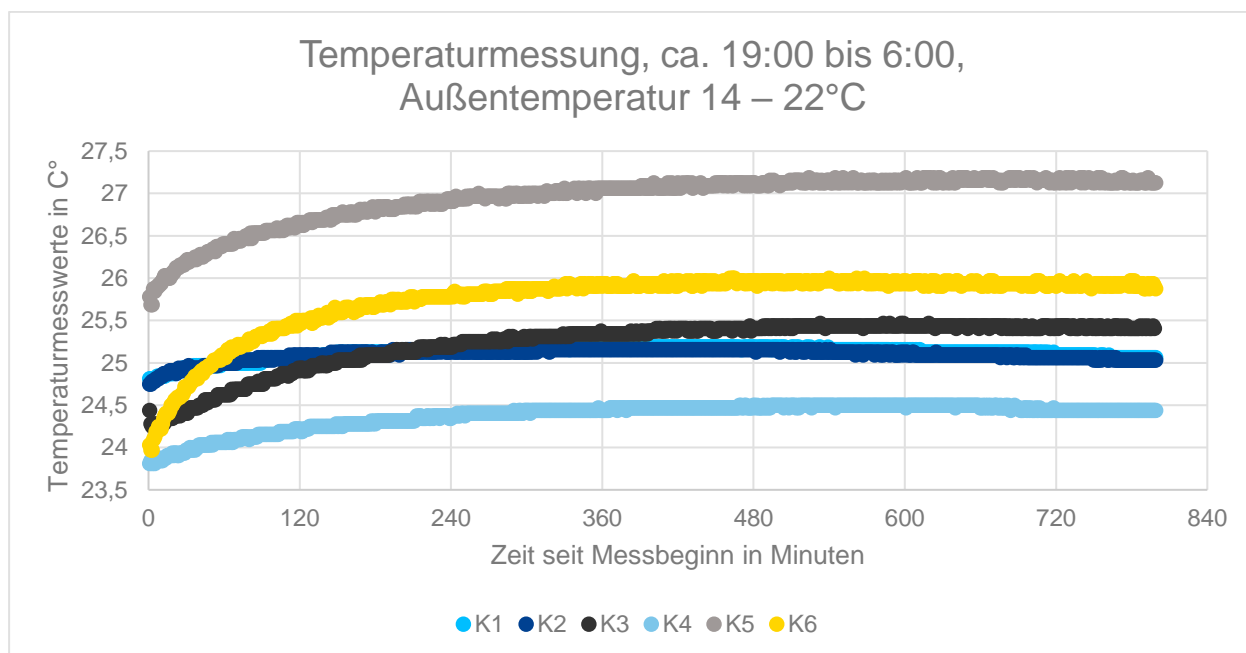


Abbildung 11: Temperaturmessung mit sechs Sensorkugeln in Weizen über Nacht. Die Werte stellen pro Kugel jeweils den Mittelwert der beiden verbauten Temperatursensoren dar.

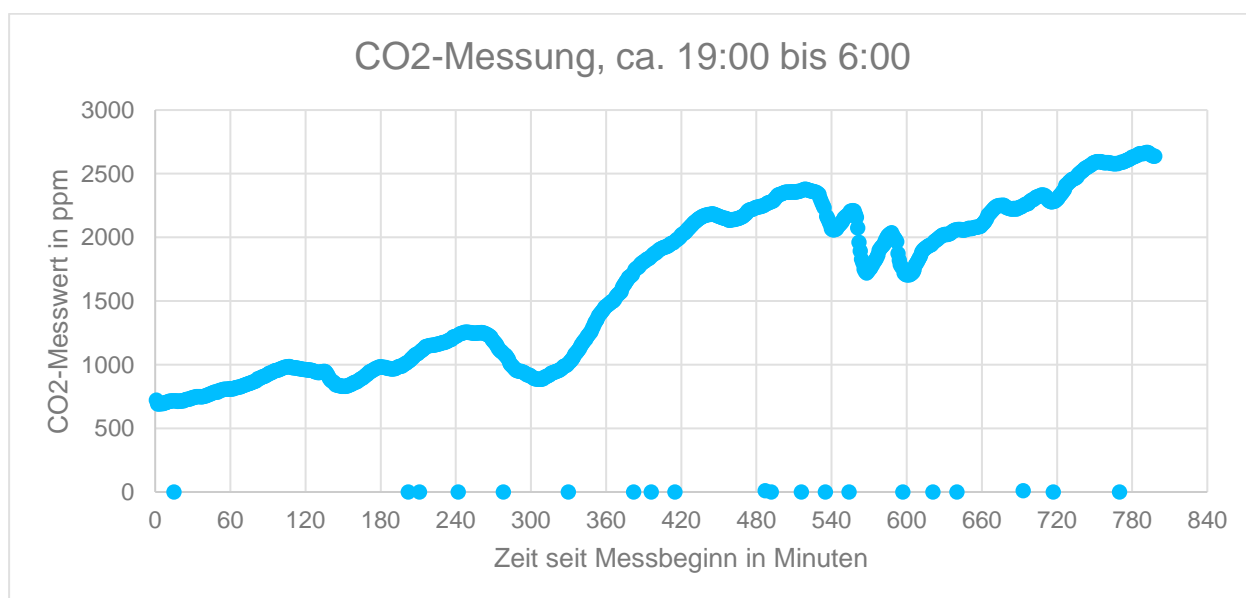


Abbildung 12: CO₂-Messung in Weizen über Nacht.

In einem separaten Versuch wurde die Reichweite mit der geänderten Frequenz von 868 MHz in Weizen ermittelt. Im Vergleich zur Reichweite bei 2,4 GHz von lediglich 2 Metern wurde mit der geringeren Frequenz eine Reichweite von über 6 Metern erzielt. Diese Reichweite ist geeignet, um ein funktionsfähiges Sensornetzwerk aufzuspannen, da der Abstand aufgrund des geringen Erfassungsradius insbesondere der Temperatursensoren einen Wert von 2 bis 3 Metern nicht überschreiten sollte. Eine wesentlich höhere Reichweite als 6 Meter ermöglicht daher nicht unbedingt eine grobmaschigere Abdeckung und dementsprechend die Verwendung von weniger Sensorkugeln. Eine detaillierte Untersuchung dieser Fragestellung wurde im Zuge des Arbeitspaketes 4 durchgeführt.

Der Erfassungsradius der Sensoren lässt sich anhand der Versuchsergebnisse nur abschätzen. Die CO₂-Messung hat potentiell einen großen Erfassungsradius, da sich das Gas durch das Schüttgut ausbreiten kann, auch wenn es weiter entfernt vom Sensor freigesetzt wird. Die Temperatursensoren sind dagegen auf ein thermisches Gleichgewicht mit ihrer Umgebung angewiesen, eine Wärmeentwicklung aufgrund von verdorbenem Getreide muss erst durch Wärmeleitung durch die Getreidekörner den Temperatursensor erreichen, bis der Messwert davon beeinflusst werden kann. Der Erfassungsradius ist daher als gering einzustufen, nur die Temperatur in unmittelbarer Umgebung des Sensors kann erfasst werden.

Neben den eigentlichen Messwerten, die die Eignung des Systems für die Schüttgutüberwachung bestätigen, ist das Verhalten des Kommunikationsnetzwerkes während der Versuche von Interesse. Anhand dieser Beobachtungen kann die Kommunikationsstrategie im weiteren Sinne, aber auch die Auswahl von Komponenten wie die Frequenzfestlegung und die Antennenwahl im engeren Sinne überprüft werden.

Das Kommunikationsnetzwerk inklusive der eingezeichneten Übertragungsqualitäten in Sende- und Empfangsrichtung während der Erprobung in Weizen ist in Abbildung 13 dargestellt. Diese Darstellung wurde mithilfe der XBee-Entwicklungsumgebung aufgenommen und erlaubt eine Einschätzung der Funktionsfähigkeit und Performance des Kommunikationsnetzwerkes während des Betriebs.

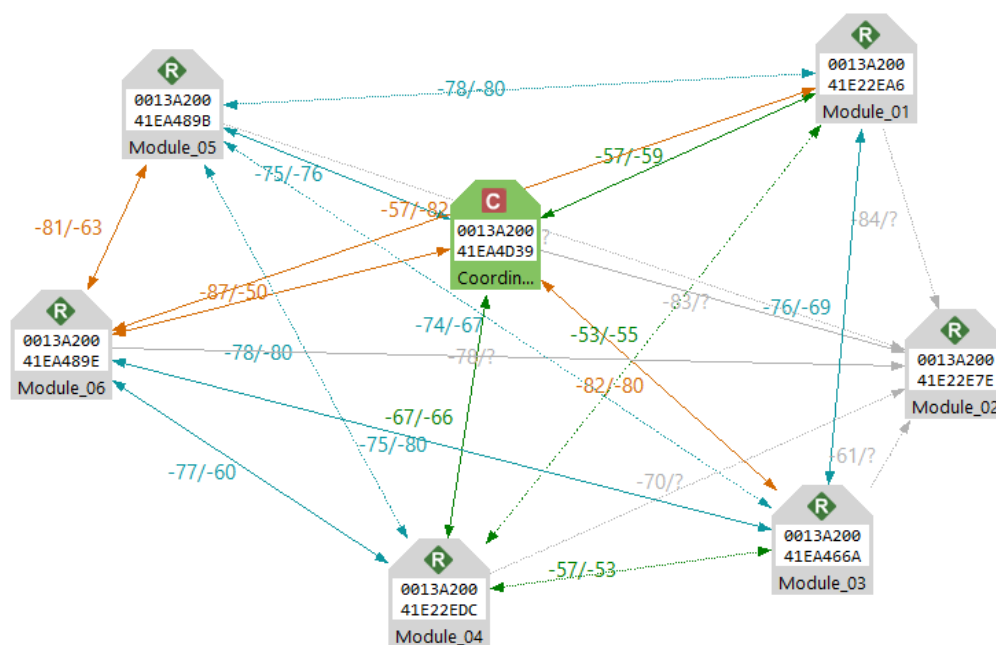


Abbildung 13: Kommunikationsnetzwerk während des Versuchs in Weizen. Das grüne Symbol in der Mitte stellt den Koordinator dar, die grauen Symbole stehen für die Funkmodule der 6 Sensorkugeln. Die Zahlen an den Kanten beschreiben die Signalqualität in Sende- und Empfangsrichtung. Die Farben der Kanten korrelieren ebenfalls mit der Signalqualität, grün und blau stellen gute Verbindungen dar, orange und grau Verbindungen mit eher niedriger Signalqualität.

