

Effektive Datenaufzeichnung in der Landwirtschaft: Ein robustes System für mobile Maschinen

Johann Brunner*

Matthias Hien*

Tobias Dobmeier*

Dmitrii Dobriborsci**

<https://doi.org/10.25929/2exfpr11>

ABSTRACT

Die präzise Erfassung und Verarbeitung von Sensordaten stellt eine Schlüsselvoraussetzung für die Entwicklung KI-gestützter Anwendungen in der Landwirtschaft dar. In dieser Studie werden die Konzeption und Implementierung eines robusten Datenaufzeichnungssystems für mobile landwirtschaftliche Maschinen vorgestellt, das auch unter extremen Einsatzbedingungen zuverlässig arbeitet. Das System erfasst und speichert die Bild- und Signaldatenströme einer multispektralen Kamera im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich sowie zweier maschinenspezifischer CAN-Bussysteme. Die Hardware basiert auf einem Rechnersystem mit stoß- und vibrationsresistentem Gehäuse sowie austauschbaren SSD-Speichern, die eine langfristige Sicherung großer Datenmengen ermöglichen. Die Softwarearchitektur erlaubt eine autarke, ereignisgesteuerte Datenerfassung und gewährleistet durch das Precision Time Protocol eine präzise Synchronisation aller Quellen. Validierungen im Labor und unter realen Einsatzbedingungen auf einer Überlademaschine für Zuckerrüben belegen die hohe Verfügbarkeit, die konsistente Datenqualität sowie die zeitlich determinierte Erfassung und zeitnahe Verarbeitung der Sensordaten. Die Bildqualität wurde anhand des Signal-Rausch-Verhältnisses bewertet und als gut eingestuft; zudem konnte eine korrekte Ausleuchtung in 99,97 % der Aufnahmen nachgewiesen werden. Die Ergebnisse bestätigen die Praxistauglichkeit des Systems und seine Eignung als Aufzeichnungsgerät dieser Datenströme. Das entwickelte Konzept bietet darüber hinaus eine flexibel anpassbare Lösung für zukünftige Anwendungen zur Datenakquise in der Präzisionslandwirtschaft.

The precise acquisition and processing of sensor data is a key prerequisite for the development of AI-supported applications in agriculture. This study presents the design and implementation of a robust data recording system for mobile agricultural machinery that operates reliably even under extreme operating conditions. The system acquires and stores the image and signal data streams from a multispectral camera in the visible and near-infrared spectral range, as well as from two machine-specific CAN bus systems. The hardware is based on a computer system with a shock- and vibration-resistant housing and replaceable SSD storages, enabling long-term archiving of large data volumes. The software architecture allows for autonomous, event-driven data acquisition and ensures precise synchronization of all sources through the Precision Time Protocol. Validations in laboratory and under real-world operating conditions on a sugar beet overloading machine demonstrate the high availability, consistent data quality, and the time-determined acquisition and real-time processing of sensor data. Image quality was assessed based on the signal-to-noise ratio and rated as good. Furthermore, correct illumination was confirmed in 99.97% of the images. The results confirm the system's practicality and its suitability as a recording device for these data streams. The developed concept also offers a flexibly adaptable solution for future applications usable for data acquisition in precision agriculture.

*Campus Cham „Intelligente Produktion“, Technische Hochschule Deggendorf

**Campus Cham „Intelligente Robotik“, Technische Hochschule Deggendorf

KEYWORDS

Data acquisition, data recording system, agriculture 4.0, robust system, precision agriculture

Datenerfassung, Datenaufzeichnungssystem, Landwirtschaft 4.0, robustes System, Präzisionslandwirtschaft

1. Einleitung

Eine grundlegende Voraussetzung für die Entwicklung eines statistischen Modells ist die Verfügbarkeit eines für die jeweilige Aufgabe geeigneten Datensatzes. Dieser muss sowohl unabhängige als auch abhängige Variablen umfassen. Der Gesamtprozess von der Auswahl der Variablen bis zu fertigen Modellen wird durch die Zusammenführung in einer umfangreichen Datenbasis, wie in Abbildung 1 dargestellt, ergänzt. Die Datenquellen werden dabei über physikalische Sensoren sowie

Schnittstellen zum automatisierten Auslesen der Datenströme definiert. Zur Sicherstellung einer hohen Datenqualität erfolgt vor und während der Zusammenführung eine Sichtung und Bereinigung der unterschiedlichen Quellen. Auf Grundlage dieser Datenbasis werden anschließend spezifische Datensätze für die jeweilige Analyse abgeleitet. Die vorliegende Studie untersucht die Gewinnung einer solchen umfangreichen Datenbasis (orange Box) als Ausgangspunkt für die Ableitung aufgabenspezifischer Datensätze.

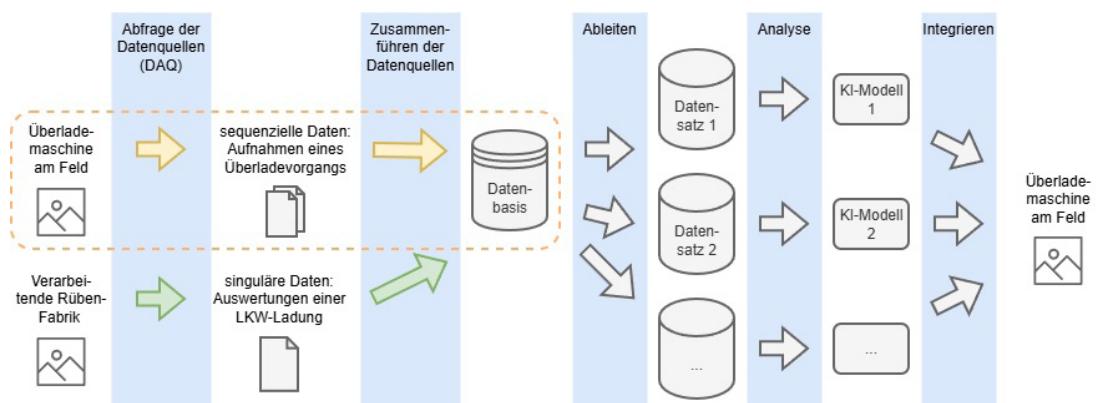


Abbildung 1 beschreibt die Prozesskette zur Entwicklung und Implementierung eines statistischen Modells: Von der Datenakquise über die Gewinnung einer umfassenden Datenbasis bis hin zur Ableitung spezifischer Datensätze für zielgerichtete Datenanalysen.

Diese Studie ist Teil eines Projektvorhabens zur Entwicklung einer echtzeitfähigen Methode zur Bestimmung des Gewichtsanteils von an geerntetem Wurzel- und Knollengemüse anhaftender Erde. In einem ersten Schritt werden die relevanten Datenquellen identifiziert. Dazu zählen zunächst eine multispektrale Kamera, die deckungsgleiche Flächenbilder im sichtbaren (VIS, visible) und nahen infraroten (NIR, near-infrared) Spektrum aufnimmt, sowie ausgewählte Signale des CAN-Bussystems (CAN = Controller Area Network)

der landwirtschaftlichen Maschine (siehe Abschnitt 3.2.3). Die tatsächliche Relevanz dieser Datenquellen lässt sich jedoch meist erst im Prozessschritt „Analyse“ (siehe Abbildung 1) verifizieren. Bei der Konfiguration des automatisierten Aufzeichnungssystems sollten daher möglichst viele verfügbare Datenquellen berücksichtigt werden, da fehlende Quellen nachträglich nicht ergänzt werden können.

Die aus den aufgezeichneten Daten abgeleiteten Ergebnisse sollen eine präzisere Messung

und Steuerung der Reinigung von Feld- und Bodengemüse durch Erntemaschinen ermöglichen. Da das entwickelte Aufnahmesystem auf einer Überlademaschine für Feldfrüchte (vgl. Abbildung 2) eingesetzt wird, muss dessen Betrieb unter rauen Bedingungen, etwa starken Vibrationen, Staub, Sonneneinstrahlung, wechselnden

klimatischen Einflüssen und begrenztem Bauraum, gewährleistet sein. Im Rahmen des Projektvorhabens erfolgte eine Kooperation mit der Firma ROPA Fahrzeug- und Maschinenbau GmbH [1]. Das Aufnahmesystem konnte für die Überlademaschine ROPA MAUS 6 vorbereitet und erfolgreich validiert werden.

Zu Beginn des Vorhabens stand keine



Abbildung 2 zeigt die Überladung einer Zuckerrübenmiete auf einen LKW nach der Ernte im Herbst mithilfe einer Überlademaschine des Herstellers ROPA. [2]

umfassende Datenbasis zur Verfügung, die für Datenanalysen hätte genutzt werden können. Zur Bestimmung des Gewichtsanteils der Erde auf dem LKW mithilfe Künstlicher Intelligenz (KI) wurden daher folgende Datenquellen definiert:

- Bild- und Signalaufnahmen einer multispektralen Kamera sowie des CAN-Bussystems, die sequenziell während eines Überladevorgangs auf der Überlademaschine erfasst werden (vgl. Abschnitt 3.2.3; Abbildung 1, gelbe Pfeile)
- Aufzeichnungen der verarbeitenden Fabrik, die jeweils für jede LKW-Ladung separat dokumentiert werden (vgl. Abbildung 1, grüne Pfeile)

Vor diesem Hintergrund ergibt sich die zentrale Forschungsfrage dieser Studie: Inwieweit erfüllt das entwickelte Datenaufzeichnungssystem wesentliche Anforderungen, wie die Verfügbarkeit der Aufnahmefunktion, das

Speichermanagement, die Qualität der aufgenommenen Bilder sowie die zeitliche Präzision der Sensordatenabfrage und weitere anwendungsspezifische Kriterien (vgl. Abschnitt 3.2), um für den Einsatz auf mobilen landwirtschaftlichen Maschinen geeignet zu sein?

Für den Aufbau einer umfangreichen Datenbasis sind zudem zusätzliche Informationen, wie Identifikationsnummern, Zeitstempel und örtliche Positionen entscheidend. Diese ermöglichen eine nachträgliche Ergänzung und Verknüpfung mit öffentlich zugänglichen Datenbanken zu Klima und Bodenbeschaffenheit. Damit entsteht die Datengrundlage für spezifische Analysen und das Training von KI-Modellen im weiteren Projektverlauf.

2. Stand der Technik

In der modernen Präzisionslandwirtschaft ist präzises Datenlogging essenziell, insbesondere

bei der Multisensordatenerfassung [3]. Neben der Aufzeichnung einfacher Parameterverläufe wie Temperatur und Luftdruck umfasst dies auch die Verarbeitung großer Datenmengen, z. B. bei der Bildaufnahme.

2.1 Bilddatengenerierung

Im Rahmen der Studie wurde eine Flächenkamera eingesetzt, da eine Linienkamera aufgrund der hohen Förderbandgeschwindigkeit von 1,5–2 m/s auf der Überlademaschine kein zusammenhängendes Bild hätte erzeugen können. Multispectral Imaging (MSI) ermöglicht die Erfassung ausgewählter Spektralbänder des sichtbaren und nicht-sichtbaren Lichts und liefert zusätzliche Informationen über Materialeigenschaften, sowie chemische Zusammensetzungen von Pflanzen und Böden [4–6].

