Sachbericht für das Verbundprojekt „Entwicklung einer intelligenten Sensorplattform zur Erntemengenerfassung und zum Management von Silagen bis zur Marktreife (SilageControl)“ - Teilprojekt B

Förderkennzeichen (FKZ): 281DT02B21
Geschäftszeichen: 313-03.03-281DT02B21

Prof. Dr. Wilhelm Hasselbring, Christian-Albrechts-Universität Kiel (CAU)

Teil I Kurzbericht

Im Projekt SilageControl ging es um die Etablierung eines Systems zur Erntemengenerfassung von Silage. Silagen werden überwiegend in Fahrsiloanlagen gelagert. Sensorik und digitale Methoden zur Prozessoptimierung werden bisher überwiegend im Bereich der Erntetechnik eingesetzt. Über die Verdichtung der Walzfahrzeuge wurden in der Vergangenheit keine Daten erhoben. Ziel des Projektes war mit der Entwicklung von SilageControl Daten über die Verdichtung des Walzschleppers zu erfassen.

Ein weiteres Ziel war die automatisierte Datenerhebung des Futterverbrauchs während der Silo-Entnahme. Hierfür wird das Entnahmefahrzeug mit ***SilageControl*** ausgestattet und bei jeder Entnahme die Lagerstätte sowie die Menge automatisch protokolliert. Anhand dieser Daten lassen sich die Entnahmen den einzelnen Silagelagerstätten des Betriebes zuordnen. Zusätzlich wird bei jeder Entnahme das verbleibende Volumen berechnet. Aus den ermittelten Tagesentnahmen und damit Verbräuchen lässt sich die zeitliche Reichweite und damit verbunden die verbleibende Nutzungsdauer der Futtervorräte bestimmen.

Zur Erfassung der Silagevorräte gibt es bisher drei Verfahren:

1. Die Brücken- oder Überfahrwaage ist die bekannteste Methode, um die Frischmasse des Ernteguts zu bestimmen und sie schlagbezogen zuzuordnen.
2. Eine weitere Möglichkeit ist die Erfassung am Feldhäcksler. Hierbei wird der Frischmasseertrag durch Volumenstrommessung am Einzug bestimmt. Zusätzlich kann der Trockenmassegehalt je nach Fabrikat mittels Nah-Infrarot-Spektroskopie (NIRS) oder elektrischer Leitfähigkeitsmessung ermittelt werden.
3. Schließlich gibt es die manuelle Schätzung des Volumens des Silagestapels. Dabei werden Silagestapel manuell vermessen und die Silageverdichtung anhand von Tabellenwerten oder Proben bestimmt.

Die drei Verfahren werden nur zu einem geringen Maß in der landwirtschaftlichen Praxis eingesetzt. Gründe dafür sind Investitionskosten, Ungenauigkeit und Arbeitsaufwand, sodass ein einfacheres und praktikableres System einen großen Mehrwert schaffen würde. Die Dokumentation der Entnahmemengen aus dem Silo kann durch den Futtermischwagen

erfolgen. Dies findet zunehmend Anwendung in der Praxis, allerdings kann eine Futterplanung nicht langfristig erfolgen, wenn die Vorräte nicht bestimmt werden.

Das Sensorsystem wurde auf dem Walzschlepper angebracht und erhebt in der Kombination mit der SilageControl-Software das Volumen des Silos sowie die Fahrtgeschwindigkeit, die Schichtdicke der eingebrachten Frischmasse und die Überfahrtanzahl. Daraus wird die Intensität der Verdichtung berechnet. Durch die Abgrenzung einzelner Schichten kann die Ertragserfassung schlagbezogen erfolgen. In der Saison 2022 fanden die ersten praktischen Tests statt. Das SilageControl-System läuft seit dem Projektbeginn auf einem Walzschlepper der Blunk GmbH und erfasst während des gesamten Jahres Silagen bei Kunden der Blunk GmbH. Im Verlauf des Projektes wurden einzelne Sensoren gegen andere ersetzt, um die Qualität der erfassten Daten zu erhöhen.

Eine Schnittstelle zur Erntekette wurde in Form einer Waagen-Software entwickelt. Die Kombination von SilageControl und der Waagen-Software ermöglicht die genaue Berechnung von der Verdichtung der Silage. Dies ist eine andere Herangehensweise als ursprünglich geplant und dient der Verifizierung der Daten von SilageControl. Die Waagen-Software kommt nur auf einem Teil viehhaltender Betriebe zum Einsatz. Dort bringt die Software einen hohen Mehrwert und vereinfacht die Datenerfassung. Die Software ist vielseitig einsetzbar und wird seit 2025 aktiv von der Silolytics GmbH vertrieben. Außerdem wird dadurch auch die schlagbezogene Erfassung mittels der Volumendaten von SilageControl verifiziert.

Die Daten zur Verdichtung von Silage Control stehen seit der Saison 2025 zur Verfügung. Zusätzlich zu der Waagen-Software können die Analysedaten aus den Futtermittelanalysen direkt zum Silo gespeichert werden.