Anhand der Darstellung in Abbildung 13 lässt sich auch der besondere Vorteil des Mesh-Charakters der gewählten Systemarchitektur erkennen. Der relevante Ausschnitt ist in Abbildung 14 gezeigt.

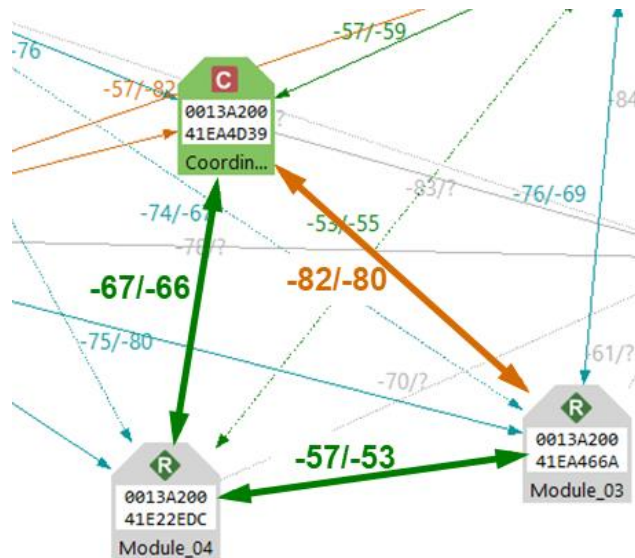


Abbildung 14: Ausschnitt aus Abbildung 13. Die drei hervorgehobenen Kanten verdeutlichen den Mesh-Charakter der gewählten Systemarchitektur.

Deutlich zu erkennen ist die orangene Verbindung von Modul 3 zum Koordinator, deren Signalqualität als eher mittelmäßig einzustufen ist. Durch die guten Verbindungen zwischen Modul 3 und Modul 4 sowie zwischen Modul 4 und dem Koordinator steht allerdings eine alternative Verbindung zwischen Modul 3 und Koordinator zur Verfügung, für den Fall, dass die direkte Verbindung ausfällt. In einer klassischen Baumstruktur wäre die Querverbindung zwischen Modul 3 und Modul 4 nicht vorgesehen, die im Projekt gewählte Kommunikationsstrategie bietet daher einen deutlichen Gewinn an Robustheit gegenüber Ausfällen sowohl von Netzwerkgeräten als auch von Verbindungen zwischen diesen Geräten.

AP 4 – Entwicklung einer Einbringungsstrategie

Auf Basis der ermittelten Reichweite in Getreide wurde in AP 4 die benötigte Sensoranzahl sowie die Position der Sensoren innerhalb der Schüttgutlagerstätte bestimmt und untersucht.

Als Grundlage für die Untersuchung der Sensorverteilung im Schüttgut wurde ein Algorithmus entwickelt und in MATLAB programmiert, mit dem sich für ein gegebenes Schüttgutvolumen und einen gegebenen Abstand zwischen zwei benachbarten Sensoren die benötigte Anzahl von Sensoren ermitteln lässt. Zusätzlich werden die Koordinaten der berechneten Sensorpositionen ausgegeben, wodurch weitere Analysen der Verteilung ermöglicht werden. Die Verteilung der Sensoren im Schüttgut wurde unter folgenden Gesichtspunkten untersucht:

- Vergleich verschiedener Verteilungsmuster
- Robustheit der Schüttgutüberwachung
- Einfluss der Einbringung auf das Kommunikationsnetzwerk

Für die im Folgenden vorgestellten Betrachtungen wurde auf Basis der Experimente aus AP 3 eine Reichweite von 5 Metern zugrunde gelegt.

Vergleich verschiedener Verteilungsmuster

Die Verteilung und Positionierung der Sensorkugeln im Schüttgut ist vergleichbar mit der Kugelpackung von Atomen im Kristallgitter. Konzepte aus der Kristallographie wie beispielsweise

die dichteste Kugelpackung können daher bei der Betrachtung der Kugelverteilung hilfreich sein. Für die Verteilung von Sensorkugeln in einem quaderförmigen Schüttgutflachlager wurden zwei Verteilungsmuster verglichen, zum einen die im Folgenden als Rechteckmuster bezeichnete Verteilung sowie eine als Rautenmuster bezeichnete Verteilung, die einem um 45° gedrehten Rechteckmuster entspricht. Die beiden Muster sind zur Anschauung in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt.

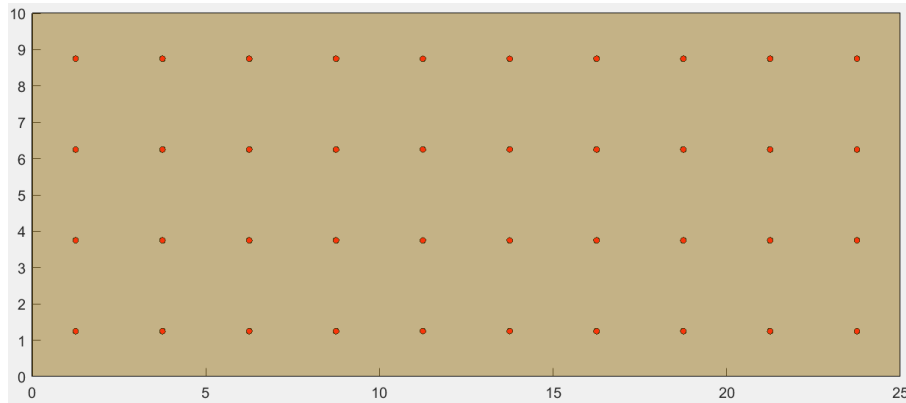


Abbildung 15: Rechteckverteilung von Sensorkugeln in Schüttgut

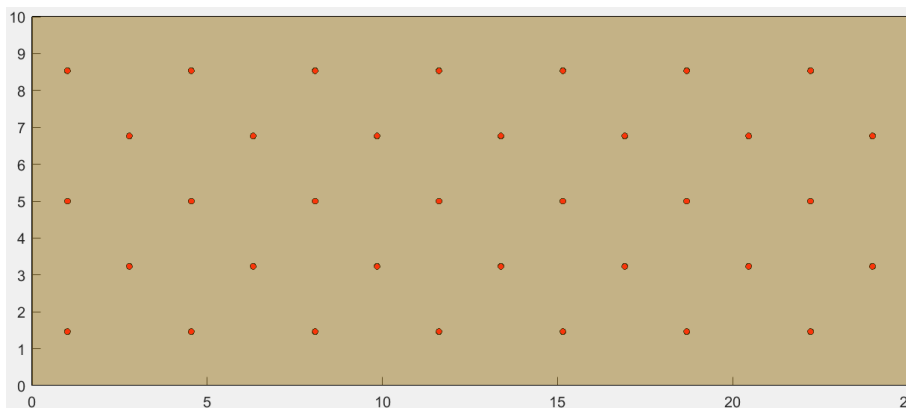


Abbildung 16: Rautenverteilung von Sensorkugeln in Schüttgut

Die beiden Verteilungen unterscheiden sich bezüglich der benötigten Sensoranzahl sowie der Robustheit der Schüttgutüberwachung. Ein erster Vergleich wurde hierzu in einer zweidimensionalen Betrachtung durchgeführt. Am Beispiel eines Flachlagers mit 20 m Länge und 8 m Breite, in das Sensorkugeln mit den beiden Verteilungsmustern in einem Abstand von 3 m eingebracht werden, sind die Unterschiede von benötigter Sensoranzahl und die verfügbaren Kommunikationspartner aufgezeigt. Die Verteilung der Sensorkugeln anhand der beiden Muster ist in Abbildung 17 und Abbildung 18 dargestellt. Nach dem Rechteckmuster werden zur Abdeckung des Lagers 21 Kugeln benötigt, nach dem Rautenmuster lediglich 18 Kugeln.

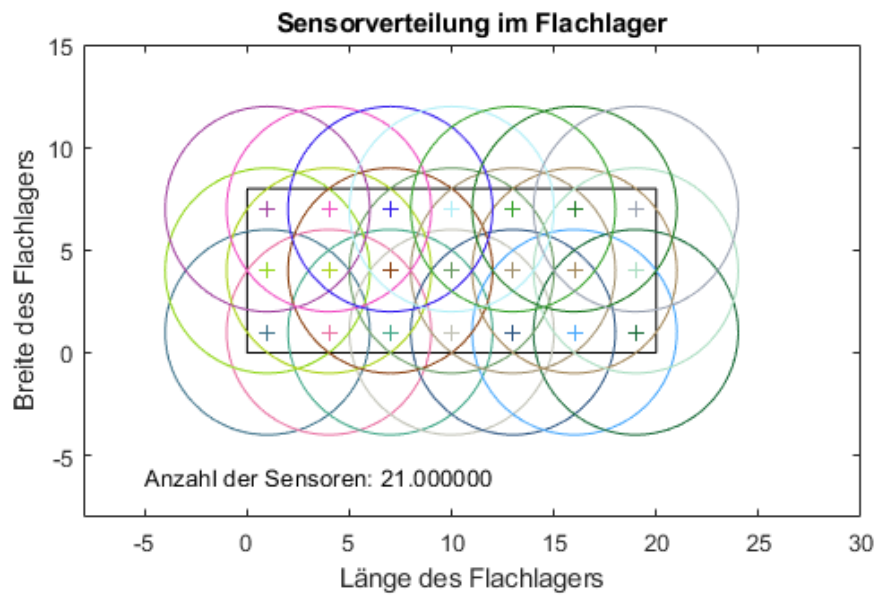


Abbildung 17: Verteilung von Sensorkugeln im Rechteckmuster, Maße Flachlager 20 x 8 m, Abstand Kugeln 3 m