Die Generierung des multispektralen Bilddatenstroms stellt besondere Anforderungen an die Kamera: Eine zeitlich präzise Bildaufnahme ist notwendig, um die Bilder eindeutig den gleichzeitig erfassten Sensordaten zuordnen zu können. Dies wird durch das Protokoll GigE Vision v2 unterstützt [7, 8]. Manche Hersteller (Allied Vision, Baumer u. a.) implementieren neben der Synchronisation auch einen internen Pufferspeicher, sodass Bilder unabhängig vom Zeitpunkt der Aufnahme und Abfrage aus diesem ausgelesen werden können.

Für kohärente multispektrale Bildaufnahmen müssen die drei CMOS-Bildsensoren (CMOS = Complementary Metal-Oxide Semiconductor) in der Kamera exakt ausgerichtet sein, insbesondere bei bewegten Objekten. Technologisch stehen neben der Strahlteilung durch ein Prisma auch Mehrfach-Kamera-Systeme zum Einsatz zur Verfügung. Das Prismen-System ermöglicht durch den kurzen Betrachtungsabstand deckungsgleiche Bilder, was bei Systemen mit einzelnen, nahe beieinander angeordneten Kameras, wie dem Parrot Sequoia [9], nicht realisierbar ist. Mehr-Kamera-Systeme werden häufig bei Drohnenflügen eingesetzt, wo der große Abstand zu den Objekten die fehlende Kohärenz weniger kritisch macht. Im Projektvorhaben hingegen ist der Abstand zwischen Kamera und Förderband sehr gering, sodass das Prismen-System die methodisch sinnvollere Lösung darstellt.

2.2 Einsatz-Szenarien

Datenaufzeichnungssysteme bzw. Datenlogger sind essenzielle Komponenten in der Präzisionslandwirtschaft. Sie werden häufig projektspezifisch entwickelt, um den jeweiligen Anforderungen gerecht zu werden. Besonders im modernen Agrarsektor und in der Automatisierungstechnik spielen sie eine zentrale Rolle und bieten ein hohes Potenzial für zukünftige Entwicklungen, v. a. im Bereich der KI und der nachträglichen Fehleranalyse. Grundsätzlich lassen sie sich in stationäre und mobile Systeme kategorisieren.

Stationäre Datenlogger dienen in der Regel der kontinuierlichen Überwachung physikalischer Größen wie Strom, Spannung oder Widerstand [10]. Projektspezifische Ausführungen ermöglichen darüber hinaus spezialisierte Analysen, beispielsweise zur Überwachung des Werkzeugverschleißes bei CNC-Maschinen [11] oder zur Erfassung des Volumenzuwachses bei Pflanzen [12]. Mobile Datenlogger werden hingegen bevorzugt für ortsaufgelöste Messungen eingesetzt. Typische Einsatzbereiche sind die Bodenkartierung, bei der Bilddaten mit präzisen Positionsinformationen kombiniert werden [13], oder die Entwicklung autonomer Fahrzeuge [14].

2.3 Umsetzung von DAQ-Systemen in der Landwirtschaft

Traditionell werden landwirtschaftliche Prozessparameter und andere Daten manuell von den Landwirt:innen erfasst. Mit dem Aufkommen von Landwirtschaft 4.0 und der Verfügbarkeit von Big-Data-Technologien übernehmen diese Aufgaben jedoch zunehmend Sensoren mit integriertem Datenspeicher, smarte Maschinen und speziell entwickelte Datenlogger (vgl. [15–17]). Dabei liegt der Fokus aktuell noch auf klassischen Sensordaten wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Bodenparametern. Dennoch findet die Bildverarbeitung in der Landwirtschaft einen wachsenden Anwendungsbereich, insbesondere bei der Analyse von Multi- und Hyperspektralbildern [4].

Die Erfassung von Multi- und Hyperspektraldaten durch Datenlogger eröffnet neue Möglichkeiten für das präzise Pflanzenmanagement. Diese Technologien ermöglichen es, Zustände der Pflanzen wie Wassergehalt, Nährstoffversorgung

oder Stressfaktoren genau zu bestimmen. Durch solche Analysen können landwirtschaftliche Prozesse zielgerichtet gestaltet und Ressourcen wie Wasser und Dünger effizienter eingesetzt werden [18]. Die in diesen Anwendungen verwendeten Datenlogger sind dabei immer speziell auf den jeweiligen Einsatzbereich zugeschnitten und zeichnen sich durch einen hohen Grad an Anpassbarkeit aus.

Ein herausragendes Beispiel hierfür ist das in Mayo et al. [19] beschriebene System, das eine offene und vollständig anpassbare Lösung zur Datenakquisition für die hyperspektrale Bildgebung bietet. Dieses System kombiniert handelsübliche Komponenten mit Open-Source-Software, um ein kompaktes, leichtes und transportables Gerät zu schaffen. Das System wurde speziell für den Einsatz auf Drohnen entwickelt, wobei die Leichtbauweise ein zentrales Designkriterium war. Die Integration eines GPS-Systems (GPS = Global Positioning System) ermöglicht es, hyperspektrale und Navigationsdaten gleichzeitig zu erfassen und direkt zu georeferenzieren. Diese Technologie eignet sich hervorragend für die effiziente Überwachung agrarrelevanter Parameter wie Pflanzenzustand, Krankheitsbefall oder Nährstoffversorgung auf großen landwirtschaftlichen Flächen und hat sich bereits in der Praxis bewährt. Beispielsweise wurde das System eingesetzt, um ein ausgewähltes Gebiet unter Verwendung von hyperspektralen Bildern zu kartographieren.

Ein entscheidender Aspekt bei mobilen und stationären DAQ-Systemen (DAQ = Data Acquisition) ist der Energieverbrauch. Insbesondere bei autarken Systemen, die über längere Zeiträume ohne externe Stromversorgung betrieben werden, ist ein geringer Energiebedarf essenziell. Solche Systeme müssen nicht nur effizient arbeiten, sondern auch robust gegenüber widrigen Umweltbedingungen sein, um zuverlässige Daten über lange Zeiträume hinweg zu liefern.

Obwohl handelsübliche Datenlogger-Systeme in vielen Anwendungen etabliert sind, erfüllen sie im Rahmen des vorliegenden Projekts die spezifischen Anforderungen nicht. So erfordert die Datenaufzeichnung eine simultane Erfassung von Bilddaten mit hoher Bildfrequenz sowie die parallele Aufzeichnung von CAN-Signalen, wobei die Steuerung der Aufzeichnung über CAN-Nachrichten erfolgen

muss. Darüber hinaus ist eine flexible und transparente Datenablage notwendig, um die aufgezeichneten Rohdaten ohne proprietäre Formate direkt weiterverarbeiten zu können (vgl. Abschnitte 3.2.3 f. und 4.1.2 f.). Die von Herstellern angefragten Systeme hätten zwar Standardfunktionen wie CAN-Trigger unterstützt, jedoch basierten sie auf proprietären Softwarelösungen und Dateiformaten, die eine zusätzliche Nachverarbeitung erfordert hätten. Damit wären die notwendige Flexibilität und Erweiterbarkeit nicht gegeben gewesen. Aus diesen Gründen wurde eine projektspezifische Lösung entwickelt, die die genannten Anforderungen vollständig berücksichtigt.

3. Methoden

Um die Leistungsfähigkeit und Effizienz des zu entwickelnden Aufzeichnungssystems zu gewährleisten, ist es entscheidend, die spezifischen Anforderungen zu kennen. Diese Anforderungen bilden die Grundlage für den Systemaufbau und ermöglichen eine umfassende Systemvalidierung. Im folgenden Abschnitt werden die Anforderungen an das Aufnahmesystem im Kontext des Projektvorhabens erläutert und deren technische Umsetzung beschrieben.

3.1 System-Scope

Bevor das Aufnahmesystem umgesetzt wird, werden die spezifischen Anforderungen daran identifiziert. Ein wichtiger Aspekt ist der Einsatz auf einer landwirtschaftlichen Maschine, was besondere Anforderungen an Robustheit und Zuverlässigkeit stellt. Außerdem muss sicherstellt werden, dass die relevanten Datenquellen in konstanten Zeitabschnitten abgefragt werden. Dies ist entscheidend für die Qualität der späteren Datenanalyse und die Verlässlichkeit der Ergebnisse. Ein weiterer Aspekt ist die Skalierbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit des Systems. Das System muss flexibel genug sein, um zukünftige Bedürfnisse im Projekt abdecken zu können. Das betrifft einerseits die Anschlussmöglichkeiten von Sensoren und das Abspeichern der abgefragten Datenpakete, aber auch den Aufbau von Remoteverbindungen zur Fernwartung. Möglicherweise muss auch eine KI-Beschleunigerkarte nachgerüstet werden können. Das vorhandene Projekt-Budget und somit das Streben nach einer kosteneffizienten Lösung spielen ebenfalls

eine wesentliche Rolle. Die Entwicklung des Aufnahmesystems berücksichtigt die Bedürfnisse und Anforderungen verschiedener Interessensgruppen:

- Der Fahrer und Bediener der Überlademaschine hat wenig bis keine Zeit, sich während einer Überladung mit dem System zu beschäftigen. Daher wird das System so konzipiert, dass es vor Ort möglichst nicht bedient werden muss.
- Die beteiligten Projektpartner legen Wert auf ein zuverlässig funktionierendes System, das die erforderlichen Daten aufzeichnet, ohne den Überladevorgang zu behindern.
- Die Projektmitarbeiter sind die Entwickler des KI-Systems. Sie wollen ein möglichst autark laufendes System, das nur minimalen Wartungsaufwand erfordert.

3.2 Anforderungen

3.2.1 Robustheit

Für den zuverlässigen Betrieb des DAQ-Systems unter den anspruchsvollen Bedingungen einer Überlademaschine müssen eine Reihe physikalischer Anforderungen erfüllt werden. Der eingesetzte Rechner muss mechanisch und thermisch stabil sein, Schocks und Vibrationen tolerieren, gegenüber Staub und Feuchtigkeit widerstandsfähig sein sowie elektronisch zuverlässig arbeiten. Rechner dieser Kategorie werden als „robust“ oder „rugged“ bezeichnet. Die Auswahl fiel auf den OnLogic Karbon 804, der speziell für den Einsatz unter rauen Umgebungsbedingungen entwickelt wurde. Das System verfügt über ein vibrationsdämpfendes, passiv gekühltes Gehäuse und ist so ausgelegt, dass es mechanischen Belastungen durch Vibrationen und Stöße, thermischen Einflüssen wie Heizung und Zugluft sowie Umwelteinwirkungen durch Staub, Feuchtigkeit und Sonneneinstrahlung standhält. Darüber hinaus wurde der Rechner nach strengen Standards entwickelt, getestet und validiert. Die Erfüllung dieser Anforderungen sowie die Eignung des Geräts lassen sich anhand der Spezifikation [20] und des Handbuchs [21] nachprüfen.

Bei den ex- und internen Schnittstellen, die zum Anschluss von Sensoren und

Erweiterungskarten gedacht sind, wird ebenfalls auf Robustheit geachtet. Deshalb bietet der Rechner M12-Ethernet- und USB-Anschlüsse für die Anbindung der Kamera und zeitweise erforderlicher Peripherie-Geräte (z. B. Maus, Keyboard, Monitor). Der interne PCIe-x4-Slot (PCIe = Peripheral Component Interconnect Express) ist für die verwendete CAN-Karte und der PCIe-x16-Slot zur Nachrüstung einer KI-Beschleunigerkarte vorgesehen.

Außerdem verfügt er über Einschübe, um Speichermedien flexibel austauschen zu können. Die Wahl fiel auf SSD-Speicher (SSD = Solid State Drive), welche keine beweglichen, mechanischen Teile besitzen und somit besser geeignet sind als herkömmliche HDD-Speicher (HHD = Hard Disk Drive).