Die Verschiebung im Projektverlauf führte dazu, dass die Datenerfassung zum Futterverbrauch noch nicht entwickelt werden konnte. Die Grundsteine dafür wurden gesetzt und im Anschluss an das Projekt wird Silolytics diesen Softwareteil weiterentwickeln, um ihn dann auch den Landwirten anbieten zu können. Ein weiterer Fokus liegt darauf die erhobenen Daten nutzbar zu machen und aufzubereiten, sodass daraus eine Entscheidungshilfe entsteht.

Teil II Eingehende Darstellung

Die Projektpartner, Silolytics GmbH, CAU-Kiel und Blunk GmbH, entwickelten in dem Vorhaben SilageControl ein intelligentes Silage-Managementsystem. Das System ermöglicht, die Erntemengen von Silierfrüchten sowie die Entnahmemengen aus den Silagestapeln präzise und einfach zu erfassen. Auf landwirtschaftlichen Betrieben werden die vorhandenen Futtermengen tagesaktuell erfasst, um der Betriebsleitung eine genaue und langfristige Grundfutterplanung zu ermöglichen.

Dafür wurde ein Modell entwickelt, mit dem die Dichte eines Silagestocks abgebildet wird. Zunächst wurden Daten auf Praxisbetrieben erhoben, auf deren Basis ein Modell errechnet wurde. Die Silageentnahme wurde in das System integriert und die Funktion in Versuchen validiert. Die mit dem SilageControl-System erhobenen Daten werden für die Anwender aufbereitet und an andere Systeme durch Schnittstellen angebunden. Das Projekt wurde im Frühjahr 2025 erfolgreich abgeschlossen und das SilageControl-System kann bei der Silolytics GmbH erworben werden.

Im Folgenden gehen wir auf Arbeitspakete (AP) ein, an denen die CAU beteiligt war.

AP 1: Allgemeine und organisatorische Projekttreffen, Kommunikation und Wissenstransfer

Die CAU hat an den regelmäßigen Koordinationstreffen aktiv teilgenommen. Diese Koordinationstreffen fanden monatlich wechselnd bei den Verbundpartnern statt.

Insbesondere war die CAU auch am initialen Aufbau der Projektwebseite maßgeblich beteiligt.

AP 4: Interaktion mehrerer Walzfahrzeuge

Bei höheren Bergeleistungen kommen mehrere Walzfahrzeuge auf einem Silo zum Einsatz. Die Integration mehrerer Walzfahrzeuge erfordert eine digitale Abbildung der Datensynchronisation und der Konfiguration des Verbundes.

Dazu war ursprünglich geplant, dass die Interaktion mehrerer Walzfahrzeuge mitberücksichtigt werden soll. Es sollte eine Netzwerktechnik auf mehreren Fahrzeugen inklusive einer Schnittstelle zum Austausch eingerichtet werden. Im Projekt zeigte sich, dass der Aufwand dieses Arbeitspaketes deutlich höher, als der Nutzen in der Praxis ist. Aus diesem Grund wurde eine andere Lösung für den Fall mehrerer Walzfahrzeuge auf dem Silo gefunden. Statt des ursprünglich verbauten Lidarsensors wird stattdessen ein 360° Lidarsensor verbaut. Dieser Sensor hat ein deutlich größeres Sichtfeld und kann somit auch die Auswirkungen anderer Walzfahrzeuge mit abbilden.

