

J. Fottner · S. Müller

Automatisierte Generierung digitaler Daten von bestehenden Intralogistikanlagen für eine aufwandsarme Modellerstellung

Forschungsbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Automatisierte Generierung digitaler Daten von bestehenden Intralogistikanlagen
für eine aufwandsarme Modellerstellung***

der Forschungsstelle

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Das IGF-Vorhaben 20680 N/1 der Forschungsgemeinschaft
Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Verfasser:

Sandra Müller, M. Eng.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik,

Printed in Germany 2022

ISBN: 978-3-948514-20-4

fml – Lehrstuhl für

Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Tel.: + 49.89.289.15921

www.mec.ed.tum.de/fml

Kurzfassung

Automatisierte Förderanlagen nehmen in der Intralogistik eine wichtige Rolle ein. Mit einer vergleichsweise hohen Lebensdauer der Mechanik werden sie im Laufe ihres Lebenszyklus immer wieder an veränderte Gegebenheiten adaptiert, modernisiert, mithilfe neuer Erkenntnisse optimiert oder aufgrund gesteigerten Bedarfs erweitert. Um diese Änderungen an bestehenden Anlagen effizient und mit einer hohen Qualität durchzuführen, können die Anpassungen an digitalen Modellen vorab getestet werden. Zur Erstellung der Modelle fehlen jedoch insbesondere bei bestehenden Anlagen oftmals aktuelle Daten, welche daher mit einem hohen manuellen Aufwand erfasst werden müssen. Dies führt dazu, dass der Einsatz von Modellen häufig aus wirtschaftlichen Gründen abgelehnt und stattdessen mögliche Probleme bei den Änderungen in Kauf genommen werden. Vor diesem Hintergrund war es das Ziel des Projektes, einen Beitrag zu einer aufwandsarmen Erfassung von Daten aus bestehenden Förderanlagen zu leisten. Es sollte ein Konzept entwickelt werden, welches Daten automatisiert erfasst und so aufbereitet, dass sie für eine Modellerstellung eingesetzt werden können.

Daher wurde im Projekt ausgehend von der Analyse des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik im Bereich von Förderanlagen sowie deren Modellerstellung iterativ ein dreistufiges Verfahren zur Extraktion und Verarbeitung von Daten aus bestehenden Förderanlagen erarbeitet. Die erste Stufe, die Datenaufnahme, basiert auf dem Konzept eines intelligenten Förderguts, welches ausgestattet mit Messsensorik, Daten seiner Umgebung in Form von Kamerabildern, Beschleunigungen und Drehraten sowie der Lichtintensität während der Überfahrt über eine Förderanlage aufnimmt. Diese Daten werden in der zweiten Stufe, der Dateninterpretation, in verschiedenen Modulen zu zeitstempelbasierten Bewegungs- und Umgebungsdaten umgewandelt. In der dritten Stufe entstehen daraus durch das Verfahren der Rekonstruktion Modellierungsdaten, welche Aufschluss über das Layout, die Geometrie sowie weitere Zusatzattribute der zu analysierenden Förderanlage geben. Basierend auf diesen Teilkonzepten wurde das intelligente Fördergut als Behälter für drei verschiedene Kleinladungsträgergrößen demonstratorisch umgesetzt. Zudem wurden Module der Dateninterpretation und der Rekonstruktion implementiert, um die entstandenen Teilkonzepte für Referenz-Anlagenkonfigurationen zu testen und zu bewerten.

Das angestrebte Forschungsziel wurde erreicht.

Abstract

Automated conveyor systems play a key role in intralogistics. With a relatively long service life of the mechanics, they are repeatedly adapted to changed conditions, modernized, optimized with the help of new findings, or expanded due to increased demand in the course of their life cycle. In order to implement these changes to existing plants efficiently and with a high level of quality, the adaptations can be tested on digital models in advance. However, current data is often missing for the creation of the models, especially for existing plants, and this data must be collected with a high manual effort. As a result, the use of models is often rejected due to economic reasons and potential problems with the changes are accepted instead. With this background, the goal of the project was to enable a low-effort acquisition of data from existing conveyor systems. A concept to automatically collect data and process it in order to create a model should be developed.

Therefore, starting from the analysis of the current state of the art in the field of conveyor systems as well as their model creation, a three-level procedure for the extraction and processing of data from existing conveyor systems was developed iteratively in the project. The first level, the data acquisition, is based on the concept of an intelligent load equipped with measurement sensors that record data of its environment in the form of camera images, acceleration, and rotation rates as well as light intensity during the transit over a conveyor system. In the second level, the data interpretation, different modules convert these data to time stamp based motion and environment data. In the third level, the reconstruction process generates modeling data that provide information about the layout, geometry, and other additional attributes of the analyzed conveyor system. Based on these sub-concepts, the intelligent load was implemented as a container for three different small load carrier sizes. In addition, data interpretation and reconstruction modules were implemented to test and evaluate the resulting concepts for reference plant configurations.

The intended research goal was achieved.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract III	
Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	2
1.2 Forschungsziel	3
1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse	3
1.2.2 Vorgehensweise und Lösungsweg	3
2 Technische Grundlagen zu Förderanlagen und deren Modellierung	7
2.1 Grundlagen innerbetrieblicher Förderanlagen	7
2.1.1 Fördergut und Förderhilfsmittel	7
2.1.2 Fördermittel für Stückgüter	8
2.1.3 Steuerung von Förderanlagen	10
2.2 Digitale Modelle im Kontext von Förderanlagen	15
2.2.1 Grundlagen	15
2.2.2 Modellierungsprozess	16
3 Definition des Betrachtungsraums	19
3.1 Anlagenkonfiguration	19
3.2 Modellierungszweck	23
3.3 Weitere getroffene Annahmen und Einschränkungen	24
4 Entwicklung eines Gesamtkonzepts zur Rekonstruktion von Modellierungsdaten aus Bestandsanlagen	25
4.1 Ableitung von Vision und Hypothese	25
4.2 Anforderungsermittlung	28
4.2.1 Anforderungen an ein intelligentes Fördergut als Erfassungssystem	28
4.2.2 Ableitung zu rekonstruierender Modellierungsdaten	30
4.3 Gesamtkonzept und Rekonstruktionsszenario	33
4.3.1 Gesamtkonzept zur Rekonstruktion von Modellierungsdaten	33

4.3.2	Beschreibung des Vorgehens zur Datenaufnahme, Interpretation und Rekonstruktion	35
5	Detaillierung der Einzelschritte des Gesamtkonzepts	39
5.1	Rekonstruktion	39
5.1.1	Schnittstelle zur (teil)automatischen Modellerstellung	39
5.1.2	Rekonstruktionsverfahren	40
5.1.3	Aufzunehmende Bewegungs- und Umgebungsdaten	48
5.2	Dateninterpretation	49
5.2.1	Schnittstelle zur Rekonstruktion	49
5.2.2	Module zur Dateninterpretation von Messdaten in Bewegungs- und Umgebungsdaten	50
5.2.3	Aufzunehmende Messdaten	55
5.3	Datenaufnahme	55
5.3.1	Messsensorik zur Aufnahme der Messdaten	55
5.3.2	Elektronik zur Datenaufnahme	57
5.3.3	Erfassungseinheit	60
6	Implementierung der Teilkonzepte	69
6.1	Umsetzung der Datenaufnahme	69
6.1.1	Messsensorik und Elektronik	69
6.1.2	Erfassungseinheit	74
6.2	Umsetzung der Dateninterpretation	82
6.2.1	Bewegungspfad	83
6.2.2	Bewegungsabschnitt	86
6.2.3	Oberflächenerkennung	89
6.2.4	Breitenerkennung	95
6.2.5	Sensorerkennung am Beispiel „Lichtschranke“	97
6.3	Umsetzung der Rekonstruktion	99
6.3.1	Umgesetzte Module und Art der Umsetzung	99
6.3.2	Datengenerierung durch Entkopplung der Rekonstruktion von der Dateninterpretation	102
6.3.3	Umsetzungsbeispiel Referenzszenario	104
7	Bewertung des Gesamtkonzepts	113
7.1	Qualitative Bewertung der Umsetzbarkeit	113
7.1.1	Datenaufnahme	113

7.1.2 Dateninterpretation	114
7.1.3 Rekonstruktion	115
7.1.4 Erfüllung der Hypothese	115
7.2 Validierung der Anforderungen	116
7.3 Bewertung des Nutzens der rekonstruierten Daten	120
8 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	123
8.1 Zusammenfassung	123
8.2 Ausblick	125
Literaturverzeichnis	127
Abbildungsverzeichnis	133
Tabellenverzeichnis	139
Anhang A Tabellen	A-1
Anhang B Abbildungen	B-1

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog-Digital-Wandler
AP	Arbeitspaket
BRIEF	Binary robust independent elementary features
CAD	Computer Aided Design; Computer Aided Design
CLAHE	Contrast limited adaptive histogram equalization
fps	frames per second
GB	Gigabyte
HOG	Histogram of Oriented Gradients
I2C	Inter-Integrated Circuit
IMU	Inertial Measurement Unit (Inertiale Messeinheit)
KLT	Kleinladungsträger
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MFR	Materialflussrechner
OpAmp	Operationsverstärker
ORB	Oriented FAST and rotated BRIEF
PA	Projektbegleitender Ausschuss
SIFT	Scale invariant feature transform
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SSD	Solid-State-Drive

1 Einleitung

Der innerbetriebliche Transport stellt aufgrund seiner vernetzenden Eigenschaft ein Kernelement in Materialflusssystemen dar. Trotz der Bestrebungen nach einer Flexibilisierung des innerbetrieblichen Transports spielen automatisierte Förderanlagen (Beispiel vgl. Abbildung 1-1) weiterhin aufgrund ihrer Transporteffizienz und Robustheit eine wichtige Rolle. Dabei ist die Lebensdauer von Förderanlagen der Intralogistik als vergleichsweise hoch anzusehen. Während die mechanischen Komponenten eine hohe mögliche Lebensdauer aufweisen, unterliegen elektronische Komponenten sowie Elemente der Steuerungssoftware dem laufenden technologischen Wandel. Um diese kurzlebigeren Bestandteile auf den aktuellen Stand der Technik zu heben, werden die Förderanlagen in wiederkehrenden Retrofits modernisiert. Neben den genannten Erneuerungen unterliegen die Förderanlagen während ihres Lebenszyklus einem stetigen Wandel der Nutzungsanforderungen, weshalb Umbauten oder Erweiterungen erforderlich sind, um diese Anforderungen zu erfüllen.



Abbildung 1-1: *Beispiel für automatisierte Förderanlage in der Intralogistik
(Bild: GEBHARDT Fördertechnik GmbH)*

Eine große Anzahl der Förderanlagen auf dem Markt weist neben der langen Lebenszykluszeit auch eine hohe zeitliche Auslastung auf. Werden die oben beschriebenen Maßnahmen (Retrofit, Umbau, Erweiterung) geplant, so müssen für die physischen Tätigkeiten an der Anlage selbst oftmals Zeiträume gewählt werden, die sich nicht nur als unattraktiv für die beteiligten Mitarbeitenden darstellen, sondern

aufgrund der knapp bemessenen Zeiträume (z. B. Wochenenden, Betriebsurlaub, Nacht) einen hohen Zeitdruck bedingen.

1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Um trotz der beschriebenen Umstände eine hohe Qualität der Maßnahmen zu sichern und den Zeitdruck bei den physischen Tätigkeiten zu reduzieren, spielt der Einsatz Digitaler Modelle, welche z. B. für Vorab-Tests dienen, eine zunehmend wichtige Rolle. Ein wirtschaftlicher Einsatz von Digitalen Modellen steht dabei jedoch im Fokus der Entscheider. Dieser ist nur gegeben, wenn der Aufwand für die Modellerstellung den Nutzen (Kosten- und Zeitvorteil, Qualitätssteigerung, Entlastung der Mitarbeitenden etc.) nicht übersteigt. [Wün-2008, S. 79ff.] Dies kann zum einen durch eine Erhöhung des Nutzens oder eine Verringerung des Aufwands erfolgen. Das Nutzenpotenzial kann in der Regel dadurch ausgeschöpft werden, dass Modelle im Sinne eines durchgängigen Engineering-Prozesses für mehrere Einsatzzwecke während des Lebenszyklus eines Systems eingesetzt werden. Dies ist bei bereits bestehenden Systemen jedoch nicht immer möglich. Eine Reduktion des Aufwands hingegen kann beispielsweise durch die Nutzung von Möglichkeiten der (teil)automatischen Modellerstellung erzielt werden [Ber-2013, S. 25]. Der beschriebene Zusammenhang der Möglichkeiten zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit beim Einsatz Digitaler Modelle ist in Abbildung 1-2 dargestellt.

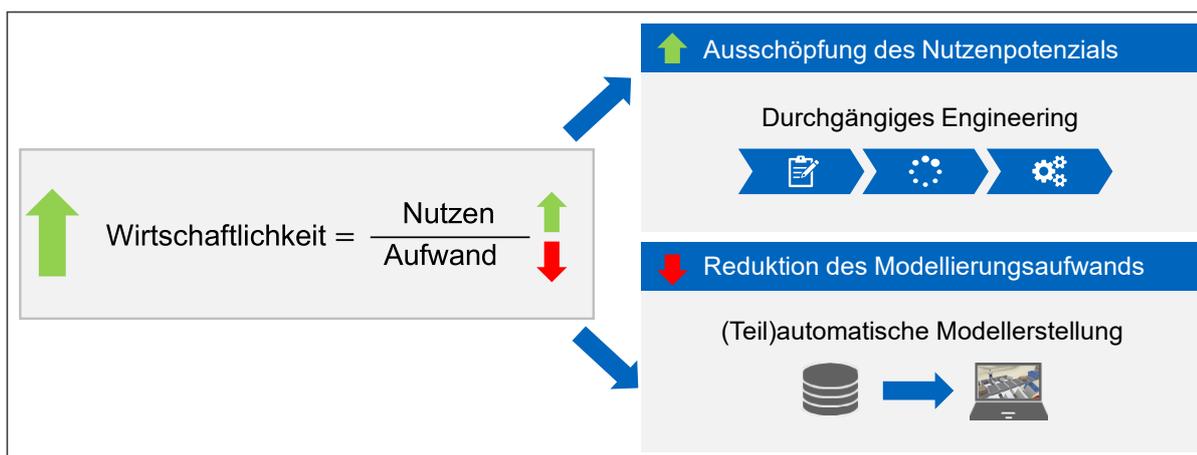


Abbildung 1-2: Möglichkeiten zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit beim Einsatz von Digitalen Modellen

Voraussetzung für die (teil)automatischen Modellerstellung ist dabei das Vorhandensein der benötigten Daten in digitaler Form. Die Datenbeschaffung bildet jedoch im Prozess der Modellerstellung einen wesentlichen Zeitaufwand (vgl. [Ber-2013, S. 25f.]). Gerade bei bestehenden Anlagen verstärkt sich dieser Effekt, da die

ursprünglichen Planungsdaten oftmals nicht mehr aktuell, nicht mehr vorhanden sind oder nicht digital vorliegen.

1.2 Forschungsziel

1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Ziel des Forschungsprojekts „AGeDa – Automatische Generierung digitaler Daten für bestehende Intralogistikanlagen“ ist es, den Aufwand bei der Datenbeschaffung zum Zweck der Modellerstellung für bestehende Förderanlagen der Intralogistik zu reduzieren. Hierfür soll ein Verfahren entwickelt werden, das Daten aufwandsarm aus bestehenden Anlagen extrahiert, verarbeitet, aufbereitet und so interpretiert, dass sich daraus Daten für eine Modellerstellung ableiten lassen. Es ergeben sich folgende Leitfragen, die durch das Forschungsprojekt beantwortet werden sollen:

- Welche Daten bieten für repräsentative Intralogistikanlagen einen Mehrwert und sollten deshalb automatisiert erfasst werden?
- Wie lassen sich Daten aufwandsarm aus Bestandsanlagen extrahieren?
- Wie müssen diese Daten aufbereitet, verarbeitet und interpretiert werden, sodass sie für eine Modellerstellung verwendet werden können?

Als Ergebnis soll das Projekt ein Gesamtkonzept liefern, mit dem Daten automatisiert aus bestehenden Intralogistikanlagen extrahiert und damit Modellierungsdaten generiert werden können. Das Gesamtkonzept soll dabei insbesondere die Anforderungen kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) repräsentieren und eine möglichst praxisgerechte Detaillierung der Teilaspekte des Gesamtkonzepts sowie eine Prüfung und Bewertung der Umsetzbarkeit liefern.

1.2.2 Vorgehensweise und Lösungsweg

Der Lösungsweg zum Erreichen der beschriebenen Forschungsziele gliedert sich in sieben Arbeitspakete (AP). Der Zusammenhang der Arbeitspakete sowie die Zuordnung zu den Kapiteln des vorliegenden Forschungsberichts ist in Abbildung 1-3 dargestellt.

Kapitel 2 bildet die Grundlagen hinsichtlich des Betrachtungsraumes ab. Da es das Ziel des Forschungsvorhabens ist, die Lücke zwischen bestehenden Förderanlagen der Intralogistik (repräsentiert durch Referenzszenarien – AP 1) und den Möglichkeiten der (teil)automatischen Modellerstellung (AP 2) zu schließen und somit die erforderlichen Daten zu generieren, werden zunächst diese beiden Themenfelder genauer beleuchtet. Dazu werden in Abschnitt 2.1 der Stand der Technik bezüglich

Förderanlagen der Intralogistik betrachtet und in Abschnitt 2.2 das Themenfeld der Digitalen Modelle inklusive der Verfahren zur (teil)automatischen Modellerstellung beleuchtet.

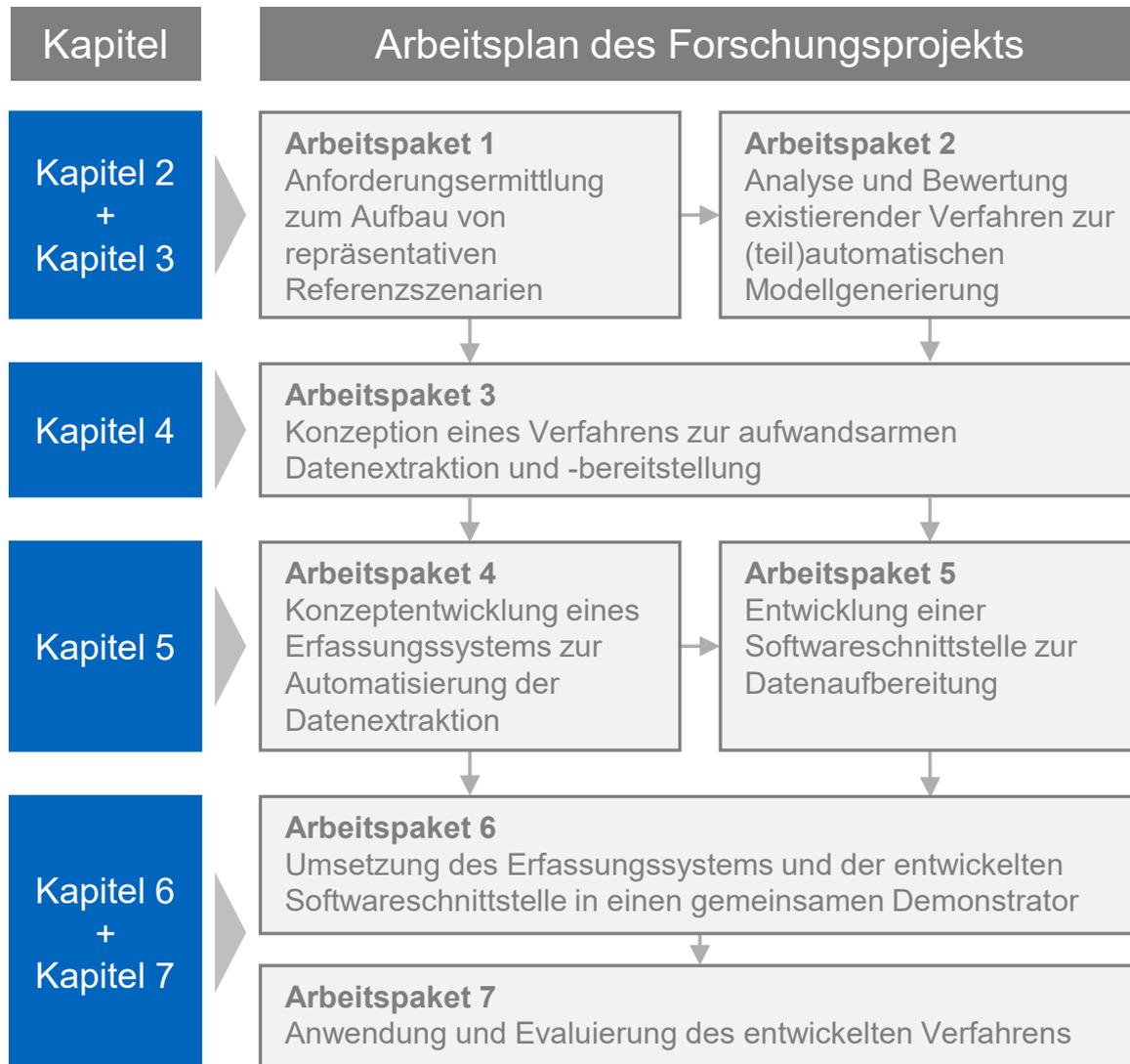


Abbildung 1-3: Einordnung der Arbeitspakete zur Erreichung des Forschungsziels in die Kapitelstruktur des Forschungsberichts

Basierend auf den in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen zu bestehenden Förderanlagen sowie den Rahmenbedingungen zum Einsatz und zur Erstellung von Modellen erfolgt in **Kapitel 3** die Definition des Betrachtungsraumes für das Forschungsprojekt. Es werden dazu zunächst in Abschnitt 3.1 die Komponenten von Förderanlagen identifiziert, die repräsentativ für den beschriebenen Problemfall sind und daher in Referenzszenarien eingesetzt werden können (AP 1). Der Modellierungszweck, welcher im Fokus der Arbeiten stehen soll (AP2), wird in Abschnitt 3.2 abgeleitet. In Abschnitt 3.3 werden weitere Annahmen und Einschränkungen definiert, welche im Rahmen des Projekts getroffen wurden.

Die Entwicklung eines Gesamtkonzepts zur automatisierten Datenextraktion und Rekonstruktion (AP 3) steht im Fokus des **Kapitels 4**. Hierzu wird in Abschnitt 4.1 zunächst eine detailliertere Vision und die damit verbundene Hypothese für das Projekt abgeleitet. Im nächsten Schritt werden in Abschnitt 4.2 im Rahmen des Betrachtungsraums Anforderungen an das Gesamtkonzept ermittelt. Daraus wird in Abschnitt 4.3 neben dem Grobkonzept für die Datenaufnahme und Rekonstruktion auch ein Vorgehen zur Durchführung dieses Konzepts abgeleitet.

Aus dem in Kapitel 4 konzipierten Gesamtkonzept des Verfahrens werden in **Kapitel 5** die Teilkonzepte zur automatisierten Datenextraktion aus bestehenden Förderanlagen der Intralogistik (AP 4) sowie zur Aufbereitung der extrahierten Daten (AP 5) abgeleitet.

Kern des **Kapitels 6** stellt die Beschreibung der Umsetzung der entwickelten Teilkonzepte dar, welche im AP 6 des Forschungsvorhabens durchgeführt wurde.

Eine Bewertung des Gesamtkonzepts und der umgesetzten Teilkonzepte (AP 7) findet in **Kapitel 7** statt.

In **Kapitel 8** werden die erreichten Ergebnisse zusammengefasst. Ein Ausblick auf einen möglichen weiteren Forschungsbedarf schließt das Kapitel ab.

2 Technische Grundlagen zu Förderanlagen und deren Modellierung

Um ein Verfahren zur Extraktion von Daten aus bestehenden Förderanlagen der Intralogistik zu erarbeiten, müssen zunächst die Grundlagen über die Funktion und die Bestandteile dieser Anlagen bekannt sein, welche daher in Abschnitt 2.1 betrachtet werden. Abschnitt 2.2 hingegen befasst sich mit der Modellierung von Intralogistikanlagen, was wiederum für die Ableitung der Anforderungen an die Datenaufbereitung essenziell ist.

2.1 Grundlagen innerbetrieblicher Förderanlagen

Unter dem Begriff **Fördern** wird im allgemeinen ein Transportvorgang in einem räumlich definierten Bereich, wie beispielsweise im innerbetrieblichen Bereich, verstanden [Hom-2018, S. 126; Arn-2008, S. 613; DIN-30781-1]. Um einen innerbetrieblichen Materialfluss zu realisieren, ist das Fördern neben Lager-, Kommissionier-, Sortier- und Verteilsystemen eine entscheidende Komponente zur Lösung der Aufgaben der Intralogistik [Hom-2018, S. 125].

Die damit verbundene **Fördertechnik** umfasst „alle technischen und organisatorischen Einrichtungen zum Bewegen oder Transportieren von [...] Gütern und Personen auf meist kurzen Strecken“ [Hom-2011, S. 103] sowie die „Lehre über die Fördermittel und ihrer durch sie aufgebauten Systeme“ [Weh-2020, S. 511; Jün-1989, S. 189].

Förderanlagen sind ein Beispiel solcher Systeme und werden definiert als „Anlagen unterschiedlicher Komplexität mit örtlich begrenztem Arbeitsbereich, in denen Fördermittel gleicher oder verschiedener Ausführung die systemspezifischen Aufgaben erfüllen“ [Weh-2020, S. 126; Hom-2018, S. 126].

Förderanlagen bilden den Ausgangspunkt für das im Forschungsziel definierte Verfahren zur Extraktion von relevanten Daten für eine Modellerstellung. In den folgenden Unterabschnitten werden daher die Grundlagen der relevanten Teilgebiete *Fördergut/Förderhilfsmittel*, *Fördermittel*, *Sensorik/Aktorik* sowie die *Steuerung* detaillierter betrachtet.

2.1.1 Fördergut und Förderhilfsmittel

In der Fördertechnik lassen sich **Fördergüter** anhand ihrer physikalischen Eigenschaften in Stückgüter und Schüttgüter unterteilen [Weh-2020, S. 512; Arn-2008,

S. 613]. Dabei versteht man unter **Schüttgut** „loses Gut in schüttbarer Form, z. B. Erz, Kohle, Getreide“ [DIN-30781-1]. **Stückgüter** werden als einzeln erfassbare Güter, welche individuell gehandhabt und zahlenmäßig sowie in ihren Eigenschaften (z. B. Maß, Form, Masse) einzeln erfasst werden können [Pfe-1989, S. 2; DIN-30781-1], beschrieben und werden häufig mit **Ladehilfsmitteln** (oder **Ladungsträger**) zusammengefasst [Arn-2008, S. 613; Hom-2018, S. 10]. Ladehilfsmittel werden dabei allgemein in tragende, umschließende, abschließende und Ladehilfsmittel unterschieden.

Zu den **tragenden Ladehilfsmitteln** zählen unter anderem Paletten, welche in verschiedenen Ausführungen vorkommen. Die Europalette (Europoolpalette) mit ihrer Grundfläche von 800 mm x 1.200 mm stellt in dieser Gruppe die meistverbreitete Variante dar.

In der Kategorie der **umschließenden Ladehilfsmittel** spielen Behälter in Form von standardisierten Kleinladungsträgern (KLT) eine wichtige Rolle. Einen wichtigen Standard stellt dabei die Normung von Maßen, Gewicht und Werkstoff nach der VDA-Norm 4500 dar, wobei sich aus drei Grundflächenmaßen und vier möglichen Höhen die in Tabelle 2-1 dargestellten normierten Kombinationen ergeben. [Hom-2018, S. 23ff.; Weh-2020, S. 433ff.]

Tabelle 2-1: *KLT Maße (Länge [mm] x Breite [mm] x Höhe [mm]) (eigene Darstellung nach [Weh-2020, S. 434])*

300 x 200 x 147	400 x 300 x 147	600 x 400 x 147
300 x 200 x 174	400 x 300 x 174	600 x 400 x 174
	400 x 300 x 213	600 x 400 x 213
	400 x 300 x 280	600 x 400 x 280

Im Rahmen dieses Forschungsberichts werden weiterhin ausschließlich Stückgüter betrachtet, welche in tragenden oder umschließenden Ladehilfsmitteln gefördert werden.

2.1.2 Fördermittel für Stückgüter

Als **Fördermittel** (oder Förderer) werden die Geräte und Hilfsmittel zum Transport im innerbetrieblichen Materialfluss bezeichnet [Arn-2008, S. 613; Hom-2018, S. 126]. Werden mehrere Fördermittel hintereinander betrieben, so spricht man von einer **Förderkette** [Hom-2018, S. 126]. Die Aufgaben von Stückgutförderern¹ gliedert

¹ Da sich der weitere Verlauf des Forschungsberichts ausschließlich auf die Stückgutförderung bezieht, wird im Folgenden auf die ausdrückliche Spezifizierung auf Stückgüter verzichtet. Stattdessen wird vereinfacht von Fördermitteln bzw. Förderern gesprochen.

Aßmann in [Sch-2019, S. 3] in die Hauptfunktionen Fördern (von Quellen zur Senken), Zusammenführen, Stauen/Puffern, Vereinzeln und Verteilen (Abbildung 2-1).

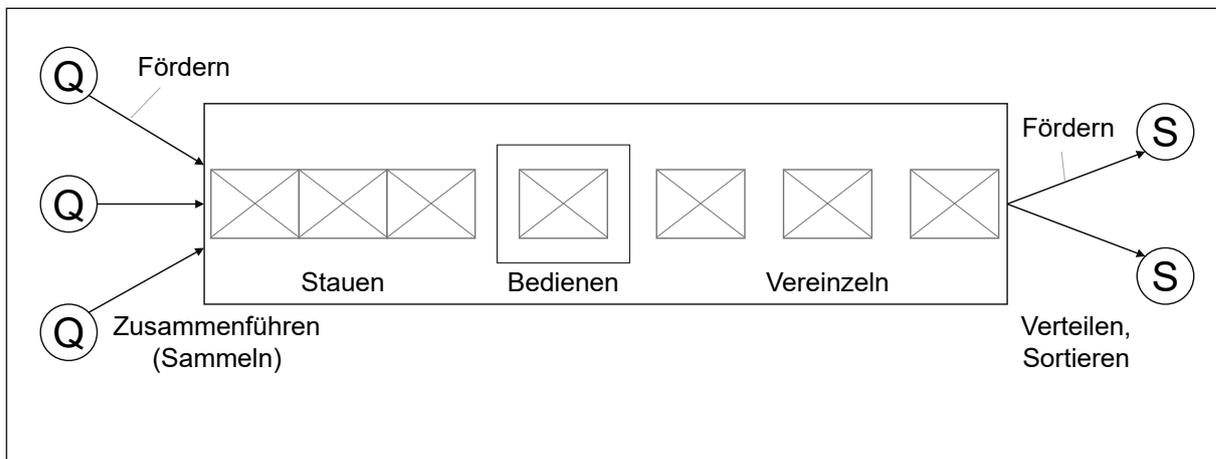


Abbildung 2-1: Materialflusstechnische Aufgaben von Stückgutförderern (eigene Darstellung nach [Sch-2019, S. 3])

Um diese materialflusstechnischen Aufgaben zu erfüllen, können Fördermittel verschiedener Eigenschaften eingesetzt werden. Die grundlegendste Einteilung dieser Fördermittel erfolgt für Stückgut in der Regel anhand der Ausprägung des Fördergutstroms in Unstetigförderer und Stetigförderer (z. B. [Hom-2018, S. 127; Muc-2018, S. 174f.; Arn-2008, S. 613; Sch-2019, S. 2; Weh-2020, S. 514ff.]). Nach *Wehking* zeichnen sich **Unstetigförderer** sowohl für Schüttgut als auch Stückgut durch einen unterbrochenen Fördergutstrom aus, der sich in individuellen Arbeitsspielen zum Transport des Förderguts widerspiegelt. **Stetigförderer** hingegen bedingen für Schüttgut einen kontinuierlichen und für Stückgut einen diskret kontinuierlichen Fördergutstrom, indem „ihre Antriebe, falls vorhanden, im stationären Dauerbetrieb laufen und ihre Tragorgane nicht einzeln angetrieben werden.“ [Weh-2020, S. 514ff.]

Die weiteren Gliederungskriterien für Fördertechnik unterscheiden sich je nach Betrachtungsweise und Anwendungsfall. Im weiteren Verlauf dieses Forschungsberichts wird auf die Systematik von *ten Hompel et al.* zurückgegriffen, welche im Folgenden detaillierter beschrieben wird.

Die Einteilung erfolgt neben der Hauptunterscheidung in Stetig- und Unstetigförderer nach drei weiteren Kriterien. Das erste bildet dabei die Förderebene, welche in die Ausführungen **flurgebunden** (Verfahrebene am Boden), **aufgeständert** (Fördermittel bzw. Verfahrschienen über Stützen in definierter Höhe über dem Boden angebracht) und **flurfrei** (Förderebene oberhalb der Arbeitsebene eines Materialflusssystems) unterschieden wird. Das zweite Kriterium wird durch die Bedienräume bzw. den damit verbundenen Grad der Beweglichkeit definiert. Hierbei wird unterschieden zwischen

ortsfesten, geführt verfahrbaren und frei verfahrbaren Fördermitteln. Als drittes Kriterium dient die Antriebsart in Verbindung mit der Charakteristik der Kraftübertragung. Bei Stetigförderern unterscheidet man in dieser Systematik zwischen einer Kraftübertragung mittels Abwälzung, Schwerkraft oder Zugmittel, wohingegen die Einteilung bei Unstetigförderern allein zwischen dem Betrieb mit Einzelantrieben oder Muskelkraft erfolgt. Die Zuteilung der marktüblichen Fördermittel zu den einzelnen Kriterien der beschriebenen Systematik ist in Abbildung 2-2 dargestellt. [Hom-2018, S. 128ff.]

Stetigförderer					Unstetigförderer						
flurgebunden	aufgeständert			flurfrei	flurgebunden	aufgeständert		flurfrei			
ortsfest	ortsfest			ortsfest	geführt verfahrbar	frei verfahrbar	ortsfest	geführt verfahrbar	geführt verfahrbar		
Zugmittel	Abwälzung	Schwerkraft	Zugmittel	Zugmittel	Einzelantrieb	Einzelantrieb	Einzelantrieb	Einzelantrieb	Muskelkraft	Einzelantrieb	
Unterflur-schleppkettenförd.	Rollenbahn, angetrieben	Rollenbahn	Tragketten-förderer	Kreis-förderer	Umsetzer	Schlepper	Aufzug/ Senkrecht-förderer	Kanal-fahrzeug	Trolley-bahn	Brücken-kran	
		Röllchen-bahn	Band-förderer	Schlepp-kreis-förderer	Verschiebe-wagen	Wagen		Verteil-fahrzeug	Rohrbahn	Portalkran	
		Kugelbahn	Wander-tisch		Elektro-tragbahn	Hubwagen				Kabelkran	
		Rutsche	Glieder-band-förderer		Regal-bediengerät	Stapler				Ausleger-/ Drehkran	
			S-/C-Förderer		automat. Flur-förderzeug	automat. Flur-förderzeug				Elektro-hängebahn	
			Ketten-förder-system			Kommissio-nier-fahrzeug					

Abbildung 2-2: Systematik der Fördermittel nach (Eigene Darstellung nach [Hom-2018, S. 128ff.]

2.1.3 Steuerung von Förderanlagen

Neben den oben beschriebenen Kriterien zur Einteilung von Fördermitteln spielt auch der Automatisierungsgrad der Förderanlage der zugehörigen Komponenten eine entscheidende Rolle. Hierbei wird unterschieden zwischen **manuellen**, **mechanisierten** oder teilautomatisierten und **automatisierten** Systemen. Bei der Realisierung von automatisierten Systemen. Während bei manuellen und mechanisierten Anlagen die Steuerung im Wesentlichen von den Entscheidungen der bedienenden Personen abhängig ist, wird in der automatisierten Variante der operative Betrieb durch ein Steuerungssystem realisiert. [Jün-1998, S. 141f.] Der Aufbau der Steuerung kann dabei, wie in Abbildung 2-3 dargestellt, unterschiedliche Ausprägungen aufweisen.

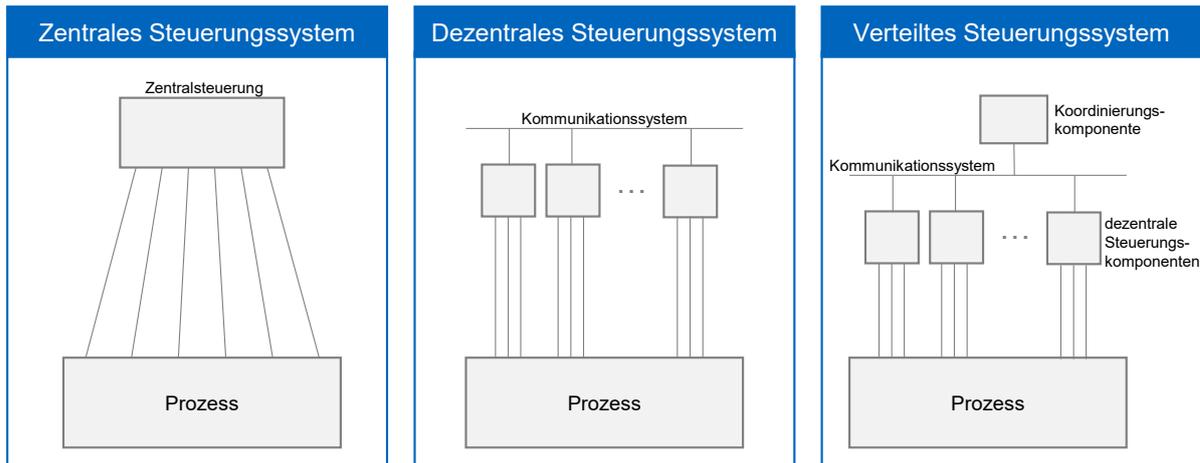


Abbildung 2-3: Ausprägungen von Steuerungssystemen für Förderanlagen (eigene Darstellung nach [Jün-1998, S. 142])

Bei einem **zentralen Steuerungssystem** werden alle Steuerungsentscheidungen von einer zentralen Steuerungseinheit übernommen, wodurch sich ein Ausfall der zentralen Einheit auf die gesamte Anlage auswirkt und insbesondere bei größeren Anlagen die Komplexität der Steuerungssoftware steigt [Arn-2019, S. 401f.; Jün-1998, S. 142f.]. Im gegenteiligen Konzept der **dezentralen Steuerung** hingegen wird auf eine übergeordnete Zentraleinheit verzichtet, sodass mehrere verteilte Steuerungen jeweils abgegrenzte Funktionen erfüllen. Dem Vorteil einer hohen Flexibilität steht jedoch ein hoher Kommunikationsaufwand zur Koordination der einzelnen Steuerungen gegenüber [Spi-2018, S. 24; Jün-1998, S. 143]. Zwischen den beiden Konzepten stehen **verteilte (oder hierarchische) Steuerungssysteme**, bei denen ein zentrales Element mehrere dezentrale Steuerungseinheiten koordiniert. Da dieses Konzept in der Praxis von bestehenden Förderanlagen häufig vorkommt, liegt der Fokus im Folgenden auf der Beschreibung verteilter Steuerungssysteme.

Steuerungsebenen

Um die Steuerungsaufgaben in verteilten Systemen zwischen den einzelnen Komponenten der Hierarchie sinnvoll aufzuteilen, kommen unter anderem **Ebenenmodelle** zur Anwendung [Gün-2010, S. 96]. *Krämer* beschreibt, dass in diesem Konzept ähnliche Aufgaben in jeweils einer Ebene gebündelt und die Schnittstellen zwischen den Ebenen möglichst schlank gestaltet werden, um die Übersichtlichkeit in komplexen Systemen zu gewährleisten. Je nach Anwendungsfall existieren jedoch verschiedene Ausprägungen dieses Ebenenmodells. [Krä-2002, S. 29ff.]

Laut *Nieke* sind Materialflusssteuerungen zum größten Teil „zentral, hierarchisch und pyramidenförmig“ aufgebaut [Gün-2010, S. 15ff.]. Daher werden im Folgenden die insgesamt fünf Schichten des dort beschriebenen pyramidenförmigen Ebenenmodells erläutert, welches auch als Automatisierungspyramide (Abbildung 2-4) bezeichnet wird:

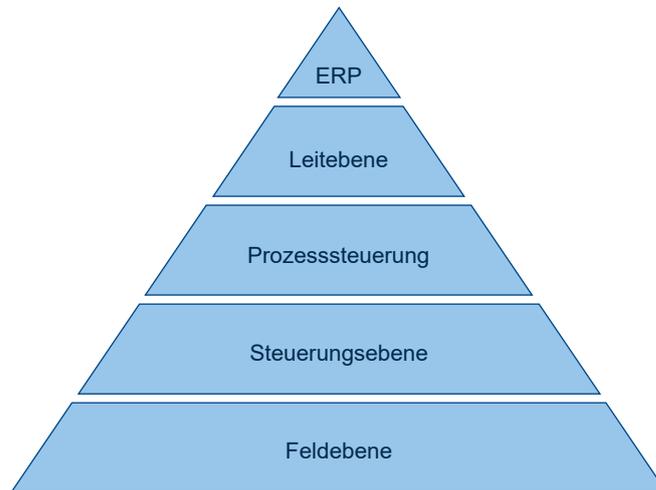


Abbildung 2-4: *Automatisierungspyramide zur Steuerung von Materialflusssystemen (eigene Darstellung nach [Gün-2010, S. 17])*

- **ERP:** In der obersten Ebene der Pyramide steht das Enterprise-Ressource-Planning-System (ERP-System). Dieses dient zur Steuerung der Geschäftsprozesse und beinhaltet beispielsweise Bestellungen, Kundeninformationen, Rechnungswesen oder Personalverwaltung. [Spi-2018, S. 25]
- **Leitebene:** Ausgehend von den übergeordneten Geschäftsprozessen werden in der Leitebene die Aufgaben der Produktionsplanung erfüllt. Dazu gehören u. a. die Auftragsfreigabe und die Disposition. Somit wird in dieser Ebene definiert, welche konkreten Aufträge zu welchem Zeitpunkt mit welchen Ressourcen durchgeführt werden sollen. [Spi-2018, S. 25]
- **Prozesssteuerung:** Ausgehend von der Produktionsplanung aus der Leitebene werden die Aufträge in der Prozesssteuerung konkret auf den Materialfluss umgesetzt. Zusammen mit den darunterliegenden Schichten (Steuerungsebene und Feldebene) bildet die Prozessebene also die eigentlichen Funktionen der Materialflusssteuerung ab. Sie gibt der Steuerungsebene die resultierenden Transportwege vor. Die verwendete Steuerungseinheit dieser Schicht wird häufig als Materialflussrechner (MFR) bezeichnet. Auch die Visualisierung für die Nutzer ist in dieser Schicht angesiedelt. [Gün-2010, S. 18]

- **Steuerungsebene:** Bestandteil der Steuerungsebene sind in der Regel Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS). Sie sammelt Informationen über ihre Eingangssignale, welche durch die Sensoren der Feldebene gespeist werden, verarbeitet diese in ihrer internen Steuerungslogik und gibt die resultierenden Steuerungsbefehle an ihre Ausgänge weiter, welche dann die Aktoren der Feldebene steuern. Die Steuerungslogik setzt dabei die Vorgaben der Prozesssteuerung über die zu realisierenden Transportwege auf die einzelnen Fördererelemente um. [Gün-2010, S. 17f.]
- **Feldebene:** Die unterste Ebene der Pyramide bildet die technischen Komponenten des Materialflusses ab. Hierunter fallen die Sensoren, welche die Zustände der Anlage erfassen und somit als Eingänge in der Steuerungsebene dienen. Des Weiteren beinhaltet die Feldebene die Aktoren, welche die Bewegungen der Fördererelemente verursachen. Die Sensoren und Aktoren bilden also zusammen mit den mechanischen Fördererelementen den „ausführenden Teil der Materialflussteuerung“ ab. [Gün-2010, S. 17] Daher werden diese Komponenten im Folgenden detaillierter beschrieben.

Sensoren und Aktoren im Kontext von Förderanlagen

Laut *Jünemann und Beyer* erfassen **Sensoren** physikalische Messgrößen in Förderanlagen und wandeln diese in digital von der Steuerung (z. B. von der SPS) erfassbare Signalgrößen um. Sie eignen sich also dazu, den Zustand (z. B. die Beladung eines Fördererelements) der Anlage zu erfassen und diese als Eingangswert für die Steuerungsentscheidungen bereitzustellen. Zur Einordnung von Sensoren existiert eine Vielzahl von Kriterien. Eines davon ist die Unterscheidung in externe und interne Sensoren. Im Gegensatz zu internen, welche rein für die technische Funktion eines einzelnen Fördererelements relevant sind, dienen externe Sensoren dazu, Informationen über den laufenden Materialfluss über die Fördererelemente zu erfassen. Daraus ergeben sich letztlich die Steuerungsentscheidungen in SPS und MFR. [Jün-1998, S. 255ff.] Daher ist diese Gruppe für den vorliegenden Forschungsbericht von besonderem Interesse.