Besonders schützenswert ist die Kamera, die den rauen Bedingungen am Aufnahmeort ausgesetzt ist. Dieser befindet sich am Überladearm der Maschine 80 cm über dem Förderband. Zum Schutz gegen Sonne, Wind und Wetter, aber auch zur Schaffung konstanter Aufnahmebedingungen wurde eine Abdeckung montiert. Zum Schutz der Kamera gegen Steinschlag wird sie in das Gehäuse „Megalodon“ von autoVimation montiert ([22], siehe Abbildung 5). Das Gehäuse weist eine robuste Bauweise auf, ist vibrationssicher, bietet eine gute Wärmeableitung und setzt die Schutzklasse IP67 (IP = Ingress Protection) um.

Auch das Datenkabel zwischen Rechner und Kamera wird robust ausgelegt. Es handelt sich um ein Ethernet-Kabel mit 8-poligem X-codiertem M12-Anschluss und RJ45-Stecker, das der CAT-7e-Spezifikation entspricht. Diese Spezifikation ermöglicht Kabellängen von max. 100 m bei max. 10 Gbps (vgl. [23]).

3.2.2 Speicherkapazität

Des Weiteren muss die Speicherkapazität ausreichend groß sein, um den Datenstrom, der vom Fahrzeug-Bussystem und der Kamera generiert wird, über einen Ziel-Zeitraum von ca. einer Woche speichern zu können. Um über mehrere Wochen aufnehmen zu können, muss die Festplatte ausgetauscht werden. Pro Abfrage wird im Speicher eine Datenmenge von 8,28 KByte der beiden Bussysteme und 9,44 MByte der Kamera erzeugt. Ausgehend davon, dass während eines Überladevorgangs alle 0,3 Sekunden diese Datenquellen abgefragt werden

und eine Festplattenkapazität von 16 TByte gewählt wird, wird eine Aufnahmezeit von bis zu 140 Stunden ermöglicht. Je nach Anzahl und Dauer der Überladungen pro Tag wird eine Aufnahmedauer von 1–2 Wochen ermöglicht. Danach muss die Festplatte getauscht werden. Die 16 TByte verteilen sich auf zwei Samsung 870 QVO SATA III 2,5 Zoll SSD-Speicher, für die der Rechner zwei Einschübe zur Verfügung stellt.

3.2.3 Aufzeichnung relevanter Datenquellen

Aufgabe im Beispielprojekt ist es, relevante Daten zu sammeln, die einen Bezug zum Gewichtsanteil der Erde in einer Ladung Feldfrüchte herstellt. Für den späteren Analyseprozess bietet sich daher eine Datenerfassung auf der Überlademaschine an, da alles, was auf den LKW geladen wird, diese Maschine passiert. Deshalb fiel die Wahl auf die Aufzeichnung von Bildern und Signalen. Die Bilder zeigen die überladenen Feldfrüchte auf einem Förderband. Die Signale werden vom Bussystem der Überlademaschine abgegriffen.

3.2.3.1 Ausgeleuchtete Bilder der MSI-Kamera

Die Kamerawahl fiel auf eine multispektrale Flächenkamera, die Bilder im sichtbaren RGB-Bereich (RGB = Rot/Grün/Blau) aufnimmt. Zusätzlich werden zwei monochrome Bilder im niedrigen und hohen Nahinfrarotbereich (NIR) deckungsgleich zum RGB-Bild erfasst, was bei Bedarf eine weitere Informationsquelle darstellt. Die gewählte MSI-Kamera vom Typ FS-3200T-10GE-NNC [24] liefert mit drei Bild-Kanälen (Abbildung 6), einer eingestellten Bit-Tiefe von 8 Bit pro Pixel, einer Bildhöhe von 1.536 und einer Bildweite von 2.048 Pixeln 9,44 MByte pro Bildaufnahme. Eine hyperspektrale Kamera wurde hingegen ausgeschlossen, da sie technisch immer als Zeilenkamera umgesetzt wird, aber trotzdem eine immense Datenmenge bei letztlich langsamer Verarbeitungsgeschwindigkeit generiert. Die Kamera wurde senkrecht und mittig zum Förderband in einem Abstand von 80 cm dazu über diesem montiert (siehe Abbildung 3 bis Abbildung 5). Sie wird über das Bordnetz der Überlademaschine mit Strom versorgt. Außerdem unterstützt sie den GigE-Vision-2.0-Standard, welcher das Precision Time Protocol (PTP) umsetzt (vgl. [25], nähere Ausführung in den Abschnitten 3.2.5 und 4.1.1).

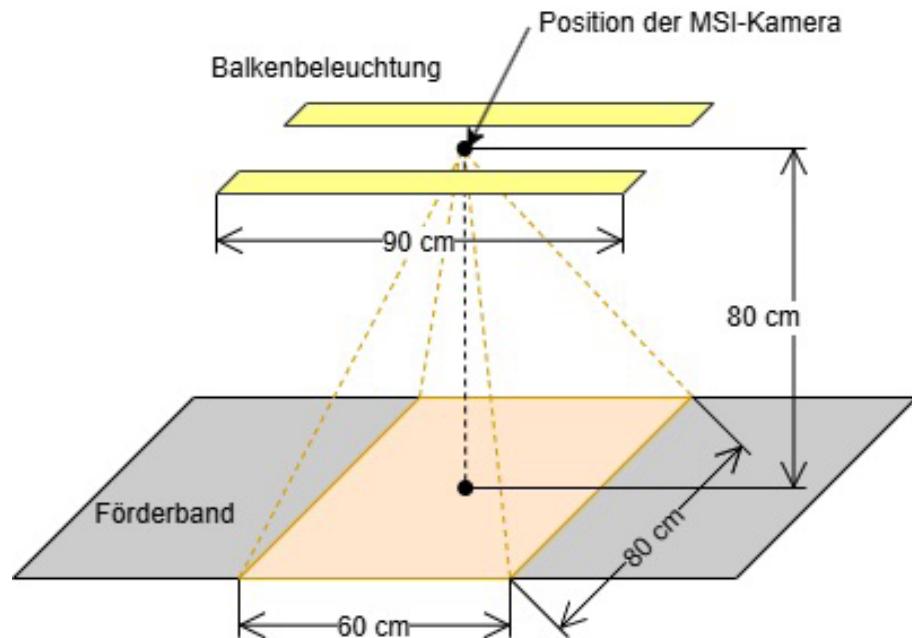


Abbildung 3 zeigt die physikalische Anordnung von MSI-Kamera und Beleuchtung über dem Förderband auf der Überlademaschine.

Um bewegte Objekte auf dem Förderband scharf abilden zu können, darf die Verschlusszeit der Kamera eine bestimmte Zeit nicht überschreiten. Die Bewegung eines Punktes auf dem Objekt wird durch das Objektiv auf den Sensor projiziert. Dabei darf sich dieser Punkt auf dem Sensor nicht weiter als um die Größe eines Pixels verschieben, um eine scharfe Abbildung zu gewährleisten. Unter Berücksichtigung einer Brennweite von 6 mm, einer Pixelgröße von 3,45 µm, einem Objektabstand von 80 cm und einer maximalen Förderbandgeschwindigkeit von 2 m/s ergibt sich eine erforderliche Verschlusszeit von etwa 0,2 ms oder weniger.

Die Brennweite des Kamera-Objektivs wurde so gewählt, dass die Kamera bei dem möglichen maximalen Abstand zum Förderband die komplette Breite des Bandes erfassen kann. Aufgrund der Förderbandgeschwindigkeit, der Brennweite und der Pixelgröße des Kamerensors ergeben sich Belichtungszeiten im Sub-Millisekunden-Bereich. Um dennoch Bilder mit ausreichender Helligkeit aufnehmen zu können, wurde das für die Kamera geeignete lichtstärkste Objektiv JVS-C118-0628 gewählt. Licht unterschiedlicher Wellenlänge wird von den Linsen unterschiedlich stark gebrochen. Dies führt zu Abbildungsfehler am Bildrand. Da der Wellenlängenbereich größer als bei normalen RGB-Kameras ist, ist dieses Objektiv für Prismen integrierende MSI-Kameras ausgelegt [26].

Testaufnahmen zeigen, dass gut beleuchtete Bilder, vor allem im Infrarotbereich, nur bei indirektem Tageslicht möglich sind. Die

Qualität der Bilder wird zusätzlich durch eine tief stehende Sonne und den Schattenwurf vom Förderbandaufbau beeinträchtigt. Dies hatte stark über- und unterbelichtete Bildbereiche zur Folge (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8). Als Abhilfe wurde im nächsten Entwicklungszyklus eine Abdeckung über der montierten Kamera angebracht (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5). Dadurch waren die Aufnahmen mangels Lichts zu dunkel, um die überladenen Feldfrüchte erkennen zu können. In einem ersten Entwicklungszyklus werden einfache Arbeits-LED-Scheinwerfer angebracht. Diese konnten zumindest das sichtbare Lichtspektrum der Kamera ausleuchten. Damit die drei Bildsensoren der MSI-Kamera genügend Licht erreichen, werden im nächsten Entwicklungszyklus zwei professionelle Zeilen-Beleuchtungen (siehe Abbildung 3 und Abbildung 5) neben dieser montiert, die die geforderten Lichtspektren bestmöglich abdecken.

In die Zeilen-Beleuchtung sind Hochleistungs-LEDs in weißer Farbe und zwei in verschiedenen Infrarotbereichen verbaut. Aufgrund der hohen erforderlichen Lichtleistung wäre bei Dauerbetrieb eine aufwändige aktive Kühlung der LEDs erforderlich. Da dies auf der Maschine unter den Bedingungen nicht zweckdienlich wäre, wird die Beleuchtung nur vor und nach dem Zeitpunkt der Bildaufnahme eingeschaltet. Dieser Impulsbetrieb wird über die Software des Rechners realisiert. Dazu werden Befehle an den im Rechner verbauten Microcontroller gesendet, welcher einen digitalen Ausgang ansteuert.



Abbildung 4 zeigt die einzelnen, an der Bildaufnahme beteiligten Komponenten am Arm der Überlademaschine von außen.



Abbildung 5 zeigt die an der Bildaufnahme beteiligten Komponenten unterhalb der Abdeckung.

Da die Beleuchtung ausschließlich während der Bildaufnahme durch die Kamera eingeschaltet ist, können zentrale Kameraparameter nicht automatisch von der Kamera eingestellt werden. Zur Konfiguration der für die Bildaufnahme wichtigen Parameter wird das mit der Kamera kompatible eBusSDK [27] verwendet. Der Gain, der die Verstärkung des Bildsignals zur Anpassung der Helligkeit beschreibt, wird für jeden Bildsensor individuell kalibriert. Zu diesem Zweck werden Testaufnahmen durchgeführt, um sicherzustellen, dass das Histogramm der Testbilder keine Ausreißer an den Rändern aufweist. Somit sind unter- oder überbelichtete Stellen im Bild ausgeschlossen. Die Belichtungszeit kann ebenfalls nicht automatisch von der Kamera eingestellt werden und wird manuell auf 0,2 ms festgelegt. Der Weißabgleich für die RGB-Bilder wird auf 5.000K eingestellt, basierend auf den vom Hersteller angegebenen Spezifikationen der weißen LEDs der Beleuchtung, ohne Verwendung eines separaten Testobjekts. Die zeitliche Synchronisation der einzelnen Bildsensoren untereinander sowie mit dem Trigger der Beleuchtung konnte in diesem Zusammenhang bereits nachgewiesen werden.