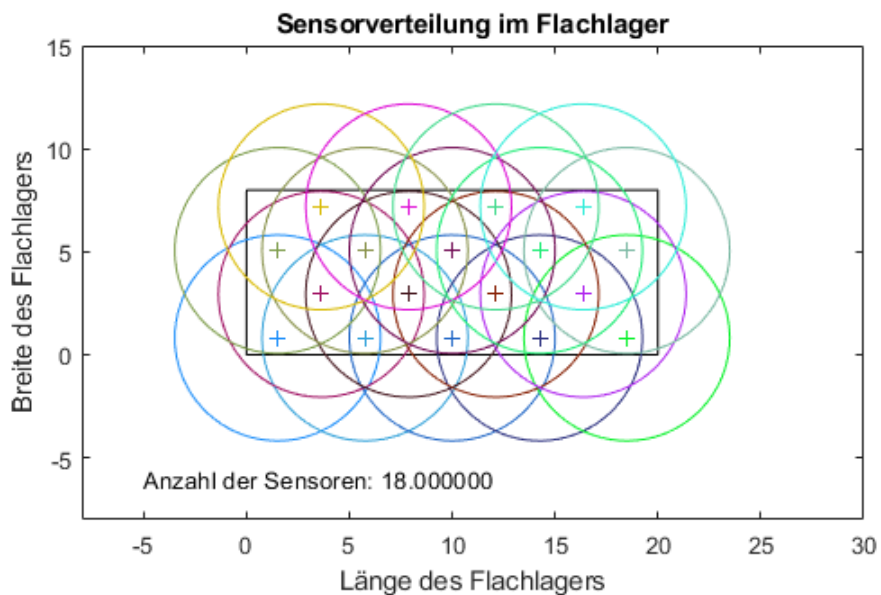


Abbildung 18: Verteilung von Sensorkugeln im Rautenmuster, Maße Flachlager 20 x 8 m, Abstand Kugeln 3 m

Gleichzeitig lässt sich eine Aussage über die Robustheit des Kommunikationsnetzwerkes machen, wenn für jede Sensorkugel die Anzahl an weiteren Kugeln in Reichweite bestimmt wird. Je größer dieser Wert ist, desto robuster ist das Netzwerk gegenüber dem Ausfall von Geräten. Die ermittelten Werte sind als Histogramme in Abbildung 19 gezeigt. Die Position der Histogrammbalken zeigt die Anzahl an Kommunikationspartnern an, die Höhe steht für die Menge an Kugeln mit einer solchen Anzahl. Aus der Berechnung wird deutlich, dass die Rechteckverteilung zwar mehr Sensorkugeln benötigt, aber die Sensorkugeln in dieser Anordnung tendenziell mehr Nachbarn in Reichweite haben und das Kommunikationsnetzwerk somit robuster ist.

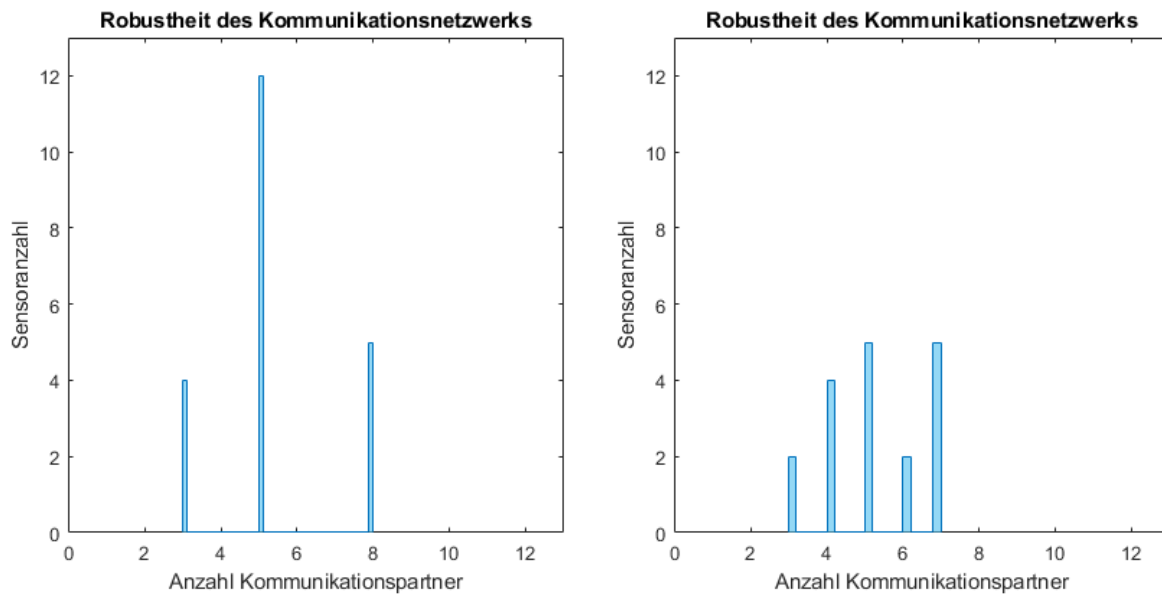


Abbildung 19: Darstellung der Kommunikationspartner nach Verteilung. Links: Rechteckverteilung. Rechts: Rautenverteilung.

Die Robustheit der drahtlosen Kommunikation wurde auf Basis der beiden Verteilungen genauer untersucht. Das grundlegende Ziel ist, dass jede Sensorkugel möglichst viele andere Sensorkugeln in Reichweite hat, so dass eine große Zahl an Querverbindungen möglich ist. Theoretisch lässt sich mit ungünstig platzierten Geräten ein Netzwerk aufspannen, das eher einer Baumstruktur entspricht, wenn nicht ausreichend Querverbindungen aufgespannt werden können. Dies ist für eine robuste Kommunikation zu vermeiden. Entsprechend muss der tatsächliche Abstand zwischen zwei Sensorkugeln geringer als die maximale Reichweite sein und zusätzlich Positionsabweichungen beim Einbringen in das Schüttgut berücksichtigt werden.

Für die Analyse werden die Histogramme in kumulierter Form dargestellt. Der Graph in Abbildung 20 zeigt eine solche kumulierte Darstellung, die aus dem linken Histogramm in Abbildung 19 abgeleitet wurde. Jeder Punkt im Graph stellt die Anzahl an Sensorkugeln dar, die mindestens die auf der Horizontalachse aufgetragene Anzahl von Verbindungen zu Nachbarkugeln hat. Diese angepasste Darstellung erleichtert den Vergleich der Ergebnisse für verschiedene zugrunde gelegte Werte.

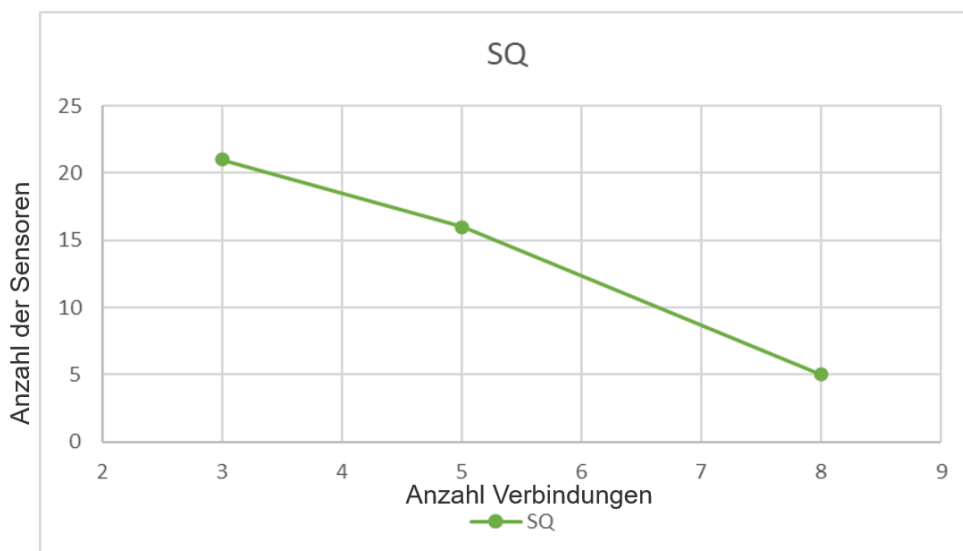


Abbildung 20: Kumulative Darstellung der benachbarten Verbindungen einer Sensorverteilung. SQ steht dabei für eine Verteilung auf Basis des Rechteckmusters.

Für ein Schüttgutlager mit einer Länge von 20 m und einer Breite von 8 m wurden für die Untersuchung der Netzwerkrobustheit die Abstände zwischen den Kugeln variiert und die Anzahl an Sensorkugeln in Reichweite in kumulierter Darstellung entsprechend Abbildung 20 aufgetragen, das Ergebnis ist in Abbildung 21 gezeigt.