Aufgrund ihrer Robustheit kommen in Förderanlagen besonders häufig **berührungslose Näherungsschalter** zur reinen Objektdetektion (Anwesenheitskontrolle) zum Einsatz. *Arnold et al.* teilen diese nach den Kriterien der Energieübertragung und der Feldbeeinflussung auf, woraus sich die in Abbildung 2-5 dargestellte Einteilung ergibt.

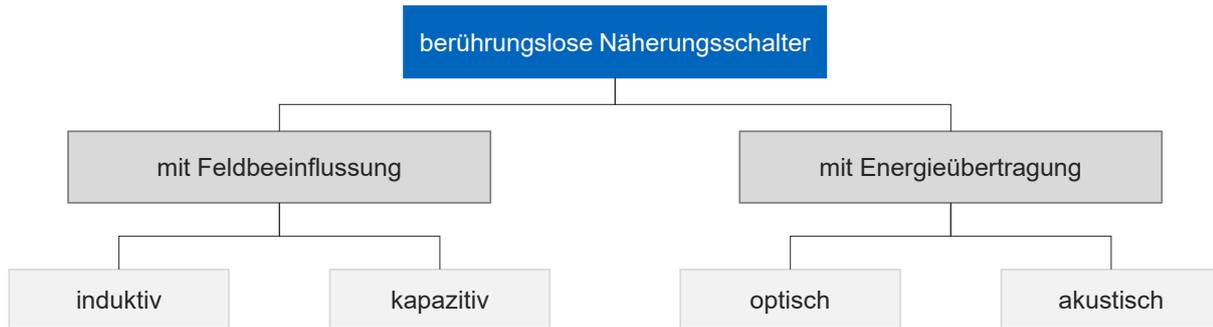


Abbildung 2-5: Einteilung berührungsloser Näherungssensoren (eigene Darstellung nach [Arn-2008, S. 793])

Induktive Näherungsschalter erzeugen ein magnetisches Wechselfeld. Tritt in dieses Feld leitfähiges Material (z. B. Metall) ein, werden darin Wirbelströme erzeugt. Dadurch tritt im Oszillatorkreis, welcher das magnetische Wechselfeld erzeugt, eine Energiereduktion auf, welche ab einem definierten Schwellwert ein Schaltsignal verursacht. **Kapazitive Näherungsschalter** reagieren im Vergleich dazu auch auf bestimmte nichtleitende Objekte. Im Messfeld der Sensoren verursachen diese Objekte eine Kapazitätsveränderung in der Messelektronik, wodurch in diesem Fall das Schaltverhalten ausgelöst wird. Als **optische Sensoren** kommen in Förderanlagen meist Lichtschranken zum Einsatz, welche über Lumineszenzdioden Licht emittieren. Man unterscheidet hierbei zwischen Einweglichtschranken, bei denen Sender und Empfänger separate Bauteile darstellen, und Reflexionslichtschranken/-taster, bei denen Sender und Empfänger in einem Bauteil integriert sind und das vom Sender emittierte Licht über einen Reflektor an den Empfänger zurückgesandt wird. Unter die Kategorie der **akustischen Sensoren** fallen die Ultraschallsensoren, welche mit Schallwellen arbeiten. Diese können nach demselben Prinzip wie bei den Lichtschranken in Ultraschall-Einwegschranken und Ultraschall-Reflexionstaster unterschieden werden. [Arn-2008, S. 793ff.]

Aktor- oder Antriebssysteme setzen die Materialflussbewegung auf Basis von Ausgangssignalen der Steuerung um. Wie auch bei der Sensorik kann auf verschiedene Systematiken zur Einteilung zurückgegriffen werden. Eine der verbreitetsten Kriterien ist dabei die Unterscheidung in elektrische, hydraulische und pneumatische Antriebe. [Jün-1998, S. 307ff.]

2.2 Digitale Modelle im Kontext von Förderanlagen

Um die Anforderungen einer Datenaufbereitung für die Modellierung von Förderanlagen ableiten zu können, bedarf es zunächst einer Übersicht über die Grundlagen der Modellerstellung von Förderanlagen, welcher in 2.2.1 gegeben wird. Des Weiteren ist der Ablauf eines Modellierungsprozesses für die weitere Einordnung der Datenaufbereitung entscheidend, weshalb dieser in 2.2.2 vorgestellt wird.

2.2.1 Grundlagen

Unter einem **Modell** versteht man eine „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System.“ [VDI-3633a] Ein **digitales Modell** bildet somit ein geplantes oder existierendes System in einem digitalen System ab.² Laut der *VDI Richtlinie 4465* können Modelle dabei an verschiedenen Stellen entlang des Lebenszyklus des abzubildenden Systems zum Einsatz kommen, sobald Anpassungen oder Änderungen am System geplant sind. Die Modelle können dabei je nach geplantem Einsatzzweck in Beschreibungsmodelle, Erklärungs- und Kausalmodelle sowie Prognosemodelle (wie z. B. Simulationsmodelle, bedientheoretische Modelle oder Entscheidungs- oder Optimierungsmodelle) unterschieden werden. [VDI-4465, S. 3]

In einem **Simulationsmodell** werden Systeme mit einem dynamischen Verhalten in einem experimentierbaren Modell umgesetzt, um daraus Rückschlüsse auf die Realität zu treffen [VDI-3633a, S. 28]. Da es sich bei Förderanlagen der Intralogistik um Systeme mit einem realen Verhalten handelt, kommt dieser Modellart eine wichtige Rolle in den weiteren Betrachtungen zu. Die Simulation kommt insbesondere dann zum Einsatz, sobald „Experimente am Original unwirtschaftlich (Kosten, Zeit) oder unzulässig (Gefahr, Risiko) sind“ [Arn-2019, S. 328].

Eng verbunden mit der Simulation ist die **Emulation**. Darunter versteht man die „Nachbildung eines Gesamtsystems, um damit Tests durchführen zu können“ [VDI-4497]. Das Gesamtsystem wird dabei in zwei miteinander gekoppelte Teile nachgebildet: Zum einen in den Teil des Modells, der digital abgebildet wird und zum anderen in den Teil, der in der Realität getestet werden soll, also unverändert bleibt (Abbildung 2-6). Dabei muss das modellierte Teilsystem über alle Funktionalitäten verfügen, die das reale Teilsystem für die Interaktion benötigt. [VDI-4497]

² Da der Fokus in diesem Projekt auf Digitalen Modellen liegt, wird der Begriff mit dem Begriff des Modells im Folgenden synonym verwendet.

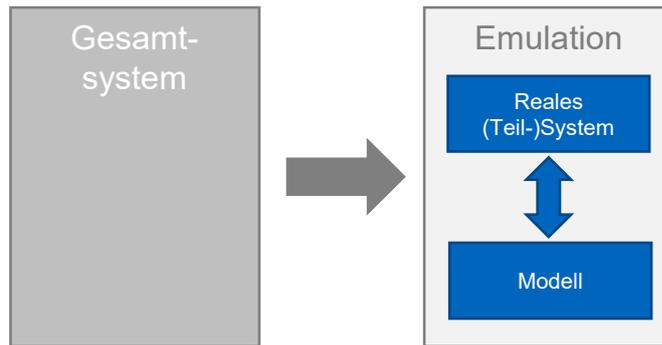


Abbildung 2-6: Systemdarstellung der Emulation als Nachbildung des Gesamtsystems (nach [VDI-4497])

Mithilfe von Simulations- und Emulationsmodellen kann eine **Virtuelle Inbetriebnahme** durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um „das entwicklungsbegleitende Testen einzelner Komponenten und Teilfunktionen des Automatisierungssystems mithilfe für die jeweilige Aufgabenstellung abgestimmten Simulationsmethoden und -modellen“ [VDI-3693].

Die verschiedenen Phasen des Lebenszyklus, in denen Modelle in der Intralogistik zum Einsatz kommen, teilen *Daniluk und Chisu* in die Phasen der Planung, Realisierung und Betrieb ein. Dabei ergeben sich in jeder der Phasen verschiedene Beispiele für mögliche Anwendungsfelder. Im Rahmen der **Planung** kann beispielsweise eine vorhandene Anlage hinsichtlich möglicher Anpassungen, Änderungen der Steuerungsstrategien oder Erweiterungsalternativen im Fokus der Untersuchungen stehen. Bei der **Realisierung** können Modelle einen Mehrwert bei der Entwicklung und dem Testen von Steuerungssoftware sowie bei der Detaillierung des Anlaufverhaltens liefern. Zudem können sie für Personalschulungen eingesetzt werden, um einen reibungslosen Anlagenhochlauf zu gewährleisten. Dies stellt auch im **Betrieb** ein Szenario zur Einarbeitung von neuen Mitarbeitenden dar. Des Weiteren können Strategien für Störfälle vorab getestet oder mögliche Prozessabläufe optimiert werden. [Dan-2010, S. 147ff.]

2.2.2 Modellierungsprozess

Das Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien wird in [VDI-3633b] beschrieben. Darin enthalten ist der grundsätzliche Prozess einer Modellierung. Er ist aufgeteilt in Aufgabendefinition, Systemanalyse, Modellformalisierung, Implementierung und – für die Verwendung des Modells als Simulationsmodell – Experimente und Analyse. Parallel dazu findet die Datenbeschaffung und -aufbereitung statt (Abbildung 2-7).

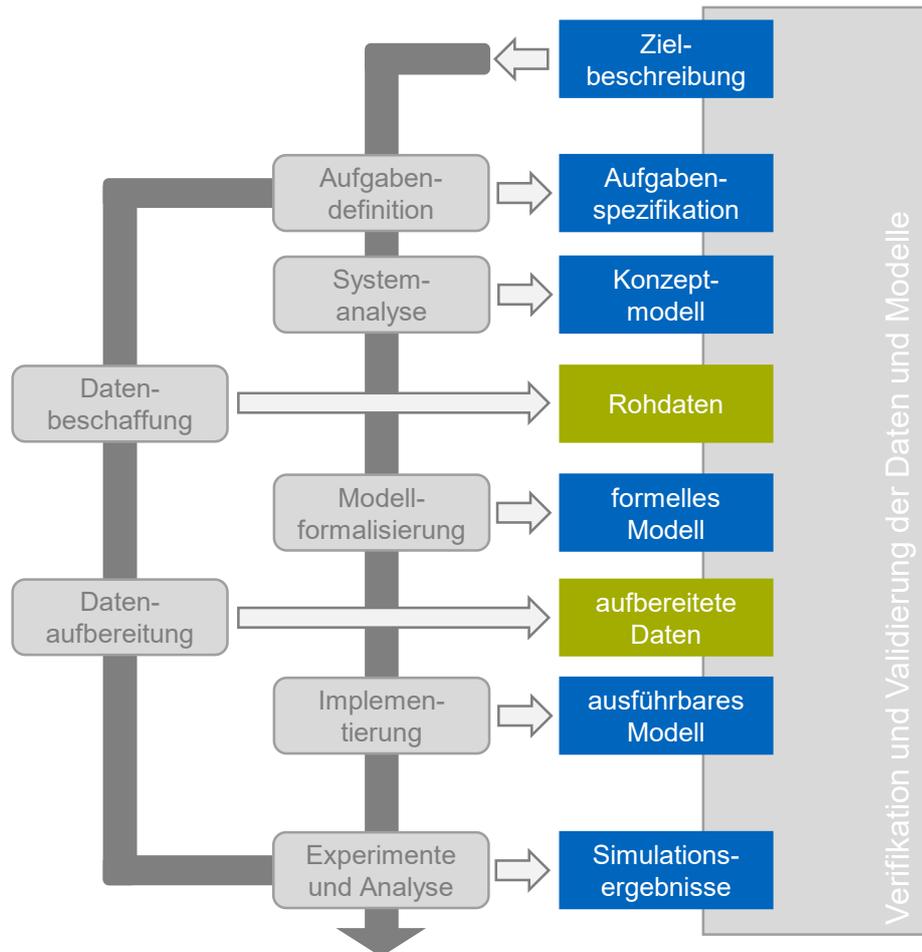


Abbildung 2-7: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie nach [VDI-3633b]

Da der Datenbeschaffung und -aufbereitung, wie in 1.1 geschildert, ein vergleichsweise hoher Aufwand zugeschrieben wird, stehen diese Schritte im Fokus des Forschungsvorhabens.

Die benötigte **Datenbasis** stellt dabei die „Summe aller für die Simulation verfügbaren und erforderlichen Daten“ [VDI-3633a, S. 9] dar. Bei der Auswahl der Daten muss darauf geachtet werden, dass die Größe der Datenbasis entsprechend des Untersuchungsziels gewählt wird [VDI-3633b, S. 33]. Entscheidend ist der Detaillierungsgrad, als das „Maß für die Abbildungsgenauigkeit bei der Umsetzung des Systems in ein Modell“ [VDI-3633a, S. 9]. Der Aufwand der Datenbeschaffung und -aufbereitung steigt mit dem Detaillierungsgrad.

(Teil)automatische Modellerstellung

Um die Daten für eine möglichst aufwandsarme Modellerstellung aufzubereiten, können Verfahren der (teil)automatischen Modellerstellung in Betracht gezogen werden. Als **automatische Modellerstellung** wird ein Vorgehen beschrieben, bei dem ein Modell vollständig auf Basis eines Datensatzes erstellt wird und das

entstehende Modell direkt und ohne Nacharbeit eingesetzt werden kann [Pun-2017, S. 76]. Eine **teilautomatische Modellerstellung** resultiert dagegen in einem Modell, welches in Teilaspekten automatisch erstellt wurde, die aber manuellen Ergänzungen bedürfen [Pun-2017, S. 73]. Durch diese Verfahren kann der Aufwand für die Modellerstellung gesenkt werden; sie sind aber umso mehr von einer vollständigen und aufbereiteten Datenbasis abhängig. Hinsichtlich der Modellierungsmethoden kann zwischen verschiedenen Ansätzen unterschieden werden. *Bergmann und Straßburger* benennen die relevantesten drei Methoden zur (teil)automatischen Modellgenerierung (basierend auf [Eck-2002]) als:

- **Parametrische Ansätze**, bei denen Bibliothekselemente als Bausteine zum Einsatz kommen und mithilfe der Eingabe von Parametern spezifiziert werden.
- **Strukturbasierte Ansätze**, welche basierend auf Daten, welche die Struktur des abzubildenden Systems repräsentieren, erstellt werden (z. B. Layoutdaten oder Computer Aided Design (CAD)-Daten).
- **Hybrid-wissenschaftliche Ansätze**, welche die Modellgenerierung durch Verfahren der künstlichen Intelligenz in Kombination mit den anderen vorgestellten Ansätzen adressiert.

Die derzeit existierenden Verfahren zur (teil)automatischen Modellerstellung lassen sich jedoch oftmals nicht trennscharf einem der Ansätze zuordnen, sondern müssen vielmehr entsprechend der Projektanforderungen gewählt werden. [Ber-2020, S. 334f.]

Neben diesen Ansätzen können auch Datenstandards als Austauschformate zur (teil)automatischen Modellerstellung beitragen. Hierbei existiert jedoch in Forschung und Praxis eine Vielzahl an unterschiedlichen, heterogenen Datenformaten, weshalb sich bisher keiner dieser Datenstandards in der Breite durchsetzen konnte. Verstärkte Standardisierungsaktivität ist allerdings im Bereich von XML-basierten Datenformaten zu erkennen. [Ber-2020, S. 337ff.]

3 Definition des Betrachtungsraums

Aus dem in Kapitel 2 beschriebenen Stand der Technik ergibt sich eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Modellierung von Förderanlagen. Zum einen begründet sich dies in der Anzahl an möglichen abzubildenden Förderelementen. Zum anderen ergeben sich aus der großen Auswahl an Modellierungszwecken sehr viele mögliche Ausprägungen von Modellen. Für die Anzahl und Art der benötigten Daten für eine Modellerstellung ergibt sich somit eine große mögliche Varianz.

Des Weiteren ergibt sich aus den unterschiedlichen Möglichkeiten zur (teil)automatischen Modellerstellung in Theorie und Praxis eine große Bandbreite an möglichen Datenformaten.

Für die Untersuchung des Forschungsziels, einer automatisierten Extraktion und Aufbereitung notwendiger Modellierungsdaten aus bestehenden Förderanlagen, ist es daher nötig, den Betrachtungsraum weiter zu definieren und einzugrenzen. In den folgenden Unterabschnitten werden daher die zu priorisierenden Förderelemente sowie allgemein die Anlagenkonfiguration und der zu betrachtende Modellierungszweck definiert. Basierend auf dem so entstehenden Referenzszenario wird das Forschungsziel anschließend weiterverfolgt.

3.1 Anlagenkonfiguration

Fördergut und Ladehilfsmittel

Um die zu betrachtenden Förderelemente zu definieren, ist es zunächst notwendig, eine Einschränkung hinsichtlich des Förderguts und der damit verbundenen Förderhilfsmittel zu treffen. Wie in 2.1.1 bereits genannt, konzentriert sich dieses Forschungsvorhaben auf die Betrachtung von Stückgut. Aufgrund der weiten Verbreitung in der industriellen Praxis wurde zudem in Diskussionen mit den Expert:innen aus dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) das Fördern von Stückgut mit standardisierten Kleinladungsträgern (KLT) und Paletten als Ladehilfsmittel als geeignetes Szenario identifiziert.

Eingrenzung der betrachteten Fördererlemente

Ausgehend von der in Abbildung 2-2 dargestellten Einteilung der Fördermittel nach ten Hompel et al. wurden mit den Expert:innen weitere Einschränkungen hinsichtlich des zu betrachtenden Referenzszenarios vorgenommen. Dabei wurde die Variante der flurfreien Förderebene ausgeschlossen, wonach sich die weiteren Untersuchungen ausschließlich auf flurgebundene und aufgeständerte Förderer beschränken. Da der Fokus auf automatisierten Förderanlagen liegt, wurden zum einen im weiteren Verlauf schwerkraftbetriebene Fördererlemente ausgeschlossen, aber auch – aufgrund des stark unterschiedlichen Automatisierungsansatzes – frei verfahrbare Elemente.

Priorisierung der betrachteten Fördererlemente

Aus diesen getroffenen Definitionen resultieren insgesamt 16 mögliche Komponenten, welche im Folgenden näher untersucht wurden. Hierzu diente eine Umfrage unter den Mitgliedern des PA, in welcher ermittelt wurde, welche Fördertechnikkomponenten (Behälter und Paletten) in deren Umfeld bekannt sind. Es wurde für jedes genannte Element abgefragt, wie häufig (1 – selten/nie; 5 – sehr häufig) diese aus ihrer Sicht zum Einsatz kommen und wie relevant sie für ein abzubildendes Referenzszenario erscheinen (1 – irrelevant; 5 – sehr relevant). Wurde ein Element genannt, welches durch die oben beschriebenen Einschränkungen bereits ausgeschlossen wurde, so wurde dieses nicht weiter betrachtet. Wurde hingegen für eines der verbleibenden 16 Elemente keine Nennung durch die PA Mitglieder erfasst, so wurde die Häufigkeit und die Relevanz auf „0“ gesetzt. Die durchgeführte Umfrage erlaubte somit zum einen die Ableitung eines gemeinsamen Vokabulars für den Projektverlauf, indem die im PA bekannten Begrifflichkeiten zu der Systematik aus Abbildung 2-2 zugeordnet wurden. Zudem konnten aus den Formulierungen der PA Mitglieder verschiedenen zu betrachtende Ausprägungen der Elemente abgeleitet werden. Zum anderen bildete die Einteilung hinsichtlich Häufigkeit und Relevanz die Basis für eine anschließende Priorisierung der Elemente. Als Ergebnis der Umfrage (ausführlich dargestellt in Tabelle A-1) wurden sechs Fördererlemente für die Palettenfördertechnik und acht Elemente für die Behälterfördertechnik als für das Projekt relevant (Relevanz größer oder gleich 4) eingeschätzt. Da sich alle relevanten Fördererlemente der Palettenfördertechnik auch in der Auswahl für die Behälterfördertechnik wiederfinden, werden diese im Folgenden gemeinsam betrachtet.

Um ein noch detaillierteres Bild über die Konfiguration bestehender Förderanlagen zu erhalten, wurden zusätzlich Layoutpläne hinsichtlich der Häufigkeit der vorkommenden Fördererlemente analysiert. Das Ergebnis der Analyse ist in Tabelle A-2 einsehbar.

Als Resultat der vorgenommenen Einschränkungen, der Relevanzbewertung durch die Expert:innen und der Häufigkeitsanalyse in bestehenden Layouts ergibt sich der in Abbildung 3-1 dargestellte Sachverhalt.

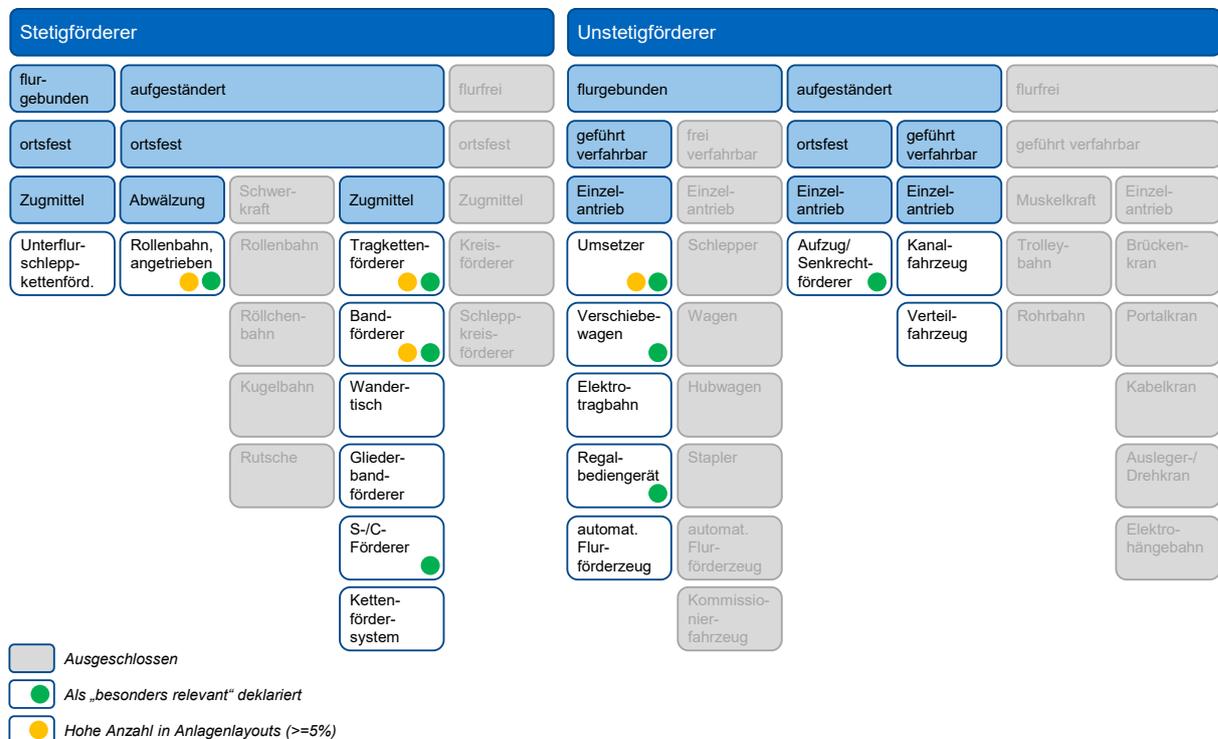


Abbildung 3-1: Ergebnis der Analyse zur Relevanz und Häufigkeit von Fördererelementen in bestehenden Anlagen (nach der Systematik von [Hom-2018, S. 128ff.])

Dies bildete die Basis für die finale Priorisierung der zu betrachtenden Fördererelemente in drei Gruppen.

- Prioritätsgruppe 1** beinhaltet Elemente, welche besonders häufig vorkommen und als besonders relevant deklariert wurden. Die Elemente dieser Kategorie werden im weiteren Projektverlauf bevorzugt betrachtet. Hierin befinden sich die folgenden Fördererelemente:
 - Rollenbahn (angetrieben)
 - Tragkettenförderer
 - Bandförderer
 - Umsetzer
- Prioritätsgruppe 2** beinhaltet Elemente, welche zwar als besonders relevant eingeschätzt wurden, jedoch eine geringe Häufigkeit in bestehenden Förderanlagen aufweisen. Innerhalb dieser Gruppe wurde im PA definiert, welche der Elemente im Rahmen des Projekts weiter betrachtet werden sollen

und welche vernachlässigt werden können. Folgende Fördererelemente sind innerhalb dieser Gruppe angesiedelt:

- S-/C-Förderer → wurde nicht weiter betrachtet
- Verschiebewagen → wurde nicht weiter betrachtet
- Regalbediengerät → wurde nicht weiter betrachtet
- Aufzug/Senkrechtförderer → wurde weiter betrachtet

- **Prioritätsgruppe 3** beinhaltet alle (restlichen) Elemente, welche weder besonders häufig vorkommen noch als besonders relevant eingestuft wurden.

Innerhalb der so verbleibenden Fördererelemente sind zudem die folgenden verschiedenen Ausprägungen zu berücksichtigen: *Gerade* (für Rollenbahn, Tragkettenförderer, Bandförderer), *Steigung* (für Tragkettenförderer, Bandförderer), *Kurve* (für Rollenbahn, Bandförderer) sowie die Ausprägungen *Gurt-/Hubumsetzer*, *Kettenabschieber*, *Drehtisch* und *Pusher* für die Kategorie der Umsetzer.

Die Ergebnisse der Analyse und Priorisierung bestätigen zudem trendmäßig einen durch *Spindler* identifizierten Sachverhalt. Er gibt (für ortsfeste, automatisierte Förderanlagen) an, dass sich die in der Praxis zum Einsatz kommenden Anlagen zu 95,8 % aus fünf verschiedenen Arten von Fördererelementen abbilden lassen [Spi-2018, S. 64f.].

Abzubildende Sensorik

Wie in 2.1.3 beschrieben sind insbesondere berührungslose Näherungsschalter zur Objektdetektion in Förderanlagen von Bedeutung und treten daher in einer großen Häufigkeit auf. In einer Umfrage unter Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses, welche analog zur Priorisierung der Fördererelemente durchgeführt wurde, bestätigt sich diese Aussage aus der Literatur. Konkret nennen die Expert:innen insbesondere Lichtschranken, Lichttaster sowie induktive und kapazitive Näherungsschalter als besonders relevant und bestätigen einen häufigen Einsatz in den betrachteten Förderanlagen. Daher wird der Fokus im weiteren Projektverlauf auf diese Gruppen gelegt.

Betrachtete Steuerung

Den Abschluss der Referenz-Anlagenkonfiguration bildet die Steuerungsebene. Hierbei wird der Betrachtungsraum auf zentrale und hierarchische Steuerungskonzepte beschränkt. Der Fokus der Betrachtung soll zudem in den unteren Bereichen der Automatisierungspyramide liegen. Gemeinsam mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses werden die Feldebene, die Steuerungsebene sowie die darunterliegende Mechatronik der Anlage in den Fokus der weiteren Untersuchungen gerückt.

3.2 Modellierungszweck

Entscheidend für die Bestimmung der Modellierungsdaten ist der angestrebte Einsatzzweck eines Modells. Zur Definition des Modellierungszwecks, welcher im Projekt weiterverfolgt werden soll, wurden die in 2.2.1 beschriebenen Einsatzzwecke mit den Erfahrungen der Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses abgeglichen. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die beschriebenen Anwendungszwecke die Praxis gut abbilden. Dennoch liegt der Fokus des Einsatzes bei Anlagenerweiterungen oder Modernisierungen häufig im Test von Steuerungssoftware und einer damit einhergehenden Virtuellen Inbetriebnahme der Steuerung. Die Funktionalität des Steuerungscode ist entscheidend für einen reibungslosen Ablauf bei der Inbetriebnahme und im Anlagenhochlauf. Fehler können zu spät aufgedeckt werden und somit Anlagenstillstände oder im schlimmsten Fall Gefahrensituationen bedingen. Der Fokus soll also auf dem Test der Steuerungssoftware für Anlagenerweiterungen und Modernisierungen liegen.

Der Steuerungscode kann dabei unter Zuhilfenahme verschiedener Modellausprägungen getestet werden. Für den betrachteten Bereich der Automatisierungspyramide, gibt *Strigl* einen Überblick über die Auswirkungen der gewählten Modellausprägung auf den Umfang der benötigten Detaillierung der Anlagenkomponenten (Abbildung 3-2). Wird das Modell als Testumgebung für die Virtuelle Inbetriebnahme der SPS verwendet, so müssen die Anlagenkomponenten mit einem hohen Detaillierungsgrad abgebildet sein, um die Steuerung möglichst realitätsnah zu testen und entsprechende Erkenntnisse aus der Modellierung ziehen zu können [Str-2009].

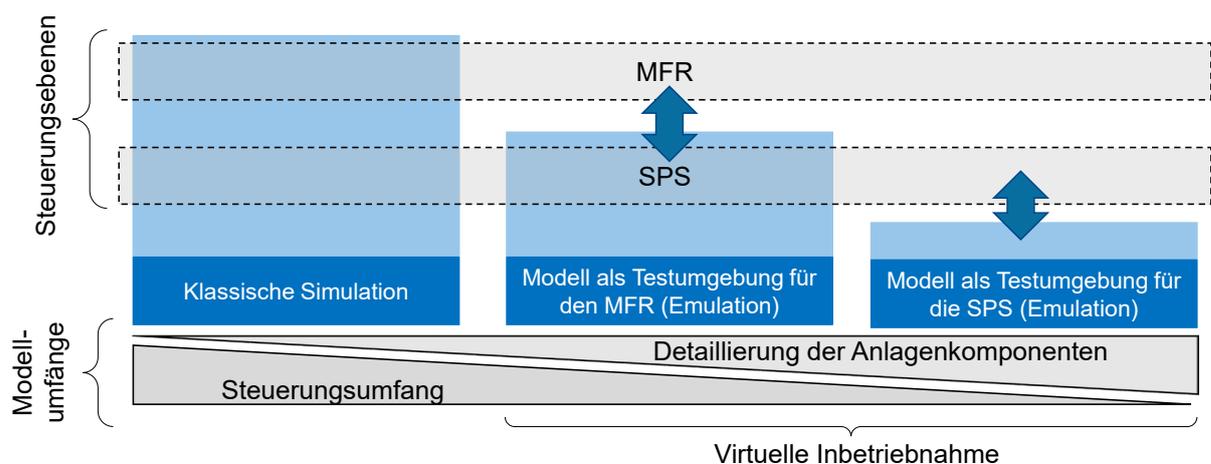


Abbildung 3-2: Abhängigkeit des Detaillierungsgrads der Anlagenkomponenten im Modell vom Einsatzzweck (Darstellung nach [Str-2009])

Da bei einer hohen Detaillierung der Aufwand für die Datenaufnahme steigt und somit das höchste Potenzial hinsichtlich der beschriebenen Projektziele erkannt wird, wird der zu untersuchende Modellierungszweck als Test der SPS im Rahmen der Virtuellen Inbetriebnahme bei Erweiterungen oder Retrofits definiert.

3.3 Weitere getroffene Annahmen und Einschränkungen

Im Rahmen der Expertengespräche und Diskussionen mit den Mitgliedern des PA werden folgende weitere Annahmen für das zu entwickelnde Rekonstruktionsverfahren getroffen.

Dauer der Datenaufnahme

Um möglichst viele Aspekte einer Förderanlage zu erfassen, kann es aufgrund der Größe und verschiedener Steuerungsausprägungen nötig sein, Daten in mehreren, statt einem singulären Schritt aufzunehmen. Daher wird es für das Forschungsvorhaben als gegeben angesehen, dass eine mehrfache Datenaufnahme innerhalb der Bestandsanlage vom Betreiber ermöglicht wird.

Zeitraum der Datenauswertung

Da es sich bei der Rekonstruktion von Modellierungsdaten aus bestehenden Anlagen nicht um ein zeitkritisches Verfahren handelt, bei dem in Echtzeit Entscheidungen und Rückschlüsse getroffen werden müssen, kann die Auswertung der Daten für die Rekonstruktion unabhängig vom Zeitpunkt der Datenaufnahme erfolgen. Dies erlaubt eine zeitliche und räumliche Entkoppelung der Schritte innerhalb des zu entwickelnden Gesamtverfahrens.

4 Entwicklung eines Gesamtkonzepts zur Rekonstruktion von Modellierungsdaten aus Bestandsanlagen

4.1 Ableitung von Vision und Hypothese

Wie in Kapitel 3 beschrieben, sollen in dem dargestellten Referenzszenario möglichst aufwandsarm mechatronische Daten erfasst und so interpretiert werden, dass sich daraus Daten für eine (teil)automatische Modellerstellung ergeben.

Um das Verfahren aufwandsarm zu gestalten, werden mögliche Methoden der manuellen Datenerfassung (Anlagenbegehung, Vermessung, Interviews mit Betreibern, manuelle Analyse von Plänen etc.) aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Stattdessen liegt der Fokus auf automatisierten Verfahren.

Dabei sind unter anderem vier verschiedene Szenarien (S1-S4) zur Datenaufnahme denkbar, welche nachfolgend beschrieben werden:

S1: Automatisierte Analyse und Auswertung von Plänen

In diesem Szenario können Daten anhand vorhandener Planungsunterlagen analysiert und aufbereitet werden. Dazu müssen analog vorhandene Planungsunterlagen zunächst (z. B. per Scan) digitalisiert werden. Für die so erhaltenen Unterlagen sowie solche, die bereits digital vorhanden sind, muss schließlich ein Analyse-Tool entwickelt werden, welches die relevanten Informationen in den Unterlagen erkennt und daraus die Gegebenheiten der Anlage in für die Modellierung benötigte Daten umsetzt.

S2: Ableitung von Anlageninformationen über die Analyse von Steuerungslogik

Über die Analyse von Steuerungscode aus SPS und MFR könnten in diesem Ansatz relevante Daten extrahiert werden. Dazu muss der jeweilige Steuerungscode um Funktionen zur Ableitung der Daten erweitert werden.

S3: Aufnahme von Daten durch ein externes Messverfahren

Das dritte Szenario verfolgt den Ansatz eines externen Messverfahrens. Als „extern“ wird hierbei definiert, dass sich die Sensorik zur Datenaufnahme nicht innerhalb der Förderanlagen und deren Komponenten befindet. Stattdessen soll notwendige Messsensorik ausschließlich in der umgebenden Infrastruktur (z. B. Hallendecke) integriert werden.

S4: Aufnahme von Daten durch intelligentes Fördergut

Im letzten Szenario wird ein Fördergut der Anlage so adaptiert, dass die notwendige Sensorik zur Aufnahme von Daten integriert ist. Über das so entstehende intelligente Fördergut werden während der Überfahrt über die bestehende Förderanlage Daten über selbige gesammelt.

Neben den beschriebenen Idealszenarien sind weiterhin Mischformen der dargestellten Methoden zur Datenaufnahme denkbar. Um in der weiteren Forschungsarbeit jedoch ein einheitliches Zielbild zu definieren und zu verfolgen, wurden die Ansätze S1-S4 qualitativ bewertet und mögliche Hürden innerhalb der Verfahren identifiziert.

- **S1:** Vorteil dieses Verfahrens stellt die Unabhängigkeit vom Anlagenbetrieb dar. Es wird erwartet, dass durch diesen Ansatz weder der Anlagenbetrieb selbst noch der mögliche umgebende Betrieb innerhalb der umgebenden Infrastruktur gestört wird. Laut Aussagen der Expert:innen aus dem PA stellt die Problematik dieses Ansatzes jedoch insbesondere die Aktualität und Verfügbarkeit vollständiger Unterlagen dar. Änderungen, welche nach der ursprünglichen Inbetriebnahme der Anlage vorgenommen wurden, werden oftmals nicht in den Anlagenplänen vermerkt. Daher besteht zum einen die Gefahr der Datenknappheit (Fehlen von Unterlagen) oder von resultierenden falschen Daten.
- **S2:** Im Gegensatz zum Ansatz S1 kann in diesem Verfahren von einer Aktualität der Daten ausgegangen werden, da die Steuerungslogik den aktuellen Stand der Anlagenkonfiguration abbildet. Es ergeben sich jedoch auch bei diesem Verfahren Hürden. Zum einen müssen neue Funktionen in den bestehenden Steuerungscode integriert werden. Dies stellt insofern eine Problematik dar, da gerade die Steuerungskomponenten oftmals aufgrund des verloren gegangenen Know-How den Fokus bevorstehender Retrofits darstellen. Zum anderen ist die Integration neuer Funktionen in den Steuerungscode immer vom jeweiligen Steuerungshersteller und der realisierten Programmierlogik abhängig. Somit ist von einem erhöhten Aufwand zur Umsetzung des beschriebenen Ansatzes auszugehen.
- **S3:** In diesem Szenario werden mehrere Vorteile gesehen. Einerseits ist die Aktualität aufgrund der direkten Datenaufnahme aus der bestehenden Anlage gewährleistet. Andererseits müssen keine Komponenten der Anlage verändert oder angepasst werden, wodurch Störungen im Anlagenbetrieb unwahrscheinlich werden. Zudem ist kein spezielles Know-How über die Umsetzung der Förderanlage notwendig, weshalb das Messverfahren allgemeingültig entwickelt werden kann. Als Hürde ist jedoch zu sehen, dass das Verfahren stark abhängig von der umgebenden

Infrastruktur (z. B. Gebäude, benachbarte Anlagen, elektronische Infrastruktur) ist. Des Weiteren kann gerade bei großen und komplexen Anlagen die Zugänglichkeit für externe Messverfahren eine Problematik darstellen.

- **S4:** Dieser Ansatz bietet neben dem Vorteil der Aktualität der aufzunehmenden Daten ebenso wie S3 den Vorteil, dass an der Anlage selbst keine Veränderungen vorgenommen werden müssen. Durch die Verlagerung der Intelligenz in das Fördergut ist zudem kein Know-How über die Anlagenkomponenten selbst erforderlich. Eine mögliche Hürde stellt allerdings die Anpassung auf das zum Einsatz kommende Fördergut dar. Dieses muss so beschaffen sein, dass es die Messsensorik integrieren kann, ohne dass der Betrieb der Anlage durch das angepasste Fördergut gestört wird. Zudem kann ein intelligentes Fördergut in der Regel mit einer Überfahrt nicht alle Bestandteile einer Anlage erfassen, sondern nur die Abschnitte, über die es durch die Anlage gefördert wird.

Nach Abwägung der beschriebenen Vor- und Nachteile wurde in Diskussion mit den Mitgliedern des PA das Szenario S4 als vielversprechend und innovativ eingeschätzt. Eine Kombination der verschiedenen Ansätze inkl. ihrer Vor- und Nachteile wurde für zukünftige Betrachtungen jedoch nicht ausgeschlossen.

Die beschriebenen Hürden des weiter zu verfolgenden Ansatzes S4 sollen zudem durch deren Berücksichtigung in der nachfolgenden Ableitung der Anforderungen minimiert werden.

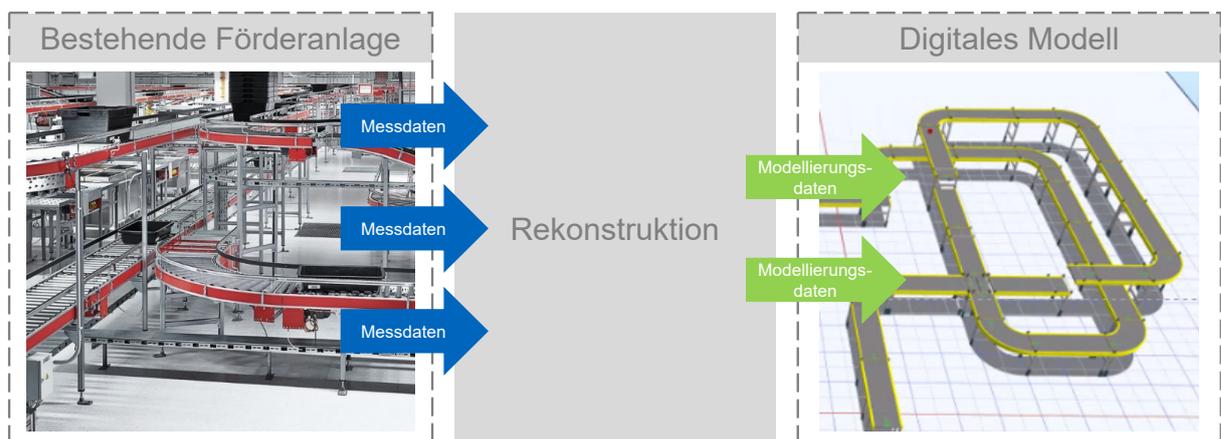


Abbildung 4-1: Vision eines Gesamtkonzepts mit intelligentem Fördergut als Erfassungssystem (Bildquelle „Bestehende Förderanlage“: GEBHARDT Fördertechnik GmbH)

Es ergibt sich als Arbeitshypothese die in Abbildung 4-1 dargestellte Vision, dass durch ein intelligentes Fördergut **Messdaten** aufgenommen, gespeichert und anschließend verarbeitet und interpretiert werden können, dass sich daraus **Modellierungsdaten** ergeben.

4.2 Anforderungsermittlung

Aus der in Abschnitt 4.1 dargestellten Vision leitet sich der Bedarf nach zwei verschiedenen Anforderungsblöcken ab. Zum einen müssen die Anforderungen an das Erfassungssystem, also das intelligente Fördergut definiert sein, sodass sich die im Szenario S4 beschriebenen Hürden abbauen und gleichzeitig die Aufnahme sinnvoller Messdaten möglich ist. Zum anderen muss für die Ausgestaltung der Datenverarbeitung und Interpretation feststehen, welche Modellierungsdaten für den in Abschnitt 3.2 definierten Modellierungszweck benötigt werden.

4.2.1 Anforderungen an ein intelligentes Fördergut als Erfassungssystem

An ein intelligentes Fördergut werden auf Basis der beschriebenen Hürden, der Festlegungen für den Betrachtungsraum aus den Abschnitten 3.1 und 3.3 sowie durch Diskussionen mit den Mitgliedern des PA folgende Anforderungen gestellt.

A 1: Vermeidung von Störungen des Anlagenbetriebs

Um eine bestehende Anlage auch für die Dauer der Datenaufnahme betreiben zu können, muss zwingend vermieden werden, dass durch das intelligente Fördergut Störungen im Anlagenbetrieb verursacht werden. Um dies zu vermeiden, müssen folgende Detailanforderungen erfüllt sein.

- *A 1.1: Einsatz passiver Messsensorik*
Die verwendete Messsensorik und die dazugehörige Elektronik darf den Betrieb der Anlage nicht stören und muss sich so verhalten, wie ein regulär auf der Anlage transportiertes Fördergut. Dies ist insbesondere in Bezug auf die in der Anlage regulär verbaute Elektronik zu beachten. Es empfiehlt sich also der Einsatz von passiver Sensorik, also solchen Komponenten, die keine von externer Sensorik wahrnehmbaren Signale aussenden.
- *A 1.2: Integrierbarkeit anlagenspezifischer Merkmale*
Um das intelligente Fördergut analog zu den regulär transportierten Fördergütern einsetzen zu können, müssen anlagenspezifische Merkmale, z. B. Barcodes zur Identifikation an den vorgesehenen Stellen auch auf dem intelligenten Fördergut integrierbar sein.
- *A 1.3: Einhaltung der Eigenschaften des regulär verwendeten Förderguts*
Beim Transport über eine Förderanlage muss sich das intelligente Fördergut analog zum regulären Fördergut verhalten. Dies bedeutet insbesondere, dass Maße und Gewicht nicht stark vom regulären Fördergut abweichen und dass die Reibung der Oberfläche so beschaffen ist, dass die alle Förderelemente aus dem

Referenzszenario inkl. deren Ausprägungen (z. B. Steigung) befahren werden können.

A 2: Mehrfach einsetzbar

Da durch ein intelligentes Fördergut immer nur die Teile einer Förderanlage erfasst werden können, über die es auch transportiert wird, wird es in der Regel (insbesondere bei größeren und komplexeren Anlagen) erforderlich sein, dass der Behälter mehrere Messfahrten unternimmt. Er soll nach einer erfolgten Datenaufnahme durch eine Überfahrt auf der Anlage wieder auf die Anlage aufgesetzt werden können, um weitere Überfahrten zu durchlaufen. Des Weiteren soll das zu entwickelte Erfassungssystem eines intelligenten Behälters auch auf verschiedenen Anlagen eingesetzt werden können, ohne dass aufwändige Anpassungen vorgenommen werden müssen. Dazu müssen insbesondere folgende Unteranforderungen erfüllt werden.

- *A 2.1: Einfacher Umbau*

Die Messsensorik muss einfach auf veränderte Situationen (z. B. Integration in ein anderes Fördergut) anpassbar sein. Dazu ist es notwendig, dass die Sensorik zerstörungsfrei aus- und in ein neues Fördergut eingebaut werden kann.

- *A 2.2: Robuster Aufbau*

Um den Anforderungen der Wiederverwendbarkeit zu genügen, muss das intelligente Fördergut inkl. der eingesetzten Sensorik so gestaltet sein, dass es Rahmenbedingungen von Förderanlagen aus dem Referenzszenario standhält. Es muss so robust gestaltet sein, dass z. B. Erschütterungen (wie durch Pusher oder Anschläge verursacht), Beschleunigungen oder die Überwindung von Steigungen keinen Einfluss auf die Funktionalität der Messeinheit haben.