Aufgrund der unzureichenden Kühlung kann die Beleuchtung maximal 5% der Periodendauer, also der Zeit zwischen den Datenframes, eingeschaltet werden. Damit im Falle eines Softwarefehlers die Beleuchtung nicht dauerhaft eingeschaltet bleibt, wird das Signal des Microcontrollers vor Ansteuerung des Relais an eine monostabile Kippstufe geleitet (vgl. mit Abbildung 11). Die Schaltung ist so ausgelegt, dass bei einer steigenden Signallanke das Ausgangssignal unmittelbar auf *high* und nach 15 ms automatisch auf *low* geschaltet wird. Diese Zeitperiode wird mit dem Verhältnis aus einem Widerstand und einem Kondensator fest eingestellt und überschreitet den maximal zulässigen Duty Cycle der Beleuchtung von 5 % nicht. Damit die Schaltung von Umwelteinflüssen geschützt ist, wird ein Gehäuse mit Hilfe eines 3D-Druckers gefertigt und auf dem robusten PC befestigt, in dem neben der Schaltung auch ein DC/DC-Konverter Platz findet.

Unter Berücksichtigung dieser technischen Details lassen sich Aufnahmen wie in Abbildung 6 realisieren.

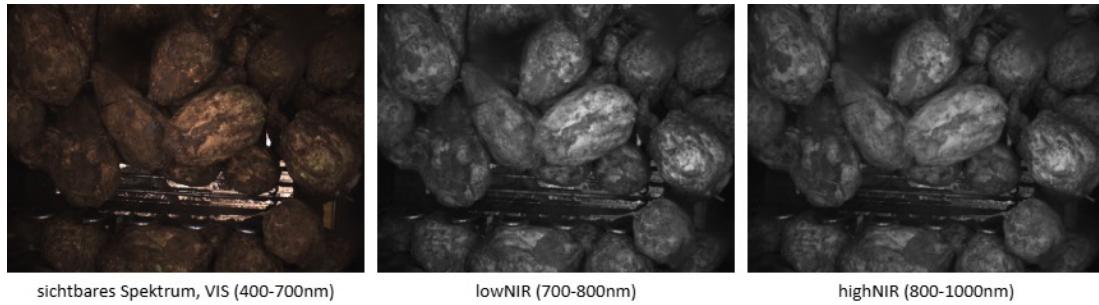


Abbildung 6 zeigt die drei Bilder einer Aufnahme mit der MSI-Kamera vom Typ FS-3200T-10GE-NNC. Das VIS-Spektrum wird als 3-Kanal-RGB-Bild, die beiden anderen Spektren als monochrome Bilder aufgenommen.

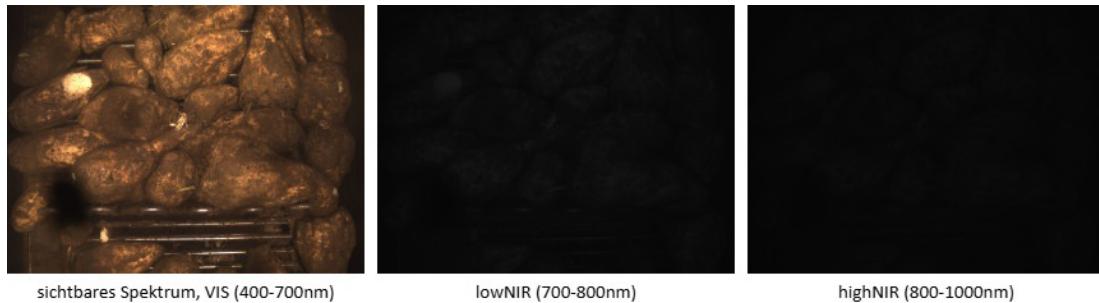


Abbildung 7 zeigt die drei Bilder einer Aufnahme mit der MSI-Kamera vom Typ FS-3200T-10GE-NNC ohne Beleuchtung im VIS- und NIR-Spektrum.

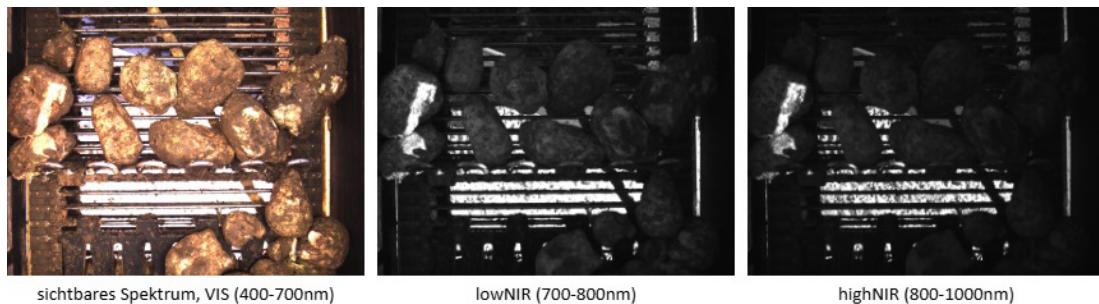


Abbildung 8 zeigt die drei Bilder einer Aufnahme mit der MSI-Kamera vom Typ FS-3200T-10GE-NNC ohne Abdeckung gegen Fremdlicht oder Sonnenlicht.

3.2.3.2 Signale des CAN-Bus

Als weitere Datenquelle auf der Überlademaschine wurden zwei CAN-Bus-Systeme ausgewählt. Die potenziellen Signale werden über Beschreibungsdateien im DBC-Format festgelegt (DBC = Database Container), die von den Projektbeteiligten ausgesucht wurden. Deshalb werden ausschließlich Signale aufgezeichnet, für die eine gültige Botschaft in der Datei angelegt wurde [28]. Die Bussysteme werden dabei nur abgehört und nicht manipuliert. Ein wichtiges Signal im Kontext des Beispielprojekts ist die Förderbandgeschwindigkeit, die über das DAQ-System zeitaufgelöst erfasst werden kann. Bei der eingesetzten Hardware entschied man sich für die PCAN-PCI-Express-Karte

des Herstellers PEAK-System Technik GmbH [29]. Diese Karte nutzt das unter Linux häufig vorinstallierte Socket-CAN.

Zur Aufzeichnung der Bus-Daten wird ein SW-interner Puffer verwendet. In diesem werden die Werte der bekannten Signale regelmäßig erneuert, sobald das Signal neu auf den Bus abgelegt wird. Der Inhalt des Puffers wird bei der zyklischen Abfrage regelmäßig ausgelesen und in den Datenframes dargestellt abgespeichert.

3.2.4 Autark arbeitende Aufnahmesoftware

Die Aufzeichnungsfunktion der Software erstellt eine Aufnahme mit bekannten Start- und Stopp-Zeitpunkten. Jede Aufnahme besteht aus

mehreren Datenframes, die jeweils mit einem Zeitstempel versehen sind. Ein Datenframe stellt eine Sammlung von Datenquellen zum Zeitpunkt des jeweiligen Zeitstempels dar. Zu den Quellen des Beispielprojekts gehören zwei CAN-Bussysteme und die MSI-Kamera, deren Bildaufnahme durch eine automatische Ein- und Ausschaltfunktion der Beleuchtung ausgelöst wird. Die Aufnahme-Software, die für dieses Projekt implementiert wurde, ist in der Lage, die einzelnen Datenquellen automatisch aufzuzeichnen. Deshalb wird die Software in einzelne Funktionskomponenten unterteilt. Diese werden entsprechend der objektorientierten Programmierung umgesetzt. Die daraus entstandenen Komponenten der Software werden übersichtlich in Abbildung 9 dargestellt.

ereignisbasiert und veranlasst die Managing-Komponente, die kontinuierliche Quellabfrage und Datenablage zu initiieren, während des Überladevorgangs aufrecht zu erhalten und danach wieder abzubauen.

Schließlich wird die Speicherbelegung mithilfe des Python-Moduls „psutil“ überwacht [30]. Diese Überwachung erfolgt für zwei Speicherplätze ebenfalls in konstanten Zeitintervallen, indem der Rückgabewert der Disk-Usage-Methode ausgewertet wird. Aufgrund dieser Funktion konfiguriert die Managing-Komponente bei Aufzeichnungsbeginn einen der beiden möglichen Speicherplätze in der Datenablage-Komponente.

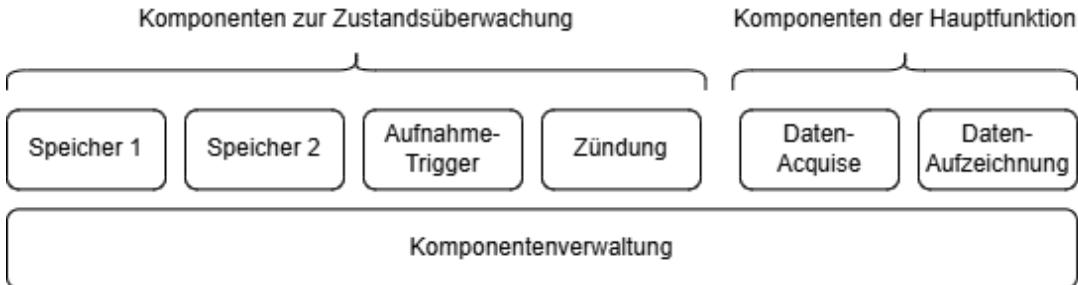


Abbildung 9 zeigt die Softwarekomponenten der Aufnahme-Software in einer einfachen Übersicht.

Der Rechner reagiert auf das Zündungssignal der Überlademaschine. Geht das Signal auf *high*, fährt der Rechner hoch; sobald es wieder auf *low* geht, erfolgt nach einer einstellbaren Verzögerungszeit (im Projekt 2 min) ein kontrolliertes Herunterfahren. Die Spannungsversorgung des Rechners bleibt dabei über die Bordnetzversorgung auch nach Abschalten des Zündungssignals noch erhalten. Erst 6 min nach Abschalten des Batteriehauptschalters wird die Spannungsversorgung des Rechners unterbrochen. Dadurch ist gewährleistet, dass die Aufnahme-Software die fallende Flanke des Signals in konstanten Intervallabständen überwacht, die Aufzeichnung geordnet beendet und einen Verlust nicht gespeicherter Datenframes verhindern kann.

Zusätzlich wird ein Signal überwacht, das die Aufnahme eigenständig startet und stoppt. Im Projektkontext ist dies ein Signal von einem der beiden Bussysteme, das den Beginn und das Ende des Überladevorgangs anzeigen. Die Überwachung des Signalzustands erfolgt

Die automatische Abfrage der Datenquellen erfolgt zeitgesteuert durch Timer-Threads, die die Abfrage der verschiedenen Datenquellen koordinieren. Jede Abfrage wird zu einem berechneten Zeitstempel ausgeführt, der verwendet wird, um die verschiedenen Datenquellen zusammenzuführen, in einem Datenframe zusammenzufassen und abzuspeichern. Die abgefragten Datenpakete werden mithilfe einer Queue an die Datenablage-Komponente übergeben. Die Datenabfrage muss präzise arbeiten und bis zur Nächsten wieder bereit sein. Um diese Funktion gewährleisten zu können, wurden anderen Funktionen, wie die Datenablage, in eine eigene, threadbasierte Funktionskomponente ausgelagert.