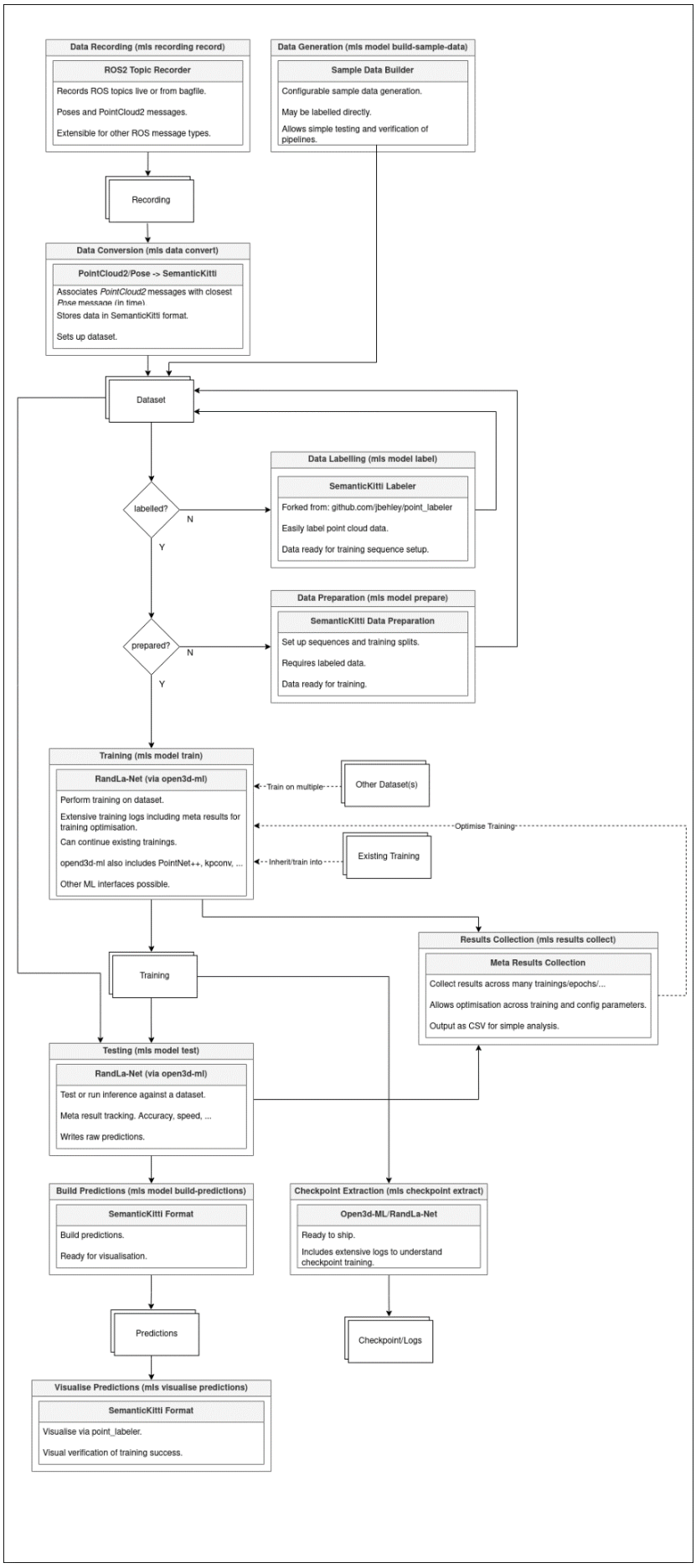
Das SilageControl-System wurde mit diesem neuem Lidar ausgestattet, der einen größeren Bereich erfasst. Ziel ist, dass ein Walzfahrzeug die anderen Fahrzeuge miterfasst und damit der Preis des SilageControl-Systems geringgehalten werden kann, weil nur ein Fahrzeug die Sensorik benötigt und die Konfiguration einfach ist.

AP 6: Integration von Daten aus der Erntekette

Das entwickelte Softwaresystem kann vielfältige Daten, wie eine schichtbezogene Schlagzuordnung und die Art der Silage abbilden. Entsprechende Schnittstellen hierzu wurden implementiert. Eine wichtige Änderung im Arbeitsplan war, dass die Umfeld-Wahrnehmung deutlich an Relevanz für die erfolgreiche Markteinführung von SilageControl gewonnen hat. Zur Umsetzung wurden neuronale Netzte zur automatischen Segmentierung der Lidardaten entwickelt.

Die bisherige Umfeld-Wahrnehmung zur automatischen Erkennung der Silo-Geometrie wies in manchen Bereichen Ungenauigkeiten auf. Außerdem basierte die vorige Software zur Umfeld-Lokalisierung auf expliziten Algorithmen und ist so grundsätzlich wartungsintensiver als etwa neuronale Netze. Um diese Limitierung zu umgehen und die verbaute Hardware optimal zu nutzen, wurde daher eine KI-basierte Umgebungswahrnehmung und semantische Segmentierung/Klassifizierung von LIDAR-Sensordaten als Punktwolken entwickelt.

Hierfür können Trainingsdaten in Sequenzen unterteilt werden, anhand derer das Modell trainiert wird. Der Workflow besteht darin, Trainingsdaten aufzunehmen, diese in Sequenzen zu unterteilen, zu labeln, das Modell zu trainieren und abschließend zu deployen. Dieser Workflow wird in der folgenden Abbildung dargestellt:

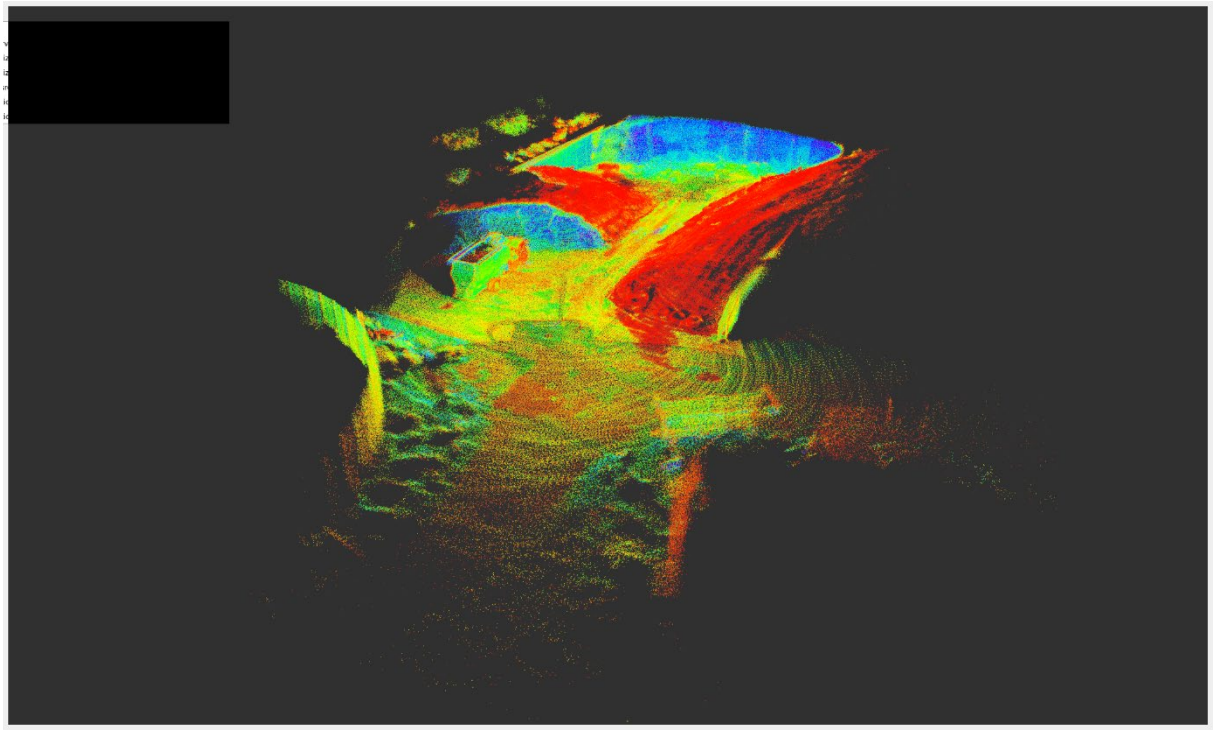

Data Recording (mls recording record)
ROS2 Topic Recorder
Records ROS topics live or from bagfile.
Poses and PointCloud2 messages.
Extensible for other ROS message types.
Data Generation (mls model build-sample-data)
Sample Data Builder
Configurable sample data generation.
May be labelled directly.
Allows simple testing and verification of pipelines.
Recording
Data Conversion (mls data convert)
PointCloud2/Pose -> SemanticKitti
Associates PointCloud2 messages with closest Pose message (in time)
Stores data in SemanticKitti format.
Sets up dataset.
Dataset
labelled?
N
Y
Data Labelling (mls model label)
SemanticKitti Labeler
Forked from: github.com/jbehley/point_labeler
Easily label point cloud data.
Data ready for training sequence setup.
prepared?
N
Y
Data Preparation (mls model prepare)
SemanticKitti Data Preparation
Set up sequences and training splits.
Requires labeled data.
Data ready for training.
Training (mls model train)
RandLa-Net (via open3d-ml)
Perform training on dataset.
Extensive training logs including meta results for training optimisation.
Can continue existing trainings.
opend3d-ml also includes PointNet++, kpconv, ...
Other ML interfaces possible.
Train on multiple
Other Dataset(s)
Optimise Training
Inherit/train into
Existing Training
Results Collection (mls results collect)
Meta Results Collection
Collect results across many trainings/epochs/...
Allows optimisation across training and config parameters.
Output as CSV for simple analysis.
Training
Testing (mls model test)
RandLa-Net (via open3d-ml)
Test or run inference against a dataset.
Meta result tracking. Accuracy, speed, ...
Writes raw predictions.
Build Predictions (mls model build-predictions)
SemanticKitti Format
Build predictions.
Ready for visualisation.
Checkpoint Extraction (mls checkpoint extract)
Open3d-ML/RandLa-Net
Ready to ship.
Includes extensive logs to understand checkpoint training.
Predictions
Checkpoint/Logs
Visualise Predictions (mls visualise predictions)
SemanticKitti Format
Visualise via point_labeler.
Visual verification of training success.