A.3: Aufwandsarmer Einsatz

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Reduktion des Aufwands bei der Erfassung von Daten, welche für die Modellierung notwendig sind. Daher ergibt sich als Anforderung an das Erfassungssystem, dass dieses hinsichtlich der verursachten Kosten und des zeitlichen Aufwands für den Einsatz optimiert gestaltet wird. Es ergeben sich folglich die nachfolgend beschriebenen Unteranforderungen.

- *A 3.1: Keine Anpassungen an der Anlage und externen Infrastruktur notwendig*

Für den Einsatz des intelligenten Förderguts sollen keine physikalischen Änderungen (z. B. die Anbringung externer Sensorik oder von Markierungen) an der Förderanlage vorgenommen werden müssen. Es ist ebenso zu vermeiden, dass Änderungen oder Ergänzungen an der externen Infrastruktur (z. B. Hallendecke) durchgeführt werden müssen.

- **A 3.2: Kostengünstige Komponenten**

Es sollen keine überdurchschnittlich teuren Hardware- oder Elektronikkomponenten zum Einsatz kommen. Kostenintensive Software-Lizenzen sind ebenso zu vermeiden.

- **A 3.3: Autarker Betrieb möglich**

Einhergehend mit A 3.1 folgt für die Gestaltung des intelligenten Förderguts, dass eventuell notwendige Energieversorgung für die Messsensorik nicht extern zugeführt werden kann. Folglich muss diese in der Erfassungseinheit integriert werden. Um zudem unabhängig von eventuell vorhandener Kommunikationsinfrastruktur (z. B. WLAN) agieren zu können, sollen aufgenommene Messdaten zunächst intern im intelligenten Fördergut gespeichert werden können, statt diese nach extern zu übertragen. Dies geht einher mit der in 3.3 beschriebenen Rahmenbedingung, dass der Zeitpunkt der Datenaufnahme und der Datenverarbeitung zeitlich und räumlich voneinander entkoppelt werden können. Durch diese Untieranforderung soll ein autarker Betrieb des intelligenten Behälters ermöglicht werden.

4.2.2 Ableitung zu rekonstruierender Modellierungsdaten

Um die relevanten Daten für den in Abschnitt 3.2 Modellierungszweck der virtuellen Inbetriebnahme zu ermitteln, wurden exemplarische Modelle aufgebaut, welche die Elemente des Referenzlayouts beinhalten und einen hohen Detailgrad abdecken. So können die Anforderungen an eine realitätsnahe Abbildung einer Förderanlage im Modell für eine virtuelle Inbetriebnahme erfüllt werden.

Aus der Abstraktion der benötigten Daten für die Modellerstellung ergeben sich die folgenden Modellierungsdaten, welche im Rahmen des Forschungsprojekts weiter betrachtet werden.

Layout

Die erste Informationsstufe, welche abstrakte Informationen über den grundlegenden Aufbau der zu rekonstruierenden Förderanlage gibt, ist die Zusammensetzung des Layouts.

1. **Anzahl der enthaltenen Förderelemente**

Um die Basis für die Modellierung einer Förderanlage zu erhalten, muss zunächst bekannt sein, aus wie vielen Elementen die Anlage, die im späteren Verlauf weiter zu spezifizieren sind, besteht.

2. *Verbindung zwischen den Förderelementen*

Für diese Beschreibung der Verbindung der Förderelemente untereinander muss für jedes dieser Elemente die Anzahl der Anschlusspunkte zu anderen Förderern bekannt sein. Zudem gibt die Art der Anschlusspunkte (Eintrittspunkt, Austrittspunkt oder beides) Aufschluss über die Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen zwischen den Förderelementen – also darüber welche Streckenführungen über eine Förderanlage möglich sind.

3. *Förderertyp*

Da die geometrischen Eigenschaften, welche für die Modellerstellung benötigt werden, abhängig von der Art des Förderelements sind, ist es weiterhin erforderlich den grundlegenden Förderertyp zu kennen. Basierend auf den Elementen des Referenzszenarios kommen hierbei die Förderertypen in Frage:

- „Gerade (ohne Eckbewegung)“,
- „Gerade (mit Eckbewegung)“,
- „Kurve“,
- „Steigung“,
- „Lift“ und
- „Drehtisch“.

4. *Mögliche Bewegungstypen (Bewegungsabschnitte) auf den Förderern*

Um bei mehreren Anschlusspunkten die möglichen Streckenführungen innerhalb des Förderelements zu kennen, benötigt man zusätzlich Informationen über die verschiedenen möglichen Bewegungsabschnitte zwischen den Anschlusspunkten. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen den Bewegungstypen:

- „linear“
- „L-Bewegung“
- „U-Bewegung“
- „Z-Bewegung“
- „Drehung“ und
- „Kurve“.

Geometrie

Um aus den im Layout enthaltenen abstrakt beschriebenen Förderelementen ein realitätsnahes Modell mit physikalischen Eigenschaften zu erstellen, müssen geometrische Informationen vorhanden sein.

1. *Maße der enthaltenen Förderelemente*

Dazu zählen die resultierenden Maße der Förderelemente. Die Art der notwendigen Maße, um ein Förderelement vollständig zu beschreiben, werden durch den im

Layout ermittelten Förderertyp definiert. So ist beispielsweise für den Förderertyp „Kurve“ dessen Radius relevant, während für eine „Steigung“ der Steigungswinkel bekannt sein muss.

2. *Zusätzliche Maße, welche die Bewegung nicht direkt beeinflussen*

Bei den Maßen der Fördererelemente kann grundlegend zwischen Maßen, welche direkten Einfluss auf die Bewegung eines Förderguts haben (z. B. Länge eines geraden Förderelements) und Maßen, welche die Bewegung nicht direkt beeinflussen bzw. nur begrenzende Funktionen haben (z. B. Breite oder Höhe eines geraden Förderelements), unterschieden werden. Auch letztere Maße können für bestimmte detaillierte Modellierungszwecke relevant sein, weshalb diese auch in diesem Rahmen weiter betrachtet werden.

3. *Position und Orientierung der Fördererelemente*

Neben den Maßen der Fördererelemente muss für die Anordnung der Fördererelemente im Raum die genaue Pose (Position und Orientierung) jedes Förderelements bekannt sein.

Zusatzattribute

Weitere Detailinformationen für eine virtuelle Inbetriebnahme können verschiedene Zusatzattribute der Fördererelemente liefern.

1. *Oberfläche der Bewegungsabschnitte*

Zur Einstellung von Reibkennwerten kann beispielsweise die Art der Oberfläche eines Förderelements eine relevante Information liefern. Insbesondere bei Eckbewegungen können dabei mehrere Oberflächen innerhalb eines Förderelements auftreten.

2. *Art der Umsetzer bei Eckbewegungen (L, U, Z)*

Für das exakte Verhalten bei einer Eckbewegung kann es zudem notwendig sein, den genauen Typ des Umsetzers, welcher die Eckbewegung hervorruft, zu kennen.

3. *Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil der Bewegungsabschnitte*

Weiterhin ist für eine virtuelle Inbetriebnahme wichtig, dass das genaue Bewegungsprofil von Fördergütern auf den Förderelementen bekannt ist. Dies zeichnet sich durch die Kinematik Kennzahlen der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile aus.

4. *Position der Sensorik*

Die Schnittstelle zur Steuerung einer Förderanlage bilden die Sensoren und

Aktoren. Während die Aktoren durch die Kinematikdaten beschrieben werden, müssen zudem Informationen über die Sensoren, die auf einem Fördererelement integriert sind, bekannt sein. Insbesondere die Position der Sensorelemente spielt dabei eine wichtige Rolle.

Für die so ermittelten notwendigen Modellierungsdaten wird folglich im Rahmen der in 4.2.1 definierten Anforderungen ein Gesamtkonzept zur Rekonstruktion von Förderanlagen mittels eines intelligenten Förderguts entwickelt.

4.3 Gesamtkonzept und Rekonstruktionsszenario

Aus der in Abschnitt 4.1 gewählten Vision für ein Extraktions- und Rekonstruktionssystem sowie den daraus abgeleiteten Anforderungen aus Abschnitt 4.2 kann ein detaillierteres Zielbild für das Gesamtkonzept abgeleitet werden. Dazu wird zunächst in Unterabschnitt 4.3.1 der Aufbau des resultierenden Gesamtkonzepts und darauffolgend in Unterabschnitt 4.3.2 der Prozess für das zu entwickelnde Szenario beschrieben.

4.3.1 Gesamtkonzept zur Rekonstruktion von Modellierungsdaten

Um die in 4.2.2 beschriebenen Modellierungsdaten mithilfe eines intelligenten Förderguts zu rekonstruieren, wurde ein Gesamtkonzept erarbeitet, welches im Folgenden beschrieben wird. Basis hierfür bildet die Überlegung, dass ein intelligentes Fördergut mit Sensorik ausgestattet ist, welche in der Lage ist, durchgängig Informationen über die Bewegung und die dabei passierte Umgebung des Förderguts zu erfassen. Der zeitliche Kontext der so aufgenommenen Bewegungs- und Umgebungsdaten soll die Grundlage für die Rekonstruktion der benötigten Modellierungsdaten ergeben.

Aus diesen Vorüberlegungen ergibt sich ein dreistufiges Verfahren (siehe Abbildung 4-2), bestehend aus den Schritten der *Datenaufnahme*, *Dateninterpretation* und der *Rekonstruktion*. Im Schritt der Datenaufnahme werden Daten in der *bestehenden Förderanlage* durch das intelligente Fördergut erfasst und stehen über die Schnittstelle der *Messdaten* für den Schritt der Dateninterpretation zur Verfügung. In diesem Schritt werden aus den Messdaten *Bewegungs- und Umgebungsdaten* abgeleitet, welche in einer Schnittstelle für die Rekonstruktion gesammelt werden. Der Rekonstruktionsalgorithmus leitet letztlich die *Modellierungsdaten* aus den Bewegungs- und Umgebungsdaten ab.



Abbildung 4-2: Dreistufiges Verfahren zur Rekonstruktion von Modellierungsdaten aus bestehenden Förderanlagen (Bildquelle „Bestehende Förderanlage“ GEBHARDT Fördertechnik GmbH)

Um die einzelnen Schritte zu detaillieren, müssen ausgehend von den zu rekonstruierenden Modellierungsdaten (vgl. 4.2.2) verschiedene Fragestellungen beantwortet werden (siehe Abbildung 4-2, Fragen 1-3).

1) *Wie können aus Bewegungs- und Umgebungsdaten die Modellierungsdaten rekonstruiert werden?*

Hierbei müssen ausgehend von den benötigten Modellierungsdaten verschiedene Möglichkeiten erarbeitet werden, wie aus Daten, die ein intelligentes Fördergut während seiner Überfahrt auf- und wahrnehmen könnte, Schlüsse auf die notwendigen Modellierungsdaten gezogen werden können. Ziel ist es, unabhängig davon, welche Daten ein intelligentes Fördergut letztlich tatsächlich aufnehmen kann, einen möglichst großen Lösungsraum hinsichtlich einer Rekonstruktion der Modellierungsdaten zu erarbeiten. Eine Prüfung der Umsetzbarkeit der aufzunehmenden Daten erfolgt in den weiteren beiden Schritten. Die Ergebnisse des so entstehenden Rekonstruktionsverfahrens werden in Abschnitt 5.1 im Detail vorgestellt.

2) *Aus welchen Messdaten können und Bewegungs- und Umgebungsdaten auf welche Weise abgeleitet werden?*

In Abhängigkeit der erarbeiteten Möglichkeiten aus der Frage 1) muss beantwortet werden, welche Messdaten der intelligente Behälter erfassen müsste, um die für die Rekonstruktion benötigten Bewegungs- und

Umgebungsdaten zu erhalten. Da diese Daten in vielen Fällen nicht direkt aus Sensorikelementen ablesbar sind, bedarf es zudem einem Interpretationsverfahren, welches aus den Messdaten der Sensorikelemente Bewegungs- und Umgebungsdaten ableitet. Die somit erarbeiteten aufzunehmenden Messdaten werden in Unterabschnitt 5.2.1 detailliert beschrieben. Die Module, welche aus den Messdaten Bewegungs- und Umgebungsdaten generieren, werden darauffolgend in 5.2.2 erläutert.

3) *Wie können Messdaten aufwandsarm erfasst werden?*

Nachdem die aufzunehmenden Messdaten definiert wurden, muss im letzten Schritt geprüft werden, mit welchen Sensorikelementen diese Daten konkret erfasst werden können. Zudem ist zu erarbeiten, wie sich die resultierenden Sensorikelemente in ein intelligentes Fördergut integrieren lassen, sodass eine aufwandsarme Datenaufnahme erfolgen kann. Wie in 3.3 beschrieben, kann die Datenaufnahme zeitlich entkoppelt von der Interpretation und der Rekonstruktion erfolgen. Daher sollte zudem eine Möglichkeit zum Speichern der aufgenommenen Daten vorgesehen werden. Um die Aufnahme der Daten zu steuern, bedarf es zudem einer Steuerungseinheit im intelligenten Behälter. Zur Versorgung der genannten Elemente ist eine Energiequelle, z. B. in der Form von Akkus vorzusehen. Die detaillierten Ergebnisse für das Verfahren im Schritt der Datenaufnahme sind in Abschnitt 5.3 beschrieben.

Da sich innerhalb dieser Fragestellungen Abhängigkeiten zwischen den Ergebnissen der Einzelschritte ergeben, müssen diese Fragen iterativ beantwortet werden. Somit können beispielsweise im Rahmen der Beantwortung der Frage nach einsetzbarer Messsensorik neue Ideen zur Ableitung von Bewegungs- und Umgebungsdaten bzw. neue Lösungsmöglichkeiten zur Rekonstruktion entstehen. Es sollte zudem stets auf Synergieeffekte geachtet werden, indem z. B. geprüft wird, ob die ausgewählten Sensorikelemente neben einem Einsatzzweck auch für weitere Ableitungen von Bewegungs- und Umgebungsdaten eingesetzt werden können.

4.3.2 Beschreibung des Vorgehens zur Datenaufnahme, Interpretation und Rekonstruktion

Um das im vorherigen Unterabschnitt technisch beschriebene Gesamtszenario in der Praxis anzuwenden, wird in diesem Unterabschnitt das Vorgehen zur Durchführung der einzelnen Schritte, vorgestellt. Dieses Vorgehen, welches im Prozessschaubild der Abbildung 4-3 dargestellt ist, setzt sich aus Tätigkeiten vor Ort an der zu rekonstruierenden Anlage sowie unabhängig davon extern durchführbaren Tätigkeiten zusammen.

An der Anlage muss zunächst die *Vorbereitung der Aufnahme* erfolgen. Dazu wird die Erfassungseinheit (nach der Sicherstellung einer ausreichenden Energieversorgung durch die eingesetzten Akkus und ausreichend vorhandenem Speicherplatz) auf die regulären Fördergüter der aufzunehmenden Anlage adaptiert. Dies kann in Abstimmung mit dem Anlagenbetreiber teilweise schon extern begonnen werden, sollte aber an der Anlage selbst finalisiert und abgeglichen werden, sodass Störungen ausgeschlossen werden. Nach der erfolgten Integration der Erfassungseinheit zählt auch eine mögliche Kalibrierung der Messsensorik sowie die Dokumentation deren exakter Position und Ausrichtung zum Schritt der Vorbereitung. Ebenso muss mit dem Anlagenbetreiber eine sinnvolle Planung der Überfahrten erfolgen, sodass alle aufzunehmenden Förderstrecken mit geringem Aufwand erreicht und aufgenommen werden können.

Anschließend erfolgt das *Aufsetzen* des vorbereiteten Förderguts auf den (ersten) Startpunkt der Anlage, wobei auf die *Dokumentation der exakten Startposition* zu achten ist. Erst danach kann die Überfahrt des intelligenten Förderguts über die Anlage starten. Hierzu muss der *Start der Überfahrt* vom Betreiber veranlasst werden und durch die anwendende Person des Erfassungssystems die *Aufnahme von Daten* gestartet werden.

Ist die vorgegebene Überfahrt beendet, so kann durch die anwendende Person des Erfassungssystems die *Aufnahme beendet* und das intelligente Fördergut von der Anlage *am Zielort abgenommen* werden.

Wurden noch nicht alle mit dem Anlagenbetreiber vereinbarten Überfahrten durchgeführt, sodass alle relevanten Abschnitte aufgenommen werden konnte, dann wird das oben beschriebene Verfahren so lange wiederholt, bis dieses Ziel erreicht ist. Dabei muss vor jeder neuen Überfahrt eine ausreichende Energieversorgung und genügend Speicherplatz geprüft werden. Sollte dies nicht gegeben sein oder sollte eine Änderung der Konfiguration des Erfassungssystems notwendig sein, muss erneut der Schritt der Vorbereitung durchgeführt werden.

Wurden alle erforderlichen Überfahrten durchgeführt, ist zunächst eine *Sicherung und entsprechende Ablage der aufgenommenen Daten* durchzuführen, sodass die Nachvollziehbarkeit auch hinsichtlich der dokumentierten Randbedingungen (Positionen, Kalibrierung) gewährleistet ist.

Als letzter Schritt auf der Anlage sind – sofern möglich und zutreffend – vorherrschende *Gegebenheiten der Förderanlage vom Anlagenbetreiber zu erfragen*. So kann es beispielsweise vorkommen, dass in Anlagen die Anordnung von

Förderelementen nur in definierten Winkeln vorgesehen ist (z. B. Vielfache von 45°). Dies kann bei der späteren Interpretation der Daten genutzt werden, um höhere Genauigkeiten zu erreichen.

Nach der erfolgten Datenaufnahme vor Ort an der Anlage kann die Interpretation der Daten und deren Rekonstruktion hin zu Modellierungsdaten unabhängig von der Anlage erfolgen. Somit ist es möglich, beispielsweise rechenintensive Aufgaben bei der Dateninterpretation oder Rekonstruktion auf entsprechend dafür vorgesehener Hardware durchzuführen.

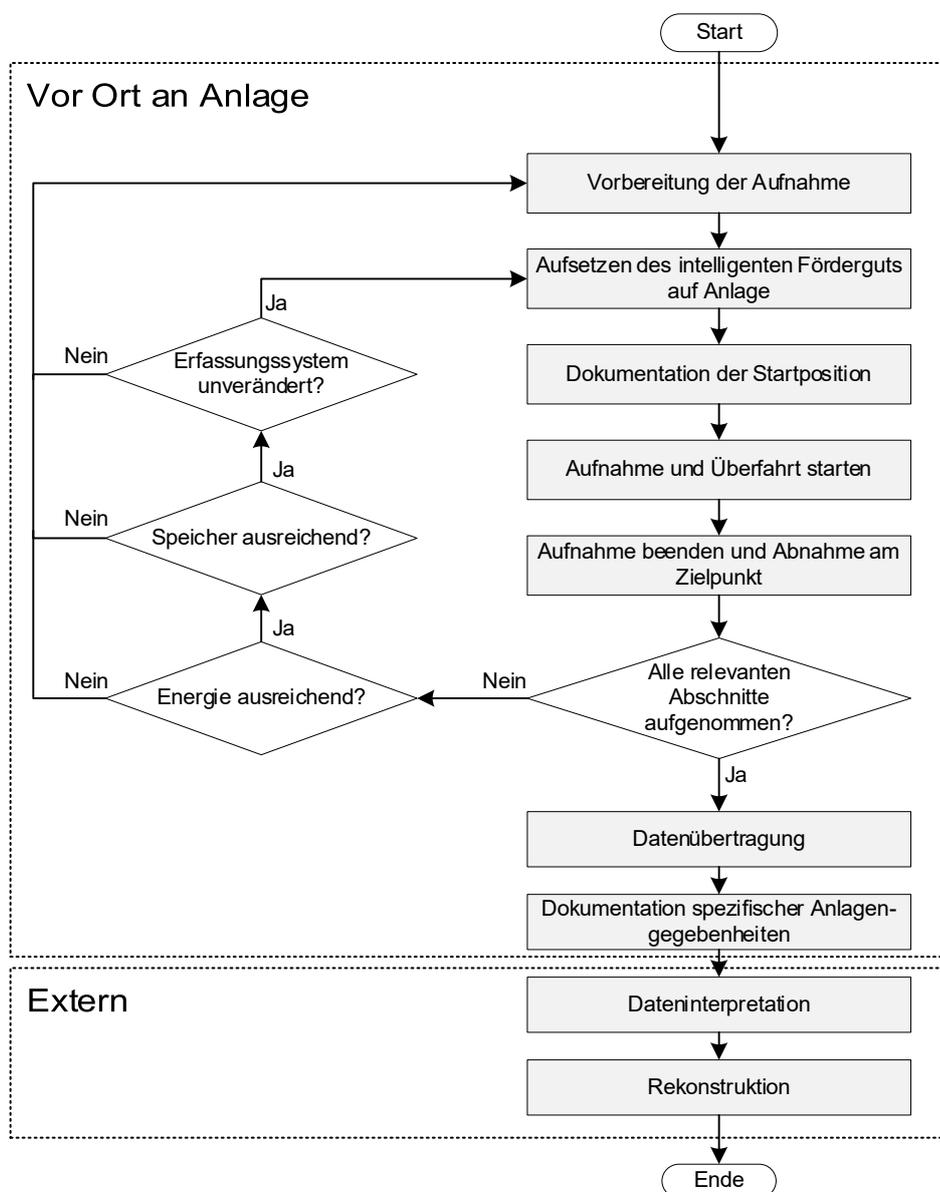


Abbildung 4-3: Prozess zur Durchführung der Datenaufnahme, Interpretation und Rekonstruktion

5 Detaillierung der Einzelschritte des Gesamtkonzepts

In diesem Kapitel werden die im Gesamtkonzept aus 4.3.1 beschriebenen Schritte der Rekonstruktion, Interpretation und Datenaufnahme detailliert. Insbesondere werden auch die Schnittstellen zwischen den drei Schritten beschrieben, um durch die Entkopplung ein möglichst technologieoffenes Verfahren zu gewähren.

5.1 Rekonstruktion

Ziel des Rekonstruktionsverfahrens ist es, aus Daten, die ein intelligentes Fördergut während seiner Überfahrt über eine Förderanlage aufnehmen kann (Bewegungs- und Umgebungsdaten) Rückschlüsse über den Aufbau der Anlage zu erlangen. Um die so erhaltenen Informationen über eine bestehende Anlage aufwandsarm in ein Modell überführen zu können, kommt die (teil)automatische Modellerstellung zum Tragen. Es soll im Rekonstruktionsverfahren eine Schnittstelle mit Modellierungsdaten befüllt werden, welche sich für eine (teil)automatische Modellerstellung eignet.

Es wird zunächst beschrieben, wie diese Schnittstelle im Rahmen des Forschungsprojekts gestaltet wird (5.1.1). Basierend darauf wird das Verfahren zur Rekonstruktion vorgestellt (5.1.2). Als Voraussetzung zur Beschreibung des Schritts der Dateninterpretation (5.2) werden in 5.1.3 gesammelt die Bewegungs- und Umgebungsdaten beschrieben, die in der Dateninterpretation erzeugt werden müssen, um in der Rekonstruktion zum Einsatz zu kommen.

5.1.1 Schnittstelle zur (teil)automatischen Modellerstellung

Nachdem in 4.2.2 die Art der zu rekonstruierenden Daten definiert wurde, soll in diesem Schritt festgelegt werden, in welcher Form diese gespeichert werden sollen, um für eine (teil)automatische Modellerstellung verwendet werden zu können.

Wie in 2.2.2 beschrieben, sind die derzeit in der Praxis eingesetzten Modellierungsmethoden und der realisierbare Automatisierungsgrad der Modellerstellung stark abhängig von der Art des zu erstellenden Modells (Detaillierung, Granularität, Linguistik) und des eingesetzten Simulationstools und lassen sich somit nicht zielführend verallgemeinern. Aufgrund der beschriebenen Diversität wird jedoch verstärkt an Standards gearbeitet, die nicht nur zu Modellerstellung für Simulationszwecke, sondern entlang des gesamten Engineering-Prozesses eingesetzt werden können. Hierbei setzen sich vermehrt XML-basierte Formate durch.

Da dennoch in der Praxis noch keine standardisierten Schnittstellen über mehrere Simulationsprogramme hinweg eingesetzt werden, wird im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts von der Festlegung auf ein spezifisches Format abgesehen. Durch den Austausch mit Simulationsdienstleistern wurde jedoch ersichtlich, dass eine Speicherung der Daten in einem tabellarischen Format genügt, um dieses mit wenig Aufwand individuell für die Importschnittstellen der Simulationsprogramme umzuwandeln. Die relevanten Modellierungsdaten sollen daher in Abstimmung mit den Modellierungsexpert:innen aus dem Projektbegleitenden Ausschuss nach der Rekonstruktion in einem *.csv Format in einer definierten Form zur Verfügung stehen.

5.1.2 Rekonstruktionsverfahren

Ausgehend von den zu rekonstruierenden Modellierungsdaten aus 4.2.2 teilt sich das Rekonstruktionsverfahren in drei Schritte, die Layoutrekonstruktion, die Geometrierekonstruktion und die Rekonstruktion der Zusatzattribute.

Layoutrekonstruktion

Die Layoutrekonstruktion setzt sich aus sechs Modulen zusammen (siehe Abbildung 5-1), welche die Basis für die Modellierungsdaten (L1 bis L4) aus der Rubrik *Layout* bilden:

- *L1 Anzahl der enthaltenen Fördererlemente*
- *L2 Verbindung zwischen den Fördererlementen*
- *L3 Förderertyp*
- *L4 Mögliche Bewegungstypen (Bewegungsabschnitte) auf den Förderern*

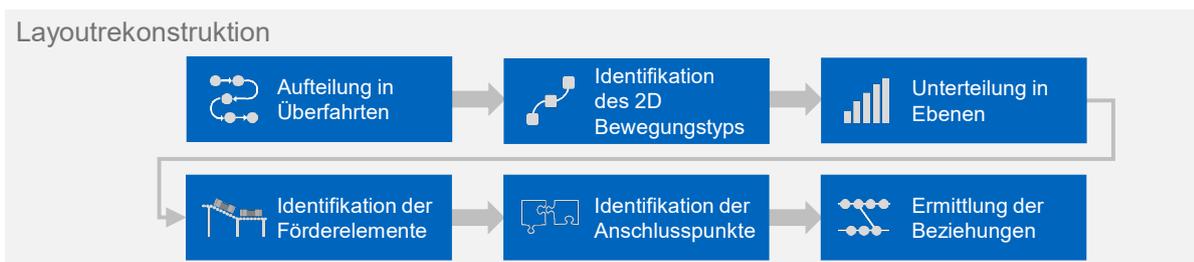


Abbildung 5-1: Module der Layoutrekonstruktion

Die Module wurden vom Autor in Teilen bereits in [Mül-2021] unter dem Oberbegriff der Topologierekonstruktion vorgestellt, werden jedoch in diesem Bericht nochmals spezifiziert und detailliert beschrieben.

Aufteilung in Überfahrten

Während seiner Fahrt über eine Förderanlage passiert ein Fördergut verschiedene Fördererlemente. Das einmalige Befahren eines Fördererlements von einem *Eintritts-* zu einem *Austrittspunkt* wird in diesem Rahmen als *Überfahrt* bezeichnet. Um eine

Überfahrt in dem hier erarbeiteten Rekonstruktionsverfahren zu erkennen, muss also durch das intelligente Fördergut erkannt werden, wenn es von einem auf ein anderes Förderelement wechselt. Man spricht hierbei von der Erkennung der *Übergänge*. Eine Überfahrt bezeichnet also die Wegstrecke, welche das Fördergut vom Übergang des Eintritts zum Übergang des Austritts zurücklegt. Um die Eigenschaften der einzelnen ermittelten Überfahrten in den folgenden Modulen genauer zu identifizieren, muss zudem die zurückgelegte Wegstrecke, also die Position und Orientierung des Förderguts in Abhängigkeit der Zeit, bekannt sein.

Identifikation des 2D Bewegungstyps

Als Voraussetzung für die spätere Identifikation der genauen Typen der Förderelemente, ist es in diesem Modul das Ziel, den *2D Bewegungstyp*, der einzelnen Überfahrten zu ermitteln. Darunter versteht man den Bewegungstyp, der sich durch eine „Draufsicht“ auf die Bewegung des Förderguts auf der Anlage ergibt. Aus den Elementen des Referenzszenarios ergeben sich die Bewegungstypen Linear, Kurve, Drehung sowie L-, U- und Z-Bewegungen. Beispiele zu den genannten Bewegungstypen sowie die Zuordnung zu möglichen Förderern sind in Abbildung 5-2 aufgeführt. Eine 2D Linearbewegung aus der Draufsicht kann also nicht nur bei Geraden auftreten, sondern auch bei Förderelementen, welche zusätzlich eine Vertikalbewegung aufweisen (z. B. Lift oder Steigung).

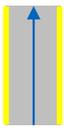
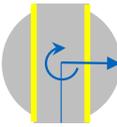
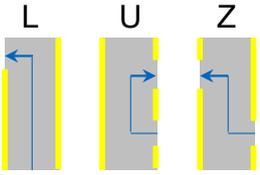
	Linear	Kurve	Drehung	L / U / Z
Beispiel				
Mögliche Förderer	<ul style="list-style-type: none"> • Gerade ohne Eckbewegung • Lift • Steigung 	Kurve	Drehtisch	Gerade mit Eckbewegung

Abbildung 5-2: 2D Bewegungstypen der betrachteten Förderelemente

Als Ergebnis dieses Moduls ist jeder zuvor identifizierten Überfahrt ein 2D Bewegungstyp zugeordnet.

Unterteilung in Ebenen

In diesem Modul wird analog zur Bestimmung des 2D Bewegungstyps die vertikale Bewegung durch die Betrachtung über die Seitenansicht der Überfahrt eines Förderguts über die Förderanlage bestimmt. Im Rahmen des Referenzszenarios wird

hierbei unterschieden zwischen Bewegungen innerhalb einer Ebene (also Bewegungen ohne vertikalen Anteil) und Bewegungen zwischen Ebenen (Lift-Bewegung oder Steigung). Bei den Bewegungen innerhalb einer Ebene wird zudem über die durchschnittliche Höhe der Bewegung während der Überfahrt die Zuteilung der Überfahrt zu verschiedenen Ebenen durchgeführt.

Identifikation der Förderelemente

Aus den Informationen der vorhergehenden Module ist es in diesem Schritt möglich, die einzelnen Förderelemente zu identifizieren. Da ein Förderer während einem oder mehreren Durchläufen mehrere Male durch ein Fördergut befahren werden kann, entspricht die Anzahl der Überfahrten nicht automatisch der Anzahl der Förderelemente. Abbildung 5-3 zeigt ein Beispiel, bei dem ein Fördergut in sechs verschiedenen Durchläufen die fünf Förderelemente einer Kreuzung (Ausschnitt aus größerer Förderanlage) in 18 Überfahrten befährt. Es muss also in diesem Schritt geprüft werden, welche der Überfahrten eine Bewegung über dasselbe Förderelement darstellen. Dies kann durch die Prüfung der Überlappung von Überfahrten derselben Ebene realisiert werden. Sobald sich zwei Überfahrten einer Ebene zu einem gewissen Anteil überlappen, werden sie demselben Förderer zugeordnet. Nach diesem Schritt kann bereits eine Aussage über die Daten $L1$ und $L4$ getroffen werden. Es ist (abhängig davon, ob alle möglichen Routen der Anlage mindestens einmal durch das intelligente Fördergut befahren wurden) möglich, die Anzahl der Förderelemente sowie die Art der möglichen 2D und 3D Bewegungstypen auf den jeweiligen Förderelementen zu bestimmen.

zeigt die resultierende Art und Anzahl der Anschlusspunkte für die im Beispiel aus Abbildung 5-3 ermittelten Fördererelemente.

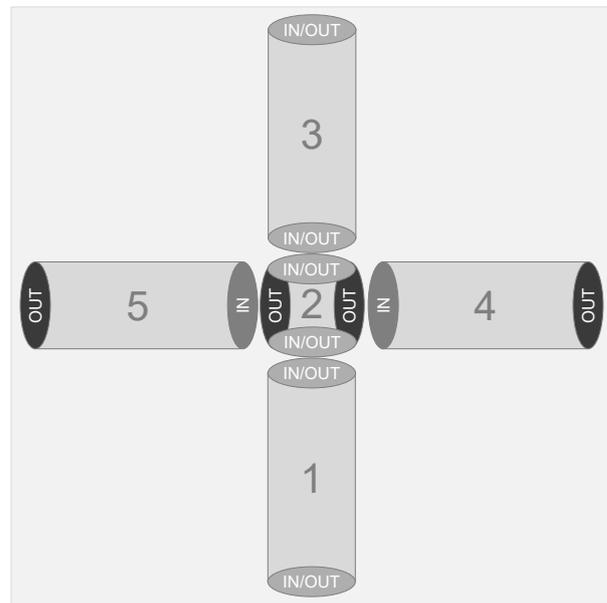


Abbildung 5-4: Art und Anzahl der Anschlusspunkte der Fördererelemente des vorherigen Beispiels [Mül-2021]

Ermittlung der Beziehungen

Das Layout und die Streckenführung innerhalb des Layouts einer Anlage wird unter anderem durch die Beziehung von Fördererelementen zueinander definiert. Ein Fördererelement kann dabei entweder Vorgänger oder auch Nachfolger eines anderen Fördererelements sein. Bei IN/OUT-Anschlusspunkten kann ein Fördererelement zudem gleichzeitig Vorgänger und Nachfolger eines anderen Elements sein. Um die Beziehung der Fördererelemente zueinander zu ermitteln, können die zuvor identifizierten Anschlusspunkte der Fördererelemente herangezogen werden. Es wird in diesem Modul geprüft, welche Anschlusspunkte eines Fördererelements mit welche Anschlusspunkten der anderen Fördererelemente überlappen. Dadurch erhält man letztlich die Art der Beziehungen zwischen den Fördererelementen, was gleichzeitig die Information für die zu rekonstruierenden Daten *L2* liefert.

Geometriekonstruktion

Die Geometriekonstruktion setzt sich aus drei Modulen zusammen (Abbildung 5-5), welche als Ergebnis die Modellierungsdaten (G1 bis G3) aus der Rubrik *Geometrie* ergeben:

- *G1 Maße der enthaltenen Fördererelemente*
- *G2 Zusätzliche Maße, welche die Bewegung nicht direkt beeinflussen*
- *G3 Position und Orientierung der Fördererelemente*



Abbildung 5-5: Module der Geometrierekonstruktion

Einteilung in Förderertypen

Je nach Art des Förderelements fallen die Definitionen für notwendige geometrische Eigenschaften unterschiedlich aus. Daher ist es zunächst nötig, die identifizierten Förderelemente in Förderertypen zu unterteilen. Basierend auf den Elementen des Referenzlayouts ergeben sich verschiedene mögliche Förderertypen (Abbildung 5-6), welche unterschiedliche geometrische Definitionen bedingen.

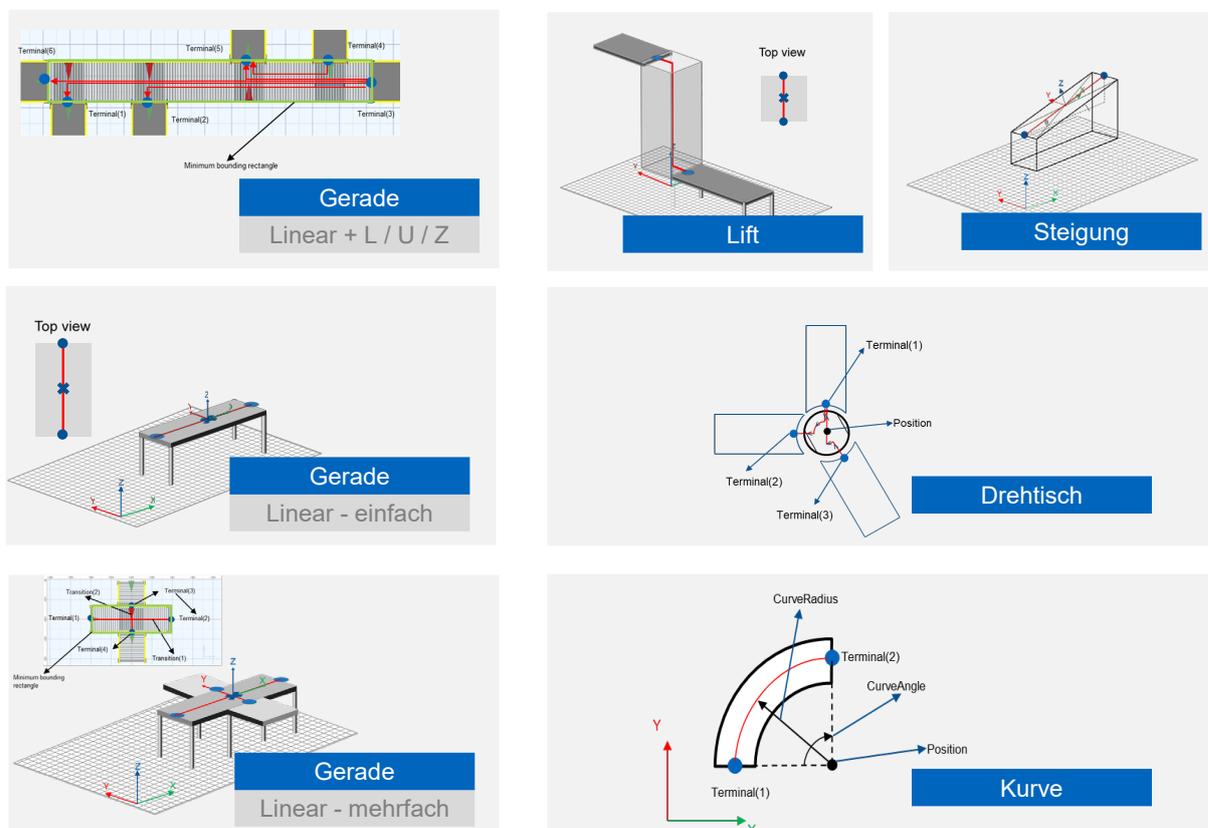


Abbildung 5-6: Förderertypen - basierend auf den Elementen des Referenzlayouts

Die Förderertypen können mithilfe der Überfahrten, welche einem Förderelement zugeordnet sind, bestimmt werden. Neben den Förderertypen *Lift*, *Steigung*, *Drehtisch* und *Kurve* werden drei verschiedene Fördertypen für eine *Gerade* definiert. Dabei wird unterschieden, ob es sich um eine Gerade handelt, die nur über eine lineare Strecke (vorwärts und rückwärts) befahren werden kann (*Linear – einfach*), oder ob neben dieser einen linearen Bewegung noch eine weitere, orthogonal dazu stehende, lineare Strecke existiert (*Linear – mehrfach*). Eine Eckbewegung ist bei diesen beiden

Förderertypen ausgeschlossen. Dies deckt der Förderertyp *Linear + L / U / Z* ab, der ausschließlich aus Eckbewegungen (L / U / Z) oder zusätzlich linearen Strecken bestehen kann. Diese Einteilung bildet neben der Voraussetzung für eine eindeutige geometrische Definition ebenso die Informationen zu den Modellierungsdaten L3.

Bestimmung der Maße und der Pose

Maße und Pose der Fördererelemente werden letztlich auf Basis der getroffenen Definitionen der Förderertypen mithilfe der Informationen (Maße und Pose) der Überfahrten sowie der Anschlusspunkte des Fördererelements getroffen. Die so gewonnenen Informationen genügen allerdings nicht für die realitätsgetreue Abbildung der Fördererelemente, da hierdurch nur die Maße definiert werden, welche ausschlaggebend für die Bewegung sind. Daneben gibt es jedoch Maße, welche beispielsweise eine begrenzende Funktion haben, wie z. B. die Breite eines Fördererelements. Exemplarisch dargestellt sind die verschiedenen Definitionsmöglichkeiten für eine Eckbewegung in Abbildung 5-7. Im Fall a) wird auf Basis der Überfahrt und der Anschlusspunkte ein umschließendes Rechteck gebildet, welches die Maße repräsentiert. Da die Breite hierbei nicht beachtet wird, entspricht das gebildete Rechteck nicht der Realität des Fördererelements. Dahingehen wird im Fall b) und c) die Breite der Streckenabschnitte zusätzlich betrachtet. Wird die exakte Breite der Streckenabschnitte weiterhin nicht direkt vom intelligenten Fördergut erfasst, so kann stattdessen mit „Standardwerten“ – abhängig von den Maßen des Förderguts – gerechnet werden. Für ein Fördergut der Maße 600 mm x 400 mm wird beispielsweise von einer Breite von $(400 + x)$ mm für Längsbewegungen und von $(600 + x)$ mm für Querbewegungen ausgegangen. Wird die exakte Breite der einzelnen Streckenabschnitte erfasst, so kann diese direkt verwendet werden. Im Fall b) wird die erfasste oder standardisierte Breite verwendet, um wiederum ein umfassendes Rechteck zu bilden, welches jedoch die Breite einschließt. In Fall c) wird hingegen von einem umfassenden Rechteck abgewichen und stattdessen die exakte Form des Fördererelements abgebildet.

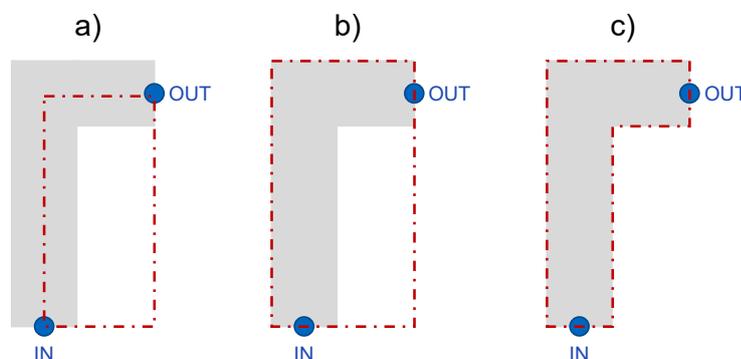


Abbildung 5-7: Beispiel für die Definition der Maße mit und ohne erfasster Breite

Um Ungenauigkeiten der Messdaten oder im Rekonstruktionsverfahren auszugleichen, können für die Bestimmung der Maße und Pose der Fördererlemente zusätzlich die Rahmenbedingungen von Förderanlagen in Betracht gezogen werden. Oftmals existieren auf Förderanlagen nur Kurven- oder Eckelemente, welche Bewegungen nur um Vielfache von 45° oder 90° erlauben. Weiterhin bieten verschiedene Fördertechnik-Hersteller die Komponenten ausschließlich in standardisierten Breiten- oder Längenprofilen an. Sind diese Rahmenbedingungen bekannt, so können diese als Zusatzinformationen im Rekonstruktionsverfahren angegeben werden und bei der Rekonstruktion beachtet werden, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Aus diesem Modul ergeben sich schließlich die Modellierungsdaten G1-G3.

Zusatzattribute

Die Rekonstruktion der Zusatzattribute ist abhängig vom genauen Einsatzzweck eines Modells. Je nach Detaillierungsgrad können mehr oder weniger Zusatzattribute benötigt werden. Im Rahmen des beschriebenen Forschungsprojekts setzt sich die Rekonstruktion der Zusatzmodule aus vier Modulen zusammen (Abbildung 5-8), welche als Ergebnis die Modellierungsdaten (Z1 bis Z4) aus der Rubrik *Zusatzattribute* ergeben:

- *Z1 Oberfläche der Bewegungsabschnitte*
- *Z2 Art der Umsetzer bei Eckbewegungen (L, U, Z)*
- *Z3 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil der Bewegungsabschnitte*
- *Z4 Position der Sensorik*

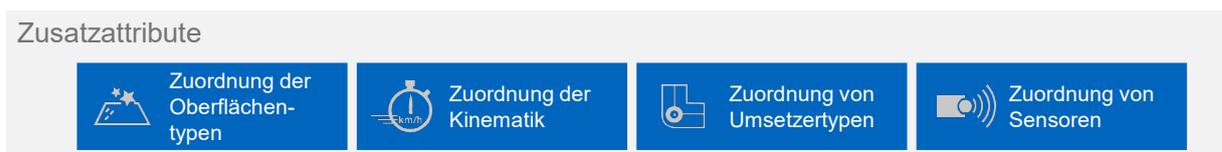


Abbildung 5-8: Module der Rekonstruktion von Zusatzattributen

Zuordnung von Oberflächentypen

Für verschiedene Modellierungszwecke kann es nötig sein, genauere Informationen zur Oberfläche der einzelnen Fördererlemente zu erhalten. Dies kann beispielsweise für eine physikalische Simulation der Fall sein, bei denen die Reibung verschiedener Oberflächen eine Rolle spielt. Zudem kann es sinnvoll sein, für Präsentationen vor Kunden eine möglichst realitätsnahe Visualisierung zu zeigen, um ein besseres gemeinsames Verständnis zu schaffen. Im Schritt der Dateninterpretation kann daher ein eigenes Modul zur Erkennung der Oberflächen vorgesehen werden, welche die Oberfläche pro Fördererlement erfasst und diesem in den Modelldaten zugeordnet werden.