Die automatische Datenablage fasst die aufgenommenen Datenquellen in Aufnahmesequenzen, sog. Recordings, und Aufnahmen, sog. Datenframes, zusammen (siehe Abbildung 10). Datenframes sind die gesammelten Aufnahmen der Datenquellen zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die

Datenablagekomponente erstellt dafür einen Ordner und speichert darin die Bilder der MSI-Kamera als gezippte Datei und die ausgelesenen Signale der beiden Bussysteme in zwei einfachen Textdateien im YAML-Format ab. Die Datenframe-Ordner werden mithilfe der Zeitstempel, die die Überwachung des Aufnahme-Trigger-Signals ermittelt, in einem weiteren Ordner als Repräsentant eines Recordings zusammengefasst. Zusätzliche Informationen zum Recording bzw. dem Überladevorgang, beispielsweise die Anzahl der verlorenen Datenframes, werden in eine Text-Datei im gleichen Ordner geschrieben.

haben (siehe Abbildung 1):

Eine Anpassung in der Logger-SW mit Auswirkungen ist beispielsweise eine effizientere Methode zur Speicherung bestimmter Datenquellen. Die MSI-Kamera liefert pro Aufnahme drei Bilder, die anfangs in drei separaten Dateien unter Verwendung im npy-Format von Numpy abgespeichert wurden (vgl. Abbildung 6). Später wurde entschieden, dass das npz-Format von Numpy mehr Vorteile bietet.

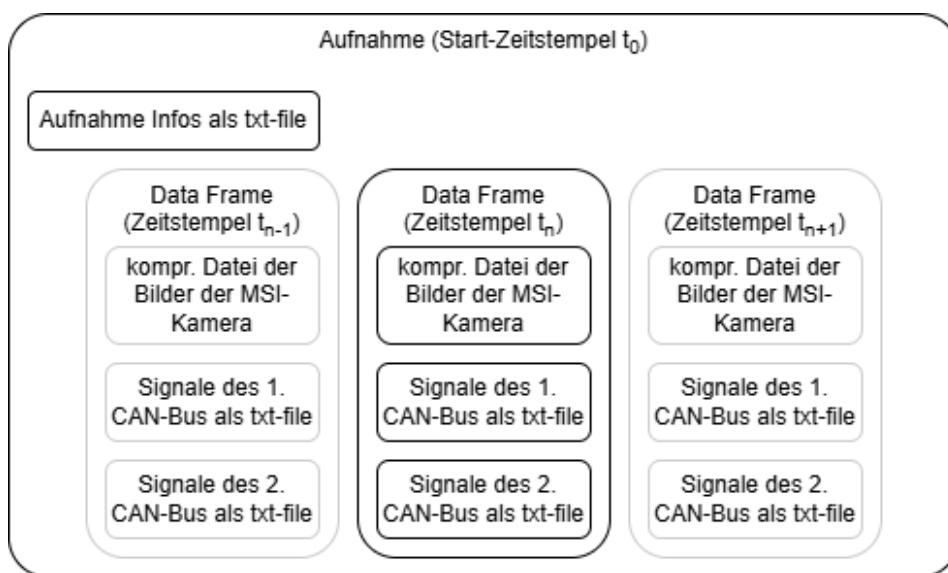


Abbildung 10 zeigt die Datei- und Ordner-Struktur, die zur Ablage der abgefragten Datenquellen implementiert wird.

Um gut ausgeleuchtete Bilder aufnehmen und abspeichern zu können, wird eine Spezial-Beleuchtung vor und nach der Kameraabfrage Software-getriggert ein- und ausgeschaltet. Für diesen Impulsbetrieb wird die Kamera-Komponente durch das Konzept der Vererbung erweitert und die erforderlichen Befehle, die an den im Rechner verbauten Microcontroller zu senden sind, ergänzt.

3.2.5 Kompatibilität der Komponenten während des Entwicklungsprozesses

Das automatisierte Aufzeichnungssystem wird während der Projektlaufzeit iterativ weiterentwickelt. Neben Schnittstellen für Datenquellen, die ergänzt oder entfernt werden können, können Änderungen relevant werden, die Auswirkungen auf die weitere Prozesskette

Dadurch konnten die erforderlichen Anweisungen im SW-Code übersichtlicher gestaltet werden. Die Unterscheidung der drei Bildquellen des VIS-, LowNIR- und HighNIR-Spektralbereichs führte ursprünglich zur Erstellung von drei unterschiedlichen npy-Dateien. Mit dem npz-Format muss nur eine einzige Datei erzeugt werden, was die Notwendigkeit aufwändiger if-Anweisungen überflüssig macht. Die Bezeichnung der drei Quellen wird innerhalb dieser Datei abgespeichert, wodurch sich die Anzahl der Dateien von drei auf eine reduziert. Bei Bedarf und wenn es die Echtzeitfähigkeit des Systems zulässt, kann die Dateigröße zusätzlich komprimiert werden.

Eine SW-Anpassung ohne Auswirkungen ist beispielsweise das optimierte Threading. Mithilfe von Threading können Aufgaben am

Prozessor zeit- und ereignisgesteuert verteilt werden. In der ersten Version der Logger-SW wurde eine erforderliche Wartezeit durch einen erneuerbaren Timer-Thread abgelöst. Dadurch kann der Prozessor die Verarbeitungszeit während der Datenaufnahme besser ausnutzen.

Als Folge müssen Anpassungen am Aufnahmesystem anhand der Verwendbarkeit in der nachfolgenden Prozesskette geprüft werden. In diesem Fall kann die Implementierung einer zusätzlichen Interpretationsoption im Postprocessing diese Problematik abfangen, sodass Aufnahmen, die mit beiden Versionen der Logger-SW erstellt wurden, weiterhin verwendbar sind.

3.2.6 Echtzeitfähigkeit, zeitliche Präzision und Synchronisation

Das Aufnahmesystem als Echtzeitsystem [31] muss spezifische Anforderungen erfüllen, um sicherzustellen, dass innerhalb eines vorgegebenen Zeitrahmens die Abfrage und Ablage der Datenquellen zuverlässig erfolgen. Dabei stellt die Datenabfrage im Vergleich zur Datenablage eine strengere Echtzeitanforderung dar: Sie muss innerhalb eines kurzen Zeitintervalls abgeschlossen sein, um die erfassten Daten einem Zeitstempel zuordnen zu können. Die Datenablage hingegen muss spätestens beim Herunterfahren des Rechners abgeschlossen sein. Zu diesem Zweck wird eine Datenqueue zwischen Abfrage- und Ablagekomponente implementiert, die vor dem Herunterfahren vollständig abgearbeitet wird. Im Beispielprojekt wurde die Queue-Größe per Parameter auf „unbegrenzt“ gesetzt, wodurch sie praktisch durch den verfügbaren Arbeitsspeicher limitiert ist und ein Überlauf ausgeschlossen wird. Für produktive Systeme empfiehlt sich hingegen eine definierte Obergrenze, die sich an der maximal erwarteten Datenrate und den verfügbaren Speicherressourcen orientiert.

Die Zeitsynchronisation erfordert eine gemeinsame Zeitbasis für die bei der DAQ beteiligten Kontrollsysteme. Im Kontext des Beispielprojekts betrifft dies das Telematik-Steuergerät der Überlademaschine, den Aufnahme-Rechner und die MSI-Kamera, die jeweils eine eigene Zeitbasis nutzen. Zur Synchronisation dieser drei Steuergeräte wird das Precision Time Protokoll (PTP) eingesetzt. PTP setzt eine hohe zeitliche Präzision gemäß dem Standard IEEE 1588 um. Durch Installation

der Programme ptpt4l und phc2sys wird PTP am Aufnahme-Rechner aktiviert (vgl. [32]).

3.2.7 Energiebedarf

Die Nennspannung des Energiebordnetzes der Überlademaschine beträgt 24 V DC. Mobile Maschinen im LKW-Bereich können im realen Betrieb bis zu 32V DC anbieten. Der Aufnahmerechner sollte mit der durch die Maschine vorgegebenen Eingangsspannung betrieben werden können. Ein DC/DC-Konverter regelt daher die Bordnetzspannung auf konstant 12V DC und versorgt neben der Kippstufenschaltung die digitalen Ausgänge des Microcontrollers mit Strom. Ein weiterer DC/DC-Konverter stellt 48V DC für die Beleuchtung zur Verfügung und glättet außerdem die Leistungsspitzen, die durch das schnelle Schalten entstehen, auf ein Minimum, sodass die Bordelektronik möglichst wenig beeinflusst wird.

3.2.8 Remote-Wartung

Eine Remoteverbbindung zum Aufnahme-Rechner am Einsatzort der Überlademaschine ist für die Fernwartung unerlässlich. Um diese Funktion bereitzustellen zu können, wird eine Mobilfunkverbindung am Rechner vorgesehen. Der ausgewählte Rechner verfügt über einen SIM-Karten-Slot und wurde mit einer LTE-Antenne (LTE = Long Term Evolution) ausgestattet. Ein Prepaid-Vertrag für mobile Daten wurde separat abgeschlossen. Mit der hergestellten Internetverbindung ist es möglich auf den Rechner mittels Reverse-SSH zuzugreifen. Dadurch wird es möglich, eine Fernwartung auszuführen, um Problemanalysen durchzuführen und Bug-Fixes zu implementieren. Außerdem kann so der aktuell verfügbare Speicherplatz und die Bild-Qualität kontrolliert werden.

3.2.9 Übertragbarkeit des Hardware-Setups und der Software-Architektur

Die Ausgestaltung des Hardware-Aufbaus ist stark abhängig von der konkreten Aufgabenstellung – im vorliegenden Projektvorhaben der Datenaufzeichnung auf einer mobilen Erntemaschine – sowie von den ausgewählten Datenquellen und den teils widrigen Umgebungsbedingungen. Dafür fiel die Entscheidung auf eine MSI-Kamera mit relativ hohen und CAN-Bus-Daten mit

vergleichsweise geringen Datenströmen, was entsprechend ausgelegte Kabel und Anschlüsse am ebenso robusten Aufzeichnungsrechner erfordert hat (Abschnitt 3.2.1). Auch der Energiebedarf der eingebundenen Systeme muss mit der verfügbaren Bordnetzleistung abgestimmt sein. Für andere Zielumgebungen kann eine angepasste Hardware sinnvoll sein, etwa infolge alternativ ausgewählter Sensoren, entsprechender Rechnerleistung oder Energieversorgungskonzepte. Die im Vorhaben identifizierten Anforderungen werden gezielt hardwaretechnisch adressiert und gelöst. Die Adaption auf andere Anwendungen muss entsprechend geprüft werden.

Die Softwarearchitektur wurde möglichst modular aufgebaut, um eine Wiederverwendbarkeit in ähnlichen oder abweichenden Anwendungskontexten zu ermöglichen (Abbildung 9). Die Komponentenverwaltung ist universell einsetzbar und kann auch für andere als die Datenaufzeichnung geeignete Aufgaben verwendet werden. Die Zustandsüberwachungen leiten sich von einer Basisklasse ab und wurden der integrierenden Umgebung entsprechend parametrisiert. Dadurch sind sie für unterschiedliche Aufgabenstellungen adaptierbar. Die Komponenten der Hauptfunktion hingegen sind für die Datenaufzeichnung innerhalb dieses Projektvorhabens konzipiert. Es wurden Interface-Module zur Datenabfrage der MSI-Kamera und der CAN-Bussysteme erstellt. Bei der Integration anderer Sensoren müssen neue Module implementiert werden, wobei auch in diesem Fall eine Basisklasse als Grundlage zur Verfügung steht. Die Datenablage

erfolgt ebenfalls projektspezifisch (Abschnitt 3.2.4). Für andere Datenaufzeichnungsprojekte kann eine abweichende Speicherstruktur sinnvoll sein. Insgesamt bietet die modulare Softwarearchitektur eine hohe Flexibilität für zukünftige Erweiterungen und Anpassungen.