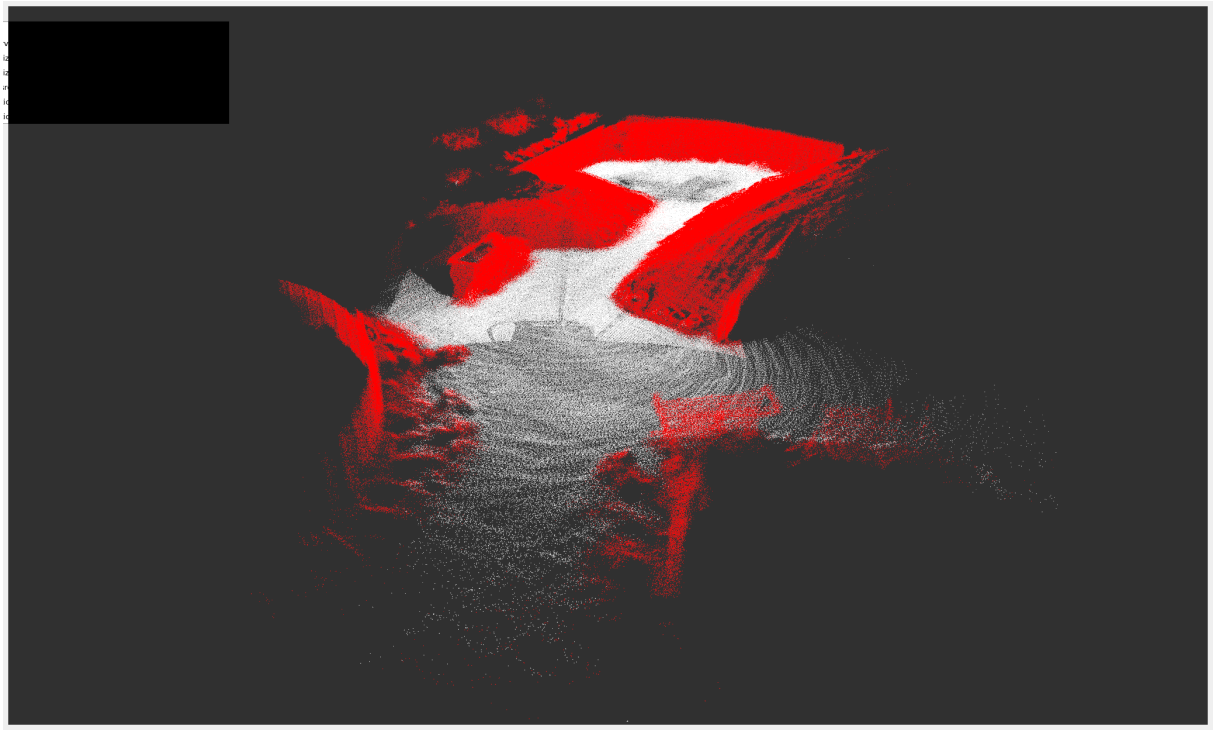
Dazu wird das Open Source Framework Opend-3D-ML eingesetzt. Während der Arbeit mit dem Paket wurden unter anderem ein Fehler in der Open-3D-ML-Implementierung gefunden und behoben. Diese Korrekturen wurden in den Open Source Code eingebracht, sodass zukünftige Nutzer von der Arbeit profitieren.

Ein großer Teil der Entwicklung wurde darauf verwendet, Trainingsvorgänge zu automatisieren. Dies verkürzt die Zeit, um neue Modelle auf Daten zu trainieren enorm und hat weiterhin den Vorteil, dass Entwickler sich nicht jedes Mal neu in den Code einarbeiten müssen.

Insgesamt zielt die Applikation darauf ab, große und komplexe Trainingsvorgänge einfach und wiederholbar darzustellen, ohne dass ein einzelner Entwickler immer selber lernen muss, wie genau man ein Modell trainiert oder Daten strukturiert. Auf der einen Seite ermöglicht dies die Erfüllung der aktuellen Segmentierungsproblemstellung, auf der anderen Seite wurde hier ein massives Potential zur generellen KI-basierten Technologienutzung manifestiert. Das Programm wurde bewusst Kontext-unabhängig gehalten, was bedeutet, dass SilageControl nun eine einfach zu nutzende Worksuite zum Thema KI-Training und Datenverarbeitung als Asset sein Eigen nennt und auch in Zukunft nutzen kann, bei geringem Aufwand für den einzelnen Entwickler.

Daten können einfach visualisiert werden. Entweder live oder insgesamt als Datensätze. Punktwolken können durch eine direkte Einbindung des jhehley/point_labeler intuitiv und direkt gelabelt werden. Trainingsbasierte Vorhersagen, können ebenso einfach visualisiert werden. Zwei Beispiel-Visualisierungen von Silage-Segmentierungen finden sich hier:





Im Jahr 2024 wurde die Erntemengenerfassung in SilageControl integriert. Die am Häufigsten genutzte Art der Ertragserfassung ist immer noch die Brückenwaage, auch wegen der Eichfähigkeit. Außerdem können mit Brückenwaagen auch andere Produkte wie Getreide gewogen werden. Schwachpunkt der Brückenwaagen ist aber die oft komplizierte und veraltete Software. Um diesen Schwachpunkt zu umgehen und Erntedaten zuverlässig in die Software zu integrieren, wurde eine moderne Software entwickelt, die den Vorgang digitalisiert und automatisiert. Zudem verknüpft die Software Wiegedaten automatisch mit den Schlagdaten aus dem Agrarantrag. Die entwickelte Lösung erfasst mittels KI das Kennzeichen und ordnet so die Wiegungen einander automatisch zu. Schon während der Ernte stehen die Wiegedaten zur Verfügung und erfordern kein händisches Nachbearbeiten mehr. Zugleich können die Daten nahtlos mit SilageControl verknüpft werden, um etwa die Dichte im Silagehaufen zu ermitteln. Die Lösung aus einer Hand erweitert SilageControl und eröffnet auch neue Geschäftsfelder. Die Webplattform bietet dabei einen großen Funktionsumfang, um die Wiegungen zu verarbeiten und auszuwerten.