Zuordnung der Kinematik

Auf Basis des zeitlichen Verlaufs der Bewegungsdaten der Überfahrten eines Fördererelements kann zudem das kinematische Verhalten (z. B. Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil der einzelnen Bewegungsabschnitte) abgeleitet werden und somit den einzelnen Abschnitten eines Fördererelements zugeordnet werden.

Zuordnung von Umsetzertypen

Wird eine Eckbewegung (L / U / Z) in den Überfahrten detektiert, so kann in der Dateninterpretation eine genaue Analyse der Art des Umsetzers, welcher die Eckbewegung verursacht, durchgeführt werden. Jeder Eckbewegung kann somit ein Umsetzertyp zugeordnet werden. Durch die Kombination des Förderertyps, der Oberfläche und den Umsetzertypen an den Eckpunkten ergibt sich somit eine noch detailliertere Aussage über das eingesetzte Fördererelement.

Zuordnung von Sensoren

Werden in der Dateninterpretation Sensoren erkannt, so können diese in der Rekonstruktion einzelnen Fördererelementen hierarchisch zugeordnet werden und deren Position innerhalb des Fördererelements bestimmt werden.

5.1.3 Aufzunehmende Bewegungs- und Umgebungsdaten

Aus den Modulen des Rekonstruktionsverfahrens ergeben sich Anforderungen hinsichtlich der Daten, welche durch den Schritt der Dateninterpretation entstehen müssen, um den Rekonstruktionsalgorithmus zu bedienen. Diese sind in der folgenden Auflistung genannt und beschrieben.

- **Erkennung der Übergänge**
Es muss der Zeitstempel der Übergänge von einem Fördererelement auf ein anderes während aller Durchläufe eines intelligenten Behälters bekannt sein.
- **Position und Orientierung des Förderguts**
Der Zeitverlauf von Position und Orientierung des Förderguts muss während seiner gesamten Durchläufe in ausreichend kleinen Zeitabständen vorhanden sein.
- **Erkennung der Bewegungsabschnitte**
Da sich die Breite sowie die Kinematik innerhalb eines Fördererelements ändern können, muss ein Fördererelement (sofern zutreffend) in seine möglichen Bewegungsabschnitte unterteilt werden. Dies zeichnet sich beispielsweise durch eine Änderung der Förderrichtung aus.

- **Erkennung der Breite je Bewegungsabschnitt**
Für jeden Bewegungsabschnitt soll die Breite des Förderelements separat ermittelt werden und für die Rekonstruktion zur Verfügung stehen.
- **Erkennung der Oberfläche pro Förderelement**
Die Oberfläche jedes Förderelements muss ermittelt werden.
- **Ermittlung der Kinematik pro Bewegungsabschnitt**
Für jeden Bewegungsabschnitt soll durch die Dateninterpretation ein Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil ermittelt werden.
- **Erkennung des Umsetzertyps**
Für jeden erkannten Eckpunkt muss ermittelt werden, durch welchen Umsetzertyp (aus einer Vorauswahl im Referenzszenario) die Eckbewegung hervorgerufen wurde.
- **Erkennung von Sensoren**
Es müssen Sensoren während der Durchläufe des intelligenten Behälters erfasst werden und der Zeitpunkt der Erfassung abgespeichert werden.

5.2 Dateninterpretation

Die in 5.1.3 beschriebenen Bewegungs- und Umgebungsdaten müssen somit im Schritt der Dateninterpretation möglichst automatisiert auf Basis der aufgenommenen Messdaten ermittelt werden. In 5.2.1 wird daher knapp die Schnittstelle beschrieben, welche durch die Dateninterpretation zu befüllen ist, damit der Rekonstruktionsalgorithmus entkoppelt davon funktionieren kann. In 5.2.2 werden mögliche Module zur Dateninterpretation vorgestellt und hinsichtlich deren Funktionalität beschrieben. Der Unterabschnitt 5.2.3 fasst zusammen, welche Messdaten durch die Datenaufnahme bereitgestellt werden müssen, um die Dateninterpretation zu ermöglichen.

5.2.1 Schnittstelle zur Rekonstruktion

Um die Verfahren der Dateninterpretation und der Rekonstruktion voneinander zu trennen und somit eine einfache Adaption der Technologie in der Umsetzung zu ermöglichen, werden die erforderlichen Daten aus den Modulen der Dateninterpretation in einheitlichen Schnittstellen abgelegt und können so für die Rekonstruktion zur Verfügung gestellt werden.

Im Rahmen dieses Projekts wird als Schnittstelle für jedes Modul ein tabellarisches Format vorgeschlagen, das die erfassten Bewegungs- und Umgebungsdaten aus dem jeweiligen Modul in der zeitlichen Abfolge abspeichert. Der Zeitstempel der Erfassung stellt zudem die wichtigste Information für die spätere Rekonstruktion der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen aufgenommenen Daten dar und soll daher in jeder Schnittstellentabelle einheitlich erfasst werden.

5.2.2 Module zur Dateninterpretation von Messdaten in Bewegungs- und Umgebungsdaten

Nachfolgend werden die erarbeiteten Module der Dateninterpretation vorgestellt. Neben der Funktionsbeschreibung und dem erwarteten Output der Module wird auch beschrieben, welche Art der Umsetzung im Projekt verfolgt wird. Abhängig davon gestalten sich die notwendigen Input-Daten aus der Datenaufnahme.

Generell sei jedoch anzumerken, dass die Art der Umsetzung immer abhängig vom aktuellen Stand der Technik ist und durch die Entkopplung in Form von Schnittstellen auch alternativ als nachfolgend dargestellt, umgesetzt werden kann. Hierbei sind jedoch Änderungen in der Datenaufnahme zu prüfen und ggf. vorzunehmen.

Modul „Übergänge“

Ergebnis des Moduls sind die Zeitstempel der Übergänge des Zentrums des intelligenten Förderguts von einem Förderelement auf das nächste. Um durch ein intelligentes Fördergut Übergänge zu erkennen, wird zunächst betrachtet, wie sich ein Übergang im Allgemeinen auszeichnet. Ergebnis der Überlegungen bildet die nachfolgende Liste möglicher „erkennbarer“ Merkmale eines Übergangs:

- Änderung der Oberfläche von einem Förderelement auf ein anderes
- Änderung der Bewegungsart – beispielsweise ein Wechsel aus einer Linear- in eine Kurven- oder Steigungsbewegung
- Lücke zwischen Förderelementen
- Lücke zwischen Führungsschienen der Förderelemente (sofern vorhanden)
- (Leichte) Erschütterung des Förderguts beim Übergang zwischen zwei Förderelementen

Im Rahmen des beschriebenen Forschungsprojekts wird hierzu der Ansatz des Maschinellen Lernens (Machine Learning) in Form des überwachten Lernens (Supervised Learning) angedacht. Der zu erstellende Algorithmus wird dadurch trainiert, dass ein erfahrener Benutzer anhand eines ausreichend großen Trainingsdatensatzes die Zeitstempel markiert, an denen ein Übergang vorhanden ist. Auf Basis der Analyse aller Eingangsdaten, welche zur Verfügung stehen, zieht der Algorithmus eigenständig Schlüsse, welche Kombination oder Ausprägung der Eingangsdaten ein Zeichen für einen Übergang feststellt. Der so trainierte Algorithmus

kann schließlich auf unbekanntem Anlagen angewandt werden. Als Eingangsdaten eignen sich auf Basis der vorher genannten Merkmale beispielsweise Kameradaten zur Erkennung der Oberfläche oder von Lücken und Daten einer inertialen Messeinheit, welche Beschleunigungen und Drehraten erfasst und somit Rückschlüsse auf eine Bewegungsart oder Erschütterungen zulässt (Gesamtbild s. Abbildung 5-9).

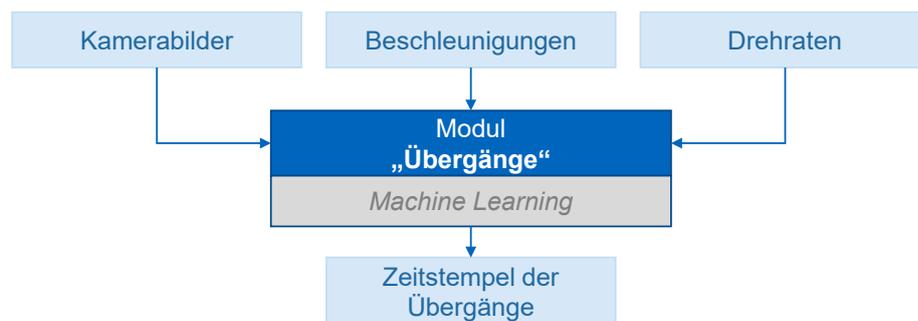


Abbildung 5-9: Ein- und Ausgangsdaten sowie angestrebte Umsetzungsart des Moduls „Übergänge“

Modul „Bewegungspfad“

Ziel des Moduls ist es, den zeitlichen Verlauf der Position und der Orientierung (beides relativ zum Startpunkt der Bewegung) des intelligenten Förderguts zu erfassen. Als Ansatz wird hierzu das Verfahren der Visual Inertial Odometry verfolgt. Dies zeichnet sich insbesondere durch die Unabhängigkeit von externer Infrastruktur aus. Als Eingangsdaten benötigt man dabei sowohl 2D-Kamerabilder als auch zeitgleich aufgenommene Tiefenbilder. Die 2D-Kamerabilder werden auf charakteristische Merkmale hin untersucht. Im darauffolgenden Bild werden ebendiese Merkmale erneut gesucht. Über die Verschiebung des Merkmals im 2D- und Tiefenbild kann der Bewegungspfad rekonstruiert werden. Die Hinzunahme von Beschleunigungs- und Drehratendaten verbessert das Verfahren hinsichtlich Qualität und Ausfallsicherheit. (Gesamtbild s. Abbildung 5-10)

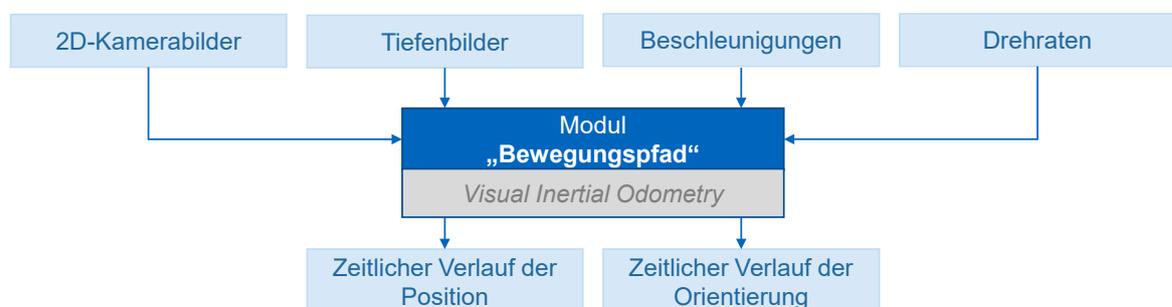


Abbildung 5-10: Ein- und Ausgangsdaten sowie angestrebte Umsetzungsart des Moduls „Bewegungspfad“

Modul „Bewegungsabschnitt“

Ziel dieses Moduls ist es, Bewegungsabschnitte zu erkennen. Spezifisch soll dafür der zeitliche Verlauf der Förderrichtung (längs / quer und vorwärts / rückwärts) ermittelt werden. Zudem ist zu bestimmen, wann zu welchen Zeitpunkten ein Wechsel von einer Bewegungsart (lineare Ebenenbewegung, Steigung, Hubbewegung Drehung, Kurve) zu einer anderen stattfindet. Hierfür können neben den Beschleunigungen und Drehraten auch die vorhandenen Rahmenbedingungen der Förderanlage herangezogen werden, da diese nur bestimmte Kombinationen von Bewegungen (und daraus resultierend Beschleunigungen und Drehraten) zulassen. (Gesamtbild s. Abbildung 5-11)

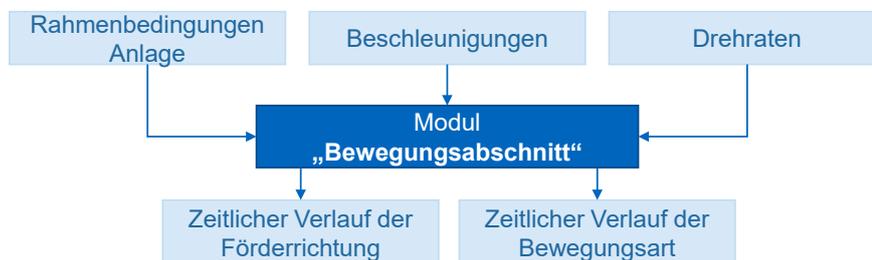


Abbildung 5-11: Ein- und Ausgangsdaten des Moduls "Bewegungsabschnitt"

Modul „Breitenerkennung“

Ziel des Moduls ist es, die Breite für einen Bewegungsabschnitt auszugeben. Dabei wird auf Basis der Elemente des Referenzszenarios davon ausgegangen, dass die Breite während eines Bewegungsabschnitts konstant ist. Hierbei soll in diesem Rahmen das Konzept der Computer Vision zum Einsatz kommen, bei welchem Schlüsselemente in 2D- und Tiefenbildern gesucht werden, die sich zur Messung der Breite eignen. Diese Schlüsselemente werden anschließend im 3D-Raum (durch die Tiefeninformationen) vermessen, wodurch sich die Breite ergibt. Da die Erkennung der Breite davon abhängig ist, dass eine eingesetzte Kamera Blick auf die Breitenmaße des Förderelements hat, muss die Möglichkeit gegeben sein, dass zu jeder Zeit Bilder in (bzw. gegen) Fahrtrichtung aufgenommen werden können. Somit muss sowohl für eine Längs- als auch eine Querförderung eine Kamera angebracht sein. Zudem muss die aktuelle Förderrichtung (längs / quer und vorwärts / rückwärts) bekannt sein, um die richtigen Kamerabilder (längs / quer) zu analysieren und korrekt (bzgl. der Förderrichtung vorwärts / rückwärts) zu interpretieren. Um zu wissen, welche Schlüsselemente in den Bildern zu suchen sind, kann es zudem erforderlich sein, Informationen über den aktuellen Bewegungstyp (z. B. linear oder Kurve) sowie die aktuelle Oberfläche als Eingangsparameter zu berücksichtigen. (Gesamtbild s. Abbildung 5-12)

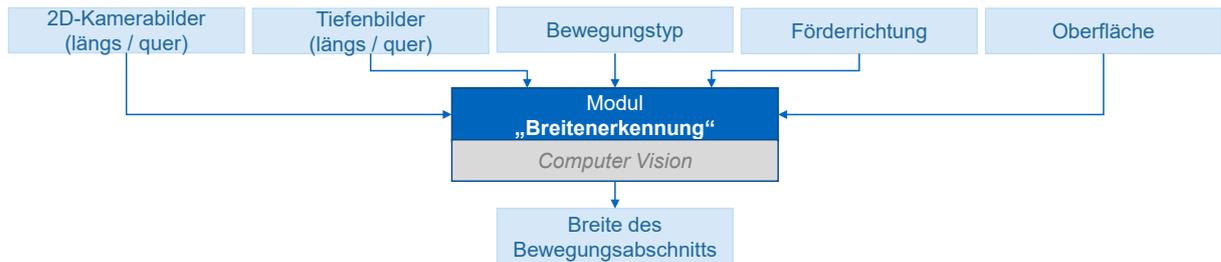


Abbildung 5-12: Ein- und Ausgangsdaten sowie angestrebte Umsetzungsart des Moduls „Breitenerkennung“

Modul „Oberflächenerkennung“

In diesem Modul wird davon ausgegangen, dass jedes Fördererelement eine (Haupt-) Oberfläche aufweist. Pro Fördererelement soll die vorwiegend vorkommende Oberfläche erkannt und dem Element zugeordnet werden. Hierzu soll das Verfahren der Computer Vision eingesetzt werden, welche in der Lage ist, verschiedene Oberflächen voneinander zu unterscheiden. Analog zur Breitenerkennung sind dabei sowohl 2D- als auch Tiefenbilder in Längs- und Querrichtung erforderlich. Für die Auswahl der zu analysierenden Bilder ist daher wiederum Kenntnis über die Förderrichtung erforderlich (Gesamtbild s. Abbildung 5-13).

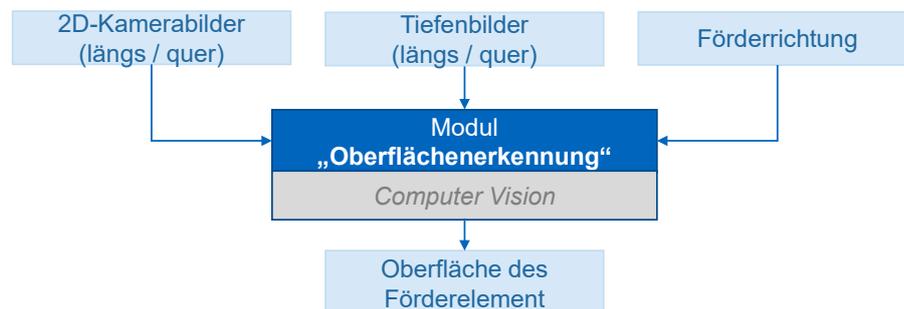


Abbildung 5-13: Ein- und Ausgangsdaten sowie angestrebte Umsetzungsart des Moduls „Oberflächenerkennung“

Modul „Kinematik“

In diesem Modul soll der Verlauf der Geschwindigkeit und Beschleunigung für einen bestimmten Bewegungsabschnitt ermittelt werden. Dafür ist es notwendig, die Zeitstempel der Wechsel von einem in den anderen Bewegungsabschnitt zu kennen. Auf Basis des zeitlichen Verlaufs von Position und Orientierung kann dann die Geschwindigkeit und Beschleunigung abgeleitet werden. (Gesamtbild s. Abbildung 5-14)

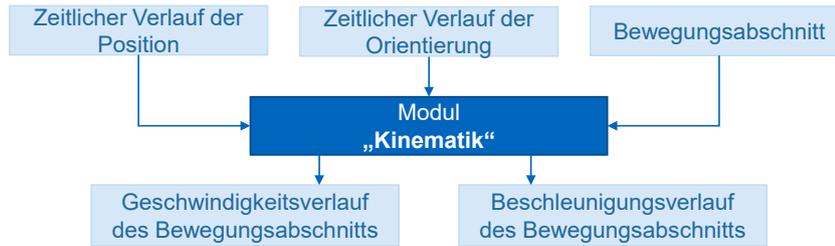


Abbildung 5-14: Ein- und Ausgangsdaten des Moduls "Kinematik"

Modul „Umsetzertyp“

Ziel dieses Moduls ist die Spezifikation des Umsetzertyps, welcher eine Eckbewegung auslöst. Für die Positionen der Eckbewegungen werden daher die Beschleunigungen analysiert. Im Referenzszenario werden Gurtumsetzer, Kettenabschieber und Pusher betrachtet, welche sich im Beschleunigungsprofil deutlich unterscheiden. (Gesamtbild s. Abbildung 5-15)



Abbildung 5-15: Ein- und Ausgangsdaten des Moduls "Umsetzertyp"

Modul „Sensorerkennung“

Dieses Modul hat zur Aufgabe, die Zeitstempel zu speichern, an denen ein Messsignal aus dem intelligenten Fördergut eine Sensorik erkennt. Wird die Sensorik beispielsweise nur an einer bestimmten Seite des Förderguts erkannt, so kann auch diese Information zusätzlich zum Zeitstempel gespeichert werden, um in der Rekonstruktion ein noch genaueres Bild bzgl. der Sensorik zu erhalten. (Gesamtbild s. Abbildung 5-16)



Abbildung 5-16: Ein- und Ausgangsdaten des Moduls "Sensorerkennung"

5.2.3 Aufzunehmende Messdaten

Aus der Beschreibung der Module zur Dateninterpretation ergeben sich verschiedene Messdaten, welche in der Datenaufnahme extrahiert werden müssen. Wie in 4.3.1 beschrieben, handelt es sich bei der Ableitung der benötigten Messdaten sowie Umgebungs- und Bewegungsdaten um ein iteratives Verfahren. In den vorhergehenden sowie folgenden Abschnitten wird lediglich das Ergebnis beschrieben, welches im Projektkontext eine sinnvolle und umsetzbare Lösung in Bezug auf den aktuellen Stand der Technik sowie die Anforderungserfüllung ergibt.

Es ergeben sich somit die folgenden Daten, welche aus der Datenaufnahme während der Bewegung eines intelligenten Förderguts hervorgehen müssen:

- Zeitlicher Verlauf der 2D-Kamerabilder in Längs- und Querförderrichtung
- Zeitlicher Verlauf der Tiefenbilder in Längs- und Querförderrichtung
- Zeitlicher Verlauf der Beschleunigungen, welche im Zentrum des Förderguts auftreten
- Zeitlicher Verlauf der Drehraten, welche im Zentrum des Förderguts auftreten
- Zeitlicher Verlauf der erkannten Sensorik: Exemplarisch für die Gruppe der Sensoren wird im Folgenden die Erkennung von Lichtschranken weiterverfolgt.

5.3 Datenaufnahme

Die Datenaufnahme bildet die Grundlage für die Zielerreichung des Forschungsvorhabens. Zum einen bildet die Erfassungseinheit zur Datenaufnahme die Schnittstelle zur Förderanlage. Somit ist deren Ausführung entscheidend für die Verhinderung von Störungen. Zum anderen ist eine hohe Qualität der aufgenommenen Messdaten die Basis für die anschließende Interpretation und Rekonstruktion der Daten.

In den folgenden Unterabschnitten wird beschrieben, welches Detailkonzept zur Datenaufnahme im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelt wurde.

5.3.1 Messsensorik zur Aufnahme der Messdaten

Entscheidend für die Qualität der aufgenommenen Messdaten ist die verwendete Messsensorik. Hierzu wird in diesem Unterabschnitt zunächst eine Technologieauswahl vorgenommen. Dabei sind insbesondere die Anforderungen A 1.1 (Einsatz passiver Messsensorik), A 3.1 (Keine Anpassungen an der Anlage und externen Infrastruktur notwendig) sowie A 3.3 (Autarker Betrieb möglich) zu beachten.

Basierend auf den in 5.2.3 ermittelten aufzunehmenden Messdaten sowie den definierten Anforderungen werden für die weitere konzeptionelle Entwicklung des Erfassungssystems die folgenden Technologien ausgewählt.

Kamera

Diese Sensorik soll zur Erkennung der Oberfläche, Ermittlung der Breite eines Förderelements, zur Detektion von Übergängen sowie zum Tracking der Bewegung des intelligenten Förderguts zum Einsatz kommen. Hierbei muss bei der Detailplanung bedacht werden, dass die Kamera zu jedem Zeitpunkt Blick auf das Förderelement hat, da beispielsweise die Oberfläche nur so ableitbar ist.

Es wird im Folgenden von einem quaderförmigen Fördergut ausgegangen, das zu jeder Zeit flächig mit seiner Bodenfläche, welche durch ein internes Koordinatensystem (x ; y) repräsentiert wird, auf einem Förderelement aufliegt. Daraus resultieren aus der internen Perspektive des Förderguts vier mögliche Hauptbewegungsrichtungen: Entlang seiner internen x -Achse sowie entlang seiner internen y -Achse jeweils in positiver und negativer Richtung. Dieser Sachverhalt ist beispielhaft für einen Kreuzungspunkt von Förderelemente in Abbildung 5-17 dargestellt.

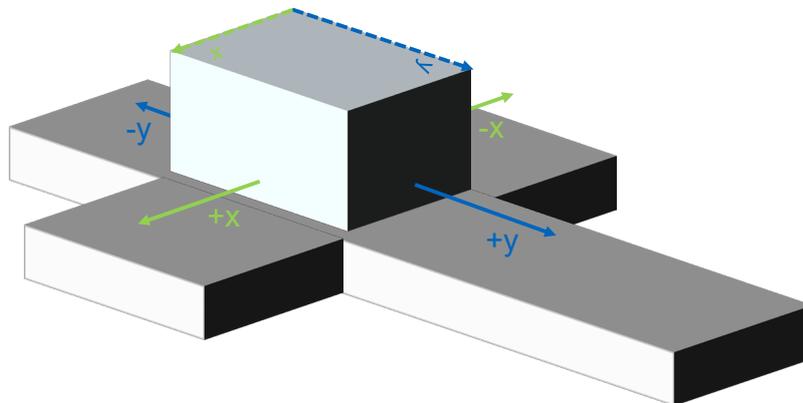


Abbildung 5-17: Internes Koordinatensystem (flächig) eines Förderguts sowie mögliche Bewegungsrichtungen auf einem Kreuzungselement

Da es für die Ermittlung der Eigenschaften eines Förderelements irrelevant ist, ob sie während einer Fahrt in positiver oder negativer Bewegungsrichtung erfasst wurden, wird für die weitere Detaillierung des Sensorikkonzepts von zwei Kameras, von denen eine in x - und die andere in y -Richtung (jeweils positiv oder negativ) bezogen auf das interne Koordinatensystem des Behälters ausgerichtet ist, ausgegangen. Um sowohl Farb- als auch Tiefenbilder zu erhalten und somit eine größere Informationsdichte zu erfassen, wird hierbei auf Stereokameras zurückgegriffen.

Intertiale Messeinheit (IMU)

Eine IMU erfasst Beschleunigungen und Drehraten während der Überfahrt des Förderguts über die Fördererlemente. Sie wird innerhalb der Erfassungseinheit für die Erkennung von Bewegungsrichtungen sowie Erschütterungen (z. B. bei Übergängen von einem auf ein anderes Fördererlement) vorgesehen.

Photodioden

Um exemplarisch für die Gruppe der Sensorik Lichtschranken und Lichttaster zu erfassen, sollen Photodioden zum Einsatz kommen. Diese reagieren auf die Lichtintensität. Somit ist zu erwarten, dass der emittierte Lichtstrahl der optischen Sensorik durch Photodioden erfasst wird. Für die Integration in den intelligenten Behälter ist darauf zu achten, dass diese überall dort angebracht werden können, wo das Auftreffen des von Lichtschranken und -tastern emittierten Lichtstrahls wahrscheinlich ist.

Aus Basis dieser ausgewählten Technologien müssen in einer konkreten Umsetzung für die Auswahl der resultierenden Hardware alle Anforderungen aus 4.2.1 detailliert betrachtet werden. Dies erfolgt in diesem Forschungsbericht im Rahmen der Implementierung in Kapitel 6.

5.3.2 Elektronik zur Datenaufnahme

Um die ausgewählte Technologie zu betreiben, bedarf es der Ausarbeitung eines Elektronikkonzepts. Wie in 4.3.1 beschrieben, soll anhand der Zeitstempel der aufgenommenen Messdaten eine Rekonstruktion der Förderanlage ermöglicht werden. Die resultierenden Messdaten aus Kameras, IMU und Photodioden müssen folglich im Rahmen des Elektronikkonzepts mit den Zeitstempeln der Erfassung gespeichert werden. Es bedarf daher einer *Recheneinheit*, welche die Datenaufnahmen und deren Speicherung auf einem *Speichermedium* steuert. Da es sich bei den Photodioden um passive Bauelemente handelt, wird dafür eine zusätzliche *Steuereinheit* benötigt. Zudem muss für den autarken Betrieb (Anforderung A 3.3) sämtliche notwendige Energieversorgung über interne Energiespeicher bereitgestellt werden. Um Messungen zu starten und deren Status zu überwachen, soll zudem eine *zentrale Bedieneinheit* in das Elektronikkonzept integriert werden.

Elektronikkomponenten und deren Energie-, Daten- und Kommunikationsverbindung

Da zu erwarten ist, dass die Datenübertragung und -speicherung der Kameraaufnahmen rechenintensiv ist, wird pro Kamera eine separate Recheneinheit in Form von **Einplatinencomputern** vorgesehen. IMU und Photodioden sollen über einen gemeinsamen weiteren Einplatinencomputer gesteuert werden. Jeder

Einplatinencomputer benötigt eine Spannungsversorgung. Da genug Energie für mehrere Überfahren vorhanden sein soll, wird für jeden Einplatinencomputer ein separater **Energiespeicher** vorgesehen. Die Versorgung der Sensorik (Kamera 1 und Kamera 2, IMU, Photodioden) erfolgt idealerweise direkt über den Einplatinencomputer. Ebenso soll jeweils ein **Speichermedium** pro Einplatinencomputer eingeplant werden, welcher seine Energie direkt über jenen bezieht. Die Kommunikation (Messung starten/stoppen inkl. Rückmeldung) mit der Sensorik soll dabei ausschließlich mit den jeweiligen Einplatinencomputern erfolgen. Der Datenfluss führt die Messdaten der Sensorik über den Einplatinencomputer, welcher u. a. die Zeitstempel hinzufügt, zum Speichermedium. Um Messungen durch den Bediener zentral zu starten und stoppen sowie den Status der Messung inkl. Fehlerfälle zu beobachten, soll die **zentrale Bediensteuerung** direkt mit allen drei Einplatinencomputern kommunizieren und ihre Energie bestenfalls über einen der drei Einplatinencomputer beziehen. Das Konzept der somit resultierenden Module inkl. der Energie-, Kommunikations- und Datenverbindungen ist in Abbildung 5-18 dargestellt.

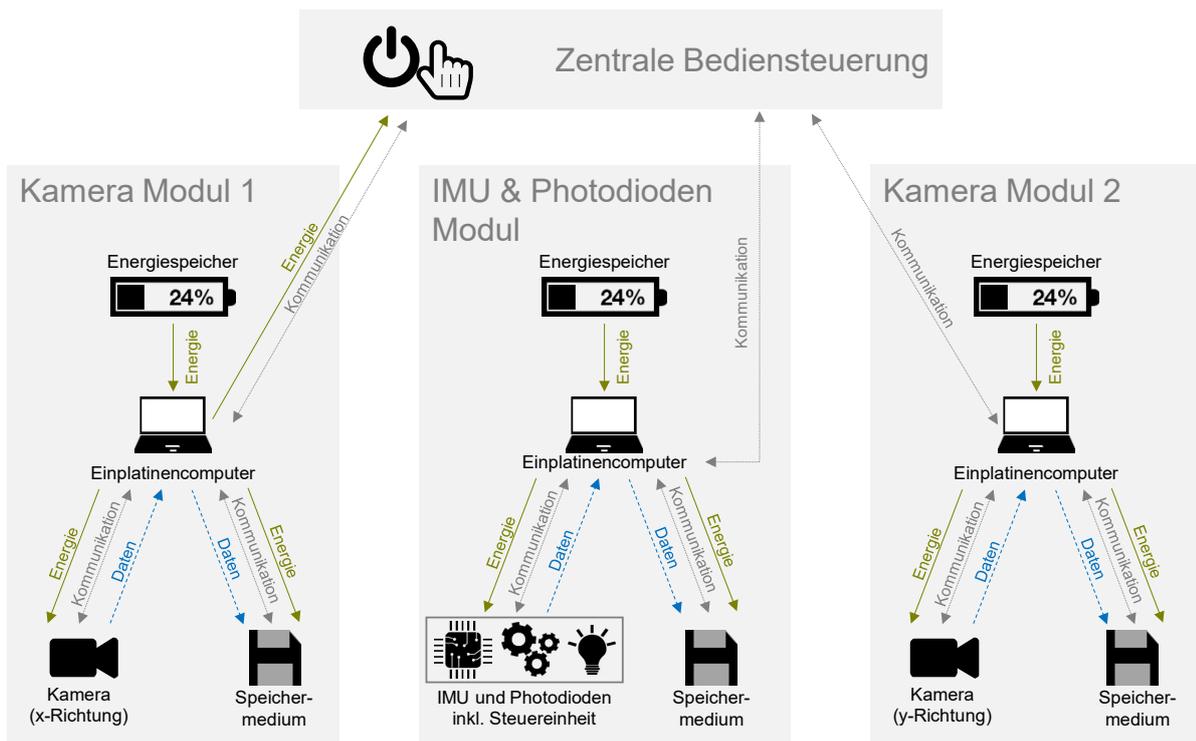


Abbildung 5-18: Elektronikkonzept zur Erfassung der Messdaten im Erfassungssystem

Detaillierung – Photodioden Ansteuerung

Geht man davon aus, dass der Lichtstrahl der optischen Sensoren auf jeder Seite des Förderguts auftreffen kann, so benötigt man auf jeder dieser Seiten Photodioden, welche den dort auftreffenden Lichtstrahl erfassen können. Da unbekannt ist, an welcher Position innerhalb der Seite der Lichtstrahl zu erwarten ist, sollten mehrere

Photodioden an jeder Seite in einer Zeile angeordnet sein, welche auf der Seitenfläche senkrecht zur Förderrichtung ausgerichtet ist (s. Abbildung 5-19).

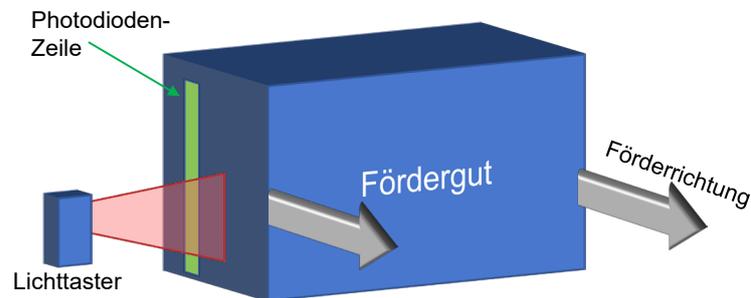


Abbildung 5-19: Beispiel zur Anordnung der Photodioden-Zeile auf einer Seite

Um den in Photodioden entstehenden Photostrom im Einplatinencomputer erfassen zu können, muss dieser zunächst verstärkt und danach in ein digitales Signal umgewandelt werden. Für die Verstärkung eignet sich eine Transimpedanzverstärker-Schaltung, welche als zentrales Bauteil mit einem Operationsverstärker (engl.: Operational Amplifier - OpAmp) arbeitet. Die Umwandlung in ein digitales Signal erfolgt durch einen Analog-Digital-Wandler (engl.: Analog-Digital-Converter - ADC). Die resultierende Gesamtschaltung, welche nach Auswahl der Bauteile detailliert werden kann, ist in Abbildung 5-20 dargestellt.

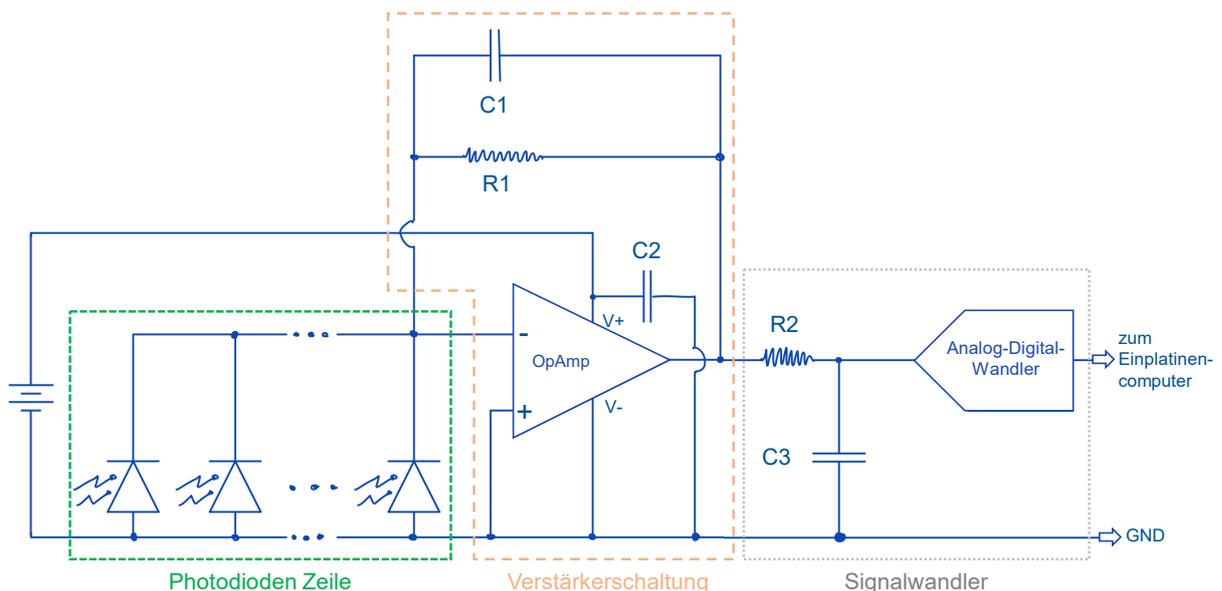


Abbildung 5-20: Schaltung zur Verstärkung und Digitalisierung des von den Photodioden verursachten Photostroms

Detaillierung – Zentrale Bediensteuerung

Die zentrale Bediensteuerung hat drei wesentliche Aufgaben. Zum einen sollen Messungen für alle Sensorelemente gestartet und gestoppt werden können (im

Schaltplan: „Start/Stop“). Zudem sollen Bediener:innen in der Lage sein, den Zustand der Messung anhand Zustandsanzeigen zu erfassen. Des Weiteren soll es möglich sein, die Einplatinencomputer über die Steuereinheit zentral starten bzw. zurücksetzen (im Schaltplan: „Reset“) zu können.

Um jede Messung für jedes Sensorikelement (Kamera 1, Kamera 2, IMU, Photodioden) separat zu- oder abschalten und beobachten zu können, werden neben einzelnen Schaltern (im Schaltplan: „S-xx“) pro Sensorikelement auch einzelne Zustandsanzeigen in Form von Leuchtdioden (im Schaltplan: „LED-xx“) vorgesehen. Im nachfolgenden Schaltplan ist der Anschluss an die Einplatinencomputer über die Klemmsymbole J1-J4 angedeutet (s. Abbildung 5-21).

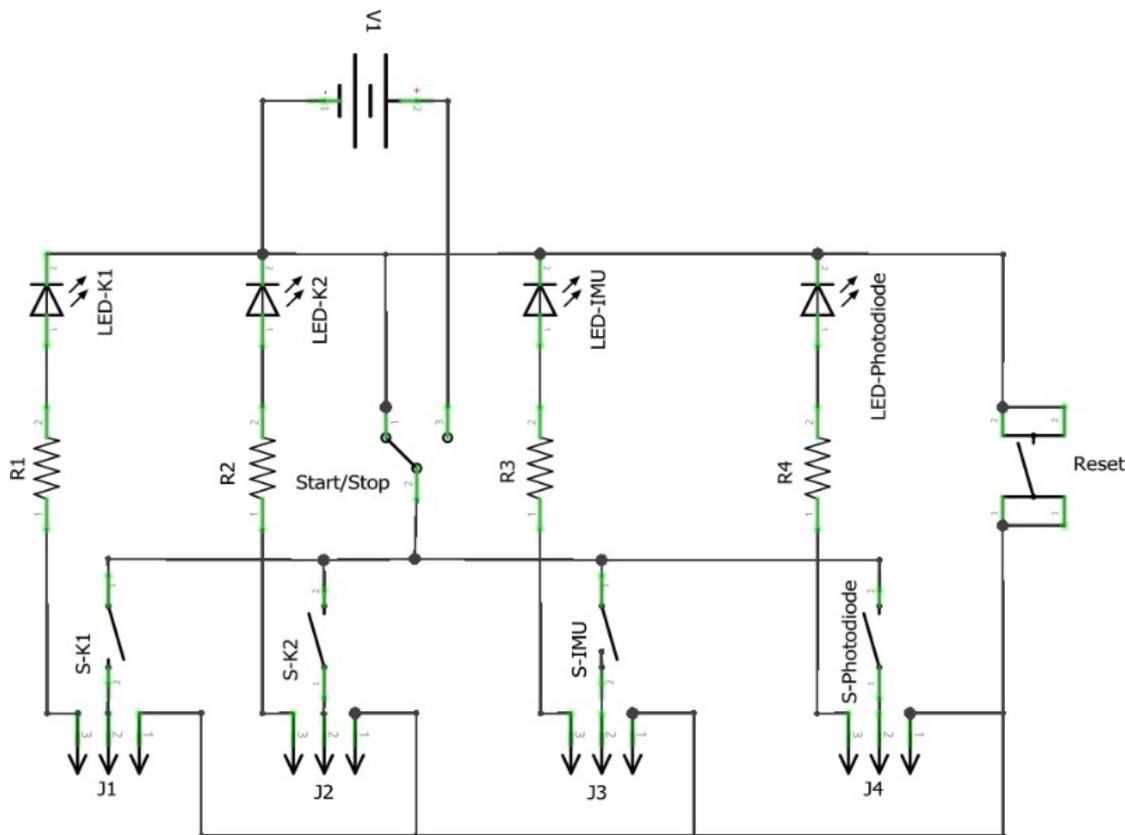


Abbildung 5-21: Schaltung für die zentrale Bediensteuerung

5.3.3 Erfassungseinheit

Die in den vorherigen Unterabschnitten beschriebenen Messtechnologien sowie die Komponenten des Elektronikkonzepts sollen im nächsten Schritt in eine Erfassungseinheit integriert werden, sodass sich daraus ein intelligentes Fördergut ergibt.

In der Anforderung A 1.3 wird die Einhaltung der Eigenschaften, wie beispielsweise Außenmaße, des regulär auf der Anlage zum Einsatz kommenden Förderguts gefordert. Da der Fokus in dem dargestellten Forschungsprojekt auf Fördergüter mit tragenden oder umschließenden Ladehilfsmitteln gelegt wurde, soll ein Ansatz gewählt werden, der die Messsensorik inkl. Elektronikkomponenten direkt in das Ladehilfsmittel integriert wird. So wird sichergestellt, dass der Transport der Erfassungseinheit keine Störungen verursacht. Auch die Erfüllung der Anforderung A 1.2 (Integrierbarkeit anlagenspezifischer Merkmale) wird somit vereinfacht, da die Merkmale (z. B. Barcodes) in der Regel analog zu den regulär eingesetzten Ladungsträgern integriert werden können.

Um die einfache Anpassbarkeit an verschiedene Ladungsträger zu berücksichtigen (A 2.1), werden im Folgenden die unterschiedlichen Ausprägungen der KLT (vgl. Tabelle 2-1) betrachtet. Es soll also eine Erfassungseinheit entwickelt werden, welche in die beschriebenen KLT-Varianten integriert werden kann.

Spezifische Anforderungen

Dazu werden zunächst spezifische Anforderungen an die Konstruktion der Erfassungseinheit aufgestellt, welche sich aus den Anforderungen aus 4.2.1 ergeben:

- Die Außenmaße und die grundsätzliche Gestaltung des KLT Behälters dürfen nicht verändert werden (A 1.2, A 1.3).
- Da die Innenmaße im Gegensatz zu den Außenmaßen für KLT nicht genormt sind, muss sich die Erfassungseinheit an verschiedene Innenmaße anpassen lassen (A 2.1).
- Die Sensorik- und Elektronikkomponenten müssen fest in der Erfassungseinheit fixiert sein, um den Anforderungen der Robustheit zu entsprechen (A 2.2).
- Die Erfassungseinheit muss aus demselben Grund fest im KLT Behälter fixiert werden können (A 2.2).

Zusätzlich werden weitere, funktionale Anforderungen gestellt:

- Zugänglichkeit zu Schnittstellen der Einplatinencomputer, Speichereinheiten und Energiespeicher (Wartung, Datenentnahme)
- Zugänglichkeit zur zentralen Bedieneinheit durch den Benutzer
- Einstellung der Neigung der Kameras muss möglich sein (z. B. für Oberflächenerkennung)
- Erfassungseinheit sollte zentriert im KLT Behälter eingebracht werden, um die exakte Position der Sensorik Elemente genau ermitteln zu können

Konzeptentwurf

Das zu entwerfende Gesamtkonzept wird zunächst in zwei Teilkonzepte aufgeteilt. Im ersten Teilkonzept werden alternative Möglichkeiten zur Anpassung eines Grundgestells (welche die Sensorik- und Elektronikkomponenten trägt) an verschiedene Größen der KLT Behälter ausgearbeitet. Verschiedene Alternativen zur Befestigung der Grundgestelle im KLT Behälter werden dagegen im zweiten Teilkonzept separat betrachtet.

Teilkonzepte für größenadaptive Grundgestelle

- **G1 – Platten:** Hierbei ist für jedes Behältergrundmaß (hier: (200 mm x 300 mm; 300 mm x 400 mm; 400 mm x 600 mm) eine eigene Grundplatte vorgesehen, auf der die Elemente der Sensorik und der Elektronik an definierten Positionen angebracht werden. Dabei ist auf die Möglichkeit zum einfachen Austausch der Sensorik- und Elektronikkomponenten zwischen den verschiedenen Grundplatten zu achten.

In den folgenden Konzepten sind im Gegensatz zum Konzept G1 alle Sensorik- und Elektronikkomponenten auf einer Grundplatte für alle Behältergrößen angebracht, welche maximal so groß ist, wie das kleinstmögliche Innenmaß der betrachteten KLT Behälter. Die Anpassung auf größere Behälter erfolgt über die angebrachten Gestelle, welche in den folgenden Konzepten vorgestellt werden.