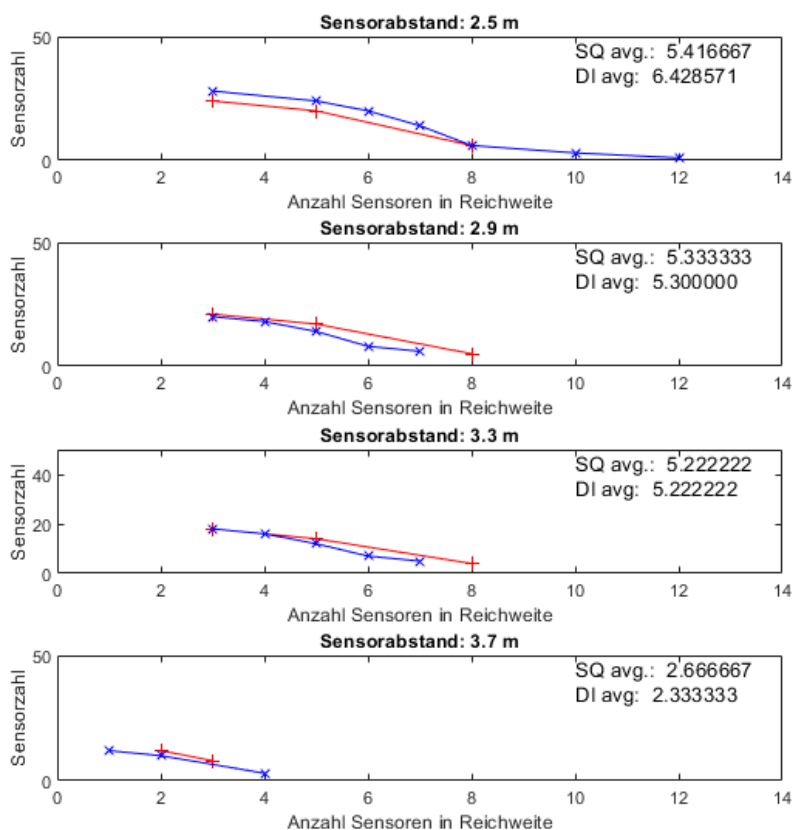


Abbildung 21: Kumulative Darstellung der benachbarten Verbindungen eines Sensors für verschiedene Sensorabstände für Rechteckverteilung (rot) und Rautenverteilung (blau). SQ avg bezeichnet die durchschnittliche Verbindungszahl für die Rechteckverteilung, DI avg bezeichnet die durchschnittliche Verbindungszahl für die Rautenverteilung.

Die Simulation verdeutlicht, wie mit zunehmendem Kugelabstand die Mindestzahl an Verbindungen abnimmt. Bei einem Abstand von 3,7 m treten in der Rautenverteilung bereits Kugeln auf, die nur Verbindung zu einer einzigen anderen Kugel haben. Ein Ausfall einer solchen Kugel führt in diesem Fall dazu, dass sofort eine zweite Kugel vom Rest des Netzwerks abgeschnitten ist, die ansonsten noch voll funktionstüchtig wäre. Dieser Fall ist für die Robustheit des Systems zu vermeiden. Die Werte für geringere Kugelabstände weisen in jedem Fall mindestens drei Querverbindungen pro Kugel zu. Aus den Simulationsergebnissen wurde die Empfehlung abgeleitet, mit dem Kugelabstand 67% der Funkreichweite nicht zu überschreiten.

Die Variation der Länge des Schüttgutlagers zwischen 10 m und 100 m bei konstanter Breite von 12 m und einem Kugelabstand von 3 m zeigt die Skalierung der Sensoranzahl je Verteilungsmuster abhängig von der Schüttgutmenge (Abbildung 22). Die Simulation bestätigt die vorherigen Ergebnisse, dass die Rechteckverteilung grundsätzlich mehr Sensorkugeln benötigt, um eine gegebene Schüttgutmenge zu überwachen, darüber hinaus steigt dieser Bedarf auch schneller.

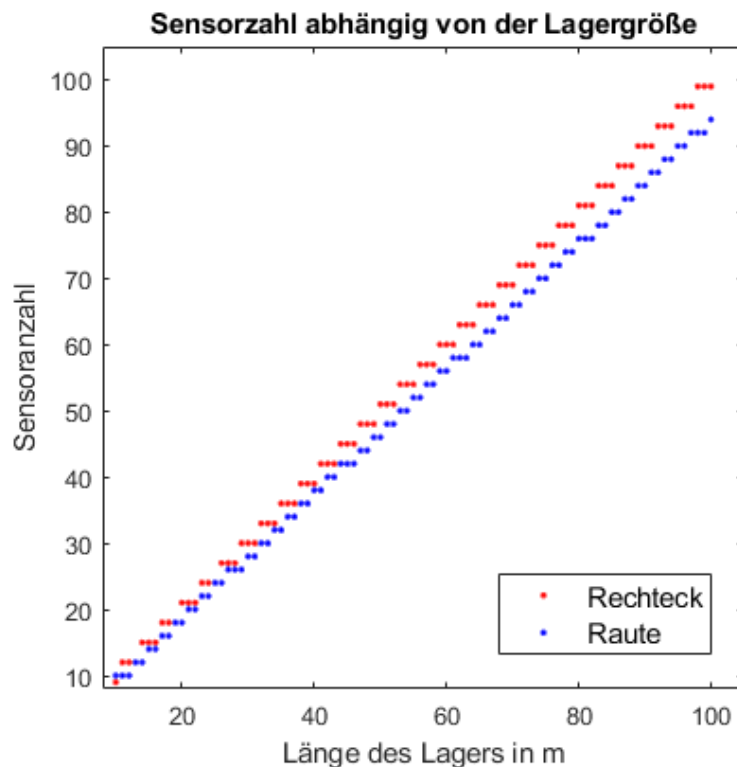


Abbildung 22: Skalierung der Anzahl an benötigten Sensorkugeln mit der Länge des Schüttgutlagers

Der Unterschied zwischen den beiden Verteilungen bezüglich der Robustheit der Schüttgutüberwachung wurde in einer zusätzlichen Analyse näher untersucht. Hierzu wird eine Schicht des gelagerten Schüttguts in ein engmaschiges Netz eingeteilt und für eine gegebene Sensorkugelverteilung für jeden Punkt des Netzes der Abstand zur nächstgelegenen Sensorkugelverteilung berechnet. Das Resultat lässt sich als sogenannte Heatmap darstellen, in der bestimmten Wertebereichen bestimmte Farben zugeordnet sind. Die berechneten Heatmaps sind in Abbildung 23 und Abbildung 24 gezeigt. Je kälter die Farbe eines Punktes, desto näher ist der Punkt einer Sensorkugel, je wärmer desto weiter entfernt.

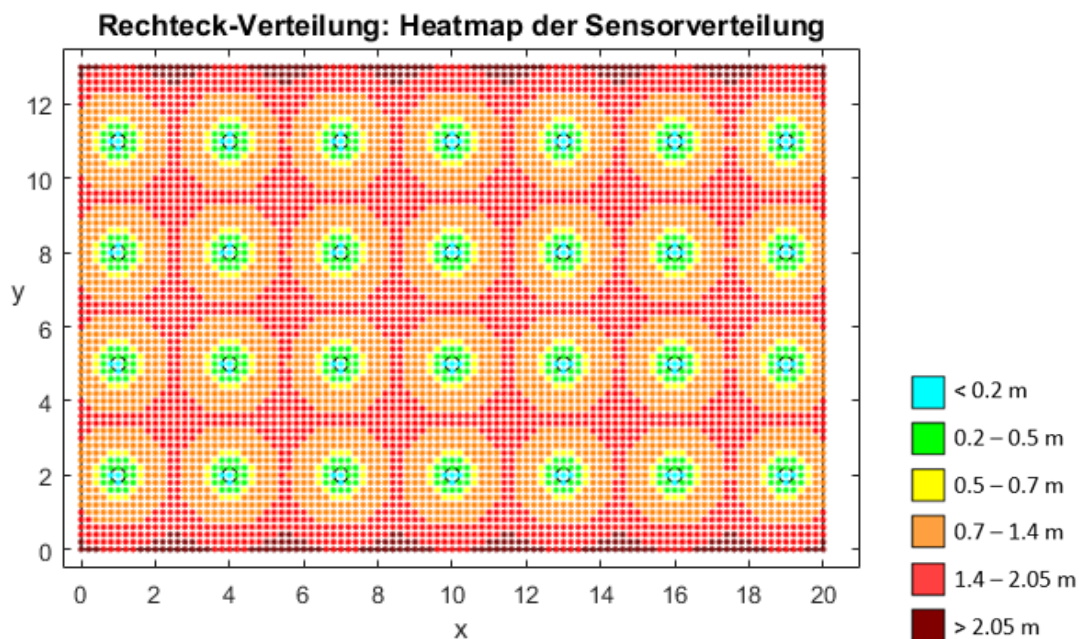


Abbildung 23: Abstand zur nächstgelegenen Sensorkugel bei Rechteckverteilung (28 Sensorkugeln)

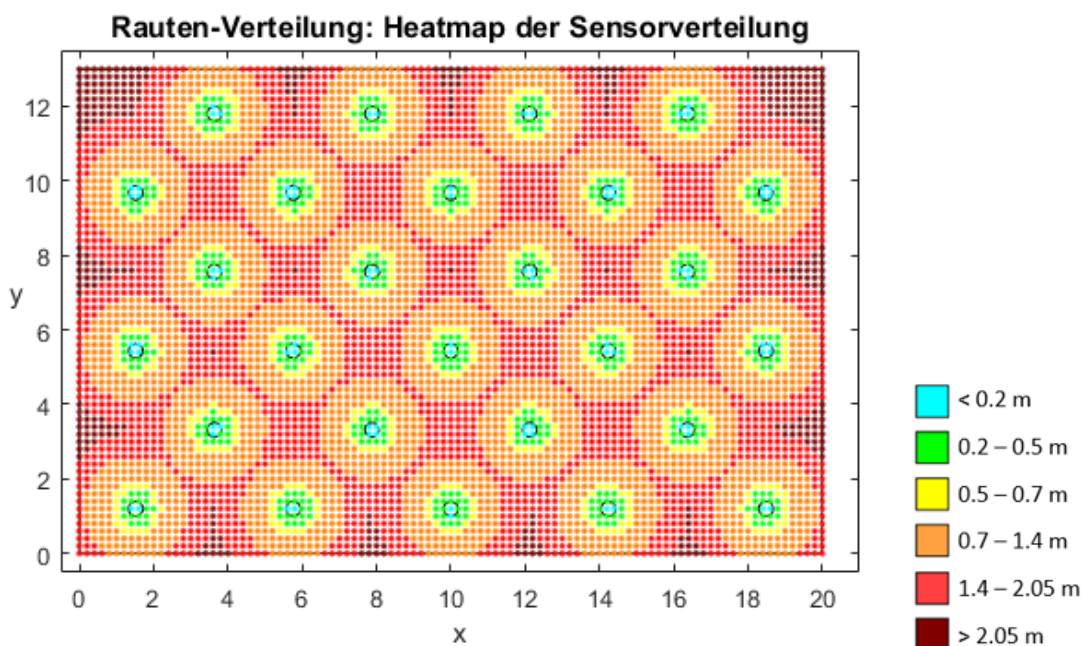


Abbildung 24: Abstand zur nächstgelegenen Sensorkugel bei Rautenverteilung (27 Sensorkugeln)

An den Darstellungen lässt sich ablesen, dass die Rautenverteilung neben der zuvor festgestellten reduzierten Robustheit bezüglich des Kommunikationsnetzwerkes auch eine reduzierte Messabdeckung aufweist. So treten im Vergleich mit der Rechteckverteilung mehrere große Bereiche auf, in denen das Schüttgut über 2 Meter von der nächsten Sensorkugel entfernt ist. In solchen Bereichen kann sich ein mikrobieller Verderb von Getreide oder ein Schädlingsbefall wesentlich länger ausbreiten und entsprechend größere Mengen Getreide zerstören, bis eine Sensorkugel ein entsprechendes Verhalten der Messwerte registriert.