Die Messung der Verdichtung als ein Alleinstellungsmerkmal von SilageControl wurde verbessert. Dabei wurde der bisherige Ansatz, die Höhe der einzelnen eingebrachten Schichten zu messen stark vereinfacht. Das System bezieht die Informationen, die benötigt werden, um die Schichtdicke zu messen jetzt zustandslos aus den aktuellen Sensordaten. Zusätzlich wurde ein Interface entwickelt, um die aktuelle Schichtdicke in einer First person View anzuzeigen. Dadurch enthält der Bediener des Walzfahrzeuges nur die Informationen, die er benötigt und kann den Verteiler oder das Schiebeschild schnell in der Höhe regulieren bzw. die Abfahrgespanne steuern. Der Upload zur Webplattform wurde robuster gestaltet.

Dabei wurde insbesondere wert daraufgelegt, einen modernen Kommunikationsstandard zu unterstützen. Zu diesem Zweck wurde die SilageControl Web-Platform dahingehend erweitert, dass Sie nun auch MQTT unterstützt, welches ein modernes Messaging-Protokoll für IoT-Systeme ist.

Bei der Integration der Daten aus der Erntekette war ursprünglich auch geplant Daten vom Feldhäcksler zu integrieren. Aufgrund der unterschiedlich ausgestatteten und unterschiedlichen Hersteller der Feldhäckseler wurden stattdessen die Daten von Fuhrwerkswaagen auf ausgewählten landwirtschaftlichen Betrieben integriert. Im Nachhinein erfasste Silage Analysen werden ebenfalls mit einer Schnittstelle eingelesen und könne zu jeder einzelnen Silage gespeichert werden.

Aufgrund der hohen Verbreitung sind Brückenwaagen immer noch die am Weitesten verbreitete Methode, um Erntemengen zu erfassen. Auch unter den Blunk-Kunden ist dies die am meisten genutzte Methode, um Erntemengen zu erfassen. Insbesondere Biogasanlagen sind darauf angewiesen, da nur diese Methode eichfähig ist.

Um keine Lösung zu entwickeln, die nur im Rahmen des Projektes bestand hat, wurde eine moderne Software entwickelt, die Wiegedaten direkt in der SilageControl-Plattform verfügbar macht.

Die CAU-Kiel hat in diesem Arbeitspaket das Interface zwischen Wiegecomputer und der SilageControl-Software implementiert. Die erste Version war in der Lage passiv über TCP zu lauschen ohne die existierende Infrastruktur zu stören. Aufgrund der Resultate dieser Phase konnte eine aktive Variante entwickelt werden, die bisherige Kundensoftware ersetzte.

Im Zuge dessen wurde die Software dahingehend erweitert, dass die am weitesten verbreiteten Wiegecomputer der Firmen Systec und Dini Arnego direkt in die Software integriert wurden. Hierfür wurde der Scale-Adapter entwickelt, ein Software-Paket, das Daten aus den Wiegecomputern verfügbar macht, um sie mittels moderner, vernetzter Programme in der Cloud zu verarbeiten. Die modular gehaltene Software bietet über klare Interfaces und Module die Möglichkeit schnell neue Protokolle einzubinden und ist damit einfach auf andere Wiegecomputer adaptierbar. Beispielsweise bietet Sie jetzt schon die Möglichkeit neben Brückenwaagen Achslastwaagen einzubinden, die deutlich günstiger sind.

Von einer Softwarearchitekturperspektive ist der Interface-Code inzwischen sehr reif und ausgiebig getestet. Der Adapter unterstützt passives Paket-Sniffing, sowie aktives Zuhören über TCP/IP und RS232 (seriell).

Speziell die Testseite ist sehr ausgereift. Mit 92% Testabdeckung wird ausgiebig getestet. Gerade Verbindungsverluste zum Waagen-Computer oder fehlende Antworten desselben

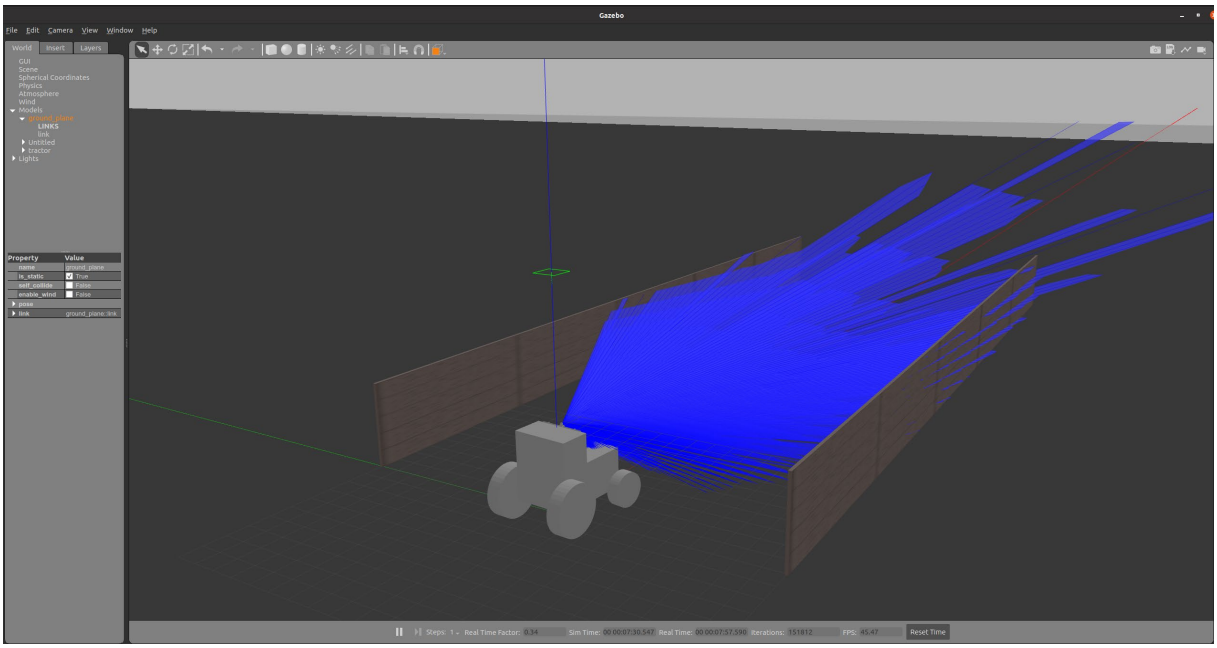
sind nahtlos in die Testumgebung integriert. Dadurch ist die Software für den Produktiveinsatz gut gerüstet.