- **G2 – Schnellverstellung A:** Für jede Behälterseite wird hier im Grundgestell eine Laufschiene vorgesehen, in welcher ein Läufer eingepasst ist, der an definierten Positionen mit einem Arretierungsknopf fixiert werden kann. Aufgrund der nicht genormten Innenmaße der KLT Behälter ist zusätzlich für die Feinjustierung an den Enden ein Spannmechanismus vorzusehen.
- **G3 – Schnellverstellung B:** Analog zum Konzept G2 werden die Grobpositionen hierbei über Arretierungsknöpfe zur Fixierung des Läufers in den Laufschiene eingestellt. Die Richtung der Laufschiene verläuft allerdings hierbei nicht parallel zu den Seitenflächen des Behälters, sondern diagonal von Ecke zu Ecke. Die Feineinstellung erfolgt ebenso wie in G2 über einen Spannmechanismus.
- **G4 – Getriebe A:** Auch in diesem Konzept werden für die Anpassung an längere Seitenmaße Stangen zur Zentrierung und Fixierung vorgesehen. Die Anpassung erfolgt jedoch hier durch den Einsatz von Gewindestangen, welche durch außenliegende Zahnräder angetrieben werden. Diese Zahnräder sind wiederum über einen Riemen mit einem zentralen Zahnrad verbunden, um die Einstellung zentral vornehmen zu können.

- **G5 – Getriebe B:** Im Zentrum sind hierbei eine Antriebs- und eine Übersetzerwelle angebracht, welche über ihre am Ende angebrachten Zahnräder Spindelmuttern antreiben. Diese sorgen für die translatorische Bewegung der Gewindestangen.
- **G6 – Kinematik:** Durch ein Zusammenziehen oder Expandieren von zwei gekoppelten Stangen findet eine translatorische Bewegung der Endstücke in der dazu orthogonalen Richtung statt. Die Bewegung der gekoppelten Stangen wird dabei durch eine zentrale Gewindestange und bewegte Spindelmuttern realisiert.



Abbildung 5-22: Grobkonzepte für die Grundgestelle der Erfassungseinheit nach den Vorgaben der Anpassbarkeit und Zentrierung

Teilkonzepte für Befestigungsmöglichkeiten der Grundgestelle im KLT Behälter

- **B1 – Gewindeverstellung:** Die Fixierung erfolgt hier durch die Erzeugung von Druck gegen die Außenwand des Behälters. Durch das Drehen einer Gewindestange wird eine dafür vorgesehene Platte gegen die Außenwand gedrückt. Eine Selbsthemmung ist durch das Gewinde gegeben.
- **B2 – Handverstellung:** Ähnlich zu B1 wird eine vorgesehene Platte an die Behälterwand gedrückt. Dies erfolgt durch die manuelle Fixierung eines Feststellelements (z. B. Schraube oder Exzenterhebel).
- **B3 – Verschrauben:** Hierbei wird das Grundgestell direkt über Fixpunkte an der Behälterwand fixiert, indem von außen Schrauben eingebracht und angezogen werden.
- **B4 – Selbstzentrierung:** Die Zentrierung erfolgt hierbei über fest mit einer Box verbundene Zentrierungselemente an den Seitenrändern. Gegengleiche Zentrierungselemente am Grundgestell ermöglichen eine optimale Ausrichtung

des Grundgestells in der Box. Zusätzlich kann das Grundgestell an den Zentrierungselementen des Behälters angeschraubt werden.

- **B5 – Federverspannung:** In diesem Befestigungskonzept verspannen Druckfedern das Grundgestell zwischen zwei gegenüberliegenden Seiten, indem diese eine Kraft nach außen aufbringen.

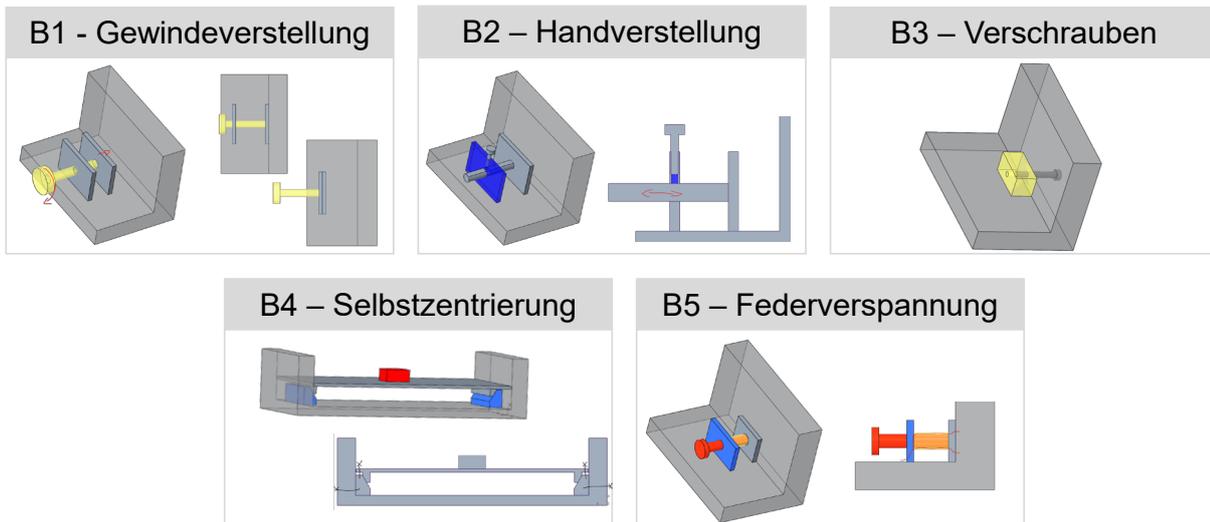


Abbildung 5-23: Grobkonzepte zur Befestigung des Gestells in einem vorhandenen KLT Behälter

Ableitung von Gesamtkonzepten

Die sich somit ergebenden sechs Konzepte für ein an verschiedene Größen anpassbares und selbstzentrierendes Grundgestell werden in einem nächsten Schritt auf die Kompatibilität mit den fünf Grobkonzepten für eine Befestigung geprüft (Tabelle A-3). Dies bildet die Grundlage für die Erstellung von zehn verschiedenen Gesamtkonzepten. Hierbei werden auch Mischkonzepte in Betracht gezogen, welche in Längs- und Querrichtung voneinander abweichende Konzepte für die Anpassung/Zentrierung oder die Befestigung aufweisen.

Konzeptauswahl

Zur Auswahl des weiter zu verfolgenden Ansatzes aus den zehn Gesamtkonzepten (Übersicht dargestellt in Abbildung B-1), werden für die Durchführung einer Nutzwertanalyse zwölf Bewertungskriterien erarbeitet sowie ein einheitliches Bewertungsschema definiert. Durch eine Gewichtung der Kriterien und die Bewertung der einzelnen Konzepte (durch Stakeholder aus der Anwendung und der Fertigung – Resultat ersichtlich in Tabelle A-5) ergibt sich als Favorit das Gesamtkonzept 1 (Abbildung 5-24).

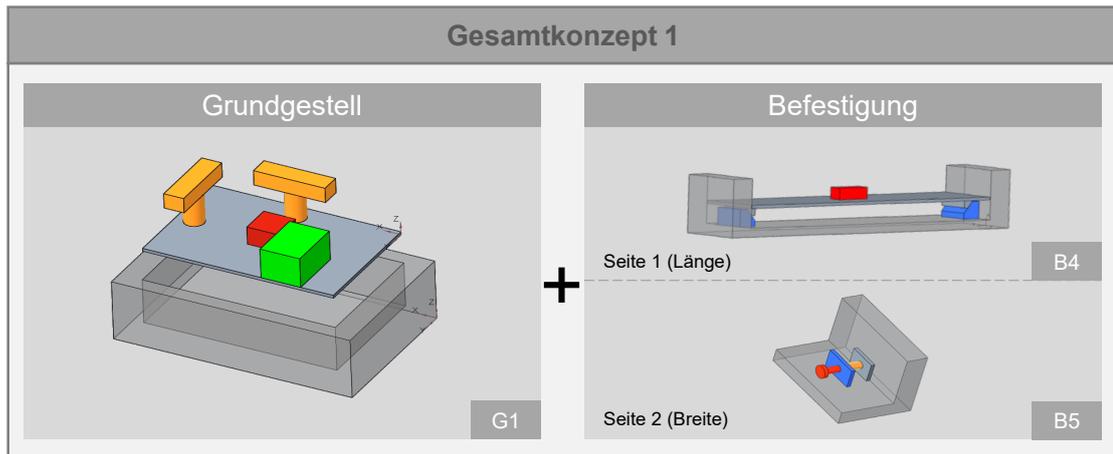


Abbildung 5-24: Zu detaillierendes Gesamtkonzept

Als Grundgestell dient hierbei eine Grundplatte (Konzept G1), welche für jede Behältergröße (200 mm x 300 mm; 300 mm x 400 mm; 400 mm x 600 mm) eine eigene Ausführung vorsieht, zwischen denen die Sensorik- und Elektronikkomponenten flexibel ausgetauscht werden können. Die Befestigung der Grundplatte soll in Längsrichtung nach dem Prinzip der Selbstzentrierung (Konzept B4) erfolgen. Um eine Zentrierung hinsichtlich der Breitseite zu erhalten, soll auf das Federkonzept (B5) zurückgegriffen werden. Zusätzlich soll die Möglichkeit der Verschraubung der Grundplatte an den Zentrierungselementen der Längsseite in Betracht gezogen werden.

Konzeptdetaillierung

Zur Detaillierung des gewählten Gesamtkonzepts werden zunächst Bauraummodelle erstellt, welches abstrakte Module in die verschiedenen Behältergrößen einpasst. Um eine möglichst große Bandbreite an möglichen Innenmaßen abzudecken, werden jeweils drei verschiedene KLT Modelle von insgesamt vier verschiedenen Herstellern hinsichtlich ihrer Innenmaße analysiert (Tabelle A-6). Als Ergebnis sollte das Bauraummodell in eine minimale Behältergrundfläche (innen) von 2430 mm x 1360 mm passen. Die maximal abbildbare Innenfläche beträgt 5440 mm x 3640 mm. Um den Bauraum optimal auszunutzen, werden die abstrakten Module in Schichten angeordnet, welche die minimale Gesamthöhe der analysierten Behälter (980 mm) nicht übersteigen.

Zu diesen Modulen zählt ein *Energieversorgungsmodul*, welches Akkus zur Versorgung der Einplatinencomputer beinhaltet. Die Einplatinencomputer selbst sind im dafür vorgesehenen *Rechnermodul* integriert. Das dritte Modul, das *Speicher- und Bedienmodul* enthält die Speichermedien sowie die zentrale Bedieneinheit. Zudem werden die beiden Kameras über die *Kameramodule* abgebildet (s. Abbildung 5-25).

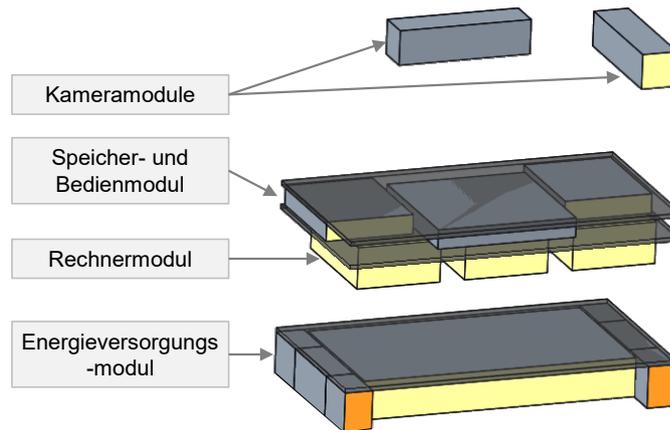


Abbildung 5-25: Darstellung der abstrakten Module für die Bauraummodelle

Um die Sensorik- und Elektronikkomponenten beim Wechsel zwischen den jeweiligen Behältergrößen möglichst wenig an das resultierende Grundgestell (Platte) anpassen zu müssen, wird das Konzept eines Trägerelements für die verschiedenen Behältergrößen erarbeitet. Dieses Trägerelement ist über die Konzepte B4 und B5 wie beschrieben im jeweiligen KLT Behälter fixiert. Die Trägerelemente der beiden größeren Varianten (300 mm x 400 mm sowie 400 mm x 600 mm) verfügen dabei über eine Aufnahmeöffnung, welche genau auf das resultierende Modulpaket für die Größe 200 mm x 300 mm angepasst ist. Alle Module bis auf die Kameramodule sind somit in einer Einheit zusammengefasst und lassen sich gesammelt in die anderen Behältergrößen einsetzen. Da die Kameramodule jeweils am Behälterranda platziert werden müssen, muss für diese im jeweiligen Trägerelement eine Anbringungsmöglichkeit außerhalb des Modulpakets vorgesehen werden. Die resultierenden Bauraummodelle für die drei verschiedenen Behältergrößen sind in Abbildung 5-26 jeweils als Explosionszeichnung sowie im eingebauten Zustand dargestellt.

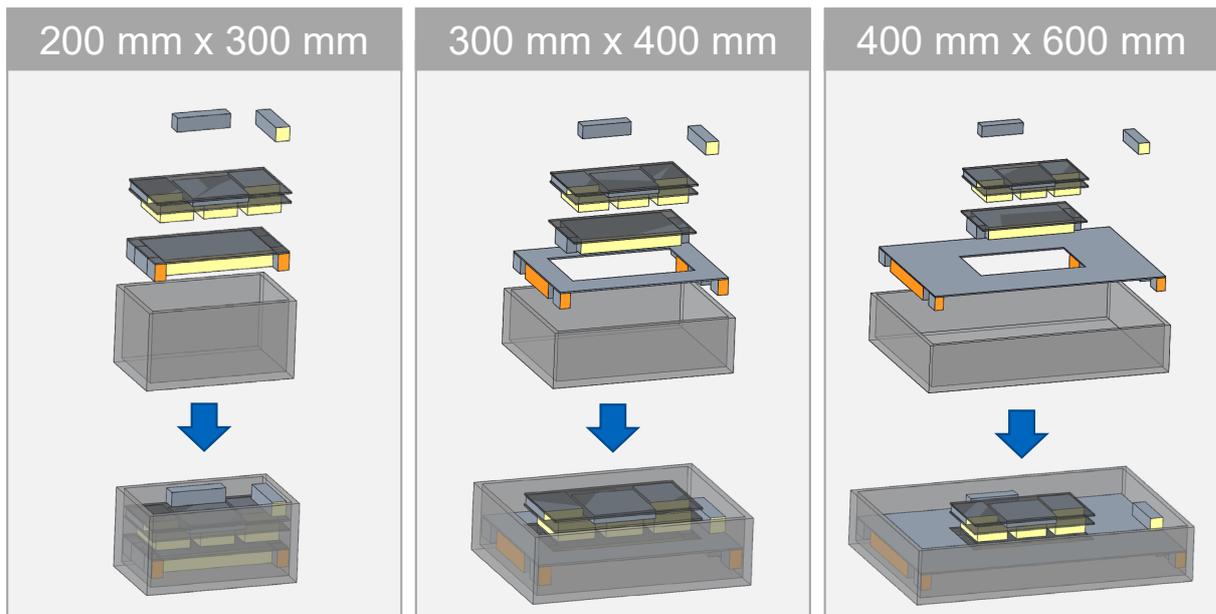


Abbildung 5-26: Bauraummodelle für die drei betrachteten KLT Behälter Grundmaße

Diese Bauraummodelle müssen nun auf Basis der realen Größen der Sensorik- und Elektronikkomponenten weiter detailliert werden und mittels Computer Aided Design (CAD) Zeichnungen für eine Fertigung vorbereitet werden. Fokus dieses Kapitels ist die Vorstellung der konzeptionellen Ausarbeitung. Daher sei für diesen Schritt auf die Ausführungen zur realen Umsetzung in Abschnitt 6.1 verwiesen.

6 Implementierung der Teilkonzepte

Zur Prüfung der Umsetzbarkeit und zur Bewertung des Gesamtkonzepts werden im Rahmen des Projekts Teilkonzepte demonstratorisch umgesetzt. Während sich die Reihenfolge der beschriebenen Schritte an der Reihenfolge der Konzipierung (top down – von der Rekonstruktion zur Datenaufnahme) orientiert, wird in diesem Kapitel die Abfolge analog zum Einsatz in der Praxis (bottom up – von der Datenaufnahme zur Rekonstruktion) beschrieben. In Abschnitt 6.1 wird daher das umgesetzte Gesamtkonzept der Datenaufnahme sowie der entstandene Hardware-Demonstrator beschrieben. Abschnitt 6.2 beinhaltet die technische Beschreibung der umgesetzten Module der Dateninterpretation. Abschließend wird in Abschnitt 6.3 die Umsetzung des Rekonstruktionsverfahrens anhand eines Referenzlayouts beschrieben.

6.1 Umsetzung der Datenaufnahme

Auf Basis der Anforderungen, welche an das Erfassungssystem gestellt wurden und der Anforderungen, welche sich durch das in 5.3 vorgestellte Teilkonzept ergeben, wird das Erfassungssystem demonstratorisch umgesetzt. Die Resultate der Umsetzung werden in den folgenden Unterabschnitten dargelegt.

6.1.1 Messsensorik und Elektronik

Ziel bei der Auswahl der Messsensorik und Elektronikkomponenten für die Umsetzung in einem Demonstrator ist, unter anderem die Verwendung von am Markt einfach verfügbaren Standardkomponenten. Zudem sind die Anforderungen hinsichtlich der Funktionalität, des Bauraums und der autarken Verwendung innerhalb des intelligenten Behälters zu erfüllen.

Auswahl der Komponenten

- **Einplatinencomputer:** Die Einplatinencomputer stellen, wie in Abbildung 5-18 dargestellt, das zentrale Element der Elektronikmodule dar, weshalb diese im ersten Schritt ausgewählt werden. Dazu werden im Rahmen einer Marktrecherche die Einplatinencomputer der Marke Raspberry Pi aufgrund dessen weiter Verbreitung und der offen zugänglichen Beschreibungen verschiedener Anwendungsbeispiele (unter anderem die Verwendung mit Stereokameras) favorisiert. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Marken und Modellen vielversprechenden Eigenschaften³ (vgl. [Win-2019]) wird die Variante des *RaspberryPi 4 Model B* für alle drei Module

³ Bezogen auf den Zeitpunkt der Projektbearbeitung.

(Kamera 1, Kamera 2, IMU+Photodioden) gewählt.

Laut dessen Datenblatt beträgt die notwendige Spannungsversorgung, welche über einen USB-C Anschluss erfolgt, bei angeschlossenen Peripheriegeräten, wie in diesem Fall beispielsweise Kamera und Speichermedium, 5 V bei einer Stromaufnahme von 3 A. Zum Anschluss von Peripheriegeräten verfügt das Gerät über vier USB-Schnittstellen (davon 2x USB2.0 und 2x USB3.0). Über die 40 integrierten (teils programmierbaren) Pins (Bezeichnung: GPIO Pins) ist die Möglichkeit zur individuellen Verbindung, welche für die Kommunikation mit den IMU-, Photodioden- und Bedienschaltungen benötigt wird, gegeben. [Ras-2019]

- **Energieversorgung:** Die Anforderungen, die sich durch den Einsatz der genannten Raspberry Pis ergeben, werden in der Regel durch Akkus in Form von marktüblichen Powerbanks erfüllt. Bei deren Auswahl ist neben der entsprechenden Nennkapazität, welche für einen ausreichend langen Einsatz des intelligenten Behälters auf einer Anlage notwendig ist, die Größe ausschlaggebend. Im Zuge der Marktanalyse fiel die Wahl auf die *Powerbank Anker PowerCore II* (Nennkapazität 10.000 mAh), welche über vergleichsweise kleine Außenmaße (96 mm x 62 mm x 22 mm) verfügt [Ank-2018]. Diese kommt für alle drei Module zum Einsatz.
- **Kamera:** Bei den Stereokameras fällt die Entscheidung für die Umsetzung im Demonstrator auf die Kamera *RealSense™ D435i* des Herstellers Intel®. Sie ist aufgrund der integrierten Energie- und Datenversorgung über eine USB-C Schnittstelle ohne Einschränkungen für den Einsatz mit den Raspberry Pi Minicomputern geeignet. Die Kameras verfügen in der genannten Variante zudem über eine integrierte IMU Einheit, welche als Referenz für die zusätzlich verbaute IMU verwendet werden können. [Int-2020] Basierend auf den Überlegungen von *Haentges* muss für die Extraktion von Informationen bedacht werden, dass alle Abschnitte der überfahrenen Fördertechnik durch die Kameras erfasst werden. Daher ist bei der Kalibrierung der Kameras auf eine ausreichende Bildfrequenz f_B (englisch: fps – frames per second) zu achten. [Hae-2021, S. 79f.]
- **IMU:** Bei der Wahl einer IMU fällt die Entscheidung auf die Variante *Bosch Sensortec BMI085 shuttle board*, da diese aufgrund der Anbringung des IMU Bauteils auf einer leicht zugänglichen Trägerplatine für Testzwecke gut geeignet ist. Die IMU wird über eine Inter-Integrated Circuit (I2C) Schnittstelle mit dem Raspberry Pi verbunden.
- **Photodioden:** Für die Umsetzung im Demonstrator werden die Photodioden BPW34 (Marke: Vishay Semiconductors) ausgewählt. Sie können bei senkrechtem Auftreffen von Lichtstrahlen Wellenlängen zwischen 430 nm bis 1100 nm erfassen. Eine Marktrecherche über die Wellenlängen von Lichtschranken ergab, dass die untersuchten Sensoren ein Spektrum von ca. 660 nm bis 940 nm ausstrahlen. Lichtstrahlen mit 660 nm können also bis zu einer relativen

Strahlungsempfindlichkeit von $(430 \text{ nm}) / (660 \text{ nm}) = 0.65$ von den Photodioden aufgenommen werden. Aus dem Diagramm in Abbildung 6-1 (rechts) wird ersichtlich, dass dies bedeutet, dass Lichtstrahlen mit einer Wellenlänge von 660 nm bis zu einem Einfallswinkel φ_{\max} von ca. 55° erfasst werden können.

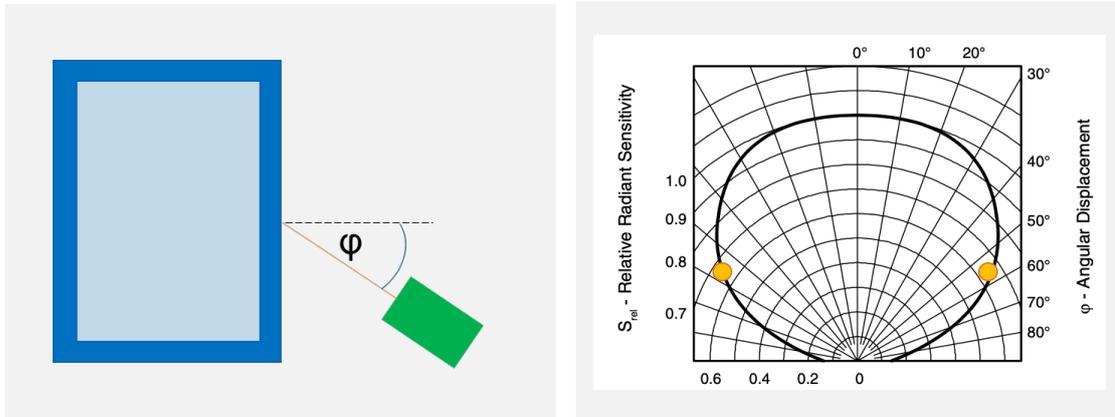


Abbildung 6-1: Links: Einfallswinkel eines Lichtstrahls auf die Seite eines Behälters; Rechts: Relative Strahlungsempfindlichkeit bezogen auf die Winkelverschiebung (Quelle: [Vis-2011])

Im Demonstrator sollen für alle vier Seiten des Erfassungssystems Photodiodenzeilen integriert werden. Daher wird ein Operationsverstärker mit vier Kanälen (hier: TLC274ACN) eingesetzt, welcher direkt über die 5 V Spannung des Raspberry Pi versorgt werden kann. Als Analog-Digital-Wandler dient die achtkanalige Ausführung im Bauteil MCP3008. Dessen Ausgänge kommunizieren über ein Serial Peripheral Interface (SPI – Schnittstelle) mit dem Raspberry Pi.

- **Speicher:** Für die Sicherung der von den beiden Kameras aufgenommenen Daten (Farb- und Tiefenbilder) spielt deren resultierende Anzahl N_{Bilder} eine entscheidende Rolle. Diese kann über die folgende Formel berechnet werden, welche die abzufahrende Strecke d sowie die durchschnittliche Geschwindigkeit des intelligenten Behälters v_B sowie die Aufnahmefrequenz der Kamera f_K als Grundlage nimmt [Hae-2021, S. 79f.]:

$$N_{\text{Bilder}} = f_K * \frac{d}{v_B}$$

Ausgehend von der resultierenden Anzahl und der zu erwartenden Größe der Bilder kann der dafür nötige Speicherplatz ermittelt werden.

Im Rahmen der Umsetzung im vorliegenden Forschungsprojekt wird als Speicher für die Kameradaten pro Modul die externe Festplatte *Samsung T5* mit einem Speicherplatz von 500 Gigabyte (GB) verwendet, welche durch die SSD (Solid-State-Drive) Technologie unempfindlich gegenüber Erschütterungen ist.

Da für die Datenaufnahmen durch IMU und Photodioden wesentlich weniger

benötigter Speicherplatz zu erwarten ist, wird für dieses Modul auf eine interne *microSD Speicherkarte* im Raspberry Pi mit einer Größe von 128 GB zurückgegriffen.

Verteiler- und Zentralplatine

Um dem Anspruch einer kompakten Bauweise gerecht zu werden, werden die Schaltungen für IMU, Photodioden und zentrale Bediensteuerung für die Umsetzung gemeinsam betrachtet.

Da die in 5.3.3 dargestellten Module der Erfassungseinheit für Wartungszwecke zugänglich sein sollten, müssen die Module leicht trennbar sein. Weil jedoch alle Raspberry Pis über die GPIO Pins mit der zentralen Bediensteuerung verbunden sein sollen, die Einplatinencomputer aber in einem unterschiedlichen Modul angeordnet sind, empfiehlt sich die Integration einer *Verteilerplatine* im Rechnermodul, die alle Signale der GPIO Pins sammelt und über eine Steckverbindung mit der zentralen Bediensteuerung (nachfolgend *Zentralplatine*) verbunden ist.

Um die Zustände anhand der LEDs einfacher beurteilen zu können, werden zudem zweifarbige LEDs in grün und rot eingesetzt, weshalb insgesamt, statt wie in Abbildung 5-21 dargestellt vier LEDs, acht LEDs eingesetzt werden.

Die **Verteilerplatine** (resultierendes Layout s. Abbildung 6-3) sammelt die Signale bzw. Spannungsversorgungen von den GPIO der Raspberry Pis über die Schnittstellen K1, K2 und IMU/PD ein und verteilt diese an einen Verbindungsstecker, welcher als Verbindung zur Zentralplatine dient. Die Pinbelegung zur Verbindung der GPIOs der Raspberry Pis ist in Abbildung B-2 und Abbildung B-3 dargestellt. Der zugrundeliegende Schaltplan für die Verteilerplatine in Abbildung B-4.

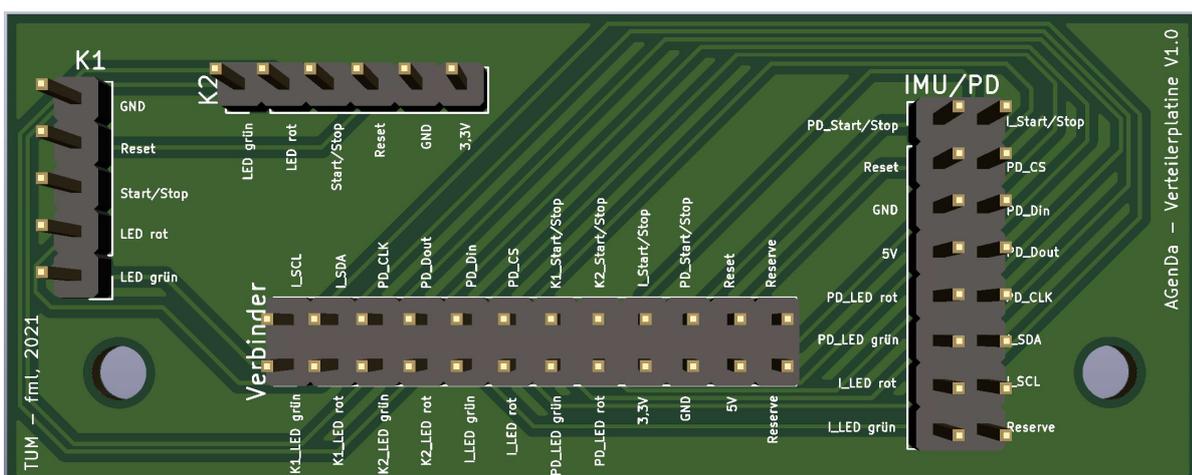


Abbildung 6-2: Resultierendes Layout der Verteilerplatine (erstellt mit der Software KiCAD)

Die **Zentralplatine** (resultierendes Layout s. Abbildung 6-3) realisiert unter anderem die zentrale Bediensteuerung. Über den zentralen Schalter SW2 kann eine Messung

zentral gestartet und gestoppt werden. Die zu messenden Kanäle (K1, K2, IMU, PD) werden über einen DIP-Schalter (SW3) zu- oder abgeschaltet. Der Status der Messungen ist über die jeweiligen zweifarbigigen LEDs ersichtlich. Zudem ist ein Reset-Taster integriert, der die Raspberry Pis zentral neu starten kann. Des Weiteren ist das IMU Shuttle Board mitsamt Ansteuerung sowie die Schaltung für die vier Photodioden-Zeilen integriert. Da die Photodioden-Zeilen an den Behälter-Außenwänden angebracht werden, sind dafür die Steckverbindungen J10, J20, J30 und J40 vorgesehen. Der entstandene Schaltplan der gesamten Elemente ist in Abbildung B-5 dargestellt.

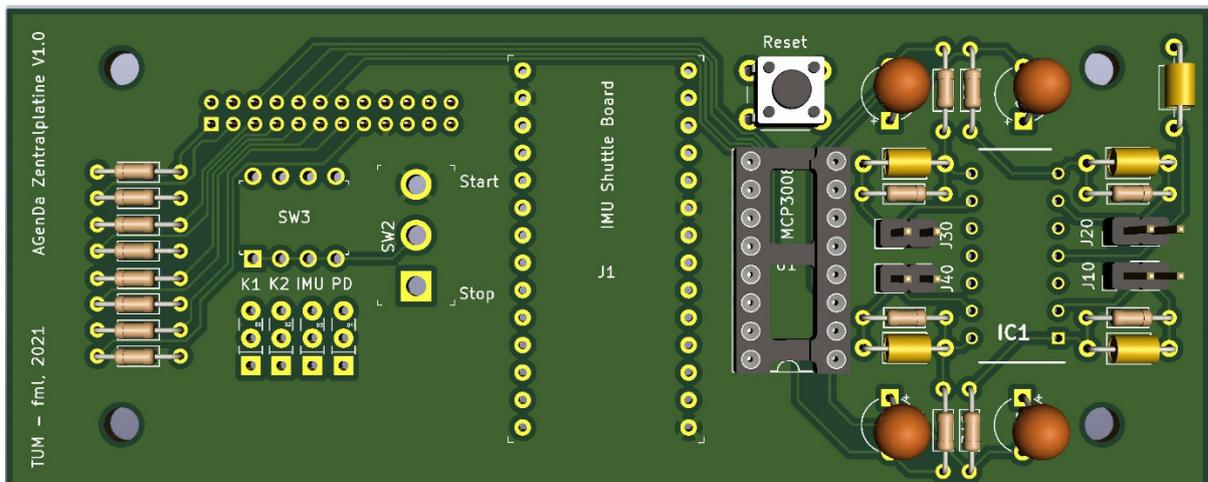


Abbildung 6-3: Resultierendes Layout der Zentralplatine (erstellt mit der Software KiCAD)

Verbindungsplan

Aus der Konstellation der beschriebenen Elemente und der angestrebten Funktion ergibt sich folgender Verbindungsplan, welcher zugleich die Komponenten den verschiedenen Modulen der Erfassungseinheit zuordnet. Dieser ist in Abbildung 6-4 dargestellt.

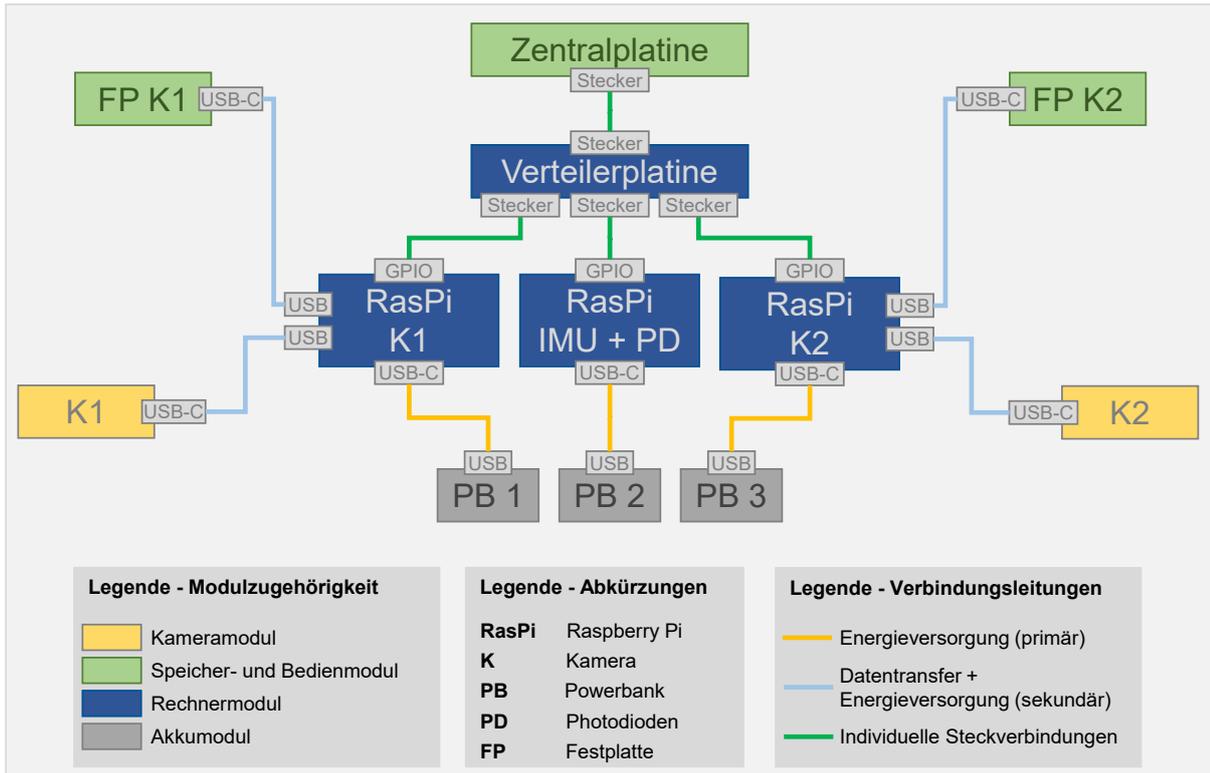


Abbildung 6-4: Verbindungsplan der verwendeten Elemente inkl. Zuordnung zu Modulen der Erfassungseinheit

6.1.2 Erfassungseinheit

Die in Unterabschnitt 5.3.3 abgeleiteten Bauraummodelle, bestehend aus Akkumodul, Rechnermodul, Speicher- und Bedienmodul und Kameramodulen werden auf Basis der in 6.1.1 beschriebenen Sensorik- und Elektronikmodule weiter detailliert und schließlich in CAD Zeichnungen für die Fertigung überführt. Daraus resultierten drei Gesamtkonzepte für jeweils eine Behältergröße (Abbildung 6-5).

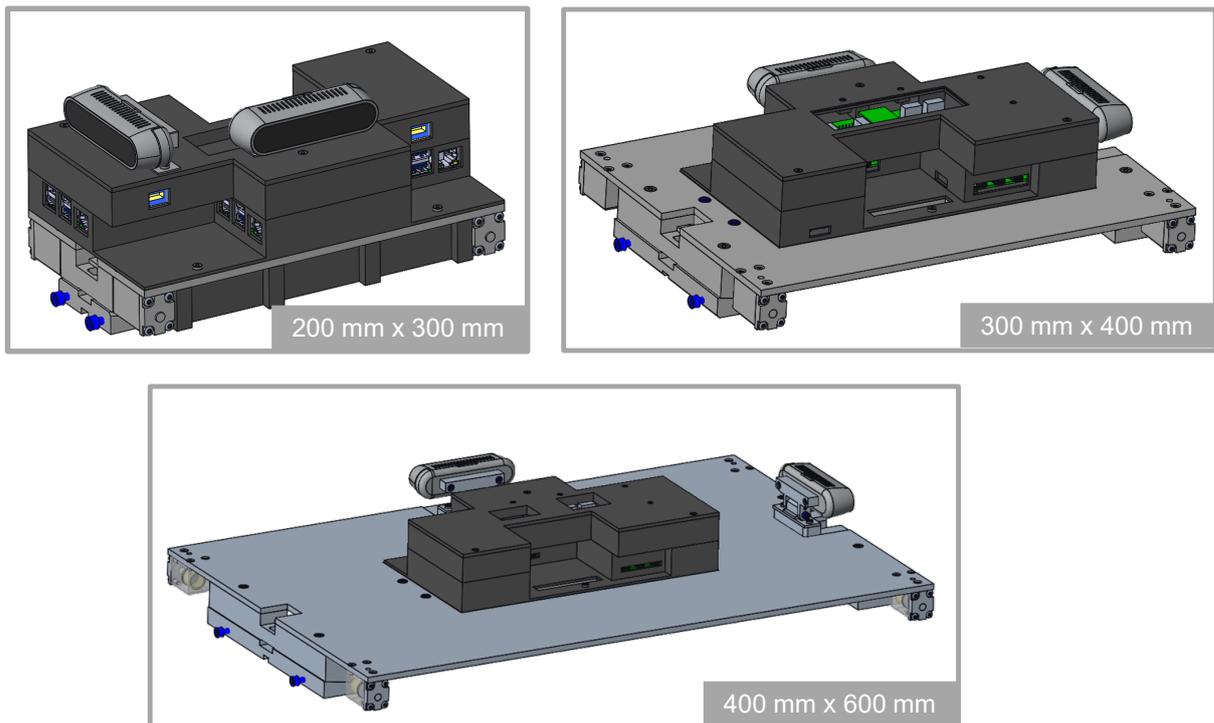


Abbildung 6-5: Konstruktionszeichnungen der Gesamtaufbauten für die Einpassung der Erfassungseinheiten in die KLT Größen 200 mm x 300 mm, 300 mm x 400 mm und 400 mm x 600 mm

Grundgestelle und Befestigungen

Für alle drei Behältergrößen ist jeweils eine Grundplatte vorgesehen (Abbildung 6-6). Wie in 5.3.3 beschrieben, dienen die Grundplatten für die beiden größeren Behältermaße als Trägereinheit für das entstehende Modulpaket, welches auf die kleinste Behältergröße (200 mm x 300 mm) angepasst ist. Die Grundplatte des kleinsten Moduls passt somit exakt in die Aussparungen der größeren beiden Grundplatten.

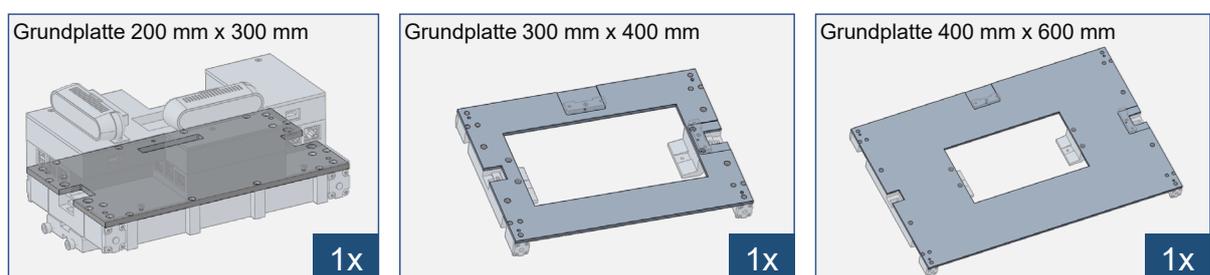


Abbildung 6-6: Grundplatten für die drei verschiedenen Behältergrößen (inkl. zu fertigende Stückzahl)

An den Grundplatten sind die Elemente zur Befestigung in Längs- und Querrichtung angebracht. Jede der drei Grundplatten enthält daher zunächst individuell an die Größe des Behälters angepasste Elemente zur Längsbefestigung im Behälter (Prinzip Selbstzentrierung). Im Behälter selbst werden die entsprechenden Gegenstücke

montiert, an denen nach der Selbstzentrierung die Grundplatten verschraubt werden können (siehe Abbildung 6-7).

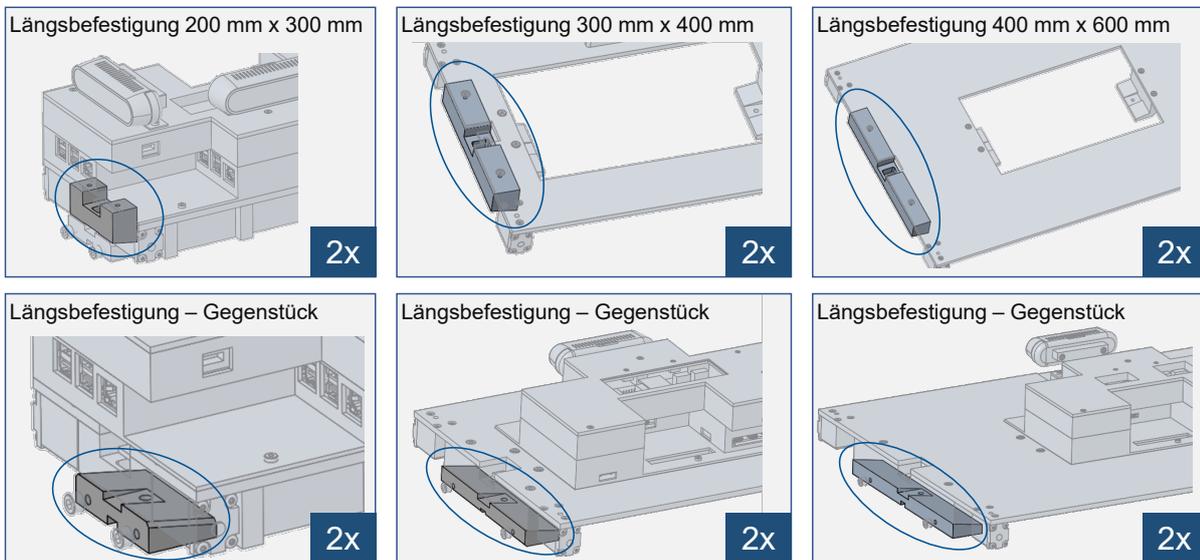


Abbildung 6-7: Längsbefestigung für die drei verschiedenen Behältergrößen (oben: Längsbefestigung montiert an Grundplatte; unten: Gegenstück montiert im Behälter) (inkl. zu fertigende Stückzahl)

Für die Querbefestigung wird auf das Prinzip der Zentrierung durch Federverspannung gesetzt. Dazu wird an jeder Ecke jeder Grundplatte ein Federverspannungselement vorgesehen, welches über ein Hauptgehäuse an der Grundplatte befestigt ist. In das Hauptgehäuse ist eine Öffnung zum Einbringen einer Feder eingebracht. Diese drückt den Federstößel durch eine Öffnung in der Frontplatte nach außen, sodass der Stößel gegen die Innenwand des Behälters gepresst wird. Die zu fertigenden Bauteile sind inkl. ihrer Stückzahl in Abbildung 6-8 dargestellt.

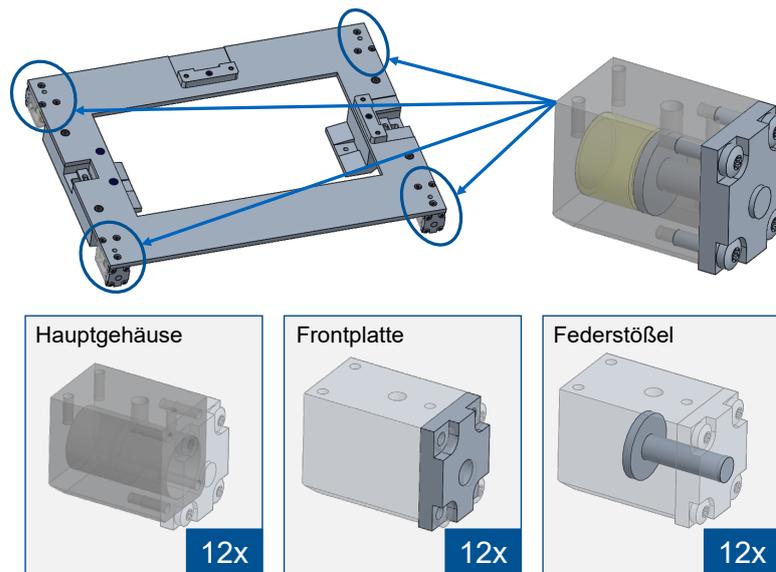


Abbildung 6-8: Elemente zur Querzentrierung der Grundplatten im Behälter (inkl. zu fertigende Stückzahl)

Um die Grundplatte der Größe 200 mm x 300 mm nicht nur für die kleinste Größe am Behälter direkt, sondern auch für die beiden größeren Behältermaße an deren Grundplatten anbringen zu können, werden dort Modulaufnahmeelemente vorgesehen (siehe Abbildung 6-9). Diese dienen als Gegenstück für die Längsbefestigung der kleineren Grundplatte.