Robustheit der Schüttgutüberwachung

Zusätzlich zum Vergleich der beiden Verteilungsmuster wurde die Robustheit der Schüttgutüberwachung auch in Hinsicht auf die Kugelabstände untersucht. In diesen Untersuchungen wird die Rechteckverteilung an einem beispielhaften Flachlager mit den Abmaßen 20 x 10 x 6 m betrachtet. Ein solches Flachlager kann ca. 1.700 t Weizen aufnehmen und je nach Abstand der eingebrachten Sensorkugeln variiert die Zahl der benötigten Kugeln sowie die Qualität der Schüttgutüberwachung deutlich. Werden die Sensorkugeln mit einem Abstand zueinander von 2 m verteilt, so sind 150 Kugeln erforderlich. Bei einem Abstand von 4 m genügen lediglich 30 Kugeln. Die dreidimensionale Positionierung der beiden Verteilungen ist in Abbildung 25 dargestellt.

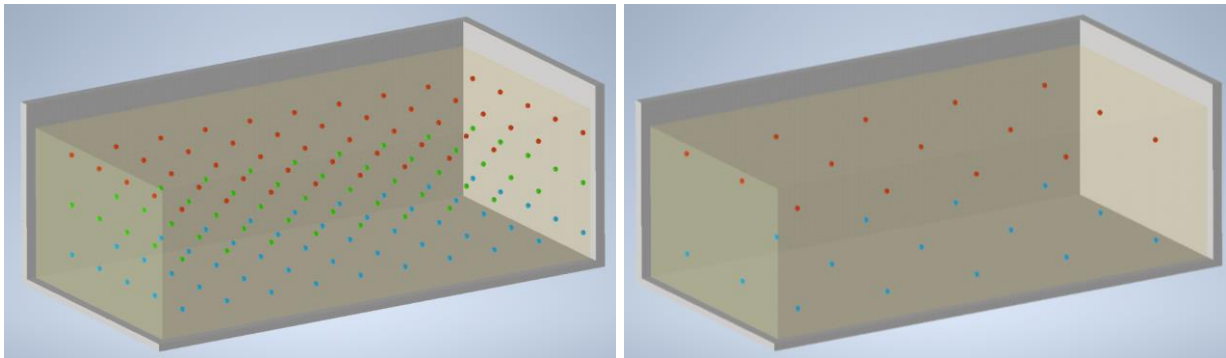


Abbildung 25: Verteilung von Sensorkugeln in Schüttgut mit verschiedenen Kugelabständen. Links: 2 m Abstand, 150 Kugeln. Rechts: 4 m Abstand, 30 Kugeln.

Aufbauend auf den beiden Verteilungen lässt sich wie zuvor eine Heatmap berechnen, die die Abstände einer diskreten Anzahl von Punkten einer Schüttgutschicht zur nächstgelegenen Sensorkugel graphisch darstellt. Für die Abstände 2 m und 4 m sind diese Heatmaps in Abbildung 26 und Abbildung 27 gezeigt. Die stark grobmaschige Abdeckung des Schüttguts bei einem Kugelabstand von 4 m wird durch die großen dunkelrot gefärbten Bereiche mit Abständen von Schüttgut zur nächstgelegenen Kugel über 2 m besonders deutlich. Anhand der Ergebnisse lässt sich zudem zurückschließen auf die Menge an Getreide, die bei einer gegebenen Kugelverteilung im schlimmsten Fall verdirbt, bis das verdorbene Volumen eine Sensorkugel erreicht. Mit der Annahme, dass sich ein mikrobieller Verderb von einem Startpunkt kugelförmig in alle Richtungen ausbildet, und dieser Startpunkt am ungünstigsten Punkt zwischen den Sensorkugeln liegt, so lässt sich für jede Sensorverteilung das größtmögliche Kugelvolumen berechnen, das zwischen die Sensorkugeln passt. Unter Einbezug der Dichte von Weizen kann so der im schlimmsten Fall zu erwartende Getreideverlust für eine gegebene Sensorverteilung ermittelt werden.

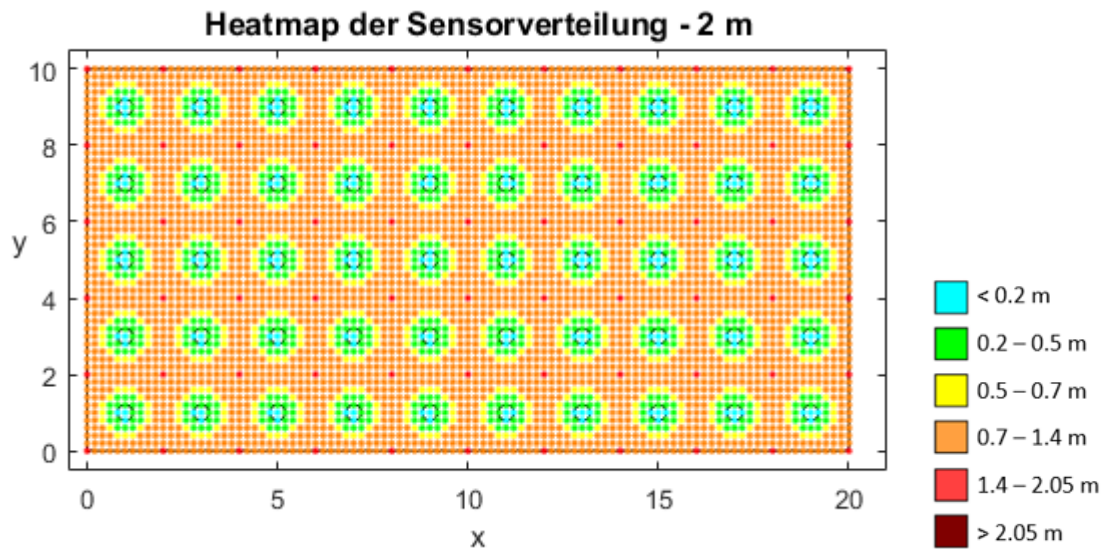


Abbildung 26: Abstand zur nächstgelegenen Sensorkugel bei 2 m Kugelabstand

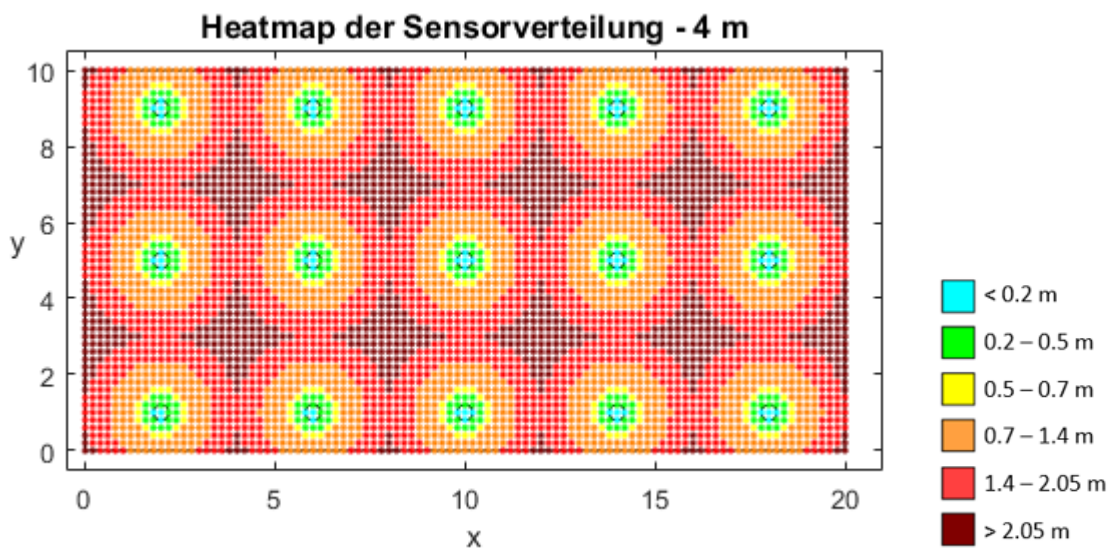


Abbildung 27: Abstand zur nächstgelegenen Sensorkugel bei 4 m Kugelabstand

Für verschiedene Kugelabstände ist dieser in Abbildung 28 gezeigt, dabei bilden die Balken den Getreideverlust ab, die Punkte des dunkelblauen Graphen die zugehörige Kugelzahl für ein Flachlager mit den Maßen 20 x 10 x 6 m. Es wird deutlich, dass ab einem Abstand von 3,4 m zwischen den Sensorkugeln kaum noch ein betriebswirtschaftlicher Vorteil in Form von geringerem Kugelbedarf entsteht, während die Menge an potentiell verderbendem Weizen weiter ansteigt.