4. Ergebnisse

Die Hauptaufgabe des Aufzeichnungssystems in dieser Umsetzung ist es, Daten aus verschiedenen Quellen aufzuzeichnen. Da bei Projektbeginn keine umfassende Datenbasis vorlag, die man als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl dieser Quellen zugrunde legen hätte können, mussten diese erarbeitet werden. Dabei spielt die zeitliche Synchronisation des Rechners mit der landwirtschaftlichen Maschine und der Kamera eine wichtige Rolle, ebenso wie die zuverlässige Erkennung von Aufnahmebeginn und -ende. Da das System in die Zielumgebung eingreift, muss ebenfalls sichergestellt werden, dass dieses mit dem zusätzlichen System nicht wechselwirkt und die Messung möglicherweise sogar verfälscht.

4.1 Validierung der autonomen Aufnahmefunktion

Um das gesamte bzw. Teil-Systeme zu entwickeln und ihre Verfügbarkeit vor dem Start der Aufnahme-Kampagne sicherzustellen, wird unter Laborbedingungen ein Validierungssetup (Darstellung 1 in Abbildung 11) aufgebaut, welches mit dem Setup in der Zielumgebung (Darstellung 2 in Abbildung 11) vergleichbar ist. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Abbildung 11:

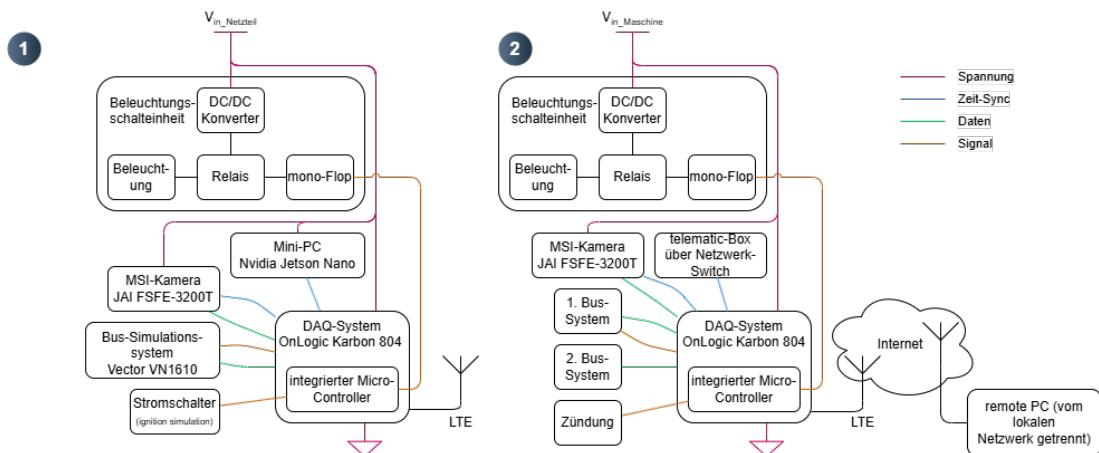


Abbildung 11 zeigt den Systemaufbau zur Validierung im Labor (1) und in der Zielumgebung (2) mit den relevanten Anschlüssen zum Abgriff der Energieversorgung und der Daten, der Signalüberwachung und zur Zeit-Synchronisation.

4.1.1 Zeit-Synchronisierung

Für die Zeitsynchronisierung vorbereitete Systemkomponenten sind der Rechner von OnLogic und die MSI-Kamera von JAI. Die Zeitbasis wird von der landwirtschaftlichen Maschine vorgegeben und wird von einer dort installierten Telematik-Box über Gigabit-Ethernet abgegriffen. Im Validierungssetup wird stattdessen ein „Jetson Nano“-Mini-Rechner von Nvidia verwendet. Unter Linux liegen die benötigten Software-Komponenten „ptp4l“ und „phc2sys“ über den integrierten Software-Paketmanager installationsbereit zur Verfügung. Diese werden am Jetson Nano- und am OnLogic-Rechner installiert. Die Ethernet-Ports der beiden Rechner werden nach Dokumentation so konfiguriert, dass der Jetson Nano-Rechner die Zeitbasis an den OnLogic-Rechner und dieser an die JAI-Kamera weiterreicht. Die Kamera implementiert das GigeVisionv2-Protokoll und kann somit die vorgegebene Zeitbasis übernehmen. Diese Synchronisationsmöglichkeit basiert auf dem Time-Master-to-Slave-Konzept. Das Auslesen der Protokolle zeigt eine Synchronisationsgenauigkeit im zweistelligen Mikrosekundenbereich. Für die Anwendung stellt dies eine präzise und zuverlässige Zeitsynchronisierung dar.

4.1.2 Überwachung der Zündung

Die Überwachung der Zündungsspannung wird am OnLogic-Rechner umgesetzt. Der Leitungspegel wird von dem im OnLogic-Rechner integrierten Microcontroller überwacht. Die Logger-Software fragt den Microcontroller über eine serielle Schnittstelle in konstanten Zeitabständen ab. Der interne Microcontroller übernimmt den Shutdown des Rechners nach 60 Sekunden. In dem darauffolgenden Zeitraum von 4 min wird die Logger-SW kontrolliert beendet, um einen Verlust bis dahin nicht abgespeicherter Datenpakete zu vermeiden. Weil nur der fallende Signalpegel erkannt werden kann, ist nur eine periodische Überwachung in engen Zeitintervallen von 3 Sekunden sinnvoll. Die Überwachung wird während einer aktiven Aufnahme ausgesetzt. Im Validierungssetup wird die Implementierung durch das Öffnen und Schließen eines Schalters simuliert.

4.1.3 Überwachung des Aufnahmetriggers

Die Überwachung des Aufnahmesignals wird ebenfalls am OnLogic-Rechner umgesetzt. Dafür wird die Schnittstelle zum Auslesen des Bussystems in der Logger-Software genutzt. Das Signal wird aus einer bekannten CAN-Botschaft ausgelesen, um die Statusänderung zu erfassen. Die Abfrage erfolgt ereignisbasiert, um die Rechnerauslastung gegenüber einer zeitbasierten Abfrage zu reduzieren und um direkt auf Signaländerungen durch Aufnahmestart und -beendigung reagieren zu können. Zur Funktionsvalidierung wird das Bus-System simuliert, was mit einem Rechner mit CANoe-Software und einer VN1610-Box von Vector umgesetzt wird. Die Botschaften von zwei simulierten CAN-Systemen kann im Validierungssetup auf einem Port reduziert werden, da in der Logger-SW der überwachte CAN-Port konfiguriert werden kann. Um realistisch die Zielumgebung abbilden zu können, wird ein Trace abgespielt. Die Analyse mit einem Oszilloskop ergab eine hohe Trigger-Genauigkeit und eine konsistente Integrität der erfassten Daten unter den gegebenen Bedingungen.

4.1.4 Abfrage der Datenquellen

Die Abfrage der Datenquellen wird mit der Logger-SW am OnLogic-Rechner realisiert. In der Logger-SW werden Module umgesetzt, die die JAI-Kamera und die beiden Bussysteme abfragen. Da diese Module ebenfalls konfigurierbar sind, können im Validierungssetup ein und in der Zielumgebung zwei CAN-Ports abgefragt werden. Bei einer aktiven Aufnahme erfolgt die Abfrage zyklisch alle 0,3 Sekunden. Das ist das minimale Zeitintervall, das durch den physikalischen Aufbau am Aufnahmestandort der Kamera gefordert werden muss und welches das Aufnahmesystem erfüllt.

4.2 Evaluation relevanter Anforderungen

Zur Beantwortung der in Abschnitt 1 formulierten Forschungsfrage wurde das entwickelte Datenaufzeichnungssystem anhand ausgewählter Systemparameter evaluiert. Die Bewertung orientierte sich an vier zentralen Anforderungen: der Verfügbarkeit der Aufnahmefunktion, der Praxistauglichkeit

des Speichermanagements, der Qualität der aufgenommenen Bilder sowie der zeitlichen Präzision der Sensordatenabfrage.

4.2.1 Verfügbarkeit der Aufnahmefunktion

Für den produktiven Einsatz im Feld ist die Verfügbarkeit der Aufnahmefunktion essenziell. Das System sollte nach einem Kaltstart innerhalb kürzester Zeit betriebsbereit sein, sodass die Datenaufzeichnung ohne Verzögerung nach dem Anlaufen der Überlademaschine beginnen kann. Zur Validierung dieser Anforderung wurde ein Integrationstest „Boot-to-Service Availability“ entwickelt. Dieser misst die Zeitspanne vom Einschalten des Rechners bis zur Verfügbarkeit des Dienstes `data_logger.service`.

Als erstes wird die Gesamtbootzeit des Onlogic-Rechners betrachtet. Dafür wird dieser vollständig vom Strom getrennt, um einen Kaltstart zu simulieren. Nach Abschluss des Bootvorgangs wird im Terminal der Befehl `systemd-analyze time` ausgeführt, um die Gesamtbootzeit zu ermitteln [33]. Diese umfasst die Zeitanteile für Firmware, Loader, Kernel und Userspace. Der Userspace wird von der Betrachtung ausgeklammert, da innerhalb dieser Zeitspanne auch die im nächsten Absatz betrachteten Dienste starten. Der Test wird dreimal ausgeführt. Die gemessenen Zeiten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Testlauf	Firmware	Loader	Kernel	Gesamtzeit
1	38,889s	27,481s	3,983s	70,353s
2	38,807s	27,475s	3,958s	70,240s
3	38,929s	27,492s	3,941s	70,362s

Tabelle 1 zeigt die Bootzeiten des Betriebssystems nach einem Kaltstart in mehreren Testläufen.

Des Weiteren werden die Startzeiten der für die Zeit synchrone Aufnahmefunktion relevanten Services `data_logger.service`, `ptp4l`, `enp9s0 master.service`, `ptp4l enp10s0 slave.service` und `phc2sys.service` betrachtet. Die zuletzt genannten drei Services sind für die Zeit-Synchronisation zuständig und starten nacheinander. Deshalb ist der `phc2sys.service` für diese Betrachtung ausreichend. Parallel dazu startet der `data_logger.service`. Die Startzeiten der Services werden mithilfe der Befehle entsprechend Listing 1 ermittelt. Der Test wird

ebenfalls dreimal ausgeführt. Die gemessenen Zeiten betragen immer 1ms für `data_logger.service` und 2,003s für `phc2sys.service`.

```
systemd-analyze blame | grep data_logger.service
systemd-analyze blame | grep phc2sys.service
```

Listing 1: CLI-Befehle zur Dienstanalyse

Die Zeit bis zur Verfügbarkeit der Aufnahmefunktion auf der Überlademaschine ergibt sich aus der Bootzeit des Betriebssystems nach Aktivierung der Zündung sowie der Startzeit des Dienstes `data_logger.service`. Zur Bewertung wurden die gemessenen Zeiten aus drei Testläufen addiert. Die resultierende Dauer bis zur vollständigen Bereitstellung einer zeitsynchronen Aufnahmefunktion beträgt etwa 1,21 Minuten und liegt damit innerhalb des verfügbaren Zeitfensters von 1,5 Minuten, in dem die Überlademaschine betriebsbereit ist. Dieses Ergebnis bestätigt, dass die Aufnahmefunktion die Anforderungen für den Feldeinsatz erfüllt.