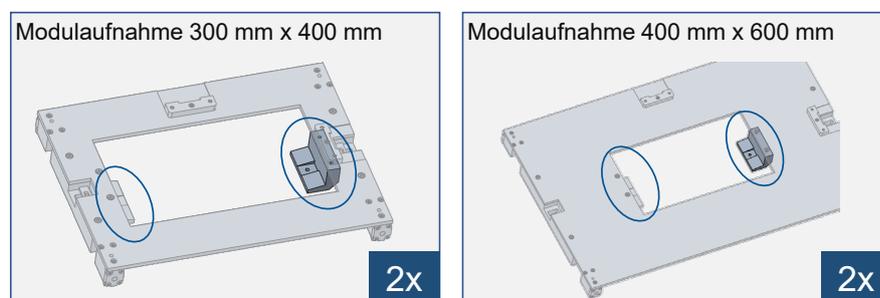


Abbildung 6-9: Modulaufnahmeelemente für die beiden größeren Behältermaße als Gegenstück zur Längsaufnahme der kleineren Grundplatte

Modulelemente

Wie beschrieben, werden die einzelnen Module direkt mit der Grundplatte des kleinsten Behälters verbunden und können dann als Modulpaket gesammelt in die größeren Grundplatten eingesetzt werden. Hierfür werden für alle Module Trägerelemente konstruiert, welche die ausgewählten Sensorik- und Elektronikkomponenten (inkl. eventuell benötigter Befestigungsmöglichkeiten) aufnehmen können. Zugleich soll auch bei der Integration des Modulpakets in die kleinste Behältergröße der Zugang zu allen benötigten Schnittstellen (z. B. USB-Ports,

Ladebuchsen etc.) gewährleistet sein. Die resultierenden Bestandteile des Modulpakets (inklusive Abdeckung) sind in Abbildung 6-10 dargestellt.

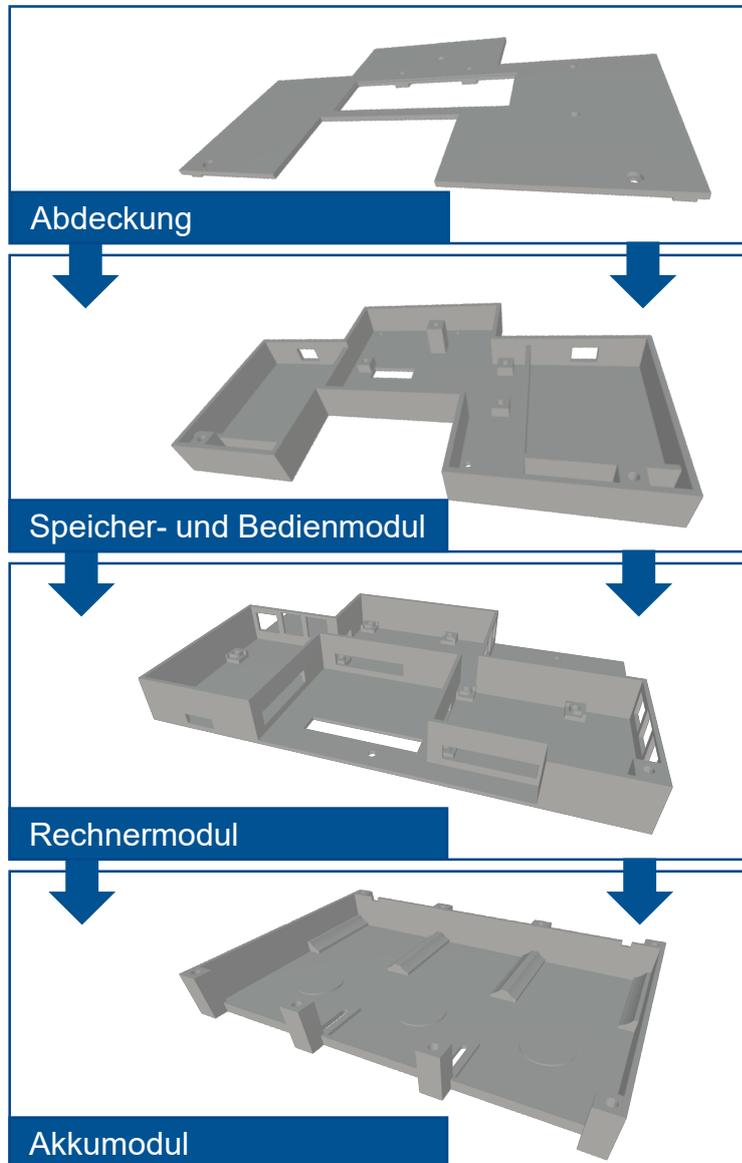


Abbildung 6-10: Zusammensetzung der Elemente des Modulpakets zur Aufnahme der Sensorik- und Elektronikelemente

Im **Akkumodul** sind die drei Powerbanks nebeneinander angesiedelt. Eine Fixiermöglichkeit verhindert deren Verrutschen. Durch die Öffnungen im Bereich der Vorderseite der Powerbanks ist der Zugang zu den Ladebuchsen gewährleistet. Das **Rechnermodul** sieht Befestigungsmöglichkeiten für die drei Raspberry Pis vor. Der Zugang zu den benötigten Schnittstellen sowie eine Kabeldurchführung zum Akkumodul sind ebenso vorgesehen. Zusätzlich soll in einer zweiten Ebene über dem mittleren der drei Raspberry Pis die Verteilerplatine angebracht werden, welche die

Signale der GPIO-Pins der Raspberry Pi sammelt und über einen gemeinsamen Kabelstrang zur Zentralplatine im **Speicher- und Bedienmodul** führt. Neben der Zentralplatine sind dort ebenso die beiden SSD Festplatten zur Speicherung der Kameradaten integriert. In der **Abdeckung** ist eine Öffnung der Bedienung der Zentralplatine vorgesehen. Zur Anbringung der Kamera sind auf der Abdeckung zusätzlich Verschraubungspunkte vorgesehen.

Wird das Modulpaket in den größeren beiden Behältern eingesetzt, so muss lediglich die Kamera auf die dafür vorgesehenen Anbringungspunkte an den Rändern der Trägerplatine versetzt werden. Eine Kamerahaltung inkl. Neigungsmöglichkeit wird dazu wie in Abbildung 6-11 dargestellt konstruiert.

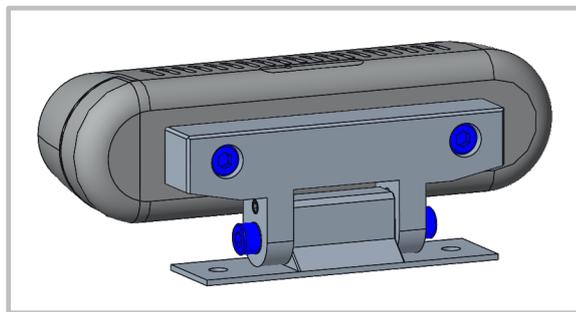


Abbildung 6-11: Kamerahalter

In der konkreten Umsetzung der Elemente wird für die Grundgestelle inkl. Befestigungselemente sowie für die beiden Kamerahalter auf eine klassische Fertigung aus Metall zurückgegriffen. Die Trägerelemente des Modulpakets werden dagegen mit dem 3D-Druck Verfahren angefertigt.

Die Ergebnisse der konkreten Umsetzung des Modulpakets inkl. der verbauten Sensorik- und Elektronikkomponenten sind in nachfolgend in Abbildung 6-12, Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14 dargestellt.

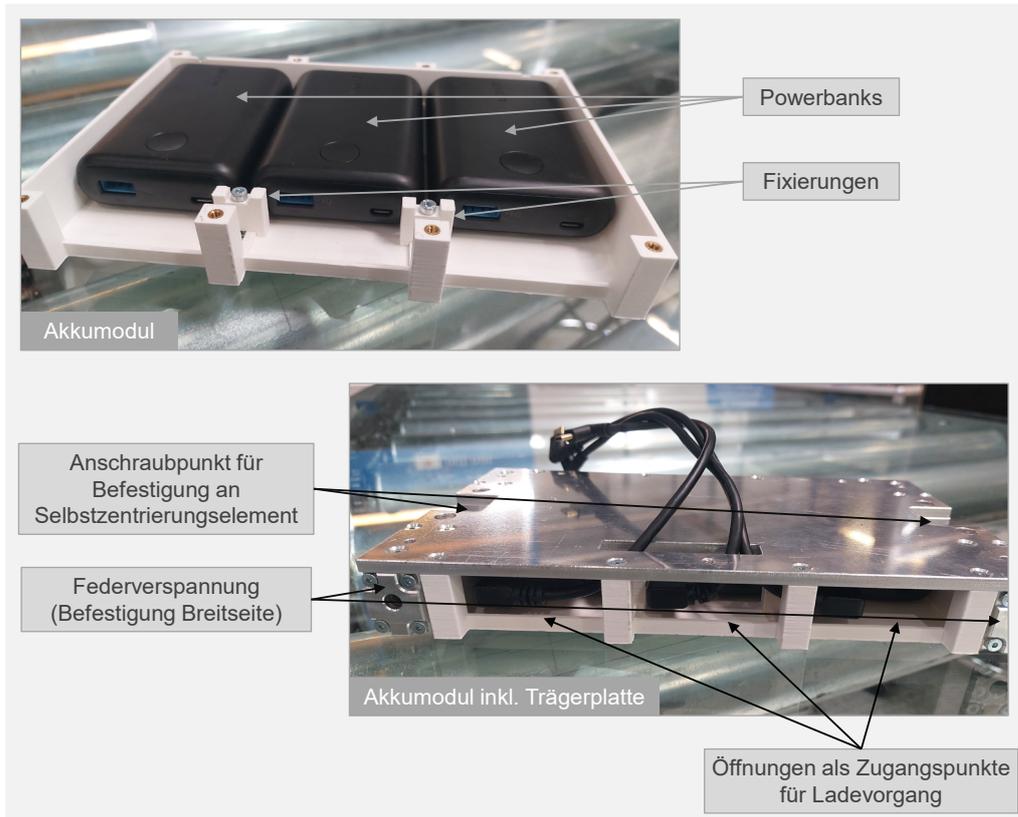


Abbildung 6-12: Umsetzung des Akkumoduls

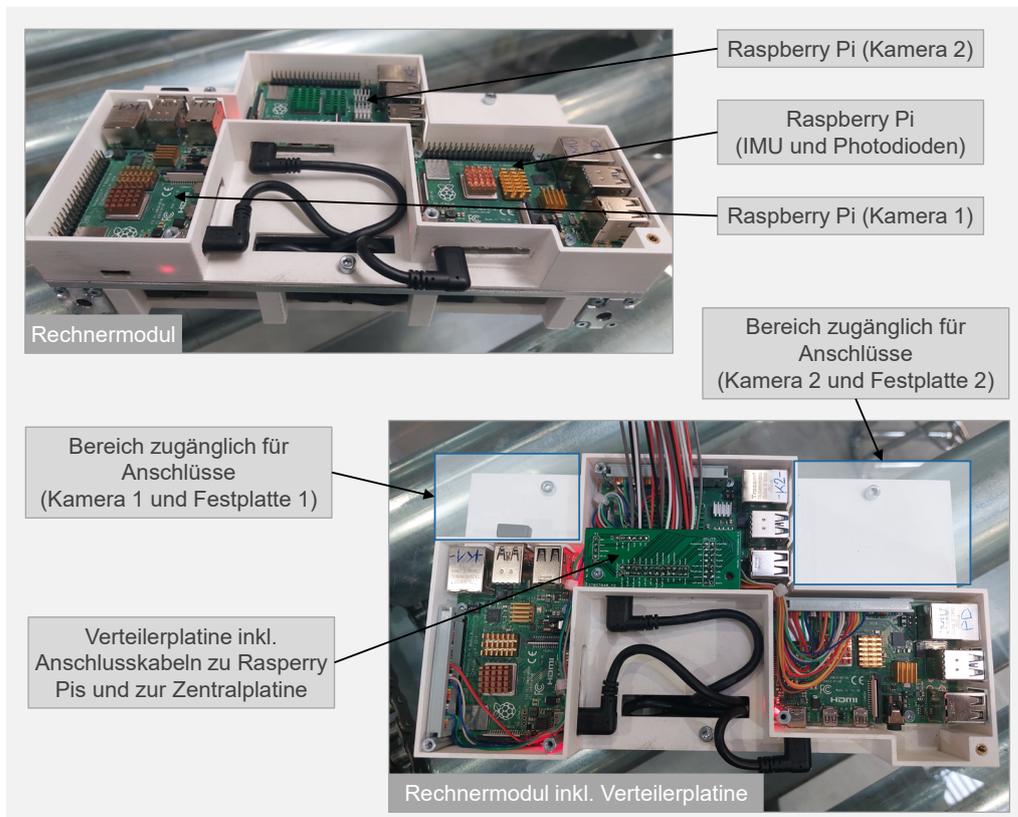


Abbildung 6-13: Umsetzung des Rechnermoduls

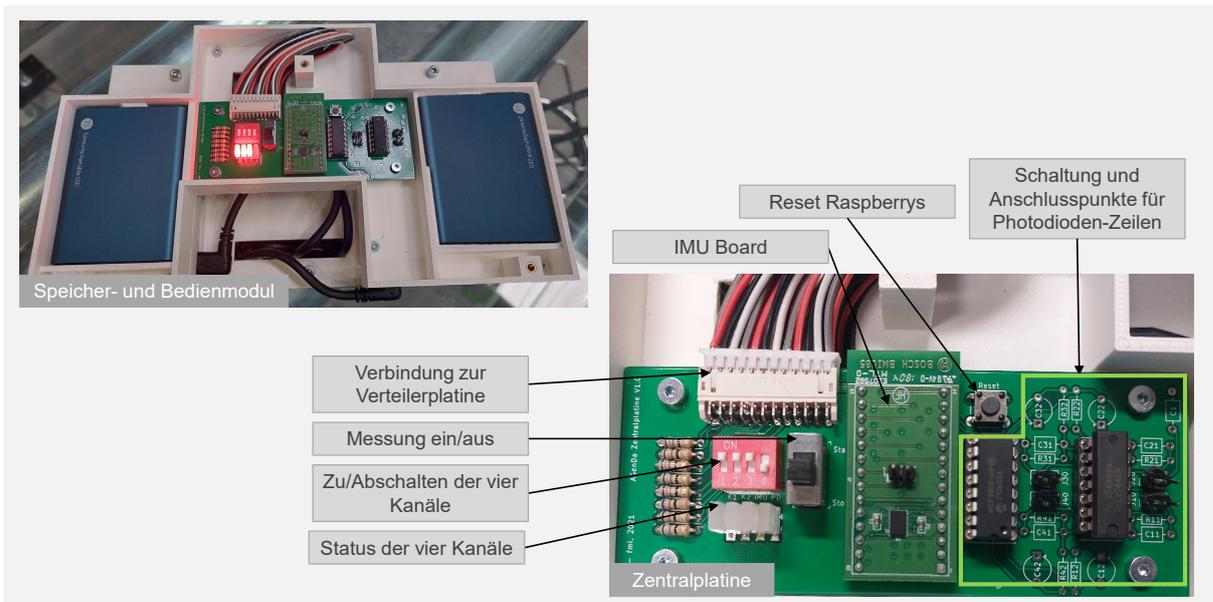


Abbildung 6-14: Umsetzung des Speicher- und Bedienmoduls sowie der Zentralplatine

Die Integration des Modulpakets in die verschiedenen Behältergrößen wird in Abbildung 6-15 ersichtlich. Um den Kameras den Blick auf ihre Umgebung zu öffnen, müssen in der Behälterwand entsprechende Öffnungen vorgesehen werden.

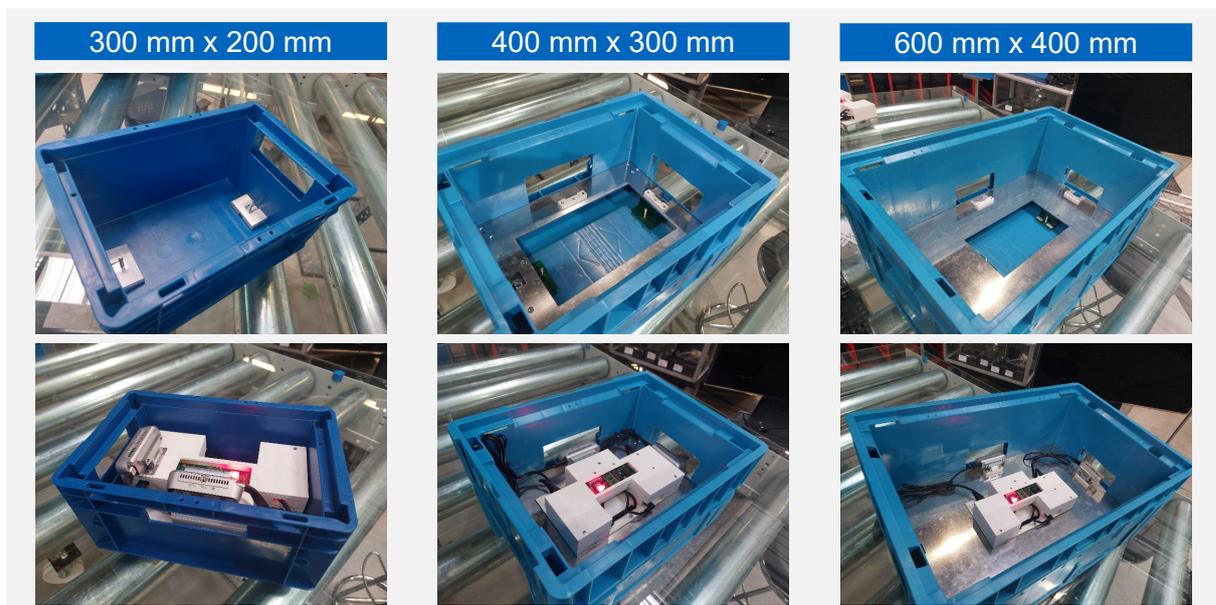


Abbildung 6-15: Integration des Modulpakets in die verschiedenen Behältergrößen

6.2 Umsetzung der Dateninterpretation

Im Rahmen des Projekts werden exemplarisch die Module „Bewegungspfad“, „Richtungswechsel“, „Oberflächenerkennung“, „Breitenerkennung“ sowie „Detektion von Lichtschranken“ ausgearbeitet. Hierfür stehen zwei Testanlagen zur Verfügung, welche im Vergleich zum Referenz-Anlagenkonfiguration aus Abschnitt 3.1 die in Tabelle 6-1 gezeigten Komponenten mit den genannten Ausprägungen enthalten.

Tabelle 6-1: *Abgleich der in den Testanlagen enthaltenen Komponenten im Vergleich zur Referenz-Anlagenkonfiguration*

Fördererelement (Referenz-Anlagenkonfiguration)	Ausprägung	Vorhanden in Testanlagen
Rollenbahn	Gerade	Ja
	Kurve	Ja
Bandförderer	Gerade	Ja
	Steigung	Nein
Tragkettenförderer	Kurve	Nein
	Gerade	Nein
Umsetzer	Steigung	Nein
	Gurt-/Hubumsetzer	Ja
	Kettenabschieber	Nein
	Drehtisch	Nein
Aufzug/Senkrechtförderer	Pusher	Nein
	--	Ja

Hinzu kommt als Fördererelement zusätzlich ein Hochleistungstransfer-Kugelförderer, welcher in einer der Testanlagen integriert ist. Tragkettenförderer sind in den zugänglichen Testanlagen nicht enthalten, genauso die Ausprägungen Steigung, Drehtisch und Pusher.⁴

Generell ist für die nachfolgend beschriebenen Umsetzungen zu erwähnen, dass deren Allgemeingültigkeit (z. B. bei der Wahl von Softwareparametern) immer von einer möglichst großen Datenbasis abhängig ist. Es soll jedoch in den Umsetzungsbeispielen gezeigt werden, wie die grundsätzliche Vorgehensweise bei deren Implementierung gewählt und auf größere Datensätze skaliert werden kann.

⁴ Aufgrund der Restriktionen im Rahmen der Covid-19 Pandemie während der Projektlaufzeit – insbesondere im Zeitraum der Umsetzung – war die Zugänglichkeit zu Betrieben stark eingeschränkt, weshalb nicht alle Ausprägungen der Referenzkonfigurationen untersucht werden konnten.

6.2.1 Bewegungspfad

Als Vorstufe zu einer Umsetzung der Visual Inertial Odometry wurde in diesem Modul im Rahmen von [San-2021] und unter Mitwirkung und Anleitung des Autors die Behälterbewegung rein auf Basis der Daten einer Kamera und ohne zusätzliche Integration der IMU-Werte rekonstruiert. Eine Hinzunahme der Kameradaten der zweiten, um 90° versetzten, Kamera sowie der Beschleunigungs- und Drehratendaten aus der IMU verspricht eine Verbesserung der Robustheit sowie der Genauigkeit des Systems, weshalb das nachfolgend beschriebene Verfahren in möglichen weiteren Umsetzungsschritten hinsichtlich dieser Aspekte angepasst werden sollte.

Das in der Programmiersprache Python3 implementierte Verfahren kann anhand von vier Schritten beschrieben werden, welche nachfolgend detailliert werden.

Einlesen und Input Filterung

Zunächst werden alle aufgenommenen 2D-Bilder eingelesen und in Grauwertbilder umgewandelt, da die nachfolgenden Verfahren ohne die Farbinformationen arbeiten können und somit eine Effizienzsteigerung erreicht werden kann. Zudem werden alle aufgenommenen Tiefenbilder eingelesen, welche für jeden Bildpixel den Abstand zur Kamera angeben. Im umgesetzten Erfassungssystem kann es zudem vorkommen, dass nicht alle Farbbilder ein deckungsgleiches (zum selben Zeitpunkt aufgenommenes) Tiefenbild aufweisen. Durch eine Input Filterung werden nachfolgend nur die Bilder verwendet, welche deckungsgleiche Farb- und Tiefenbilderpaare aufweisen.

Merkmalsextraktion

Das Prinzip der Visual Odometry basiert auf der Rekonstruktion des Bewegungspfads zwischen einzelnen Bildern einer Sequenz auf Basis der Wiedererkennung von Merkmalen des einen Bildes im nächsten Bild (vgl. [You-2015]) Daher werden in diesem Schritt zunächst für alle Bilder charakteristische Schlüsselpunkte bestimmt, für welche deren Merkmale in der Form von Deskriptoren beschrieben werden. Zur Identifikation von Schlüsselpunkten wird in dieser Umsetzung das Verfahren des Harris-Detektors (vgl. [Har-1988]) zur Identifikation von Ecken und Kanten im Bild angewandt. In Abbildung 6-16 ist ein Beispiel zu den dadurch erkannten Schlüsselpunkten bei der Überfahrt auf einer Testanlage gegeben. Um die so bestimmten Merkmale zu spezifizieren und wiedererkennbar zu machen, werden Deskriptoren eingesetzt, welche die Umgebung der Schlüsselpunkte formal beschreiben. Die Auswahl des Verfahrens zur Bestimmung der Deskriptoren ist abhängig von verschiedenen Faktoren, wie beispielsweise der Eignung für den spezifischen Anwendungsfall oder die notwendige zeitliche Performance. In diesem Umsetzungsbeispiel kommt der „Scale Invariant Feature Transformation“ (SIFT, vgl.

[Low-1999]) Algorithmus zum Einsatz, welcher sich durch eine Rotations- und Skalierungsinvarianz sowie eine hohe Robustheit für Rauschen oder Belichtungsunterschiede auszeichnet.

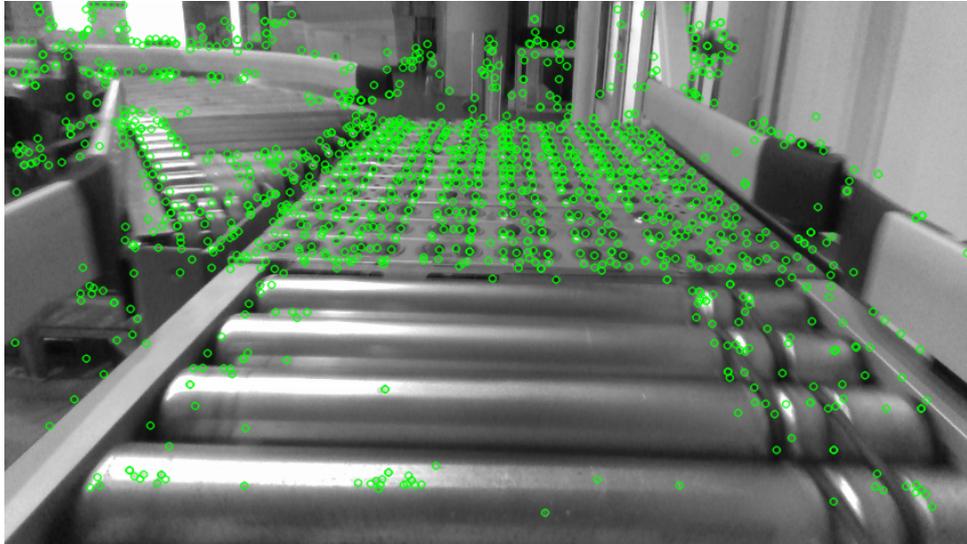


Abbildung 6-16: Beispiel - Detektion von Schlüsselpunkten bei der Überfahrt auf einer Testanlage

Merkmalsvergleich

In diesem Schritt werden die erkannten und durch Deskriptoren beschriebenen Schlüsselpunkte eines Bildes (Zeitpunkt t) mit denen des vorherigen Bildes (Zeitpunkt $t-1$) verglichen. Ziel ist es, die Schlüsselpunkte durch den Merkmalsvergleich im jeweils anderen Bild wiederzufinden (Feature Matching). Hierzu wird die Bibliothek FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors, vgl. [Muj-2009]) verwendet, welche in diesem Fall für die Ermittlung der zwei nächsten Nachbarn (nearest neighbors) eines Schlüsselpunkts im korrespondierenden Vorgängerbild eingesetzt wird. Um entstehende Ausreißer zu filtern, wird zudem der Lowe's ratio test [Low-2004, S. 104] angewandt.

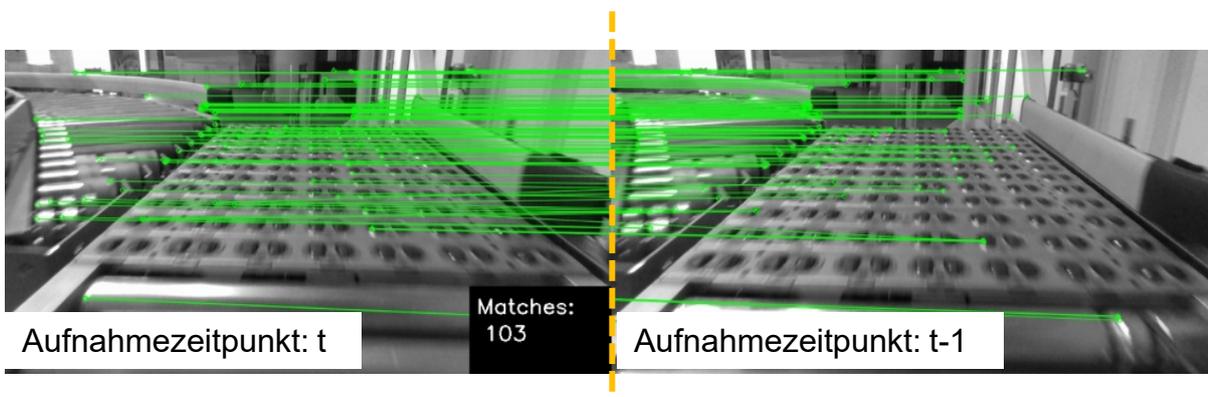


Abbildung 6-17: Beispiel - Vergleich der Merkmale zum Aufnahmezeitpunkt t und zum Aufnahmezeitpunkt $t-1$ bei der Überfahrt über eine Testanlage

Trajektorienbestimmung

Um aus der Veränderung der Position der Schlüsselpunkte eines Bildes (Zeitpunkt t) im Vergleich zu seinen korrespondierenden Schlüsselpunkten des Vorgängerbildes (Zeitpunkt $t-1$) eine Trajektorie im dreidimensionalen Raum zu bestimmen, wird die Schlüsselpunktbetrachtung zunächst auf die entsprechenden Tiefenbilder übertragen. Somit ist die Koordinate der Schlüsselpunkte im dreidimensionalen Raum bekannt (Beispielbild s. Abbildung 6-18). Zu weiteren Details zur Bestimmung der resultierenden Trajektorie sei auf [San-2021, S. 21ff.] verwiesen.

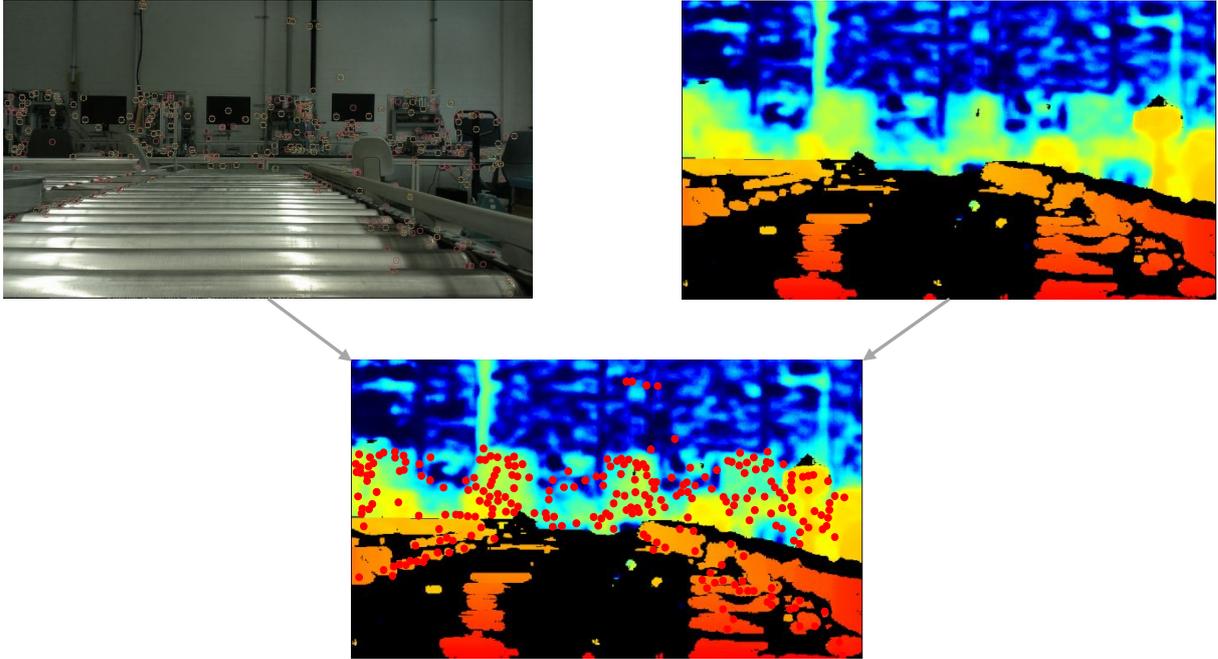


Abbildung 6-18: *Kombination der Tiefenbilder mit den erkannten Schlüsselpunkten im Raum zur Bestimmung der Trajektorie*

Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Trajektorie der Behälterbewegung. Ein Beispiel für die Visualisierung eines Bewegungspfades ist in Abbildung 6-19 dargestellt. Der Bewegungspfad lässt sich durch das umgesetzte Verfahren rekonstruieren. Es wurden jedoch Schwächen hinsichtlich der Robustheit bei Hindernissen, welche z. B. beim Passieren von Säulen entstehen, erkannt. Hierbei werden für einzelne Frames nicht genügend Schlüsselpunkte detektiert, weshalb die Trajektorie nicht vollständig rekonstruiert werden kann. Um diese Schwächen auszugleichen, sollte – wie bereits oben und in 5.2.2 erwähnt – auf das Verfahren der Visual Inertial Odometry mit einer zusätzlichen Integration der zweiten vorhandenen Kamera zurückgegriffen werden.

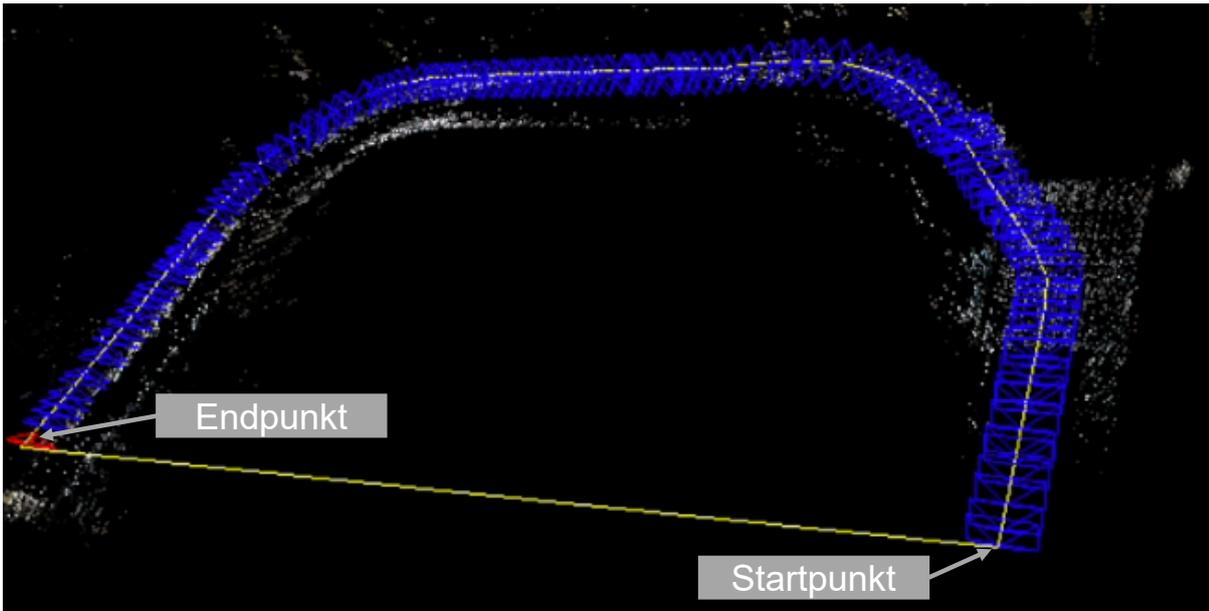


Abbildung 6-19: Ergebnis der Dateninterpretation von Kameradaten zum Bewegungspfad beim Durchlauf auf einer Testanlage (gelb: Trajektorie, blau: Kameraframes, rot: Aktueller Kameraframe, Weiß: Erkannte Schlüsselpunkte)

6.2.2 Bewegungsabschnitt

Ein mögliches Verfahren zur Erkennung von Bewegungsabschnitten wurde im Rahmen von [Bof-2021] unter Mitwirkung und Anleitung des Autors umgesetzt. Hierbei werden allein die Daten der IMU, also Beschleunigungen und Drehraten, verwendet, um den zeitlichen Verlauf der Bewegungsart zu ermitteln. Der zeitliche Verlauf der Förderrichtung wird in diesem Beispiel nicht umgesetzt. Die Umsetzung wird mit der Software Matlab realisiert.

Zunächst wird analysiert, welche Bewegungsarten, also Abschnitte, die in sich geschlossen ähnliche kinematische Eigenschaften aufweisen, in den Komponenten des Referenzszenarios auftreten können. Das Ergebnis der Analyse ist in dargestellt. Es ergeben sich insgesamt vier mögliche Bewegungsarten, die im Folgenden näher betrachtet werden: lineare Bewegungen in der x/y Ebene (linear x/y), lineare Hub- und Senkbewegungen (linear z), lineare Steigungen (linear Steigung) sowie Rotationsbewegungen in Form von Kurven oder Drehungen (Rotation). Dabei kann innerhalb eines Förderelements auch eine Kombination von Bewegungsarten auftreten. Beispielsweise wechselt die Bewegungsart bei einer 90° Eckbewegung von einer linearen Bewegung in der x/y Ebene zu einer um 90° rotierten linearen Bewegung in der x/y Ebene.

Tabelle 6-2: Mögliche Bewegungsarten auf den Fördererelementen des Referenzszenarios

Fördererelement	Ausprägung	Bewegungsart
Rollenbahn	Gerade	Linear x/y
	Kurve	Rotation
Bandförderer	Gerade	Linear x/y
	Steigung	Linear Steigung
	Kurve	Rotation
Tragkettenförderer	Gerade	Linear x/y
	Steigung	Linear Steigung
Umsetzer	Gurt-/Hubumsetzer	Linear x/y → Linear x/y
	Kettenabschieber	Linear x/y → Linear x/y
	Drehtisch	Linear x/y → Rotation
	Pusher	Linear x/y → Linear x/y
Aufzug/Senkrechtförderer	--	Linear x/y → Linear z

Für diese vier Bewegungen wird analysiert, welche Kombination der Beschleunigungen und Drehraten auftreten können. Dabei werden folgende Annahmen bzw. Definitionen getroffen [Bof-2021, S. 29]:

- Vor der ersten und nach der letzten Bewegung befindet sich der Behälter im Stillstand.
- Vor und nach jeder Bewegungsänderung befindet sich der Behälter in parallel zur Erdoberfläche, also in einer x/y Ebene.
- Der Behälter bewegt sich immer in einer parallelen oder senkrechten Ausrichtung zur Förderbewegung (Behälter längs oder quer auf Fördererelement).
- Die Erdbeschleunigung wird in z-Richtung subtrahiert, weshalb sie in der Überprüfung der Kombinationen nicht beachtet wird.

Die Ergebnisse der in Tabelle A-7 dargestellten Analyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Rotation:** Charakteristisch für die Rotation ist zum einen eine Drehratenänderung um die z-Achse. Zum anderen treten Beschleunigungen in x und y Richtung aufgrund der Zentripetalkraft gleichzeitig auf.
- **Linear – Steigung:** Da davon ausgegangen wird, dass eine Steigung immer aus einer x/y Ebenenbewegung mündet und wieder in eine x/y Ebenenbewegung übergeht, ist hierbei eine Drehrate sowohl zu Beginn als auch zum Ende des Bewegungsabschnitts um entweder die x- oder die y-Achse charakteristisch. Zudem tritt neben der Beschleunigung in x- oder y-Richtung aufgrund der Hangabtriebskraft ebenfalls eine Beschleunigung in z-Richtung auf.
- **Linear – z:** Hierbei treten keine Rotationsbewegungen auf. Stattdessen ist die Beschleunigung in z-Richtung signifikant.

- **Linear – x/y:** Hierbei treten keine Rotationsbewegungen auf. Stattdessen ist die Beschleunigung in x- oder in y-Richtung signifikant.

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich zum einen die Bewegungsart ableiten, zum anderen können diese Faktoren auch eingesetzt werden, um eine spätere Implementierung der Visual Inertial Odometry zu verbessern. Dadurch, dass die Rahmenbedingungen der Referenzszenarien keine beliebigen Bewegungen im Raum ergeben, können bestimmte Werte der Beschleunigung und Drehraten bei Erkennen einer Bewegungsart auf „0“ gesetzt werden und somit Drift und Rauschen verbessert werden. Ein Beispiel für die Erkennung der Bewegungsart auf einer Testanlage ist in Abbildung 6-20 dargestellt.

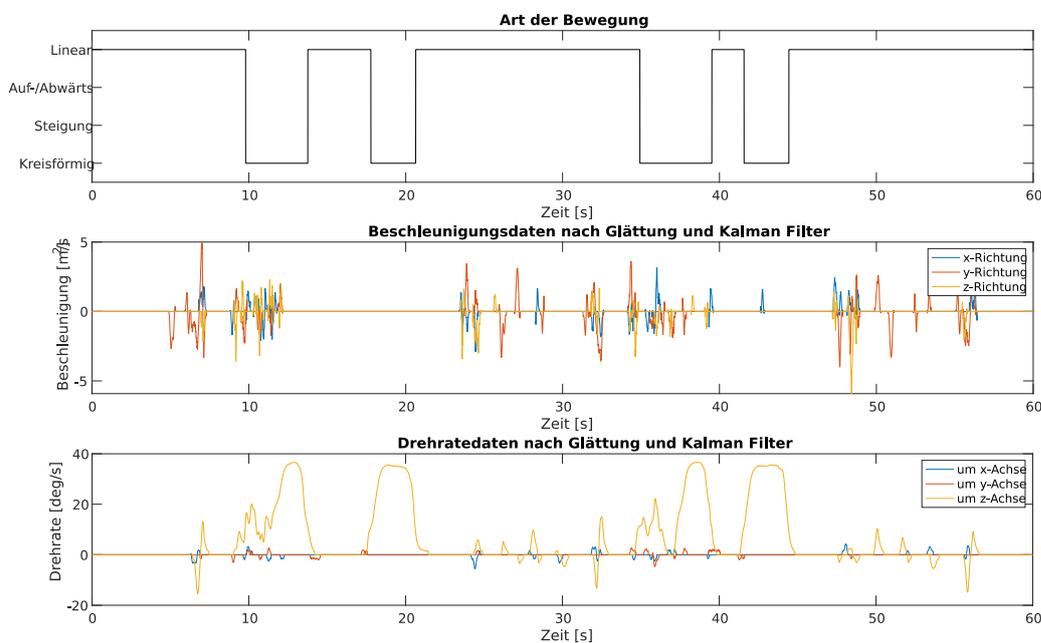


Abbildung 6-20: Beispiel - Ermittlung der Bewegungsart anhand der Beschleunigungen und Drehraten [Bof-2021, S. 43]

6.2.3 Oberflächenerkennung

Im Rahmen von [Hae-2021] wurde unter Mitwirkung und Anleitung des Autors die Umsetzbarkeit der Identifikation von Oberflächen von Förderelementen auf Basis von Farb- und Tiefenbildern untersucht. Wie in Tabelle 6-1 gezeigt, werden dazu in der Umsetzung die Oberflächentypen „Rollenband“, „Bandförderer“ und „Kugelförderer“ unterschieden.

Um in einzelnen Bildern Objekte erkennen bzw. diese interpretieren zu können, kann laut *Erhard* der Ansatz der *Computer Vision* zum Einsatz kommen. Dabei werden aus einzelnen „Bildern oder Bildsequenzen abstrakte Beschreibungen“ erzeugt. [Erh-2008, S. 3]. Da durch den intelligenten Behälter während seiner Bewegung laufend Bilder des entsprechenden Förderelements gemacht werden, genügt es hierbei zu bestimmen, welche Oberfläche direkt vor (bzw. hinter) dem Behälter liegt. Es kann also das gesamte Bild einer definierten Oberflächenklasse zugeordnet werden. Man spricht in diesem Fall von *Bildklassifikation* bzw. -kategorisierung [Süß-2014, S. 589f.].

Für die beispielhafte Umsetzung der Bildklassifizierung nach der erkannten Oberfläche, wird auf einen klassischen Ansatz zurückgegriffen, der aus den vier Blöcken *Bilderzeugung*, *Bildverarbeitung*, *Merkmalsextraktion* und *Klassifikation* besteht [Jia-2009]. Eine Alternative dazu bietet ein Deep-Learning Ansatz, welcher auf Basis künstlicher neuronaler Netze selbstständig Merkmale in Bildern extrahiert und die Bilder anhand derer klassifiziert [Sch-2012] (s. Abbildung 6-21). Dieser Ansatz bietet zwar eine Reihe von Vorteilen, für die automatisierte Merkmalsextraktion ist ein ausreichend großer und auf den Anwendungsfall angepasster Trainingsdatensatz notwendig [O'M-2020]. Ein solcher Datensatz existiert jedoch zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht und konnte im Rahmen des Projekts nicht erstellt werden. Aus diesem Grund wird ein klassischer Ansatz im Projekt gewählt.

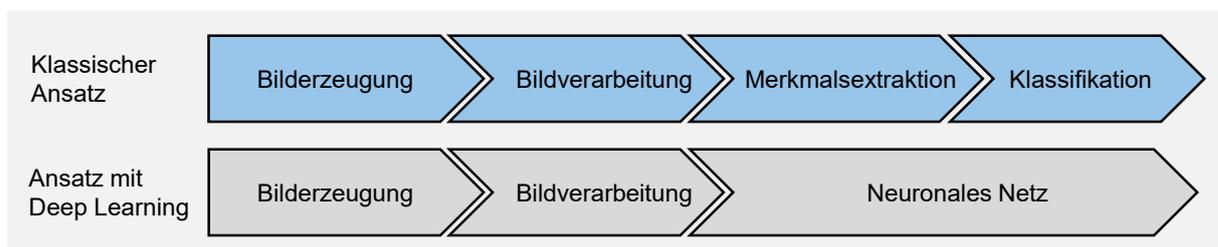


Abbildung 6-21: Gegenüberstellung des klassischen Ansatzes zur Bildklassifizierung und des Ansatzes mit Deep Learning (nach [Hae-2021])

Der erste Schritt der Bilderzeugung ist bereits durch die Ausarbeitung des Erfassungssystems abgedeckt, weshalb in den folgenden Absätzen lediglich auf die verbleibenden drei Schritte des klassischen Ansatzes zur Bildklassifizierung eingegangen wird. Diese werden in der Programmiersprache Python 3, insbesondere

unter Zuhilfenahme der offenen Programmbibliothek OpenCV („Open Computer Vision“) umgesetzt.