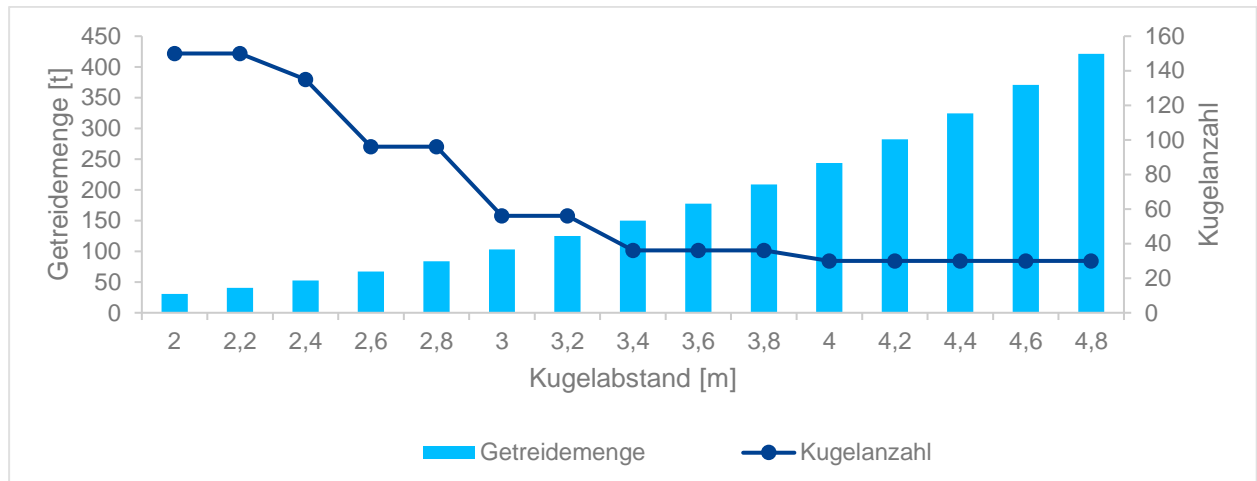


Abbildung 28: Abdeckung des überwachten Schüttguts durch Sensorkugeln.

Einfluss der Einbringung auf das Kommunikationsnetzwerk

Abschließend wurde untersucht, in welchem Ausmaß die Robustheit des Kommunikationsnetzwerkes durch unvermeidbare Abweichungen beim Einbringen der Sensorkugeln beeinflusst wird. Die durch den Algorithmus berechneten Positionen sind in der Realität nicht genau zu erreichen, Abweichungen beispielsweise durch die Bewegung der Sensorkugeln im Schüttgutstrom oder beim Einbringen in das Schüttgut werden zu einer abweichenden Position führen. Der Einfluss wurde exemplarisch an einem Schüttgutlager mit den Maßen 20 x 10 x 6 m simuliert. Die Kugeln wurden mit einem Zielabstand von 3 m platziert und als Referenzwert ein Histogramm der verfügbaren Verbindungen ermittelt. Im Vergleich dazu wird angenommen, dass die Sensorelemente in der Realität in einer Kugel mit Radius 0,5 m um ihre Zielposition landen. Das aktualisierte Histogramm, das aus den vergrößerten Abständen resultiert, ist zusammen mit den Referenzwerten in Abbildung 29 dargestellt.

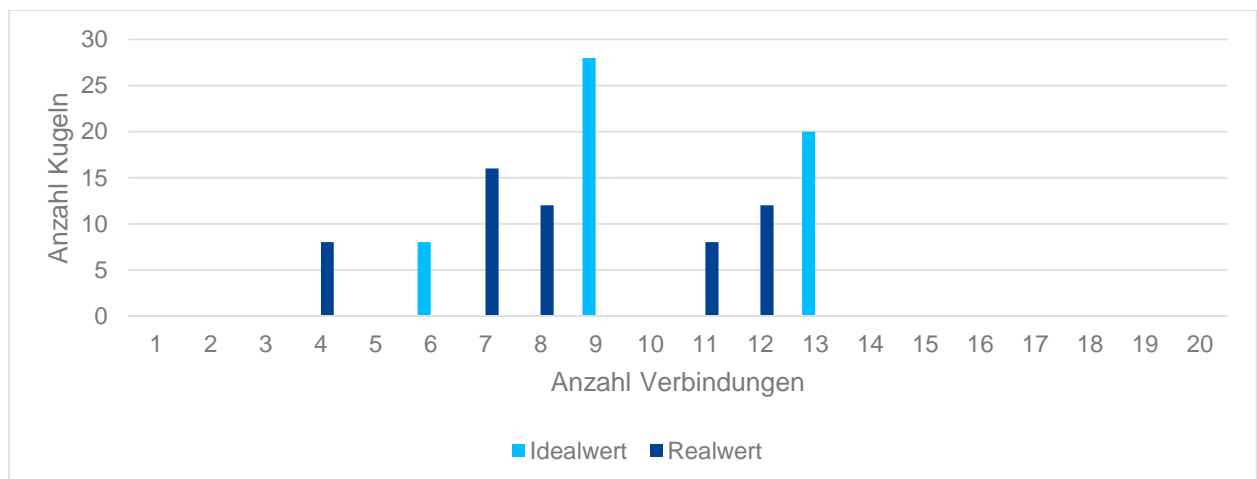


Abbildung 29: Vergleich der Verbindungszahl bei idealer Kugeleinbringung und bei einer Positionsabweichung von 0,5 m

Im Mittel ist ein Verlust von 2 Verbindungen pro Sensorkugel festzustellen, was bei der Auswahl von Einbringungsparametern berücksichtigt werden muss.

AP 5 – Entwicklung einer automatisierten Aufgabeeinrichtung

Das Arbeitspaket 5 beschäftigte sich mit der Entwicklung einer automatisierten Vorrichtung für die Einbringung der Sensorkugeln in das Schüttgut. Im Laufe der Projektbearbeitung ist unter anderem im Gespräch mit den Mitgliedern aus dem projektbegleitenden Ausschuss, deutlich geworden, dass die technische Umsetzung der Einbringung der Sensorkugeln in das Schüttgut eine der zentralen Herausforderungen darstellt. Darüber hinaus hängt die konkrete Umsetzung der Einbringung auch stark von dem zum Einstapeln des zu überwachenden Schüttguts verwendeten Verfahren ab. Eine allgemeingültige Umsetzung, die sich für jede Form des Einstapelns eignet, ist daher nicht abzusehen.

Als Grundlage für die Entwicklung einer automatisierten Aufgabeeinrichtung wurde zunächst unterschieden zwischen solchen Aufgabekonzepten, die die Sensorkugeln während des Einstapelns gemeinsam mit dem Schüttgut platzieren, und solchen, die nach fertig eingestapeltem Schüttgut die Sensorkugeln gezielt in das Schüttgut einbringen.

Darauf aufbauend wurden verschiedene Einstapeltechniken recherchiert und jeweils geprüft, inwiefern die Einbringung der Sensorkugeln sinnvoller während des Einstapelns oder im Anschluss daran ist.

Ein naheliegender Ansatz, das Schüttgut mit einem Förderband zu einem Schüttkegel aufzuschütten und zu bestimmten Zeitpunkten eine Sensorkugel in den Schüttgutstrom einzubringen, führt dazu, dass die Sensoreinheiten den Schüttkegel hinabrollen und sich auf dem Boden sammeln. Eine eher in der Lagerung von Erzen oder Kohle verbreitete Methode ist das Windrowing, bei der mit einem beweglichen Förderband Reihen aus kleineren Schüttkegeln nebeneinandergelegt werden (Abbildung 30).

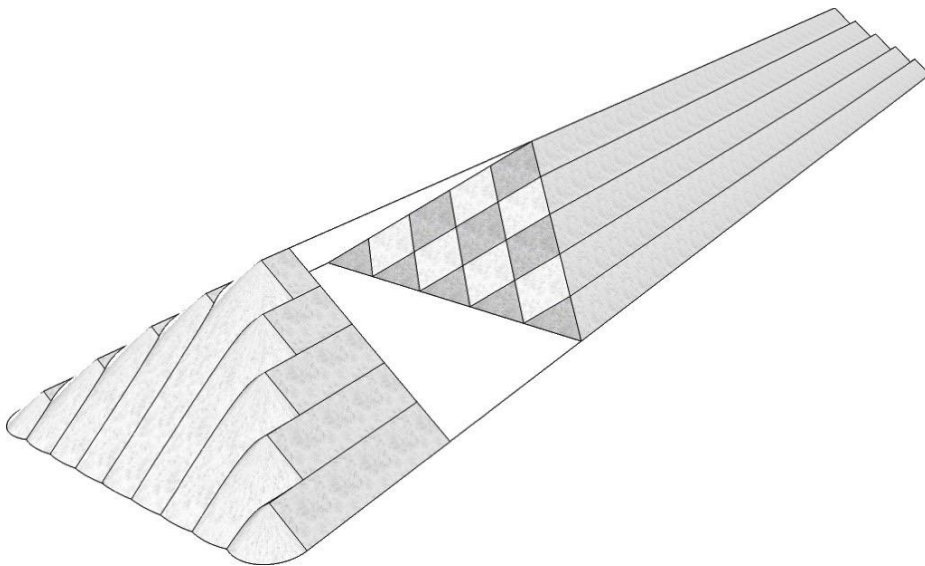


Abbildung 30: Aufschüttung durch Windrowing³

Dieses Prinzip findet wegen des finanziellen und technischen Aufwands keine Anwendung bei Getreide, allerdings werden auf dem Markt hochautomatisierte Schüttsysteme für

³ Bildquelle: news.bulk-online; https://news.bulk-online.com/bulk-solids-handling-archive/raw-material-storage-and-blending-solutions-parameters-for-selecting-the-best-available-solution.html/attachment/bsh2012_03_02_wintz_04d_img

Getreideflachlager angeboten, die mit verfahrbaren Förderbändern eine dem Windrowing ähnliche Einstapelung ermöglichen. Konzepte, die das Einbringen der Sensorkugeln während des Einstapelns zum Ziel haben, müssen diese Eigenheiten berücksichtigen.