4.2.2 Praxistauglichkeit des Speichermanagements

Ein praktischer Aspekt betrifft den Austausch der Speichermedien. Aufgrund der großen Datenmengen (mehrere Terabyte) erweist sich der physische Versand der SSDs per Post als schneller und effizienter als ein Upload über eine Internetverbindung. Dies unterstreicht die Relevanz einer durchdachten Strategie für Speicherung und Datenaustausch.

Im Rahmen der Aufnahmekampagne konnte festgestellt werden, dass die in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Speicherkapazität ausreichend dimensioniert wurde, um die Aufnahmefunktion über den gesamten Zeitraum zuverlässig aufrechtzuerhalten. Der damit verbundene organisatorische Aufwand blieb überschaubar und bestätigte die Praxistauglichkeit der gewählten Speicherlösung.

4.2.3 Qualität der Aufnahmen

Die Beurteilung der Bildqualität ist ein wesentlicher Schritt bei der Bewertung von Bildgebungssystemen, da sie ein objektives Maß für die Leistung des Kamerasensors und die Zuverlässigkeit der erfassten Daten liefert. Unter den häufig verwendeten Kriterien ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR = Signal-to-Noise Ratio) besonders wichtig, da es

das Verhältnis zwischen sinnvollem Signal und zufälligem Rauschen in einem Bild widerspiegelt. Gemäß den Richtlinien von ISO 15739 [34] wird das SNR anhand einheitlicher Bereiche von RGB- und NIR-Bildern mithilfe eines robusten Rauschschätzverfahrens quantifiziert. Die resultierenden SNR-Werte betragen 66, 63 und 65 (36 dB) für den Rot-, Grün- und Blaukanal der RGB-Kamera, 56 (32 dB) für den HighNIR-Kanal und 37 (31 dB) für den LowNIR-Kanal. Gemäß ISO 12232 [35] gelten SNR-Werte über 40 (ca. 32 dB) als ausgezeichnet, Werte um 20 (ca. 26 dB) als gut und Werte nahe 10 (ca. 20 dB) stellen die minimal akzeptable Qualität dar. Basierend auf diesen Schwellenwerten erreichen alle Kanäle der MSI-Kamera mindestens eine gute Bildqualität, wobei die meisten in die Kategorie „ausgezeichnet“ fallen. Dies bestätigt, dass das entwickelte DAQ-System eine Bildqualität gemäß internationalen Standards und nahe den im Datenblatt [24] der Kamera angegebenen SNR-Werten gewährleistet.

4.2.4 Ausleuchtung der aufgenommenen Bilder

Der Betrieb der Beleuchtung erfolgt aufgrund der hohen Leistungsanforderungen ausschließlich im Impulsbetrieb. Die korrekte Aufnahme erfordert eine exakte zeitliche Synchronisation mit der aktiven Beleuchtungsphase. Zur Überprüfung der Synchronisation wurde die mittlere Helligkeit von insgesamt 573.890 Aufnahmen berechnet. Nach automatischer Sortierung der Bilder nach Helligkeit, konnte sehr leicht festgestellt werden, dass Unterbelichtung lediglich bei 187 Aufnahmen

auftrat, was einem Anteil von 0,03 % entspricht. Damit wurde in 99,97 % der Fälle eine korrekte Ausleuchtung erzielt, womit die Zuverlässigkeit für die vorliegende Anwendung als ausreichend bewertet werden kann.

4.2.5 Dauer der Datenabfrage und -ablage

Im Rahmen der Evaluation zeitkritischer Anforderungen wurde die Dauer der Datenabfrage und -ablage innerhalb eines Aufnahmeverfahrens untersucht. Grundlage dieser Analyse ist ein Integrationstest, dessen Ziel es ist, die Einhaltung eines Aufnahmeyzyklus von 0,3 Sekunden unter realen Betriebsbedingungen zu verifizieren.

Die Datenabfrage erfolgt über drei voneinander unabhängige Timer-Threads, die jeweils eine Sensorquelle (zwei CAN-Bussysteme und eine MSI-Kamera) bedienen. Die Threads starten ihre Abfragen idealerweise gleichzeitig. In der Praxis können geringe zeitliche Verschiebungen auftreten, da alle Threads denselben Prozessorkern nutzen. Die effektive Dauer der Datenabfrage wird durch den Thread bestimmt, der als letzter sein Datenpaket in der FIFO-Pipe (FIFO = first-in, first-out) ablegt. Sobald das erste Datenpaket in der Pipe liegt, beginnt der Consumer-Thread mit der Verarbeitung, d.h. dem Ablegen der Datenpakete auf der SSD-Festplatte. Die Gesamtzeit der Datenablage wird durch das zuletzt aus der Pipeline entnommene Paket bestimmt. Abbildung 12 veranschaulicht die betrachteten Threads.

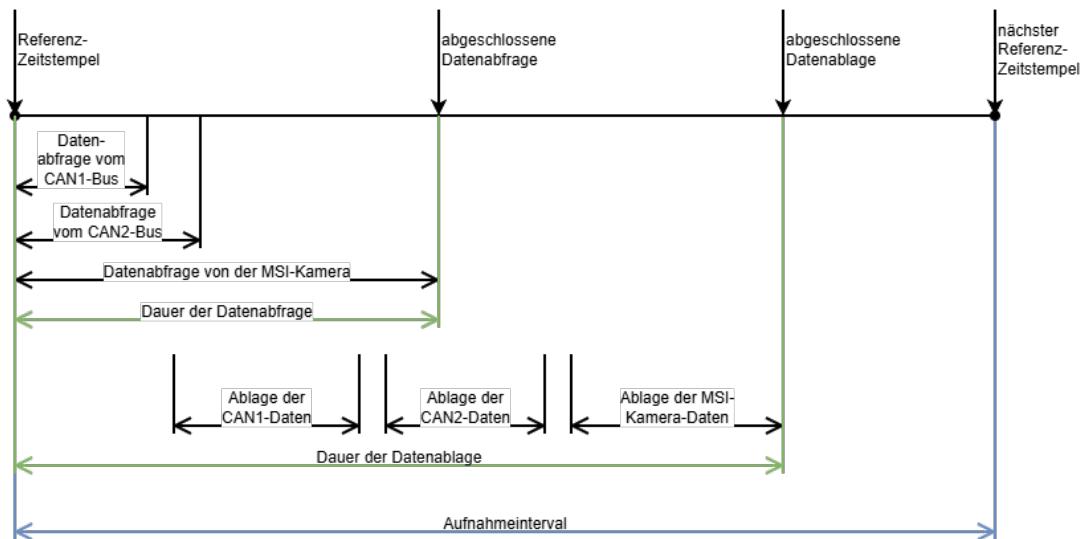


Abbildung 12 zeigt die Dauer von Datenabfrage und -ablage während einer Aufnahme.

Zur Evaluation dieser Prozessdauern wurde im Softwarecode eine Zeitmessung integriert, die zur Laufzeit des Dienstes `data_logger.service` eine CSV-Datei erzeugt. Die in Grün dargestellten Zeittäufen werden während einer aktiven Aufnahme für jedes Aufnahmeverfahren in diese Datei geschrieben. Nach Abschluss der Aufnahme erfolgt eine Auswertung der Datei, wobei Mittelwert, Standardabweichung und Maximalwert der Zeittäufen berechnet werden (siehe Tabelle 2).

	Mittelwert	Standard-abweichung	Maximum
Datenabfrage	0,0951s	0,0012s	0,1011s
Datenabfrage	0,2389s	0,0344s	0,3079s

Tabelle 2 zeigt Mittelwert, Standardabweichung und Maximalwert der Dauer einer Datenabfrage und -ablage während einer Aufnahme.

Die Analyse der Prozessdauern zeigt, dass der Aufnahmzyklus von 0,3 Sekunden in 95,28 % der Fälle eingehalten wurde. Der Anteil der Überschreitungen lag bei 4,72 %. Im Rahmen des Testlaufs wird der Anteil als akzeptabel bewertet, da das jeweils folgende Aufnahmeverfahren wieder unterschritten wurde. Dennoch sollte dieser Anteil weiter beobachtet werden, da eine Zunahme potenziell dazu führen könnte, dass die Datenablage die nächste Datenabfrage verzögert.

Die Datenablage stellt sich als kritischster Teilprozess im DAQ-System dar. Dies zeigt sich in einem hohen Mittelwert und einer hohen Standardabweichung. Im Gegensatz dazu weist die Datenabfrage eine hohe zeitliche Stabilität auf. Die geringe Standardabweichung deutet auf eine konsistente und zuverlässige Ausführung der Abfrage-Threads hin. Idealerweise sollte die Datenabfrage möglichst unmittelbar nach dem Referenzzeitstempel abgeschlossen sein, um die Präzision und Qualität der Datenaufnahme zu gewährleisten. Die Datenablage kann das verbleibende Zeitfenster des Aufnahmeverfahrens nutzen. Sollte dieses Fenster verkürzt werden, wäre eine Optimierung der Ablagedauer erforderlich, beispielsweise durch eine zeitliche Entkopplung der Datenabfrage und -ablage.

4.3 Systemverhalten in Zielumgebung

Trotz der gründlichen Validierung vor Inbetriebnahme traten bei und nach der Installation in der Produktivumgebung ein paar Probleme auf, die v.a. im Zusammenhang mit der neuen Systemumgebung stehen. Über die Internetverbindung ist es gelungen, Fehler im Gesamtsystem remote zu identifizieren und nachträglich zu lösen.

- Auf der landwirtschaftlichen Maschine musste ein kompatibler Softwarestand durch den Projektpartner installiert werden. Diese Installation war nötig, da der Hersteller ein eigenes Signal zur Aktivierung der Aufnahme angeboten hatte. Außerdem musste der Ethernet-Port zur Zeitsynchronisation konfiguriert werden. Daraufhin war auch eine Neukonfiguration am Logger und an der Kamera erforderlich.
- Bei ersten Testaufnahmen auf der Maschine fiel auf, dass nur etwa die Hälfte der Bilder beleuchtet waren. Kameraaufnahme und Beleuchtung werden nacheinander im gleichen Thread getriggert. Es zeigte sich, dass die Ansteuerung der Beleuchtung über die serielle Schnittstelle am Microcontroller mehr Zeit in Anspruch nimmt als das Senden des Befehls für die Abfrage der Kameradaten. Eine Verzögerung der Kameraabfrage in der Software konnte hier Abhilfe schaffen. Dieser Fehler konnte durch Messungen mit einem Oszilloskop an der Hardware identifiziert werden.
- Die drei Parameterwerte „Gain“ eines jeden Sensors der MSI-Kamera mussten neu eingestellt werden, da die Rüben einen anderen Lichtreflexionsgrad als die Testobjekte im Labor aufwiesen. Aufgrund der konstanten Beleuchtungssituation auf dem Förderband kann der Gain für alle drei CMOS-Sensoren fest eingestellt werden. Eine Abdeckung schützt das Sichtfeld der MSI-Kamera gegen direktes Tageslicht. Die Helligkeit von einfallendem Rest-Tageslicht, auch zu unterschiedlichen Tageszeiten, ist im Vergleich zur Beleuchtung vernachlässigbar gering und hat keinen Einfluss auf die Helligkeit der Bilder.