Bildverarbeitung

Da sich die Qualität der aufgenommenen Bilder vor dem Hintergrund unterschiedlicher Anlagengegebenheiten (z. B. Belichtung, Fördergeschwindigkeit etc.) stark unterscheiden kann, müssen diese in einem ersten Schritt vorverarbeitet werden. So können die möglichen ungünstigen Effekte in den Bildern ausgeglichen werden und eine bessere Basis für die anschließende Merkmalsextraktion erreicht werden. Die Art und Umsetzung der Bildverarbeitung ist damit immer abhängig von der Wahl der anschließenden Merkmalsextraktion und sollte auf diese hin optimiert werden.⁵

Die gewählte Methode der Merkmalsextraktion stellt ein sog. globales Verfahren dar, d. h., dass die Merkmale im gesamten Bild ermittelt werden. Um möglichst nur Merkmale des zu untersuchenden Bereichs (Förderelement vor der Kamera) zu identifizieren, muss das Bild entsprechend segmentiert werden, sodass vorrangig relevante Bildausschnitte zu sehen sind. Um dies zu erreichen und das Bild möglichst optimal für die Merkmalsextraktion vorzubereiten, sind im Umsetzungsbeispiel die in Abbildung 6-22 dargestellten Schritte zu durchlaufen.

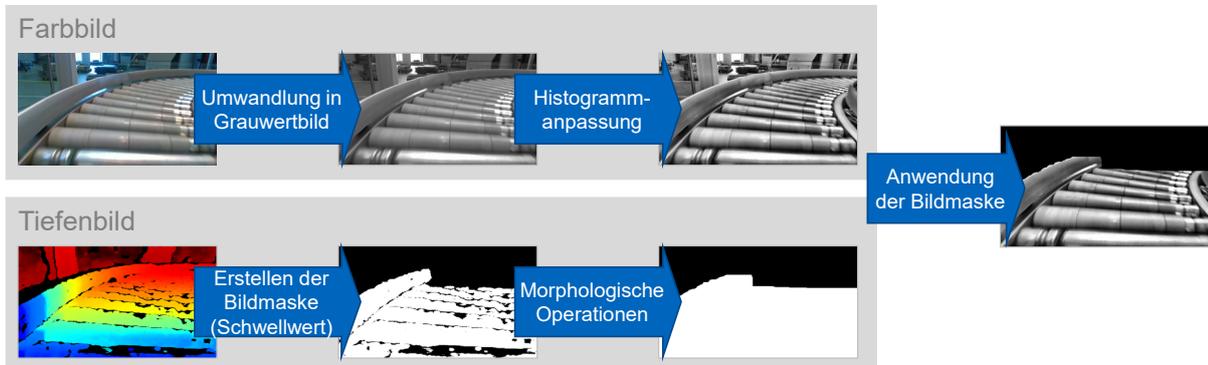


Abbildung 6-22: Schritte der Bildverarbeitung anhand eines Beispielbilds (Rollenband - Kurve)

Umwandlung in Grauwertbild

Für das gewählte Verfahren der Merkmalsextraktion sind die im Originalbild enthaltenen Farbinformationen nicht notwendig. Um somit eine Reduktion des Speicherplatzes zu erreichen und das Bild in einem ersten Schritt auf wesentliche Informationen zu reduzieren, werden alle Originalbilder in Grauwertbilder umgewandelt.

⁵ In Vorstudien wurde die Merkmalsextraktion auf Basis des Verfahrens des „Histogram of Oriented Gradients (HOG)“ als passend identifiziert. Eine Detaillierung dazu erfolgt im Absatz der Merkmalsextraktion.

Histogrammanpassung

Um schwankende Belichtungsverhältnisse inkl. Schattenbildung oder Reflexionen auszugleichen und zugleich den Bildkontrast, welcher für das Verfahren der Merkmalsextraktion vorteilhafte, stark ausgeprägten Bildgradienten bedingt, zu erhöhen, wird eine Histogrammanpassung anhand des „Contrast limited adaptive histogram equalization“ (CLAHE)-Verfahrens durchgeführt. Histogramme von Grauwertbildern stellen die Häufigkeitsverteilung der vorkommenden Grauabstufungen dar und repräsentieren damit Kontrast und Dynamik eines Bildes [Erh-2008, S. 102ff.]. Durch eine Anpassung des Histogramms kann also eine Bildveränderung, beispielsweise eine Kontrastverstärkung, erreicht werden. Das hier angewandte CLAHE-Verfahren zeichnet sich durch eine gute lokale Kontrastverstärkung innerhalb des Bildes bei gleichzeitiger Vermeidung von einer Verstärkung des Bildrauschens [Zui-1994].

Erstellen einer Bildmaske (Schwellwertoperationen)

Um im resultierenden angepassten Grauwertbild irrelevante Bereiche für die Merkmalsextraktion zu entfernen, wird aus dem zeitgleich aufgenommenen Tiefenbild (genauer: der Entfernungsmatrix) eine Bildmaske erstellt. Die Bildmaske besteht aus Bereichen mit einer „1“ oder einer „0“, stellt also ein Binärbild dar. Nur in den Bereichen, die eine „1“ beinhalten, sollen letztlich im „maskierten“ Grauwertbild ersichtlich sein.

Zur Erstellung der Bildmaske wird zunächst für jeden Bildpunkt anhand der Entfernungsmatrix des Tiefenbilds (= Abstand der Pixel zur Kamera) untersucht, ob diese unter oder über einem definierten Schwellwert (in dieser Umsetzung: 0,8 m) liegt. Für alle Pixel, die weiter als dieser Schwellwert entfernt sind, wird der Wert in der Maske auf „0“ gesetzt. Die so entstehende Version der Maske blendet also Bereiche aus, die weiter als der Schwellwert entfernt sind.

Morphologische Operationen

Aufgrund von Reflexionen, Aufnahme Fehlern oder durch Abstände zwischen Rollen bei Rollenbahnen werden durch die Schwellwertoperation Bereiche ausmaskiert, welche für die Merkmalsextraktion relevant wären. Um diese Lücken zu entfernen und mögliche Flecken in den auszublendenden Bereichen zu eliminieren und damit eine flächige Maske zu erhalten, werden die morphologischen Operationen in Form des „Closing“ und des „Opening“ angewandt. Hierbei sei für eine detaillierte Beschreibung auf [Bur-2016, S. 181ff.] verwiesen.

Anwendung der Bildmaske

Die so entstandene flächige Bildmaske wird nun auf das histogrammangepasste Grauwertbild angewandt, wodurch wie in Abbildung 6-22 dargestellt, ein für die Merkmalsextraktion optimiertes Bild entsteht.

Da die Merkmale des in diesem Beispiel angewandten Verfahrens ausschließlich auf Bildgradienten beruhen, kann die Bildgröße des resultierenden Bildes minimiert werden. Die Bildgradienten werden dadurch nicht verändert. Im vorliegenden Umsetzungsbeispiel wurden die entstandenen Bilder auf eine Größe von 120x216 Pixel reduziert.

Merkmalsextraktion

In der Merkmalsextraktion ist es das Ziel, die verschiedenen Objekte, welche klassifiziert werden sollen, möglichst eindeutig gegeneinander abzugrenzen [Jia-2009]. Merkmale basieren dabei auf einer numerischen Beschreibung eines Bildes, welche beispielsweise aufgrund verschiedener Formen, Farben, Anzahl an Eckpunkten etc. entstehen kann. Die Merkmale eines Bildes bilden Merkmalsvektoren, welche in einem n-dimensionalen Merkmalsraum angesiedelt sind. [Erh-2008, S. 105]

Bei der Auswahl der Verfahren zur Merkmalsextraktion liegt ein besonderes Augenmerk unter anderem in dessen Reproduzierbarkeit. Es sollen für dieselben Objekte in unterschiedlichen Aufnahmen immer identische Merkmalscharakteristika abgeleitet werden [Has-2018, S. 15]. Insbesondere sollen Unschärfen oder kleinere Fehler in der Bildsegmentierung zu keinen Fehlzugeordnungen führen. Aufgrund unterschiedlicher Fördergrößen, Behältergrößen und Kamerapositionen ist eine Skalierungsinvarianz erforderlich. Verschiedene Ausprägungen der Fördererlemente, z. B. Kurvenelemente, bedingen zudem eine Rotationsinvarianz.

Die Wahl des Verfahrens zur Merkmalsextraktion ist damit immer stark vom Anwendungsfall (gestellte Anforderungen und anwendbare Unterscheidungsmerkmale) abhängig. In einer Vorstudie wurden für den Anwendungsfall verschiedene Vorgehensweisen auf ihre Eignung hin untersucht (Hough Transformation [Hou-1962], Histogram of Oriented Gradients (HOG) [Dal-2005], Hu-Bildmomente [Hu-1962], Scale invariant feature transform (SIFT) [Low-1999], Binary robust independent elementary features (BRIEF) [Cal-2010], Oriented FAST and rotated BRIEF (ORB) [Rub-2011]). Hierbei zeigte sich insbesondere die Eignung der HOG-Merkmale, welche zum einen gute Resultate erzielen und sich zum anderen durch einen geringeren Implementierungs- und Anpassungsaufwand als beispielsweise die Anwendung der ORB- und SIFT-Verfahren auszeichnen.

Das HOG-Verfahren bedient sich der Beschreibung eines Bildes durch die Verteilung der auftretenden Bildgradienten, also den Intensitätsunterschieden benachbarter Bildpunkte. Diese Intensitätsunterschiede treten insbesondere an Kanten im Bild auf und verursachen an diesen Stellen ausgeprägte Gradienten.

Die Ergebnisse der Anwendung des HOG-Verfahrens auf die betrachteten Oberflächen der Förderer ist in Abbildung 6-23 graphisch⁶ dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass sich die einzelnen Oberflächentypen gut durch die Anwendung des HOG-Verfahrens unterscheiden lassen.

Da die HOG-Merkmale ausschließlich die Verteilung der Orientierungen der Gradienten in Betracht ziehen, sind Varianzen in der Fördererbreite und bei veränderten Eigenschaften wie beispielsweise einem Rollendurchmesser abgedeckt. Da das Verfahren allerdings nicht rotationsinvariant ist, muss in diesem Beispiel insbesondere darauf geachtet werden, dass der Datensatz für das Klassifikatortraining (s. nächster Absatz) zwingend Kurvenfahrten enthält.

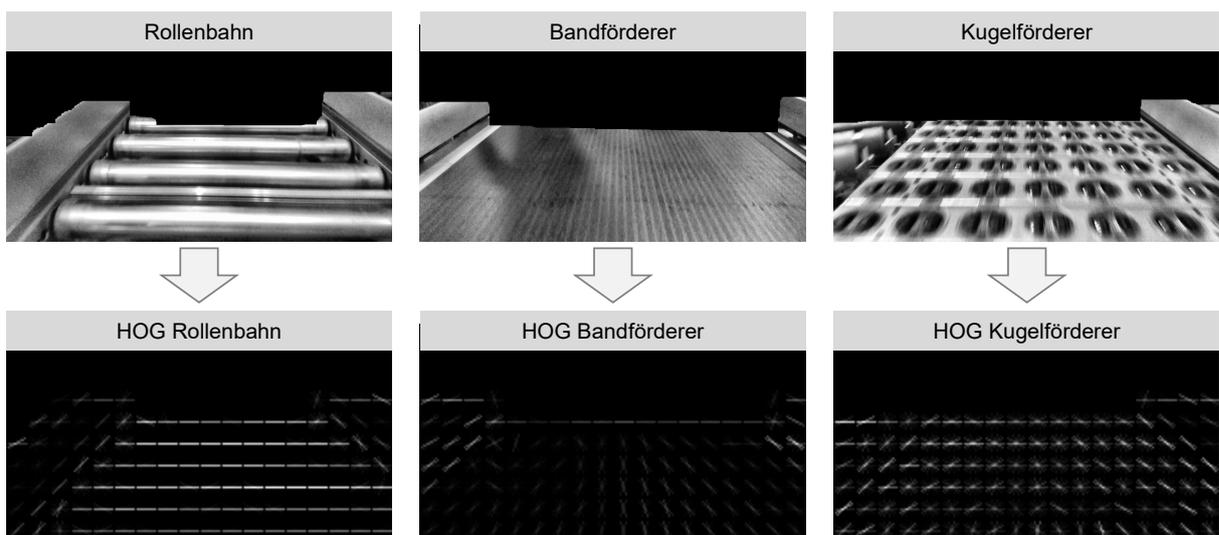


Abbildung 6-23: Visualisierung der HOG-Merkmale verschiedener Fördereroberflächen (nach [Hae-2021])

⁶ Visualisierung durch normalisiertes Histogramm der einzelnen Bildzellen. Zur besseren Visualisierung verläuft die dargestellte Gradientenrichtung senkrecht zur berechneten Gradientenrichtung.

Klassifikation

Die Schritte der Klassifikation werden im Rahmen dieser Arbeit anhand zwei der Phasen „Klassifikatortraining“ und „Klassifikation“ erläutert (s. Abbildung 6-24).

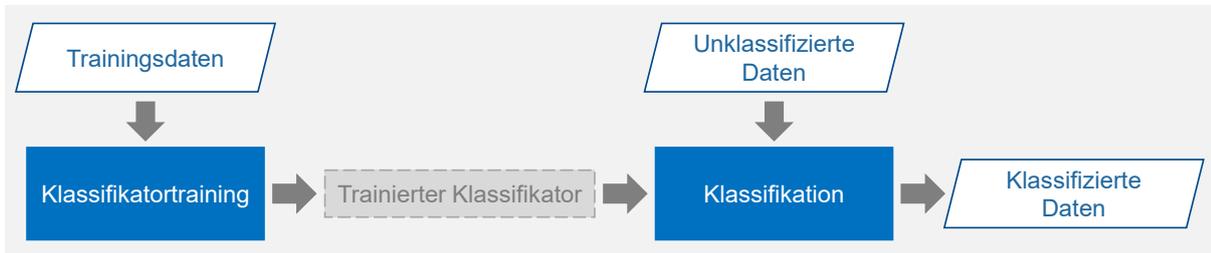


Abbildung 6-24: Beschreibung der Phasen "Klassifikatortraining" und "Klassifikation"

Klassifikatortraining

Ziel des Klassifikatortrainings ist es, den Merkmalsraum in verschiedene Regionen zu unterteilen, von denen jede eine bestimmte Klasse abdeckt. Da die Grenzen zwischen den Regionen nicht immer bekannt sind, müssen diese in der Trainingsphase erlernt werden. Dazu wird ein Trainingsdatensatz erstellt, für dessen Bilder die Klassenzugehörigkeit manuell zugeordnet wird.

Bei der Erstellung des Datensatzes muss darauf geachtet werden, dass möglichst viele Varianzen im Datensatz in einer ähnlichen Häufigkeit abgebildet sind. In diesem Umsetzungsbeispiel wird ein Datensatz erstellt, welcher 100 Bilder je abzubildender Klasse (Rollen, Band, Kugel) enthält und die verfügbaren Varianten (z. B. Linkskurve, Rechtskurve) enthalten sind. Dieser Datensatz wird schließlich dazu verwendet, einen Klassifikator (z. B. ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Klassenzugehörigkeit) zu trainieren. Man spricht hierbei von überwachtem Lernen (engl. Supervised Learning). [Erh-2008, S. 212ff.]

Es existieren dabei eine Vielzahl möglicher Klassifikatoren, welche auf bestimmte Klassifikationsprobleme und Anwendungsfälle optimiert sind. Im Rahmen der Forschungsarbeit werden dabei verschiedene Klassifikatoren auf ihre Eignung hin untersucht, wobei die Auswahl aufgrund der Beschaffenheit des Datensatzes und seiner geringen Modellkomplexität auf den Einsatz von Stützvektormaschinen (engl. Support Vector Machine; vgl. [Cor-1995]) fällt. Diese teilen zwei verschiedene Klassen in einem Merkmalsraum durch eine Hyperebene. Soll dieser Klassifikator zur Unterscheidung mehrerer Klassen angewandt werden, so kann dies z. B. durch die Ansätze „Einer-gegen-Alle“ bzw. „Einer-gegen-Einen“ erfolgen (vgl. [Hsu-2002]). In diesem Umsetzungsbeispiel wird aufgrund der Vermeidung von undefinierten Bereichen im Merkmalsraum und der gleichzeitig geringen Anzahl an zu unterscheidenden Klassen der „Einer-gegen-Einen“ Ansatz vorgezogen.

Zur Umsetzung des Trainings der Stützvektormaschine wird auf die Python Bibliothek *scikit-learn* (Funktion `SVC()`) zurückgegriffen, woraus der trainierte Klassifikator entsteht.

Klassifikation

Dieser trainierte Klassifikator kann nun dazu verwendet werden, unbekannte Aufnahmen des intelligenten Behälters in die drei genannten Klassen einzuteilen.

Es können jedoch immer nur Bilder klassifiziert werden, die von einer Kamera aufgenommen werden, welche in positiver bzw. negativer Fahrtrichtung des Behälters angebracht ist. Somit wird zunächst auf Basis einer Eingangsvariable (aus dem Modul der Bewegungsrekonstruktion) des Softwaremoduls zur Oberflächenerkennung durch einen Algorithmus bestimmt, für welchen Zeitstempel welche Kamerabilder (Kamera 1 oder Kamera 2) klassifiziert werden sollen.

Zudem drückt das Klassifikationsergebnis eines Bildes eines bestimmten Zeitstempels immer den vor (bzw. hinter) dem Behälter liegenden Abschnitt aus. Es muss also „zurück bzw. vorwärts gerechnet“ werden, zu welchem Zeitstempel der Behälter tatsächlich an der identifizierten Oberfläche ankommt.

Dieser Zeitstempel wird dann zusammen mit der erkannten Klasse in einer *.csv Datei gespeichert und steht für die Rekonstruktion der Anlage zur Verfügung.

6.2.4 Breitenerkennung

Exemplarisch für die Erkennung der Breite wurde in [Jer-2021] unter Mitwirkung und Anleitung durch den Autor ein Verfahren zur Ermittlung der Breite von geraden Rollenförderern auf der Basis von 2D- und Tiefenbildern erarbeitet und getestet. Es muss also für dieses Verfahren die Oberfläche und der aktuelle Bewegungstyp bekannt sein. Zudem muss die aktuelle Förderrichtung bekannt sein, um die Bilder der relevanten Kamera zu analysieren. Die Umsetzung dieses Moduls erfolgt in der Programmiersprache Python3, insbesondere unter Zuhilfenahme der Bibliothek OpenCV.

Als Grundgedanke für die Ausarbeitung des Moduls für die genannten Einschränkungen werden zwei Teilziele gesetzt. Zum einen soll die Breite einer Rolle stellvertretend für die Breite des Förderelements ermittelt werden, zum anderen der Abstand zwischen den Führungsschienen, sofern diese vorhanden sind. Zur Erreichung dieser Ziele wird ein vierstufiges Verfahren erarbeitet (Abbildung 6-25), dessen Schritte im Folgenden erläutert werden. Das Verfahren wird für jeden Aufnahmezeitpunkt der relevanten Bildsequenz angewandt.

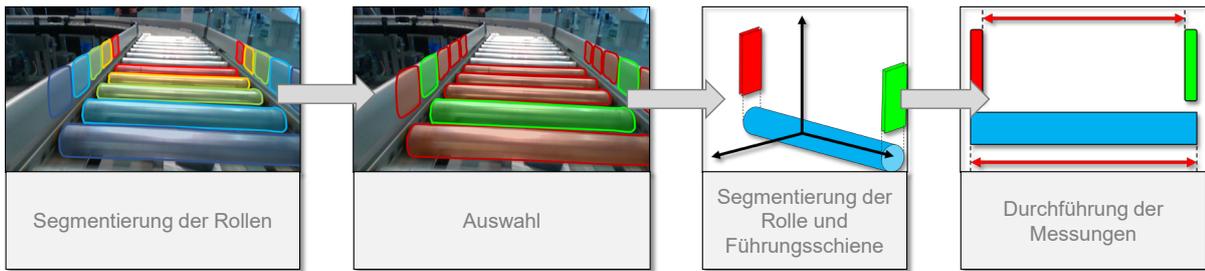


Abbildung 6-25: Verfahren zur Messung der Rollenbreite und des Abstands zwischen den Führungsschienen

Segmentierung der Rollen

In diesem Schritt sollen zunächst verschiedene Rollen im Bild erkannt werden. Um den Bildausschnitt auf naheliegende Bereiche zu begrenzen, wird dazu zunächst (Schritt 1.1) ein Schwellwert (hier 0,7 m) im Tiefenbild angewandt (Überblick über Schwellwertoperationen in [Sah-1988]). Darauf aufbauend wird eine Segmentierung mittels des k-means Clustering ([Pri-2015, S. 79f.]) angewandt (Schritt 1.2). Dieses Verfahren teilt einen Bildbereich in verschiedene Segmente (oder Cluster).

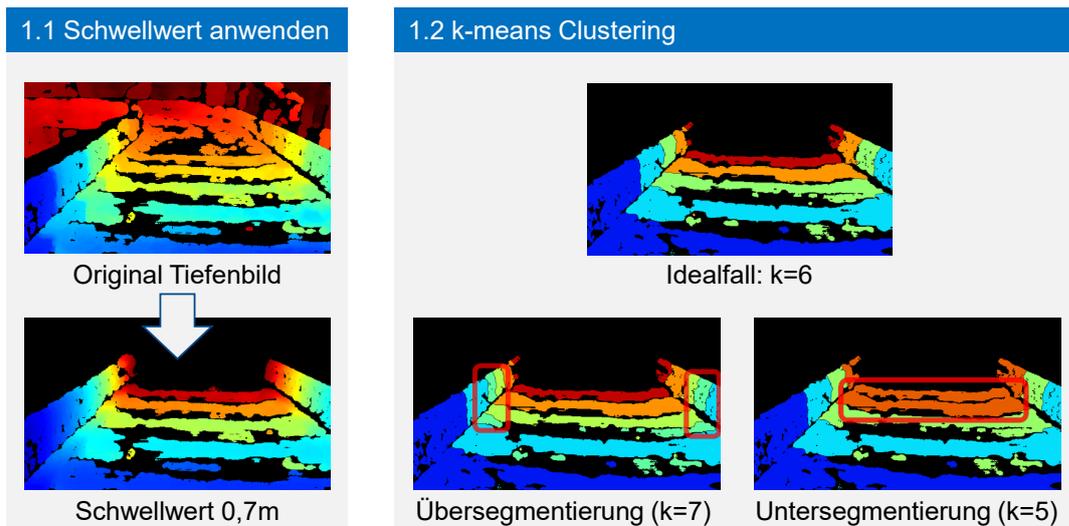


Abbildung 6-26: Beispiel zu Schwellwertoperation und k-means Clustering

Da davon ausgegangen wird, dass der Abstand und der Durchmesser der Rollen in einem zusammenhängenden Abschnitt gleich für alle Rollen sind, wird darauf abgezielt, das Tiefenbild in so viele Segmente zu teilen, wie Rollen auf dem Bild erkennbar sind. Entscheidend dafür ist die Wahl der Anzahl der Segmente (also des Parameters k), sodass keine Über- oder Untersegmentierung stattfindet (Beispiel s. Abbildung 6-26). Für das Verfahren zur Identifikation des passenden Wertes für den Parameter k sei auf [Jer-2021, S. 26ff.] verwiesen.

Auswahl eines Messbereichs

Aus den detektierten Abschnitten, welche das Tiefensegment einer Rolle repräsentieren, soll im zweiten Schritt einer der Abschnitte ausgewählt werden, welcher sich für die Messung eignet. Es wird in diesem Schritt der Abschnitt ausgewählt, welcher am nächsten an der Kamera ist (also die geringsten Tiefenwerte aufweist) und gleichzeitig aber vollständig sichtbar ist. Dies wird durch die Prüfung der Überschneidung von Pixeln des Ausschnitts mit dem Bildrand erreicht.

Segmentierung der Rolle und der Führungsschiene

Aus dem ausgewählten Abschnitt wird in diesem Schritt zunächst eine Punktwolke erzeugt, um dreidimensionale Messungen durchführen zu können. Die entstandene Punktwolke besteht beim Vorhandensein einer Führungsschiene aus dem Bereich der Rolle sowie den zwei Segmenten der Führungsschiene (rechts und links). Die Segmentierung ist im Detail in [Jer-2021, S. 35ff.] beschrieben.

Durchführung der Messungen

Für die Messung der Breite der Rolle wird um das aus dem letzten Schritt resultierende Segment ein umhüllender Quader (Bounding Box) gelegt. Die Messung der längsten Seite entspricht somit der Breite der Rolle. Um den Abstand zwischen den Führungsschienen zu ermitteln, wird mittels der OpenCV Bibliothek der kürzeste Abstand zwischen den entsprechenden Punktwolken gemessen.

Als Ergebnis des Verfahrens (Beispiel s. Abbildung 6-27) kann für jeden Zeitstempel einer Bildsequenz von geraden Rollenförderern eine Breite gemessen werden. Da davon ausgegangen wird, dass die Breite innerhalb des Bewegungsabschnitts konstant ist, können Ausreißer im Messverfahren ausgefiltert werden und ein Durchschnittswert für die Breite im Bewegungsabschnitt ermittelt werden.

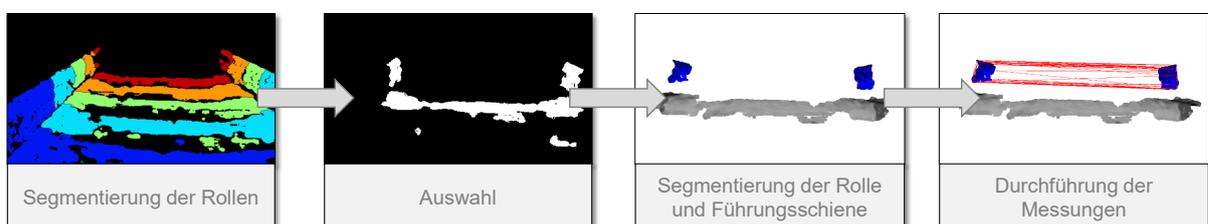


Abbildung 6-27: Beispiel - Ergebnis des vierstufigen Verfahrens zur Breitenerkennung

6.2.5 Sensorererkennung am Beispiel „Lichtschanke“

Die Umsetzung dieses Moduls hat eine Programmlogik zum Ziel, welche die Zeitstempel der Detektion von Lichtstahlen in tabellarischer Form (*.csv Datei) abspeichert.

Wie in 6.1.1 beschrieben, kommuniziert der Analog-Digital-Wandler (ADC) über eine SPI-Schnittstelle mit dem dafür vorgesehenen Raspberry Pi.⁷ Auf dem Raspberry Pi selbst läuft im Umsetzungsbeispiel ein Programm⁸ (Umsetzung in Python3), welches nach der Aktivierung der Messung auf dem Photodioden-Kanal (vgl. Elektronikkonzept) in einer vorgegebenen Frequenz (hier 200 Hz) die Werte aus den beschalteten Kanälen des ADC sammelt. Da der eingesetzte ADC MCP3008 über eine Auflösung von 10 Bit verfügt, kann er auf jedem Kanal Werte zwischen 0 und 1023 erfassen. Dabei entspricht der Wert 0 einer Eingangsspannung von 0 V und der Wert 1023 der am ADC anliegenden Versorgungsspannung (hier 3,3 V). Abbildung 6-28 zeigt dies beispielhaft für zwei Messkanäle, welche mit unterschiedlichen Widerständen in der Verstärkerschaltung der Photodioden realisiert wurden. Kanal 1 setzt dabei einen höheren Widerstand ein.

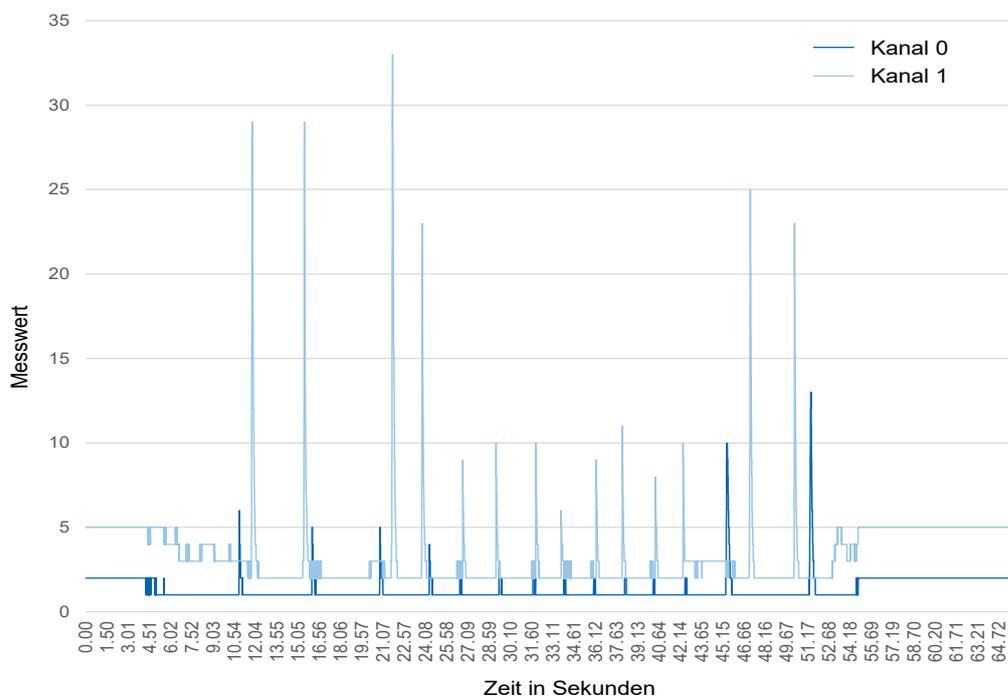


Abbildung 6-28: Beispiel für Messdaten der Photodioden-Schaltung zur Detektion von Lichtstrahlen

Im Programm kann letztlich ein Schwellwert vorgegeben werden, ab welchem das Eingangssignal als eintreffender Lichtstrahl interpretiert werden soll. Liegt der Eingangswert über dem Schwellwert, so wird dieser mitsamt dem Zeitstempel seines Auftretens in einer *.csv Datei gespeichert und bildet die Basis für die Rekonstruktion der Positionen der Lichtschranken auf der Förderanlage.

⁷ Zur Aktivierung der SPI Schnittstelle, muss dies in der Konfiguration des Raspberry Pi entsprechend eingestellt werden.

⁸ Um die Funktion beim Start des Raspberry Pi bereit zu stellen, muss für das entsprechende Programm ein Autostart definiert sein.

6.3 Umsetzung der Rekonstruktion

Die demonstratorische Umsetzung des Rekonstruktionsverfahrens wird in den folgenden Unterabschnitten beschrieben. Um im Rahmen der Projektlaufzeit⁹ eine parallele Umsetzung inkl. Test der Dateninterpretation und der Rekonstruktion zu realisieren, wird auf eine durchgängige Umsetzung zwischen den beiden Schritten verzichtet. Stattdessen werden diese an der Schnittstelle entkoppelt. Hierfür wird ein Verfahren zur Erzeugung von synthetischen Bewegungs- und Umgebungsdaten umgesetzt.

In 6.3.1 wird beschrieben, welche Module des Rekonstruktionsverfahrens demonstratorisch umgesetzt wurden. 6.3.2 schildert die Umsetzung der Entkopplung durch die Generierung synthetischer Bewegungs- und Umgebungsdaten. 6.3.3 zeigt die Umsetzung des Rekonstruktionsverfahrens anhand eines Referenzszenarios.

6.3.1 Umgesetzte Module und Art der Umsetzung

Die Umsetzung des Rekonstruktionsverfahrens erfolgt mit der Software Matlab R2020b. Ziel der Rekonstruktion ist es, die notwendigen Modellierungsdaten zu generieren und wie in 5.1.1 beschrieben in definierter Form in einer *.csv Datei zu speichern. Zusätzlich dazu wird im Hinblick auf eine bessere Verständlichkeit in einer demonstratorischen Umsetzung eine Visualisierung der resultierenden Daten in Form eines Layouts umgesetzt. Es wurden die folgenden Module des Rekonstruktionsverfahrens umgesetzt:

- Layout
 - Aufteilung in Überfahrten
 - Identifikation des 2D-Bewegungstyps
 - Unterteilung in Ebenen
 - Identifikation der Fördererlemente
 - Identifikation der Anschlusspunkte
 - Ermittlung der Beziehungen

- Geometrie
 - Einteilung in Förderertypen
 - Bestimmung von Maße
 - Bestimmung von Pose

⁹ Zusätzliche Einschränkungen ergaben sich durch die im Projektzeitraum eingetretenen Beschränkungen im Rahmen der Covid-19 Pandemie. Aufgrund der teilweisen Unzugänglichkeit zu Förderanlagen, welche als Basis für die Umsetzung der Dateninterpretation dienen sollte, war die Entkopplung der Schritte essenziell für eine Umsetzbarkeit des Rekonstruktionsverfahrens.

- Zusatzattribute
 - Zuordnung von Sensoren am Beispiel von Lichtschranken

Basierend auf der Schnittstelle zur Dateninterpretation wird dazu als Input für das Rekonstruktionsverfahren eine Struktur (siehe Abbildung B-6) verwendet. Hierbei werden die Daten aus verschiedenen Durchläufen (Runs) eingelesen. Ein Durchlauf besteht dabei aus der Liste der Zeitstempel (Time), den relativen Positionen (Position) und Orientierungen (Orientation) bezogen auf den Startpunkt, die Zeitstempel der Übergänge (Transitions) sowie die Zeitstempel der Sensorerkennungen (Sensors).

Da die verschiedenen Durchläufe nicht zwangsweise an derselben Stelle beginnen müssen, kann zunächst über Benutzereingaben der aufgenommene Startpunkt (relativ zu einem Referenzlauf) der Durchläufe eingegeben werden, wodurch die Positionen und Orientierungen alle relativ zum Referenzlauf normiert werden.

Im ersten Schritt folgt darauf die Aufteilung der Pfaddaten (Position und Orientierung) in *Überfahrten* anhand der Zeitstempel der Übergänge. Es ergibt sich eine neue Struktur, bestehend aus den Überfahrten, welche sich durch deren Pfad, Eingangs- und Ausgangspunkt auszeichnet.

Der *2D-Bewegungstyp* wird über die Analyse der 2D-Pfaddaten (hier x, y) ermittelt. Ist eine Änderung der Orientierung $\Delta\theta$ erkennbar, so handelt es sich um eine Drehung oder Kurvenbewegung. Diese werden durch die Größe des Radius unterschieden. Bewegungen ohne Orientierungsänderung können entweder lineare, L-, U- oder Z-Bewegungen sein (siehe Abbildung 6-29).

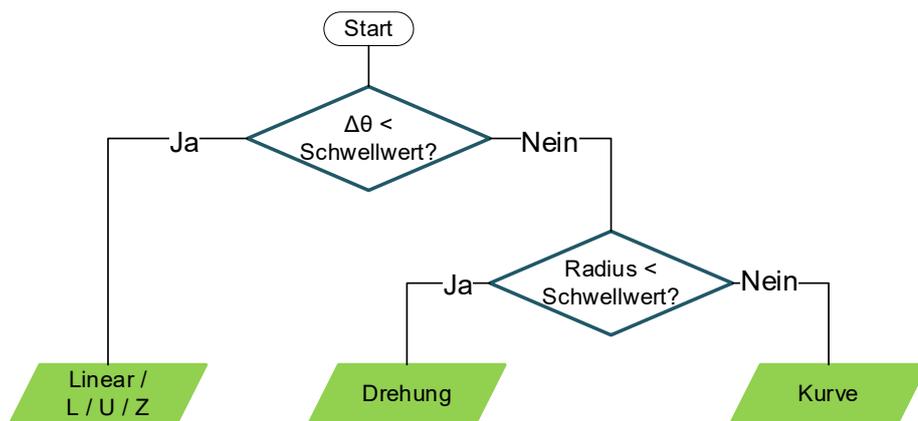


Abbildung 6-29: Ermittlung des 2D-Bewegungstyps

Um diese zu unterscheiden, wird die Änderung des Beschleunigungswinkels betrachtet, welcher sich in der 2D-Bewegung ergibt. Ändert sich der

Beschleunigungswinkel während der Überfahrt nicht, dann handelt es sich um eine Linearbewegung. Änderungen des Beschleunigungswinkels um 180° zeichnet eine Linearbewegung mit Starts bzw. Stopps während der Fahrt aus. Eine Eckbewegung nach rechts (L – rechts) findet statt, wenn sich eine Änderung des Beschleunigungswinkels um 90° ergibt. Eine Änderung um 270° ist dagegen charakteristisch für eine Eckbewegung nach links (L – links). Durch die Kombination verschiedener Eckbewegungen ergeben sich U- bzw. Z-Bewegungen. Eine Zusammenstellung der Analyse der Beschleunigungswinkel findet sich in Abbildung B-7 und Abbildung B-8.

Zur *Aufteilung in Ebenen* wird zunächst analysiert, ob sich die Höhe (hier z-Komponente) während einer Überfahrt ändert. Ist dies nicht der Fall, so handelt es sich um eine Ebenenbewegung, welche auf Basis der Höhe der Überfahrt einer bestimmten Ebene zugeordnet wird. Ändert sich die Höhe während der Überfahrt, so wird zwischen einer Steigung und einer Liftbewegung unterschieden, wobei sich eine Steigung durch eine Änderung der Orientierung auszeichnet.

Um aus den Überfahrten die einzelnen *Fördererelemente* zu erkennen, wird jedem Pfad ein „2D-Footprint“ eines definierten Durchmessers zugeordnet. Für jede Ebene werden die Footprints auf Überlappungen mit Footprints derselben Ebene geprüft. Da es bei Liften zu Überlappungen mit anderen Ebenen kommen kann, werden diese auch in Kombination mit den Ebenenbewegungen geprüft. Alle überlappenden Überfahrten werden somit einem Fördererelement zugeordnet.

Zur Identifikation der *Anschlusspunkte* werden die Ein- und Ausgangspunkte aller Überfahrten eines Fördererelements ebenfalls mittels eines „Footprints“ auf Überlappungen geprüft. Dadurch ergibt sich die Anzahl sowie die Art der Anschlusspunkte je Fördererelement.

Die *Beziehung zwischen den Förderern* werden die Anschlusspunkte der einzelnen Förderer mit den Anschlusspunkten aller anderen Fördererelemente ebenfalls auf Überlappungen geprüft. So entsteht eine Übersicht über die Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen innerhalb des Layouts.

Zur *Einteilung der Fördererelemente* in Förderertypen wird die Kombination der 2D-Bewegungstypen und der 3D-Bewegungstypen (resultierend aus der Ermittlung der Ebenenzugehörigkeit) analysiert. Daraus ergeben sich die in Abbildung 5-6 möglichen Förderertypen.

Für jeden Förderertyp wurden im Rahmen des Projekts Eigenschaften hinsichtlich der Definitionen von Maß und Orientierung getroffen. Auf Basis der Einteilung in Förderertypen erfolgt durch eine Analyse der zugehörigen Überfahrten und Anschlusspunkte des Förderelements die Ableitung der spezifischen *Maße und Orientierung* des Förderelements.

Die Zuteilung der erkannten *Sensoren* (Lichtschranken) zu den Förderelementen und die Bestimmung der Position und Orientierung innerhalb des Förderelements erfolgt wiederum auf Basis der Relation der Zeitstempel der Sensorerkennung und der Zeitstempel der Bewegungspfade aus den Überfahrten.

6.3.2 Datengenerierung durch Entkopplung der Rekonstruktion von der Dateninterpretation

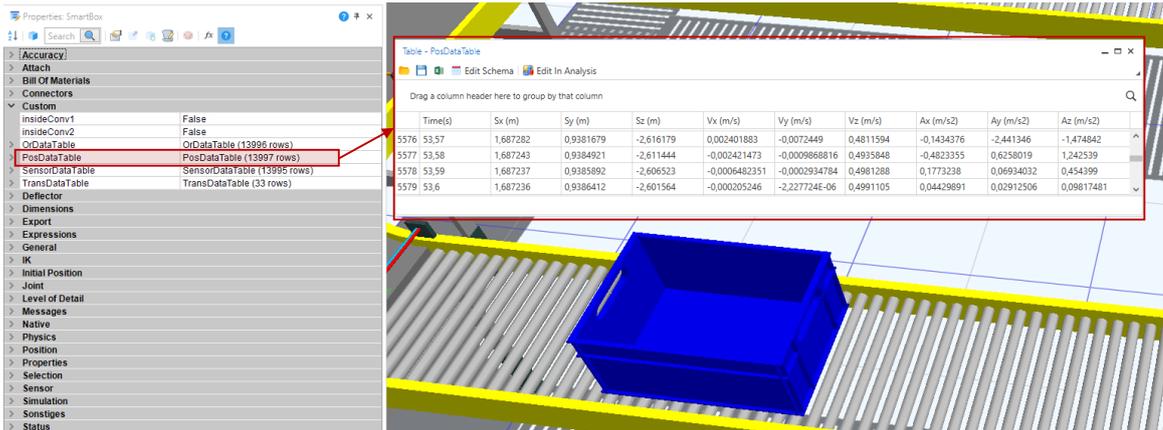
Um die Umsetzung des Rekonstruktionsverfahrens unabhängig vom Vorhandensein und der Qualität der in der Dateninterpretation ermittelten Bewegungs- und Umgebungsdaten zu testen, wurde im Rahmen des Forschungsprojekts ein Verfahren zur Erzeugung synthetischer Daten erarbeitet. Um die Input-Struktur für den Matlab Algorithmus zu befüllen, müssen daher für mehrere Durchläufe

- die Positionen und Orientierungen eines Behälters,
- die Übergänge zwischen den Förderelementen sowie
- die Zeitstempel des Passierens einer Lichtschranke erzeugt werden.

Hierzu wurde eine Lösung in der Software Demo3D implementiert. In diesem Tool lassen sich Layouts von Förderanlagen mithilfe von Bibliothekselementen erstellen und parametrisieren, sodass ein ablauffähiges Modell entsteht. Es lassen sich also verschiedene Elemente eines Referenzszenarios abbilden.

Um das Szenario eines intelligenten Behälters zu simulieren, wird in das Modell ein Fördergut eingesetzt, für welches verschiedene Funktionen in Software-Skripten hinterlegt sind.

- Die erste Funktion beinhaltet die **Speicherung der Position und Orientierung**. Hierbei wird in jedem Zeitschritt der laufenden Simulation (Event in Demo3D: „OnMoved“) die aktuelle Position und Orientierung (in Weltkoordinaten) in Datenstrukturen (*PosDataTable*, *OrDataTable*), welche dem Behälter zugeordnet sind, gespeichert. Abbildung 6-30 zeigt ein Beispiel der aufgenommenen Positionsdaten während einer Überfahrt des Behälters.



Time(s)	Sx (m)	Sy (m)	Sz (m)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vz (m/s)	Ax (m/s ²)	Ay (m/s ²)	Az (m/s ²)	
5576	53,57	1,687282	0,9381679	-2,616179	0,002401883	-0,0072449	0,4811594	-0,1434376	-2,441346	-1,1474842
5577	53,58	1,687243	0,9384921	-2,611444	-0,002421473	-0,0009868816	0,4935948	-0,4823355	0,6258019	1,242539
5578	53,59	1,687237	0,9385892	-2,606523	-0,0006482351	-0,0002934784	0,4981288	0,1773238	0,06934032	0,454399
5579	53,6	1,687236	0,9386412	-2,601564	-0,000205246	-2,227724E-06	0,4991105	0,04429891	0,02912506	0,09817481

Abbildung 6-30: Beispiel - Aufgenommene Positionsdaten während einer Behälterbewegung in Demo3D

- Eine weitere Funktion bildet die **Erkennung der Übergänge** ab. Um dies zu realisieren, werden an jedem Übergang zwischen Fördererelementen manuell Sensoren platziert. Da ein Sensor nicht exakt zwischen zwei Fördererelementen platziert werden kann, wird dies durch zwei Sensoren realisiert: einer am Ende des einen Förderers und einer am Anfang des folgenden Förderers (siehe Abbildung 6-31). Der Übertrittspunkt entspricht dann der Mitte zwischen den beiden Sensoren. Werden diese durch den Behälter während seiner Überfahrt betätigt (Events in Demo3D: „OnBlocked“ und „OnCleared“), so wird der entsprechende Zeitstempel in der zugehörigen Datenstruktur (*TransDataTable*) abgespeichert.