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurden zwei Konzepte von Aufgabeeinrichtungen für Sensorkugeln in das Schüttgut entwickelt, ein manuelles für kleinere Lagerstätten und eines zur Einbindung in automatisierte Lagerstätten.

Das Konzept für die manuelle Einbringung sieht ein Einbringen der Sensorkugeln nach Abschluss des Einstapelns vor, indem die Sensorkugeln mit einer Vorrichtung (Abbildung 31) im Schüttgut an ihre Position geschoben werden. Das Konzept lässt sich zudem auf das Einstapeln mit Radladern übertragen, indem die Vorrichtung an der Schaufel oder dem Getreideschieber des Radladers befestigt wird und nach dem Aufschieben des Getreides eine Sensorkugel darin absetzt. Mit diesem Prinzip wurden die Sensorkugeln auch während der Erprobung eingebracht.

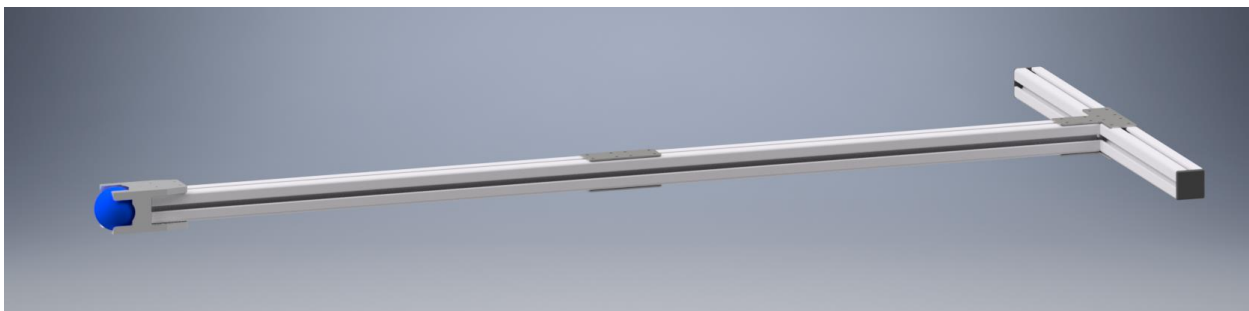


Abbildung 31: Vorrichtung zur manuellen Einbringung der Sensorkugeln nach dem Einstapeln

Das Konzept für die automatisierte Einbringung sieht dagegen eine Einbringung während des Einstapelns vor, indem Sensorkugeln dem Schüttgutstrom hinzugefügt werden. Das System besteht aus einem Behälter zum Vorhalten von einer ausreichenden Anzahl Kugeln sowie einer Vereinzelungseinheit, die zum geeigneten Zeitpunkt genau eine einzige Kugel ausgibt. Der Ansatz, kugelförmige Objekte zu speichern und bei Bedarf abzugeben, wird bereits bei automatischen Saftpresen verwendet. Eine Herausforderung dabei ist, möglichst viele Kugeln platzsparend unterzubringen, ohne dass diese dabei verklemmen und nicht mehr abgegeben werden können.

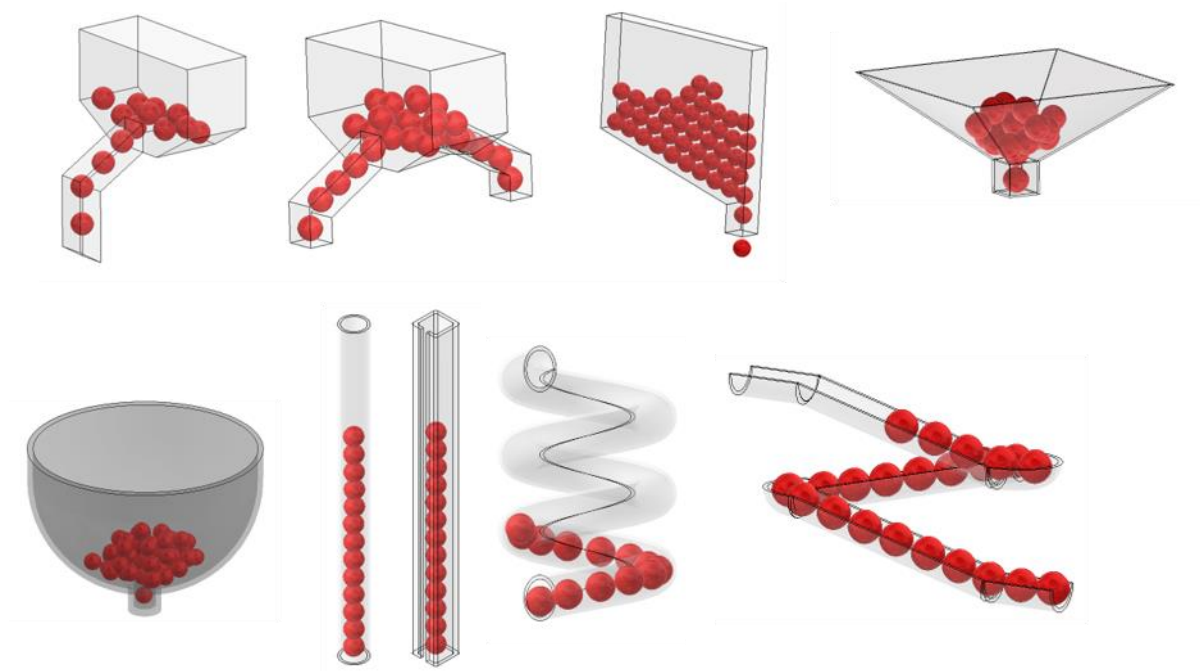


Abbildung 32: Untersuchte Formen für die Aufbewahrung der Sensorkugeln in der Aufbaueinrichtung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene Formen von Kugelspeichern bewertet (Abbildung 32), darunter solche in denen die Kugeln gerichtet hintereinander aufbewahrt werden und solche in denen sie lose in einem Behälter liegen. Aufgrund der kompakten Form wird in dem entwickelten System ein Korb zur losen Aufbewahrung verwendet, in dem durch Bewegung der Sensorkugeln das Verklemmen verhindert wird, der Korb bietet Platz für ca. 150 Sensorkugeln. Zur Vereinzelung dient ein Rotor am Auslass der Vorrichtung, der bei jeder Viertelumdrehung genau eine Sensorkugel auslässt. Das entwickelte System ist in Abbildung 33 gezeigt.



Abbildung 33: System zur automatisierten Einbringung der Sensorkugeln während des Einstapelns

AP 6 – Erarbeitung von Entnahmekonzepten

Ergänzend zu der Entwicklung und technischen Umsetzung von Einbringungskonzepten in AP 4 und 5 wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes Konzepte für die Entnahme der Sensorkugeln aus dem Schüttgut erarbeitet.

Grundsätzlich ist die Entnahme der Kugeln weniger herausfordernd als die Einbringung, da keine Positionierungsanforderungen mehr bestehen. Da die Sensorkugeln wesentlich größer als Getreidekörner wie Weizen, Mais oder Raps sind, kann die Entnahmeeinrichtung über ein Sieb kostengünstig und zuverlässig umgesetzt werden. Diese Umsetzung lässt sich mit verbreiteten Methoden zum Ausstapeln des Schüttguts kombinieren, beispielsweise vor dem Einlass verschiedenster Förderanlagen wie Schneckenförderer oder auch beim Ausstapeln mit Radladern. Im Rahmen der Erprobung des Experimentalprototypen wurde dies am verwendeten Flachlager ebenfalls erprobt, da der Einlass des Schneckenförderers durch ein entsprechendes Gitter abgedeckt ist. Dessen Wirkung durch den deutlichen Größenunterschied zwischen Weizenkörnern und Sensorkugeln ist in Abbildung 34 zu sehen.

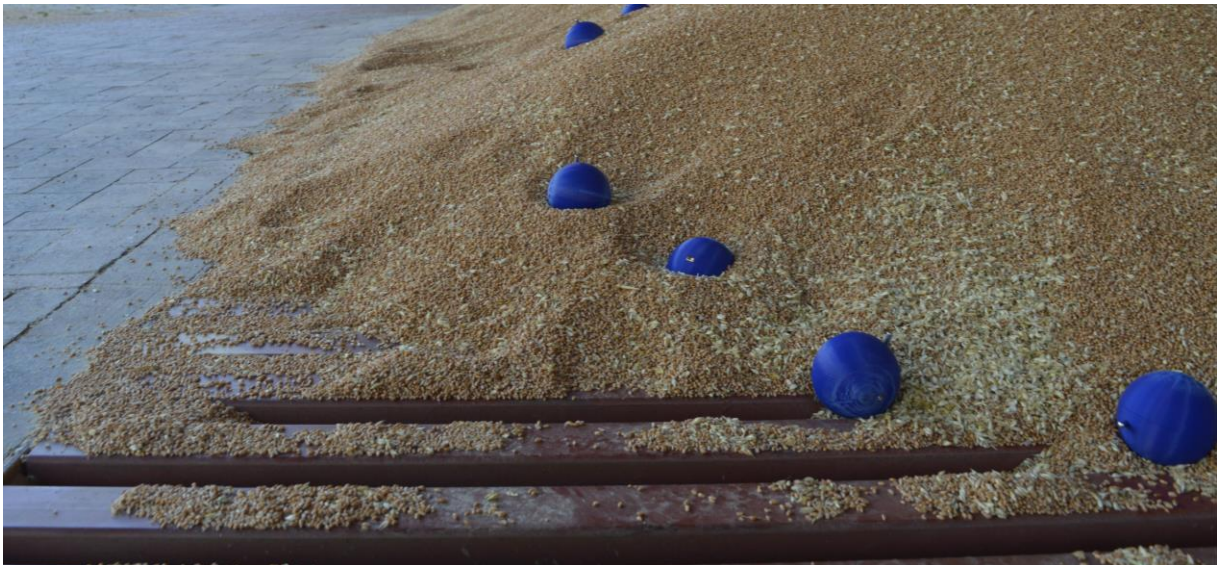


Abbildung 34: Trennung der Sensorkugeln vom Schüttgut durch Gitter

AP 7 – Aufbau eines Demonstratorsystems

Der Aufbau eines Demonstratorsystems zur Erprobung und die Untersuchung der entwickelten Konzepte waren Inhalt des siebten Arbeitspaketes. Während der Bearbeitung des Projektes wurde allerdings deutlich, dass zum einen die Entwicklung der Sensoreinheiten eine intensivere Betrachtung erfordert, zum anderen, dass sich nicht alle Schüttgutlagerstätten durch ein einzelnes Einbringungskonzept abdecken lassen. Daher wurde der Entwicklungsaufwand im Verlauf des Projektes stärker auf die Sensoreinheiten selber fokussiert. Zudem ist der Aufbau eines automatisierten Einbringungssystems mit hohen Kosten verbunden, weshalb die automatisierten Ansätze hauptsächlich theoretisch untersucht wurden, in der Erprobung wurde mit manuellen Ansätzen gearbeitet. Der Aufbau eines Demonstrators zur Erprobung der automatisierten Einbringung und Entnahme wurde daher nicht durchgeführt.