AP 7: Digitaler Zwilling zur Qualitätssicherung und weitere Systementwicklung

Smart Farming ist ein Konzept, das den Einsatz digitaler Technologien zur Verbesserung der Effizienz und Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Praktiken beinhaltet. In SilageControl wird dieser Ansatz auf die digitale Landwirtschaft angewendet um die Silageproduktion zu verbessern. Unsere Arbeiten in der Softwareentwicklung zum Paradigma des digitalen Zwillings befassen sich mit der Herausforderung, eingebettete Softwaresysteme für Smart Farming zu erstellen. Digitale Zwillinge ermöglichen die vollständige Entwicklung von Softwaresystemen, bevor physische Prototypen hergestellt werden, und sind ein Ansatz für eine kosteneffiziente Methode für die Softwareentwicklung. Bei unserem Digital Twin Prototype-Ansatz werden alle Sensorschnittstellen in den Entwicklungsprozess integriert und ihre Ein- und Ausgänge der emulierten Hardware stimmen mit denen der realen Hardware überein. Die Emulatoren reagieren auf die gleichen Befehle und geben identisch formatierte Datenpakete zurück wie ihre realen Gegenstücke, was den Digital Twin Prototype zu einer validen Quelle eines digitalen Schattens macht, d. h. der Digital Twin Prototype ist ein Prototyp des physischen Zwillings und kann ihn für automatisierte Tests ersetzen. Neben automatisierten Tests mit kontinuierlicher Integration betrachten wir in diesem Zusammenhang auch die kontinuierliche Bereitstellung modularer Docker-Container, ggf. orchestriert in einer Kubernetes-Umgebung. Hierdurch wird auch die Saisonabhängigkeit der Softwareentwicklung deutlich reduziert und das Testen der Software vereinfacht.

Der Einsatz von digitalen Zwillingen kann bei Entwicklung und Betrieb technischer Systeme dazu beitragen, mögliche Fehler bereits vor der Inbetriebnahme zu erkennen. Nach der Inbetriebnahme kann der digitale Zwilling dazu genutzt werden, den Zustand des Produkts oder des Systems kontinuierlich zu überwachen und sogar Ausfälle vorherzusagen. Durch den Einsatz eines digitalen Zwillings können Optimierungen und Fehlerbehebungen über den gesamten Produktlebenszyklus vorgenommen und damit erhebliche Kosten gespart und gleichzeitig die Qualität gesichert werden. Anhand von realen Daten können Zusammenhänge erschlossen und Produkte bzw. Systeme optimiert werden.

Die Entwicklung eines digitalen Zwillings dient der Entwicklung und Überwachung der Sensorsysteme, damit Fehler frühzeitig erkannt werden. Dafür wurde ein automatisches Framework zum Testen gebaut. Dieses Framework nutzt im Vergleich zum digitalen Zwilling keine generierten Sensordaten, sondern in sogenannten Bagfiles aufgezeichnete Daten. Anhand dieser Daten werden definierte Testfälle ausgeführt und so die Funktionsfähigkeit der Software sichergestellt. Die folgende Abbildung zeigt den digitalen Zwilling eins mit unseren Sensoren ausgestatteten Walzfahrzeuges:



In Gesprächen mit Wissenschaftlern vom ATB Potsdam, die Anfang 2023 stattfanden, wurde klar, dass die Entwicklung eines kompletten Digitalem Zwillings sehr aufwendig ist aufgrund der Dynamiken und angepasste Ansätze für unser Projekt besser geeignet sind. Der Fokus dieses Arbeitspakets wurde auch hin zum Deployment verschoben, da sich dies als Flaschenhals bei der Skalierung des Systems erwies. Ein automatisiertes Deployment bedeutet, dass neue Software für alle Plattformen automatisch gebaut wird und so die Vorbereitungszeit eines neuen Systems von einer Woche auf zwei Stunden reduziert wird. Das Deployment sollte somit komplett auf Kubernetes migriert werden, was es der Silolytics GmbH erlaubt große Softwaresysteme effizient zu managen. Dies ist eine Schlüsselkompetenz für den Betrieb digitaler Systeme. Der Digitale Zwilling ist somit in abgewandelter Form im Einsatz, jedoch fand eine Verschiebung der Priorität von der Entwicklung zum Deployment statt.