- Eine für die Aufnahmefunktion nicht relevante Monitoring-Komponente wurde auskommentiert, nachdem festgestellt wurde, dass sie diese Funktion blockiert.
- Der Remote-Zugriff auf den Datenlogger konnte final nach der Erstinbetriebnahme über Reverse-SSH konfiguriert werden.
- Bei Aufnahmestart geht ein Datenframe verloren, was beim Vergleich des Zeitstempels des ersten Datenframes mit dem eigentlichen Startzeitstempel aufgefallen ist. Dieser Umstand wird aufgrund der zum Aufnahmestart-Zeitpunkt wenig aussagekräftigen Bilder akzeptiert.

Wie man sieht, ist die Fehler-Ursache des Öfteren die Tatsache, dass die Zielumgebung, für die das Aufnahmesystem ausgelegt wird, ein anderes Verhalten aufweist als angenommen. Für die Weiterentwicklung der Logger-SW ist es essenziell, diese im realen Betrieb der Produktivumgebung zu überwachen. Dadurch und durch absichernde Testläufe kann eine hohe Systemverfügbarkeit erreicht werden. Auch künftige Probleme können so hoffentlich erfolgreich identifiziert und behoben werden.

5 Schlussfolgerung

Insgesamt war das Projekt zur Entwicklung eines robusten Datenaufzeichnungssystems für mobile Maschinen ein großer Erfolg. Die gesetzten Ziele, wie die erforderliche Framerate, wurden erreicht und das System konnte erfolgreich implementiert werden. Die Hardware- und Softwarekomponenten haben sich während des Praxiseinsatzes als zuverlässig und robust erwiesen, selbst unter den anspruchsvollen Bedingungen der landwirtschaftlichen Umgebung.

Die durchgeführten Tests und Validierungen haben gezeigt, dass das System in der Lage ist, präzise und konsistente Daten zu erfassen und zu verarbeiten. Der Einsatz des Systems in der Praxis über mehrere Wochen hat dies bestätigt. Die Echtzeitfähigkeit und die zeitliche Synchronisation der verschiedenen Komponenten haben sich als besonders wertvoll erwiesen, um die Anforderungen des Projekts zu

erfüllen. Trotz einiger Herausforderungen, wie der Notwendigkeit zur Fehlerbehebung in der Produktionsumgebung und der eingeschränkten Internetverfügbarkeit auf landwirtschaftlichen Flächen, konnte das Projektteam diese erfolgreich meistern. Die Möglichkeit zur Fernwartung und die Implementierung von Sicherheitsmechanismen haben dazu beigetragen, die Systemstabilität zu erhöhen.

Jedoch wird auch deutlich, dass die Fehlerbehebung in der Produktionsumgebung schwierig ist und ein besseres Validierungsumfeld erforderlich macht. Zudem ist die Online-Fehlerbehebung oder sogar die Datenübertragung in landwirtschaftlichen Gebieten aufgrund der aktuellen Situation nicht immer möglich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Projekt nicht nur die technischen Anforderungen erfüllt hat, sondern auch wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Entwicklungen im Bereich der Datenaufzeichnung und -verarbeitung in der Landwirtschaft geliefert hat. Die erzielten Ergebnisse und die gewonnenen Erfahrungen bilden eine solide Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Bereich.

Danksagungen

Wir danken unserem Projektpartner ROPA Fahrzeug- und Maschinenbau GmbH, auf deren Entwicklungsmaschine wir das Aufnahmesystem installieren durften.

Ein besonderer Dank gilt dem Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, insbesondere Dr. Roland Krebs, sowie dem Bayerischen Verbundforschungsprogramm (BayVFP) des Freistaates Bayern mit der Förderlinie "Digitalisierung", die dieses Projekt durch ihre finanzielle Unterstützung ermöglicht haben.

Erklärung zu Interessenkonflikten

Die Autor:innen erklären, dass kein Interessenkonflikt in Bezug auf die Veröffentlichung dieser Arbeit besteht.

References

- [1] ROPA Fahrzeug- und Maschinenbau GmbH. "Historie – Vom Landwirt zum Maschinenbauer." Zugriff am: 9. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.ropa-maschinenbau.de/unternehmen/historie/>.
- [2] W. Weiser, Zuckerrübenernte Mit Landmaschinen. Zugriff am: 4. März 2025.
- [3] C. Lozoya, A. Aguilar und C. Mendoza, "Service Oriented Design Approach for a Precision Agriculture Datalogger," IEEE Latin Am. Trans., Jg. 14, Nr. 4, S. 1683–1688, 2016, <https://doi.org/10.1109/LTA.2016.7483501>.
- [4] K. Dasari, S. A. Yadav, L. Kansal, J. Adilakshmi, G. Kaliyaperumal und A. Albawi, "Fusion of Hyperspectral Imaging and Convolutional Neural Networks for Early Detection of Crop Diseases in Precision Agriculture," in 2024 International Conference on Communication, Computer Sciences and Engineering (IC3SE): 9-11 May 2024, Gautam Buddha Nagar, India, 2024, S. 1172–1177, <https://doi.org/10.1109/IC3SE62002.2024.10593368>.
- [5] "Was ist multispektrale Bildgebung?" Zugriff am: 10. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.baslerweb.com/de-de/learning/multispektrale-bildgebung/>.
- [6] Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS. "Hyperspektrale und multispektrale Bildgebung – Fraunhofer IWS." Zugriff am: 10. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.iws.fraunhofer.de/de/technologiefelder/optische-messtechnik/optische-inspektionstechnik/technologien/hyperspectral-imaging.html>.
- [7] Automate. "GigE Vision." Zugriff am: 15. Januar 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.automate.org/vision/vision-standards/vision-standards-gige-vision?>
- [8] "IEEE 802.3 ETHERNET." Zugriff am: 15. Januar 2025. [Online.] Verfügbar: <https://ieee802.org/3/>.
- [9] Parrot Drones S.A.S. "Datasheet: Sequoia: the multi-band sensor designed for agriculture."
- [10] dataTec AG. "Leitfaden für DAQ-Systeme. Die Messdatenerfassung mit dem Datenlogger optimieren." Zugriff am: 24. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.datatec.eu/wiki/leitfaden-fuer-daq-systeme-die-mess-datenerfassung-mit-dem-datenlogger-optimieren>.
- [11] J. Downey, S. Bombiński, M. Nejman und K. Jemielniak, "Automatic Multiple Sensor Data Acquisition System in a Real-time Production Environment," Procedia CIRP, Jg. 33, S. 215–220, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.039>.
- [12] S.-H. Lee und J. Park, "A spatiotemporal data acquisition toolkit for volume estimation tools in precision agriculture," Concurrency and Computation, Jg. 33, Nr. 3, 2021, Art. Nr. e5258, <https://doi.org/10.1002/cpe.5258>.
- [13] V. Schatz, "Synchronised data acquisition for sensor data fusion in airborne surveying," S. 1125–1130, 2008, <https://doi.org/10.24406/publica-fhg-360314>.
- [14] B. Borgmann, V. Schatz, M. Hammer, M. Hebel, M. Arens und U. Stilla, "MODISSA: a multipurpose platform for the prototypical realization of vehicle-related applications using optical sensors," Applied optics, Jg. 60, Nr. 22, F50-F65, 2021, <https://doi.org/10.1364/AO.423599>.
- [15] A. Weersink, E. Fraser, D. Pannell, E. Duncan und S. Rotz, "Opportunities and Challenges for Big Data in Agricultural and Environmental Analysis," Annu. Rev. Resour. Econ., Jg. 10, Nr. 1, S. 19–37, 2018. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100516-053654>. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.annualreviews.org/docserver/fulltext/resource/10/1/annurev-resource-100516-053654>
- [16] A. Samourkasidis, E. Papoutsoglou und I. N. Athanasiadis, "A template framework for environmental timeseries data acquisition," Environmental Modelling & Software, Jg. 117, S. 237–249, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.009>.
- [17] M. G. P. S und B. R. Chintala, "Big Data Challenges and Opportunities in Agriculture," International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems, Jg. 11, Nr. 1, S. 48–66, 2020, <https://doi.org/10.4018/IJAEIS.2020010103>.
- [18] F. Piccoli, S. G. Locatelli, R. Schettini und P. Napoletano, "An Open-Source Platform for GIS Data Management and Analytics," Sensors (Basel, Switzerland), Early Access. <https://doi.org/10.3390/s23083788>.
- [19] Y. Mao et al., "A Customisable Data Acquisition System for Open-Source Hyperspectral Imaging," Sensors (Basel, Switzerland), Early Access. <https://doi.org/10.3390/s23208622>.
- [20] OnLogic. "OnLogic Karbon 804 High-Performance Rugged PC mit ModBay & PCIe: Spezifikation."

- Zugriff am: 11. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.onlogic.com/de/store/k804/>.
- [21] OnLogic, K800-Product-Manual. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://static.onlogic.com/resources/manuals/OnLogic-K800-Product-Manual.pdf>.
- [22] autoVimation GmbH, Hg., "Datenblatt: Megalodon-Kameraschutzgehäuse," 2024. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.autovimation.com/de/downloads/datenblaetter-deutsch/523-megalodon-de/file>.
- [23] CABLIFY. "Speeds of Cat5e, Cat6, Cat6a, Cat7, and Cat8 Cables Compared." Zugriff am: 17. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.cablify.ca/speeds-of-cat5e-cat6-cat6a-cat7-and-cat8-cables-compared/>.
- [24] JAI A/S, Hg., "FS-3200T-10GE-NNC Datasheet," Zugriff am: 18. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.jai.com/uploads/documents/English-Manual-Datasheet/Fusion-Series/Datasheet_FSFE-3200T-10GE-Flex-Eye.pdf.
- [25] Basler AG. "Wie profitieren Multi-Kamerasysteme von GigE Vision 2.0." Zugriff am: 17. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.baslerweb.com/de/de/learning/multi-kamerasysteme-gige-vision-2-0/>.
- [26] JAI A/S. "Lenses for JAI cameras." Zugriff am: 9. Januar 2025. [Online.] Verfügbar: www.jai.com.
- [27] JAI A/S. "Software products for JAI cameras." Zugriff am: 24. Januar 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.jai.com/de/support-software/jai-software>.
- [28] "DBC Introduction — Open Vehicles documentation." Zugriff am: 16. Januar 2025. [Online.] Verfügbar: https://docs.openvehicles.com/en/latest/components/vehicle_dbc/docsdbc-primer.html.
- [29] PEAK-System Technik GmbH. "PCAN-PCI Express: PEAK-System." Zugriff am: 17. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.peak-system.com/PCAN-PCI-Express.206.0.html#>.
- [30] "psutil documentation — psutil 6.1.1 documentation." Zugriff am: 20. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: https://psutil.readthedocs.io/en/latest/index.html#psutil.disk_usage.
- [31] P. Scholz, Softwareentwicklung eingebetteter Systeme: Grundlagen, Modellierung, Qualitätssicherung (SpringerLink Bücher). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [32] Linux PTP Project. Zugriff am: 13. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://linuxptp.nwtime.org/>.
- [33] "systemd-analyze," ubuntu Deutschland e. V., Hg., 2025. Zugriff am: 21. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://wiki.ubuntuusers.de/systemd/systemd-analyze/>.
- [34] ISO 15739:2017 Photography — Electronic still-picture aw imaging — Noise measurements, International Organization for Standardization, ISO, 2017.
- [35] ISO. "ISO 12232:2019 Photography - Digital still cameras - Determination of exposure index: ISO speed ratings, standard output sensitivity, and recommended exposure index: Photography — Digital still cameras — Determination of exposure index." Zugriff am: 27. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.iso.org/standard/73758.html>.