Verwendung der Zuwendung

Insgesamt wurde das Projekt im Berichtszeitraum in 24 PM durch wissenschaftlich-technische Mitarbeiter bearbeitet, diese wurden dabei durch studentische Hilfskräfte in insgesamt 7 PM unterstützt.

Im Rahmen des Projektes wurden keine Geräte beschafft und es gab keine Ausgaben für die Leistungen Dritter. Die beschafften Elektronikkomponenten und Materialien für den Experimentalprototypen und die manuelle Eingabevorrichtung wurden über die Pauschale für Sonstige Ausgaben sowie mit Eigenmitteln finanziert.

Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren für die Erzielung der Projektziele notwendig und angemessen. So konnten die im Arbeitsplan aufgeführten Arbeitspakete zur Konzeptionierung, Entwicklung und Erprobung des Experimentalprototypen sowie die Konzeptionierung von Einbringung und Entnahme durch die geleistete Arbeit vollumfänglich erfüllt werden und das Projekt somit erfolgreich abgeschlossen werden.

Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

Durch die Beteiligung und den erfolgreichen Abschluss des Projektes kann das Institut für Fördertechnik und Logistik als ausführende Forschungsstelle seine Reputation als maschinenbauliche Forschungseinrichtung im Bereich der Fördertechnik, insbesondere der Schüttguttechnik, steigern. Damit lassen sich für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte weitere Partner aus Forschung und Industrie gewinnen. Darüber hinaus konnten auch Studierende für die maschinenbaulichen Teildisziplinen der Fördertechnik und der Schüttguttechnik begeistert werden, die sowohl als studentische Hilfskräfte als auch in Abschlussarbeiten an Detailfragestellungen des Projektes gearbeitet haben.

Der wirtschaftliche Nutzen wird vor allem durch das übergeordnete Ziel des Projektes, die Vermeidung von Verlusten bei der Getreidelagerung, deutlich. Allein bei Weizen wird von Verlusten von ca. 0,9% durch mikrobiellen Verderb und ca. 2% durch Schädlingsbefall ausgegangen.⁴ Auf Basis der Getreideernte 2015 von 49 Mio. Tonnen⁵ und des durchschnittlichen Getreidepreises von 157€ pro Tonne⁶ verursachte dies 2015 einen Schaden von 225 Mio. €. Diese Zahlen verdeutlichen zum einen den gesamtwirtschaftlichen Nutzen, den das in diesem Projekt entwickelte System potenziell erzielen kann, wenn dadurch die Verluste von Getreide in Lagerstätten reduziert werden können. Zum anderen bietet dieser Umstand auch ein entsprechendes Potenzial für Unternehmen, durch eine Weiterentwicklung des Experimentalprototypen zur Marktreife, einen Markt zu erschließen und dadurch Arbeitsplätze zu schaffen und Einnahmen zu generieren.

⁴ Peter, G.; Kuhner, H.; Haß, M.; Banse, M.; Roser, S.; Trierweiler, B.; Adler, C.: *Einschätzung der pflanzlichen Lebensmittelverluste im Bereich der landwirtschaftlichen Urproduktion. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)*. Braunschweig, 2013

⁵ Eurostat: *Agriculture, forestry and fishery statistics*. Luxemburg 2016

⁶ Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft: *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland*. Ostbevern 2017

Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Der Ergebnistransfer konnte während der Projektlaufzeit bisher nur in eingeschränktem Umfang erfolgen. Fachmessen und Kongresse, auf denen die Gelegenheit zur Vorstellung des Konzepts an ein breiteres Publikum möglich gewesen wäre, konnten pandemiebedingt nur eingeschränkt stattfinden. Da die Vorversuche zum einen die Notwendigkeit einer Anpassung des verwendeten Funkstandards und der Sensorik aufgezeigt haben, zum anderen die aussagekräftigeren, umfangreichen Experimente in Getreide noch ausstanden, wurde bis zum Abschluss dieser Experimente von einer Publikation in Fachmedien abgesehen. Allerdings haben die Treffen des projektbegleitenden Ausschusses ein großes Interesse der Industrie an dem Projekt aufgezeigt. Das Projekt wurde zudem auf der LogiMAT 2022 am Stand des IFT vorgestellt. Im Abschlusstreffen wurde vonseiten eines Mitgliedes des projektbegleitenden Ausschusses das Interesse zu einer Weiterentwicklung des Experimentalprototypen durch sein Unternehmen kommuniziert. Es ist beabsichtigt, diese Weiterentwicklung in Form eines ZIM-Projektes umzusetzen, Gespräche mit dem Unternehmen zur Konsortiumsbindung finden aktuell statt. Das IFT hat bereits eine Reihe von ZIM-Projekten erfolgreich beantragt und durchgeführt und mit verschiedensten Partnern erfolgreich abschließen können. Die Reputation des IFT als universitäre Forschungseinrichtung im Bereich der Fördertechnik kann hier bei der Suche nach weiteren Unternehmen für das FuE-Kooperationsprojekt helfen.

Darüber hinaus sollen die Ergebnisse im Rahmen der Fachtagung Schüttgutförderertechnik 2023 als Beitrag veröffentlicht werden sowie auf dem Stand des IFT auf der Messe LogiMAT 2023 präsentiert werden.

Das Abschlusstreffen des projektbegleitenden Ausschusses konnte erst nach der Projektlaufzeit stattfinden. Grund dafür war die Verzögerung der erforderlichen abschließenden Erprobung des Experimentalprototypen. Aufgrund der aktuellen globalen Getreidekrise war eine Erprobung in den Lagerstätten großer Landhändler nicht möglich, da das Risiko einer Kontamination von entsprechend großen Getreidemengen bei strukturellem Versagen der Sensorkugeln aus ethisch-sozialen Gesichtspunkten nicht vertretbar ist. Insofern wurde die Erprobung bei einem Landwirt durchgeführt, was zeitlich allerdings an den Erntebeginn 2022 Mitte Juli gebunden war. Für ein Zusammentreffen des projektbegleitenden Ausschusses ließ sich im Spätsommer 2022 kein gemeinsamer Termin mehr finden. Aufgrund dessen wurde das Abschlusstreffen erst am 05.10.2022 durchgeführt.

Transfermaßnahmen während Projektlaufzeit	Ziel	Turnus	Stand 21.11.2022
Sitzungen eines projektbegleitenden Ausschusses	Kickoff, Diskussion Zwischenergebnisse sowie Abstimmung des Vorgehens, Final (Projektstart, ein Zwischentreffen, Projektende)	3x während Projektlaufzeit	Kickoff: 25.06.2021 Zwischentreffen: 17.11.2021 Abschlusstreffen: 05.10.2022
Vergabe von Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten zu einzelnen Schwerpunkten des Forschungsprojektes	Einbindung der Studenten in die Thematik, Bearbeitung zusätzlicher Fragestellungen	3x während Projektlaufzeit	1. Ziegler, T.: Software Engineering für IoT-Sensormodule und Entwicklung eines dazugehörigen Evaluierungssystems. Masterarbeit 2. Geywitz, J.: Design eines Systems zum Handling von IoT-Sensormodulen mit drahtloser Energieübertragung. Bachelorarbeit. 3. Totorika, I.: Concept and design of a positioning system for sensors in grain storages. Masterarbeit
Transfermaßnahmen nach Projektlaufzeit	Ziel	Turnus	Stand 21.11.2022
Veranschaulichung der Projektergebnisse gegenüber Studenten in Lehrveranstaltungen der Forschungsstelle	Inhaltliche Bereicherung der Lehrveranstaltung Praktikumsversuch Schüttgutanlage	ab Q3/2022	Einbindung des Forschungsprojektes in Lehrveranstaltungen des IFT im Rahmen des Allgemeinen Praktikums Maschinenbau an der Universität Stuttgart im Versuch „Schüttgutanlage“, sobald Präsenzlehre wieder möglich ist
Publikation der Projektergebnisse auf einer Fachtagung	Publikation der Projektergebnisse, dabei Fokus auf wissenschaftlicher Herangehensweise	Q3/2023	Eine abschließende und wissenschaftlich publizierte Veröffentlichung findet nach Abschluss des Forschungsprojektes statt. Geplant ist hier die Publikation auf der Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023.
Präsentation auf einer Messe	Publikation der für die Praxis interessantesten Projektaspekte	Q2/2023	Die Ergebnisse des Projektes werden einer großen Zahl von interessierten Firmen auf der Logistikmesse LogiMAT 2023 vorgestellt.

Forschungsstelle	Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT), Universität Stuttgart
Adresse	Holzgartenstr. 15 B 70174 Stuttgart
Telefon	0711 / 685 - 83770
Fax	0711 / 685 - 83769
Leiter der Forschungsstelle	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz
Telefon	0711 / 685 - 83770
Fax	0711 / 685 - 83769
E-Mail	robert.schulz@uni-stuttgart.de
Projektleiter	Markus Schröppel
Telefon	0711 / 685 - 84256
E-Mail	Markus.schroepfel@uni-stuttgart.de