Das Vorhaben eines digitalen Zwillings wurde auch dahingehend angepasst, dass ein automatisches Framework zum Testen gebaut wurde. Dieses Framework nutzt im Vergleich zu digitalen Zwillingen keine generierten Sensordaten, sondern in sogenannten Bagfiles aufgezeichneten Daten. Anhand dieser Daten werden definierte Testfälle ausgeführt und so die Funktionsfähigkeit der Software sichergestellt.

Die Software von SilageControl wurde im Jahr 2024 in wichtigen Bereichen weiterentwickelt, um den Anforderungen der Nutzenden zu entsprechen. Der Hauptfokus lag dabei weniger auch neuen Features, sondern eher auf der Stabilität des Gesamtsystems. Die Software von SilageControl basiert auf dem Robot Operating System (ROS). Der aktuelle Standard ist ROS2. SilageControl wurde mit Beteiligung der CAU inzwischen komplett auf diesen Standard migriert. Die Funktionalität wurde getestet. Damit basiert SilageControl auf der

neuesten Version und benötigt in der Zukunft weniger Wartungsaufwand. Außerdem steigt der Aufwand je später die Migration angegangen wird, da neu entwickelter Code zusätzlich migriert werden muss.

Wichtigste Positionen zahlenmäßig

An der CAU sind im Wesentlichen die im zahlenmäßigen Nachweis dargestellten Personalkosten angefallen. Darüber hinaus entstanden Reisekosten im geringen Umfang.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die im Rahmen dieses DIP-Projekts geleistete Arbeit war essenziell und angemessen, um die definierten Forschungsziele im Bereich Ganzpflanzensilage zu erreichen. Die Notwendigkeit der durchgeführten Untersuchungen ergab sich direkt aus der Problemstellung, dass Daten bei der Silagebereitung fehlen. Ohne die systematische Erhebung und Analyse der Daten mit dem SilageControl System wäre es nicht möglich gewesen, valide Erkenntnisse über die Silagen zu gewinnen.

Die Angemessenheit der gewählten Methodik und des Projektumfangs spiegelte sich in der effizienten und zielgerichteten Durchführung wider. Die eingesetzten Ressourcen wurden präzise auf die Anforderungen der Forschungsfragen abgestimmt. Die erzielten Ergebnisse, die in den vorangegangenen Abschnitten detailliert dargestellt wurden, bestätigen die Eignung des gewählten Ansatzes und die Qualität der geleisteten Arbeit. Insbesondere die Datenerfassung von SilageControl zeigt den Erfolg unserer Vorgehensweise. Die gesammelten Erkenntnisse schaffen eine solide Grundlage für zukünftige Forschungsaktivitäten in diesem Bereich.

Fortschritt der Technologiereife

Die Technologiereife wurde insbesondere mit Blick auf die Qualitätssicherung durch Digitale Zwillinge, innovative Methoden zum Deployment und der erfolgreiche Einsatz maschineller Lernverfahren erheblich erhöht.

Erreicht wurde TRL 5 (Versuchsaufbau und Überprüfung in relevanter Einsatzumgebung). Die Software und die Softwareentwicklungsmethodik wurden intensiv in relevanter Umgebung erprobt. Wesentliche Technikelemente wurden mit den unterstützenden Elementen verbunden. Die Prototypenimplementierung entspricht der Zielumgebung und den erforderlichen Schnittstellen.

Verwertungsplan

Auf der Basis der gewonnenen Projektergebnisse sollen weitere Projektideen formuliert und entsprechende Fördermittel im Bereich Internet der Dinge akquiriert werden. Es ist ferner beabsichtigt, die Ergebnisse im Rahmen weiterer Abschluss- und Promotionsarbeiten zu vertiefen. Es ist geplant, die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse zur Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit, in weiteren Fachjournalen sowie in Form von Fachbeiträgen auf nationalen und internationalen Tagungen/ Konferenzen zu veröffentlichen.

Veröffentlichungen

- Barbie, Alexander, Hasselbring, Wilhelm und Hansen, Malte (2023): “Enabling Automated Integration Testing of Smart Farming Applications via Digital Twin Prototypes.” In: 2023 IEEE International Conference on Digital Twin (Digital Twin 2023). August 28-31, 2023, Portsmouth, UK. DOI https://doi.org/10.1109/SWC57546.2023.10449240
- Barbie, Alexander, Hasselbring, Wilhelm und Hansen, Malte (2024) Digital Twin Prototypes for Supporting Automated Integration Testing of Smart Farming Applications. Symmetry, 16 (2). p. 221. DOI https://doi.org/10.3390/sym16020221
- Die Machine Learning Software wurde auf GitHub veröffentlicht: https://github.com/john-philipp/ml-suite