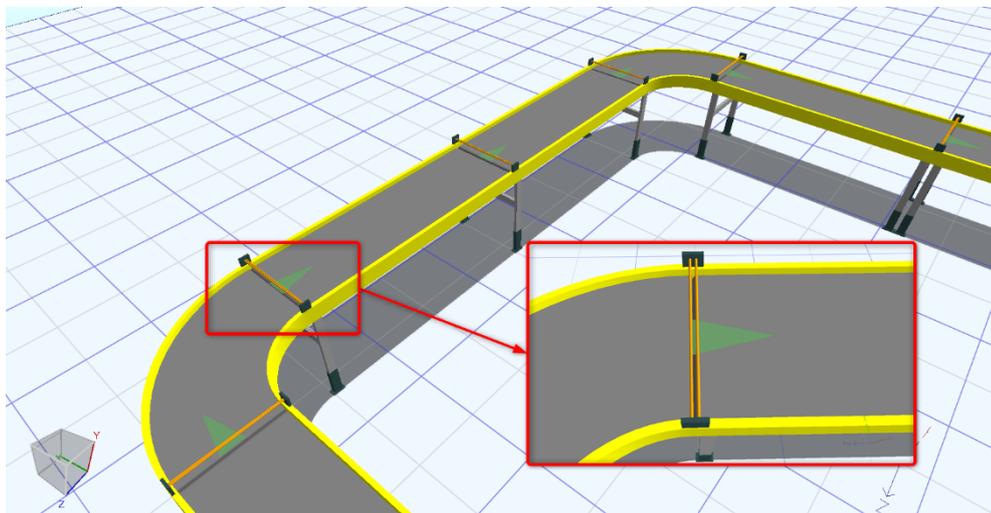


Abbildung 6-31: Beispiel - Sensoren zur Erzeugung der synthetischen Daten zu den Übergängen zwischen Fördererelementen

- Zur **Detektion von Lichtschranken** werden im Modell Lichtschranken an verschiedenen Positionen platziert. Deren Status wird ebenfalls durch die Demo3D Events „OnBlocked“ und „OnCleared“ überwacht. Für die Zeit

zwischen dem Blockieren der Lichtschranke und dem Verlassen des Lichtschrankenbereichs durch den Behälter wird das Erkennungssignal in der entsprechenden Datenstruktur (*SensorDataTable*) mit dem Zustand „1“ gespeichert (siehe Abbildung 6-32). Dies entspricht nicht exakt dem Verhalten, was durch den intelligenten Behälter ausgelöst wird, da in der realen Umsetzung nicht der Sensor sein Blockieren meldet, sondern die Photodioden am Behälter ausschlaggebend für die Dauer des „1“-Signals sind. Für das Rekonstruktionsverfahren kann dies allerdings analog betrachtet werden und verfälscht das Ergebnis nicht.

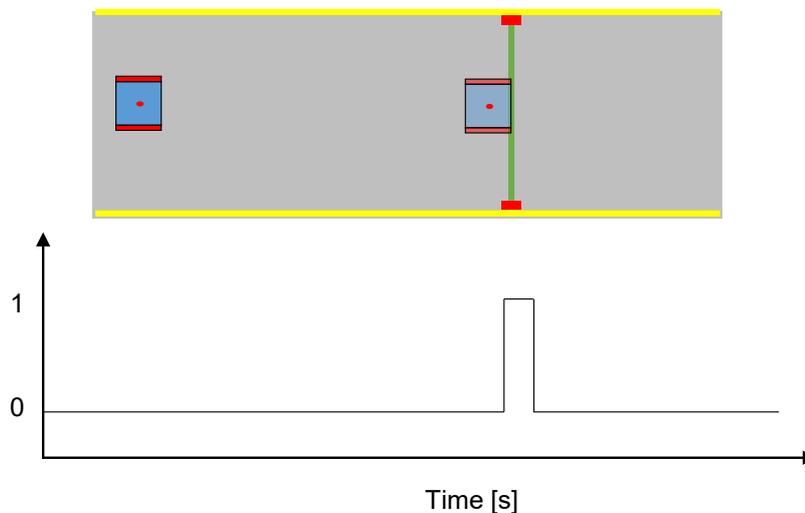


Abbildung 6-32: Beispiel - Detektion eines Sensors mit dem zugehörigen Signalverlauf

6.3.3 Umsetzungsbeispiel Referenzszenario

Um die Umsetzung des Rekonstruktionsverfahrens zu prüfen, wurde für die zuvor beschriebene Generierung von synthetischen Daten in Demo3D ein Referenzszenario umgesetzt, welches die in Tabelle 6-3 Fördererlemente der Referenz-Anlagenkonfiguration enthält. Somit werden alle Komponenten außer eine Steigung mit Tragkettenförderern abgedeckt. Da die Erfassung der Oberfläche allerdings nicht im Fokus des Umsetzungsbeispiels steht und eine Steigung durch einen Bandförderer eingebracht wird, kann dennoch von einem repräsentativen Szenario für die Bewertung der Umsetzung der adressierten Module gesprochen werden.

Tabelle 6-3: Anzahl der vorkommenden Referenzelemente im Umsetzungsbeispiel

Fördererelement (Referenz-Anlagenkonfiguration)	Ausprägung	Anzahl in Umsetzungsbeispiel
Rollenbahn	Gerade	9
	Kurve	1
Bandförderer	Gerade	4
	Steigung	1
	Kurve	1
Tragkettenförderer	Gerade	1
	Steigung	0
Umsetzer	Gurt-/Hubumsetzer	3
	Kettenabschieber	2
	Drehtisch	3
	Pusher	1
Aufzug/Senkrechtförderer	--	1

Das resultierende Referenzszenario, umgesetzt in Demo3D, ist in Abbildung 6-33 visualisiert. Hieraus wurden die in 6.3.2 Datenstrukturen extrahiert, um synthetische Daten für den Test des Rekonstruktionsverfahrens zu erzeugen.

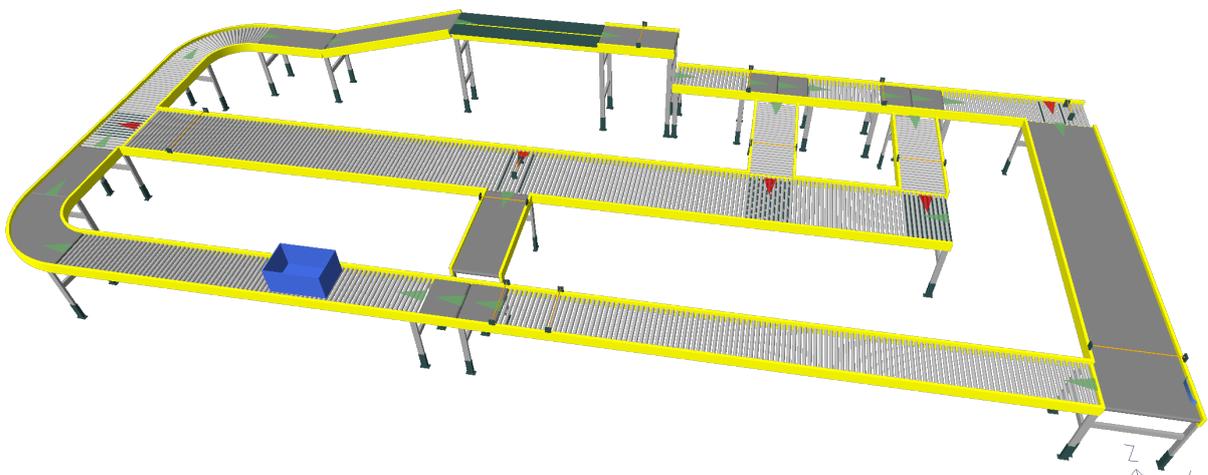


Abbildung 6-33: Umgesetztes Referenzszenario

Hierbei werden durch den intelligenten Behälter drei verschiedene Runden befahren (siehe Abbildung 6-34, Abbildung 6-35 und Abbildung 6-36).

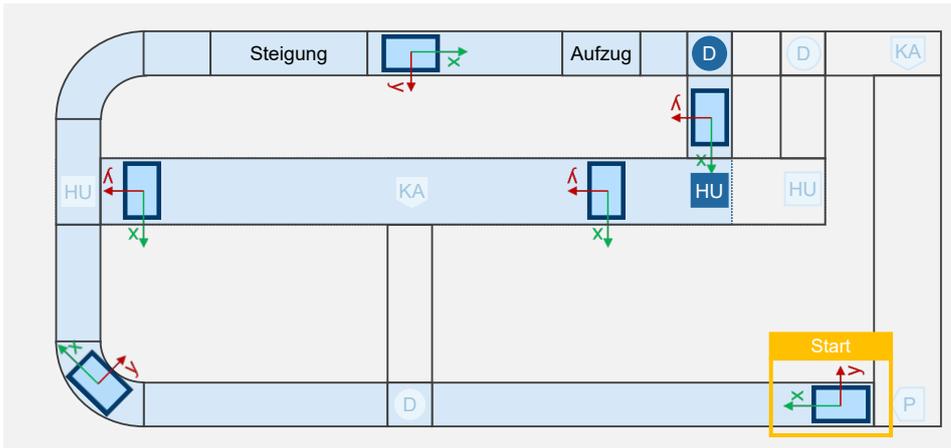


Abbildung 6-34: Umsetzungsbeispiel - Runde 1 (blaue Markierung)

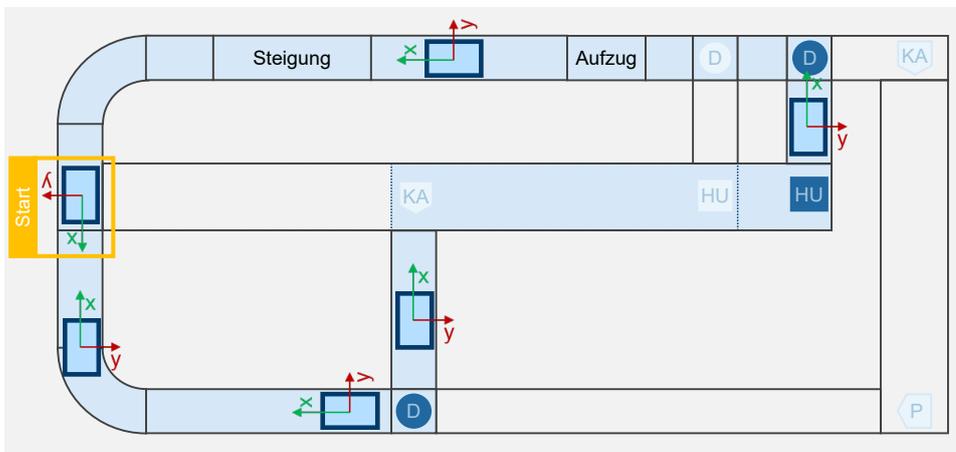


Abbildung 6-35: Umsetzungsbeispiel - Runde 2 (blaue Markierung)

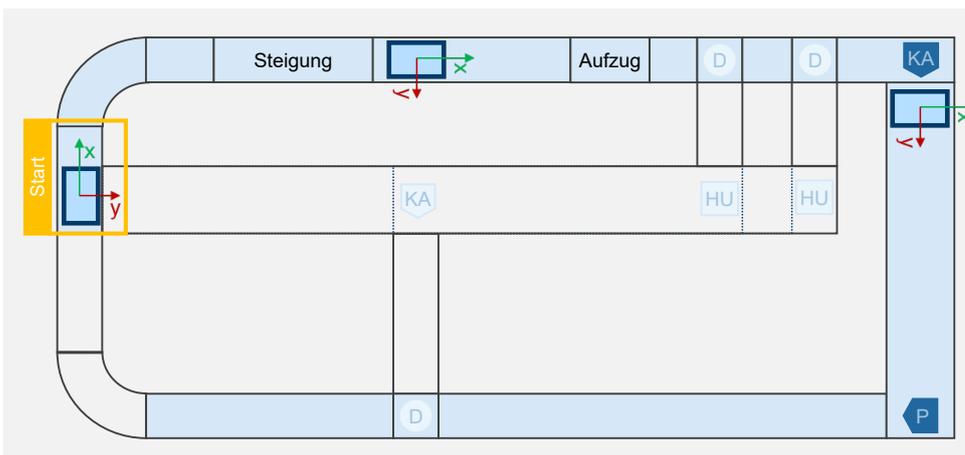


Abbildung 6-36: Umsetzungsbeispiel - Runde 3 (blaue Markierung)

Durch die Ausführung des Rekonstruktionsalgorithmus in Matlab wird der Bewegungspfad (Position und Orientierung) anhand der Übergänge in insgesamt 46 Überfahrten geteilt, was dem erwarteten Wert entspricht (Visualisierung des Erwartungswerts s. Abbildung 6-37)

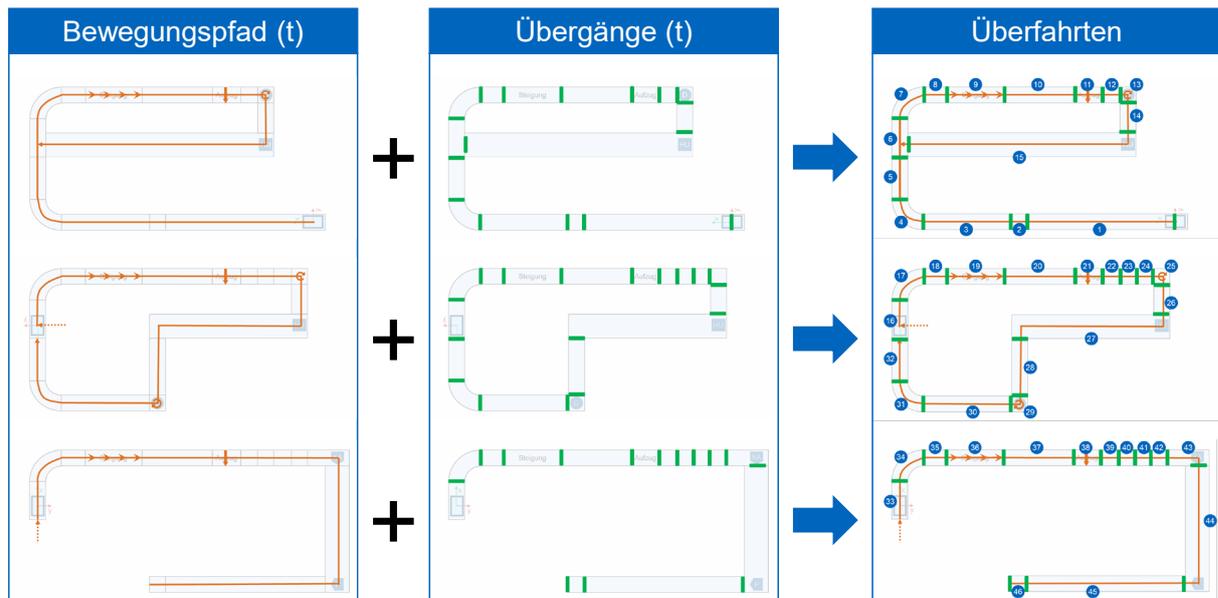


Abbildung 6-37: Umsetzungsbeispiel - Darstellung der Aufteilung des aufgenommenen Bewegungspfad in 46 Überfahrten

Die Einteilung in 2D-Bewegungstypen anhand des in 6.3.1 beschriebenen Verfahrens ergibt eine Datenstruktur, welche den 46 erkannten Überfahrten neben ihrem Bewegungspfad, dem Eintritts- und Austrittspunkt ebenso den erkannten Bewegungstyp zuordnet. Das Resultat ist als Auszug der Datenstruktur in Matlab in Abbildung 6-38 exemplarisch dargestellt. Nach der Analyse der 3D-Bewegung erfolgt eine Aufteilung der Überfahrten in zwei verschiedene Ebenen unterschiedlicher Höhe (insgesamt 40 Überfahrten können den beiden Ebenen zugeordnet werden), Lift-Überfahrten (drei Überfahrten können dieser Kategorie zugeordnet werden) sowie Steigungen (es können ebenso drei Überfahrten zugeordnet werden).

Fields	[-E] Path	[-E] In	[-E] Out	[str] MotionType
1	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
2	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
3	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
4	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"curve"
5	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
6	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
7	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"curve"
8	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
9	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
10	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
11	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
12	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
13	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"turn"
14	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
15	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"L"
16	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"L"
17	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"curve"
18	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
19	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
20	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
21	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
22	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
23	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
24	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
25	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"turn"
26	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
27	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"Z"
28	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
29	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"turn"
30	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
31	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"curve"
32	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
33	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
34	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"curve"
35	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
36	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
37	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
38	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
39	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
40	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
41	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
42	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
43	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"L"
44	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"L"
45	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"
46	1x1 struct	1x1 struct	1x1 struct	"linear"

Abbildung 6-38: Umsetzungsbeispiel - Exemplarische Darstellung der Datenstruktur der Überfahrten nach der Einteilung in 2D-Bewegungstypen



Abbildung 6-39: Umsetzungsbeispiel - Darstellung der Überlappungsprüfung der Überfahrten mit dem Ziel der Identifikation der Fördererlemente

Ebene 1			
Fields	Transitions	Terminals	UniqueTransitions
1	1x1 struct	1x2 struct	1x1 struct
2	1x1 struct	1x2 struct	1x1 struct
3	1x1 struct	1x2 struct	1x1 struct
4	1x1 struct	1x2 struct	1x1 struct
5	1x2 struct	1x3 struct	1x2 struct
6	1x2 struct	1x2 struct	1x1 struct
7	1x2 struct	1x4 struct	1x2 struct
8	1x1 struct	1x2 struct	1x1 struct
9	1x3 struct	1x3 struct	1x2 struct
10	1x3 struct	1x2 struct	1x1 struct
11	1x3 struct	1x2 struct	1x1 struct
12	1x3 struct	1x2 struct	1x1 struct
13	1x3 struct	1x3 struct	1x2 struct
14	1x2 struct	1x2 struct	1x1 struct
15	1x2 struct	1x2 struct	1x1 struct
16	1x2 struct	1x2 struct	1x1 struct
17	1x3 struct	1x3 struct	1x2 struct
18	1x2 struct	1x3 struct	1x2 struct

Ebene 2	
Field	Value
Transitions	1x3 struct
Terminals	1x2 struct
UniqueTransitions	1x1 struct

Steigungen	
Field	Value
Transitions	1x3 struct
Terminals	1x2 struct
UniqueTransitions	1x1 struct

Lift	
Field	Value
Transitions	1x3 struct
TerminalsLevels	1x2 struct
Terminals	1x2 struct
UniqueTransitions	1x1 struct

Abbildung 6-40: Umsetzungsbeispiel - Zuordnung der Förderer inkl. deren Datenstruktur (Überfahrten, Anschlusspunkte) zu den Ebenentypen

Ein Auszug aus der logischen Zuteilung der Überfahrten (Transitions) und Anschlusspunkte (Terminals) zu Förderern (Conveyors) ist in Abbildung 6-40 dargestellt. Die Förderer werden dabei durch die Prüfung der Überlappungen (visuell dargestellt in Abbildung 6-39) ermittelt und den entsprechenden Ebenen zugeteilt:

- Ebene 1: Bestehend aus 18 Fördererelementen
- Ebene 2: Bestehend aus einem Fördererelement
- Steigungen: Bestehend aus einem Fördererelement
- Lift: Bestehend aus einem Fördererelement

Eine Ausführung der Geometriererkennung durch den implementierten Algorithmus gibt letztlich Aufschluss über die Beschaffenheit des Layouts. Hierbei wird die Rahmenbedingung der spezifischen Förderanlage angewandt, dass Eck- bzw. Kurvenbewegungen nur in Vielfachen von 90° zugelassen sind, um eine höhere Genauigkeit zu erhalten.

Die Rekonstruktion der Lichtschranken wird zwar im Zuge der Erstellung des Verfahrens ausgearbeitet und getestet, für das Beispiel des Referenzlayouts allerdings nicht eingesetzt.

Die Ergebnisse der Layout- und Geometrierekonstruktion werden zum einen im *.csv Format automatisch abgespeichert (Ergebnisauszug des Umsetzungsbeispiels siehe Abbildung 6-41). Diese Datei bildet die Schnittstelle zu Modellierungssoftware, welche in der Praxis zum Einsatz kommt. Durch die vorgegebene Struktur kann einmalig ein Übersetzer formuliert werden, der diese in das für die Software passende Format zur (teil)automatischen Modellerstellung überführt. Laut Aussage der Mitglieder des PA, welche Modellierungssoftware einsetzen, ist dies aufwandsarm realisierbar.

Typ	Name	Pos (X)	Pos (Y)	Pos (Z)	Länge	Breite	Höhe	Or (X)	Or (Y)	Or (Z)	Kurven- winkel	Kurven- radius	Steigungs- winkel	Terminal(1) Position.X	Terminal(1) Position.Y	Terminal(1) Position.Z	Terminal(1) Direction	Terminal(1) Width	Terminal(1) Angle	Terminal(1) ConnectedTo
SC	SC1	-1.74	-1.88	0.80	4.30	0.60	0.80	0.00	0.00	90.00				-1.39	-0.04	0.80	Out	0.60	0.00	SC13 - Terminal1
SC	SC2	-1.29	-4.34	0.80	0.60	1.69	0.80	0.00	0.00	90.00				-1.81	-4.02	0.81	Out	0.60	90.00	SC1 - Terminal2
SC	SC3	4.58	-1.11	0.80	1.19	0.60	0.80	0.00	0.00	-90.00				4.58	-0.51	0.80	Out	0.60	90.00	TT3 - Terminal1
SC	SC4	-0.09	-3.25	0.81	1.37	0.60	0.81	0.00	0.00	-90.00				-0.08	-2.57	0.81	Out	0.60	90.00	SC6 - Terminal2
SC	SC5	0.80	-4.41	0.80	0.92	0.60	0.80	0.00	0.00	0.00				0.34	-4.41	0.80	Out	0.60	-180.00	TT1 - Terminal3
SC	SC6	4.53	-2.12	0.81	9.85	0.84	0.81	0.00	0.00	0.00				4.58	-1.70	0.81	Out	0.60	90.00	SC3 - Terminal2
SC	SC7	1.67	-3.34	0.81	1.47	0.60	0.81	0.00	0.00	-90.00				1.67	-2.61	0.81	Out	0.60	90.00	SC6 - Terminal4
SC	SC8	2.55	-4.38	0.80	0.97	0.60	0.80	0.00	0.00	0.00				2.07	-4.38	0.80	Out	0.60	180.00	TT2 - Terminal2
SC	SC9	8.48	-4.38	0.81	1.00	0.60	0.81	0.00	0.00	0.00				7.98	-4.38	0.82	Out	0.60	180.00	IC1 - Terminal2
SC	SC10	9.71	-2.77	0.80	2.00	0.60	0.80	0.00	0.00	90.00				9.45	-2.10	0.80	In	0.60	0.00	SC6 - Terminal3
SC	SC11	9.71	-1.20	0.80	1.14	0.60	0.80	0.00	0.00	90.00				9.72	-1.77	0.80	Out	0.60	-90.00	SC10 - Terminal3
SC	SC12	7.01	0.00	0.80	3.98	0.60	0.80	0.00	0.00	180.00				9.00	0.00	0.80	Out	0.60	0.00	CC2 - Terminal2
SC	SC13	1.43	-0.02	0.80	0.64	5.56	0.80	0.00	0.00	90.00				-1.35	-0.04	0.80	In	0.60	0.00	SC1 - Terminal1
SC	SC14	5.03	-4.38	1.32	1.99	0.60	1.32	0.00	0.00	0.00				4.04	-4.38	1.32	Out	0.60	0.00	Lift1 - Terminal2
CC	CC1	8.97	-3.64	0.80		0.60	0.80	0.00	0.00	0.00	-90.00	0.75		8.98	-4.38	0.80	Out	0.60	-180.00	SC9 - Terminal2
CC	CC2	8.98	-0.74	0.80		0.60	0.80	0.00	0.00	90.00	-90.00	0.74		9.70	-0.62	0.80	Out	0.60	-90.00	SC11 - Terminal2
TT	TT1	-0.09	-4.41	0.80	0.75	0.60	0.80	0.00	0.00	-180.00				-0.46	-4.41	0.80	Out	0.60	-180.00	SC2 - Terminal2
TT	TT2	1.67	-4.38	0.80	0.81	0.60	0.80	0.00	0.00	-180.00				1.27	-4.41	0.80	Out	0.60	-180.00	SC5 - Terminal2
TT	TT3	4.58	0.03	0.80	1.11	0.60	0.80	0.00	0.00	0.00				4.58	-0.52	0.80	In	0.60	-90.00	SC3 - Terminal1
IC	IC1	7.00	-4.38	1.07	1.96	0.60	1.07	0.00	0.00	0.00		-14.60		6.06	-4.38	1.32	Out	0.60	180.00	SC14 - Terminal2
Lift	Lift1	3.54	-4.38	0.00	0.99	0.60	1.32	0.00	0.00	-180.00				3.04	-4.38	0.80	Out	0.60	-180.00	SC8 - Terminal2

Abbildung 6-41: Umsetzungsbeispiel - Auszug aus der resultierenden *.csv Datei

Neben der tabellarischen Ausgabe der Rekonstruktionsergebnisse als Schnittstelle zur Modellierungssoftware wird auch eine grafische Ausgabe implementiert, die das

Layout in Form von Blöcken darstellt. So ist das Ergebnis des Verfahrens einfach einsehbar und dient aufgrund seiner Verständlichkeit als Basis für die korrekte Implementierung der genannten Übersetzungsfunktion für die Modellierungssoftware. Das Ergebnis als Blocklayout ist in Abbildung 6-42 dargestellt und entspricht dem Layout, welches zur Extraktion der synthetischen Bewegungsdaten erstellt wurde.

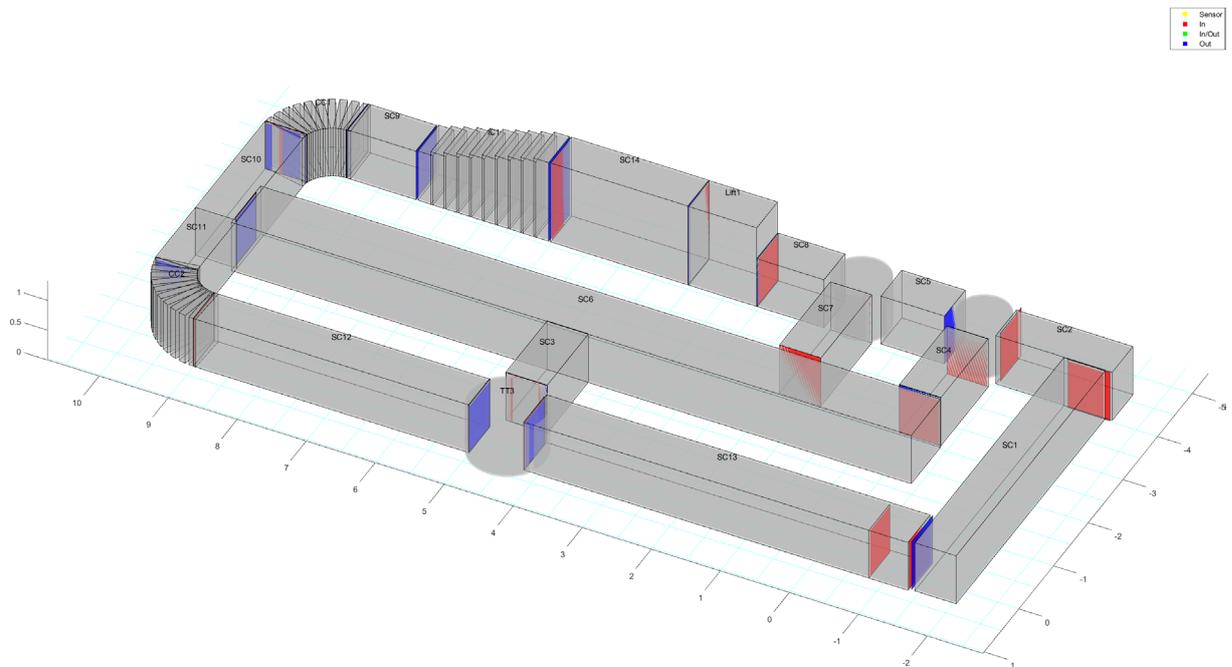


Abbildung 6-42: Umsetzungsbeispiel - Ergebnis des Rekonstruktionsverfahrens visualisiert durch ein Blocklayout

7 Bewertung des Gesamtkonzepts

7.1 Qualitative Bewertung der Umsetzbarkeit

Durch das in Kapitel 4 abgeleitete Gesamtkonzept und die Detaillierung der Teilkonzepte in Kapitel 5 wird der Grundstein für eine Umsetzung des erarbeiteten Verfahrens zur aufwandsarmen Extraktion von Daten mit dem Ziel der Rekonstruktion von Modellierungsdaten für bestehende Förderanlagen gelegt. Durch die in Kapitel 6 durchgeführte Implementierung der Teilkonzepte lassen sich die Umsetzbarkeit qualitativ bewerten und Verbesserungspotenziale für eine mögliche industrielle Umsetzung ableiten. Durch die Entkopplung zwischen der Schicht der Dateninterpretation und der Rekonstruktion konnte im Rahmen des Projekts kein durchgängiges Verfahren getestet werden. Stattdessen werden in den folgenden Unterabschnitten die Bewertungen der Teilkonzepte Datenaufnahme (7.1.1), Dateninterpretation (7.1.2) und Rekonstruktion (7.1.3) separat durchgeführt.

7.1.1 Datenaufnahme

Durch die ausgewählte **Messsensorik** konnten in der Umsetzung alle Messdaten in der erwarteten Qualität aufgenommen werden. Bei einer Auswahl für eine industrielle Umsetzung sollte jedoch immer der aktuelle Stand der Technik für Messsensorik betrachtet werden, um die Potenziale des Verfahrens auszuschöpfen. Hierbei ist – insbesondere im Hinblick auf kleine Ladungsträger – der Bauraum der Sensorik sowie deren Anbringungsort in Kombination mit den anderen Komponenten zu beachten.

Durch die Umsetzung der **Elektronik** mit Zukaufkomponenten (Raspberry Pi, Power Bank, Festplatte) konnte das Konzept vergleichsweise aufwandsarm umgesetzt werden, da sich der Entwicklungsaufwand für Elektronikkomponenten auf die Konzipierung und Umsetzung der Verteiler- und Zentralplatine beschränkt. In einer weiteren Ausbaustufe sollte analysiert werden, ob sich die Komponenten in einem gemeinsamen Modul integrieren lassen, welches nur aus einer (statt drei) zentralen Einheit mit Rechenleistung, Speicherplatz und Energieversorgung für die verschiedene Messsensorik besteht. Somit können beispielsweise die Funktionen der Elemente besser auf den Anwendungsfall optimiert und der Bauraum effizienter genutzt werden. Dies sollte allerdings immer in einer Aufwand-Nutzen Betrachtung geschehen. So kann es insbesondere für kleinere Unternehmen ohne eigene Entwicklungsabteilung sinnvoller sein, das Konzept, wie vorgestellt, mit Zukaufkomponenten umzusetzen.

Im Rahmen der Umsetzung der Dateninterpretation ergab sich für die Elektronik eine

zusätzliche Anforderung. Insbesondere für die kombinierte Interpretation der Messsignale (z. B. Betrachtung von zwei Kameras oder zeitgleiche Betrachtung von IMU und Kamera), sollte zudem auf eine Synchronisation der Zeiten der Einplatinencomputer geachtet werden.

Die **Erfassungseinheit** konnte im Rahmen der Umsetzung wie im Konzept geplant realisiert werden. Im Modulpaket können alle Komponenten der Sensorik und Elektronik integriert und vernetzt werden. Die einzelnen Schichten des Modulpakets lassen sich schrittweise zusammensetzen und verkabeln, sodass ein Zugang zu allen Komponenten gewährt ist.

Der Einsatz des Modulpakets in die Modulaufnahmen lässt sich einfach und robust vollziehen, sodass die Flexibilität des Konzepts für verschiedene Behältergrößen gewährleistet ist. Die Realisierung der Modulaufnahmen für die beiden größeren Behälter erweist sich als passend für die betrachteten Innenmaße der Behälter.

Als Verbesserungspotenzial sei jedoch die Konzipierung der Federverspannung der Querbefestigung zu nennen. Diese hat den Zweck, die Aufnahmeeinheiten im Zentrum (relativ zur Breite) zu fixieren. Die Fixierung der Federverspannung gestaltet sich im aktuellen Konzept als herausfordernd, weshalb der Einsatz der Modulaufnahmen bzw. des Modulpakets umständlich ist. Zudem kann durch eine entsprechende Anbringung der Längsfixierung im Behälter eine Querzentrierung erreicht werden, wodurch auf die vorgesehene Federverspannung unter Umständen verzichtet werden kann.

7.1.2 Dateninterpretation

In der Schicht der Dateninterpretation wurden verschiedene Module exemplarisch umgesetzt. In kleinem Maßstab konnte so die generelle Umsetzbarkeit und die Integrierbarkeit in das Gesamtkonzept gezeigt werden. Ausgehend von den in der Datenaufnahme generierten Messdaten konnten so zeitstempelbehaftete Bewegungs- und Umgebungsdaten erzeugt werden. Für eine Umsetzung der Module der Dateninterpretation in der Praxis sind allerdings verschiedene Faktoren zu beachten. Zunächst muss für die Implementierung der Module immer der aktuelle Stand der Technik betrachtet werden. Insbesondere Ansätze des Maschinellen Lernens oder der Bildverarbeitung sind aktuell Gegenstand der Forschung, weshalb hier Potenziale für zukünftige Umsetzungen gesehen werden. Des Weiteren sind diese Verfahren immer abhängig von einer vorhandenen Datenbasis. Im Vorfeld einer industriellen Umsetzung muss also diese Datenbasis erstellt und für die entsprechenden Algorithmen aufbereitet werden. Dazu müssen Daten mithilfe des intelligenten Förderguts auf einer möglichst großen Anzahl an Förderanlagen mit einer großen Varianz hinsichtlich vorkommender Fördererlemente und Herstellern erfasst werden.

7.1.3 Rekonstruktion

Für das entworfene Rekonstruktionsverfahren konnte eine Mehrzahl der vorgesehenen Module im Rahmen der Projektlaufzeit in der Software Matlab umgesetzt werden. Durch die Erzeugung der synthetischen (optimalen) Bewegungs- und Umgebungsdaten konnte dieses Rekonstruktionsverfahren unabhängig von der möglichen Qualität der Ergebnisse aus den Modulen der Dateninterpretation getestet werden. Zudem erlaubt diese Entkopplung den Test von einer Vielzahl an möglichen Anlagenlayouts mit verschiedensten Fördererelementen – unabhängig von der Zugänglichkeit realer Anlagen.

Durch die Extraktion der synthetischen Bewegungsdaten aus einem Layout bestehend aus den Komponenten des Referenzszenarios konnte gezeigt werden, dass durch das Rekonstruktionsverfahren die Modellierungsdaten erstellt werden, welche für eine Modellierung des Layouts benötigt werden. Die Anforderungen an das Rekonstruktionsverfahren können somit als erfüllt betrachtet werden.

7.1.4 Erfüllung der Hypothese

In Abschnitt 4.1 wurde die Hypothese aufgestellt, dass durch ein intelligentes Fördergut Messdaten aufgenommen, gespeichert und anschließend so verarbeitet und interpretiert werden können, dass sich daraus Modellierungsdaten ergeben.

Durch den Beweis der Umsetzbarkeit des intelligenten Behälters kann bewiesen werden, dass hierdurch Messdaten aufgenommen und gespeichert werden können. Die Verwendung der erzeugten Messdaten in der Dateninterpretation bildet den ersten Schritt der Verarbeitung und Interpretation der Daten. Durch die Prüfung der Umsetzbarkeit einzelner Module kann die Hypothese für einzelne Pfade bestätigt werden. Durch die Entkopplung an der Stelle der entstehenden Bewegungs- und Umgebungsdaten kann der zweite Schritt der Verarbeitung und Interpretation der Daten nicht durchgängig getestet werden. Synthetisch erzeugte (optimale) Daten liefern allerdings die Bestätigung des zweiten Teils der Hypothese.

Dennoch kann im Rahmen der erfolgten Umsetzung die Hypothese nur in Teilen bewiesen, jedoch nicht widerlegt werden. Daher sollte es Ziel weiterer Forschungsaktivitäten sein, die Durchgängigkeit von der Datenaufnahme über die Dateninterpretation bis zur Rekonstruktion zu prüfen, um die Erfüllung der Hypothese vollständig zu bewerten.

7.2 Validierung der Anforderungen

Eine Validierung, ob die in 4.2.1 beschriebenen Anforderungen an das Erfassungssystem durch die Umsetzung des intelligenten Behälters, welche in 6.1 beschrieben wurde, erfüllt werden, fand im Rahmen einer Online-Umfrage statt. Diese wurde mit acht Mitgliedern (N = 8) des Projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt, welcher sich aus Anwendern und Herstellern von Förderanlagen sowie aus Modellierungsexperten zusammensetzt. Die Online-Umfrage setzt sich aus fünf Hauptfragen zusammen (Gestaltung der Umfrage einsehbar unter Abbildung B-9).

Bewertung der allgemeinen Umsetzung

In der ersten Frage wurde um eine qualitative Bewertung der Gesamtumsetzung des intelligenten Behälters gebeten. Im Bewertungsbereich von *1-nicht gelungen* bis *5-sehr gelungen* bewerteten 62,5 % der Experten die Umsetzung mit der Höchstpunktzahl und 37,5 % mit der zweitbesten Bewertung, was in einer durchschnittlichen Bewertung von 4,63 resultiert.

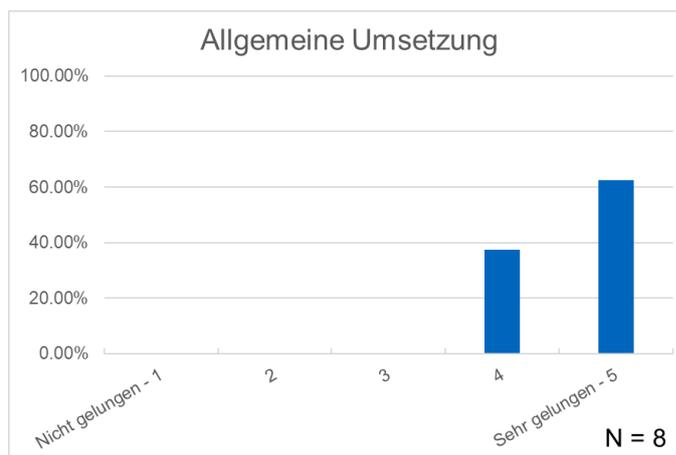


Abbildung 7-1: Bewertung der allgemeinen Umsetzung des Erfassungssystems

Bewertung der Anforderungserfüllung A1 – A3

Die beschriebenen Unteranforderungen der Kategorien A1-A3 wurden einzeln hinsichtlich der Anforderungserfüllung abgefragt. Es waren hierbei Bewertungen zwischen 1-Anforderung nicht erfüllt und 5-Anforderung vollumfassend erfüllt zugelassen.

Die erste Hauptanforderung zielt auf die Vermeidung von Störungen des Anlagenbetriebs ab. Die Umsetzung wurde hierbei in den Unterkategorien *A1.1-Einsatz passiver Messsensorik* sowie *A1.3-Einhaltung der Eigenschaften* des regulär

verwendeten Förderguts mit einer Durchschnittlichen Bewertung von 4,88 bewertet. Die Unterkategorie *A1.2-Integrierbarkeit anlagenspezifischer Merkmale* erreichte 4,75 Punkte im Durchschnitt. Die Zusammensetzung der Bewertung der Unterkategorien A1.1, A1.2 und A1.3 ist in Abbildung 7-2 dargestellt. Die Auswertung der Bewertung lässt darauf schließen, dass die Experten die Vermeidung von Störungen des Anlagenbetriebs allgemein durch die Umsetzung als sehr gut erfüllt sehen.

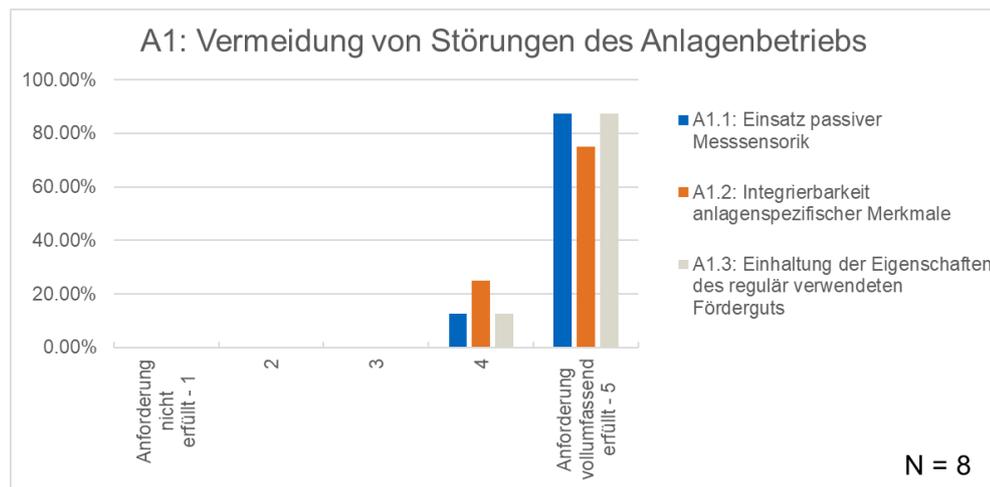


Abbildung 7-2: Bewertung der Anforderungserfüllung A1

Die zweite Anforderungskategorie hatte die Wiederverwendbarkeit des Erfassungssystems zum Ziel. Sowohl die Unteranforderung *A2.1-Einfacher Umbau* als auch *A2.2-Robuster Aufbau* erreichten hierbei eine Bewertung von 4,63. Die genaue Aufteilung der Punktevergabe ist in Abbildung 7-3 einsehbar. Trotz der insgesamt hohen Bewertung von 4,63 ist dennoch eine schlechtere Bewertung im Vergleich zur Kategorie A.1 erkennbar. Durch die Umsetzung des intelligenten Behälters als Demonstrator ergeben sich noch Potenziale hinsichtlich der Robustheit sowie in der Vereinfachung des Umbaus zwischen den Behältergrößen. Dies sollte in einer industriellen Anwendung kritisch betrachtet werden und Optimierungspotenziale identifiziert werden.

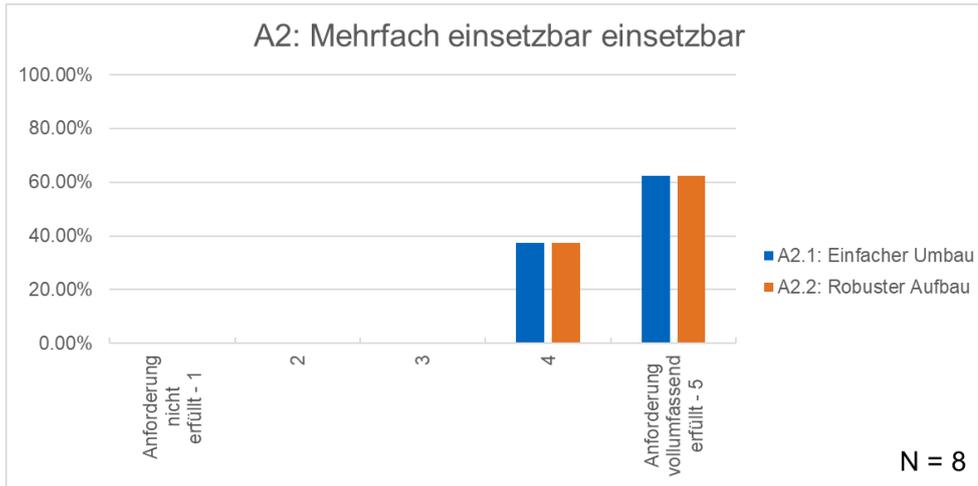


Abbildung 7-3: Bewertung der Anforderungserfüllung A2

Da das Ziel des Projekts eine Reduzierung des Aufwands bei der Erfassung von notwendigen Modellierungsdaten ist, ist die Anforderung A3 nach einem aufwandsarmen Einsatz des Erfassungssystems direkt ableitbar. In der Bewertung der Unteranforderungen erreichte die Kategorie *A3.1-Keine Anpassungen an der Anlage und externen Infrastruktur notwendig* eine durchschnittliche Bewertung von 4,38, die Anforderung *A3.2-Kostengünstige Komponenten* 4,75 Punkte und die Anforderung *A3.3-Autarker Betrieb möglich* eine Gesamtbewertung von 4,88 (Aufteilung der Punktevergabe dargestellt in Abbildung 7-4). Insbesondere die Bewertung der Notwendigkeit von Anpassungen der Anlage und externen Infrastruktur lassen hierbei Potenziale für eine Verbesserung in einer möglichen industriellen Anwendung erkennen. Aus mündlichen Rücksprachen mit verschiedenen Experten geht hervor, dass dies insbesondere auf die Vorgabe der abzufahrenden Routen durch den intelligenten Behälter zutrifft. Im derzeitigen Konzept ist der Anlagenbetreiber dafür verantwortlich, dass das Routing und die Ziele für den Behälter in seinen verschiedenen Durchläufen so vorgegeben werden, dass durch den Behälter alle möglichen Strecken und Zustände mindestens einmal erfasst werden können.

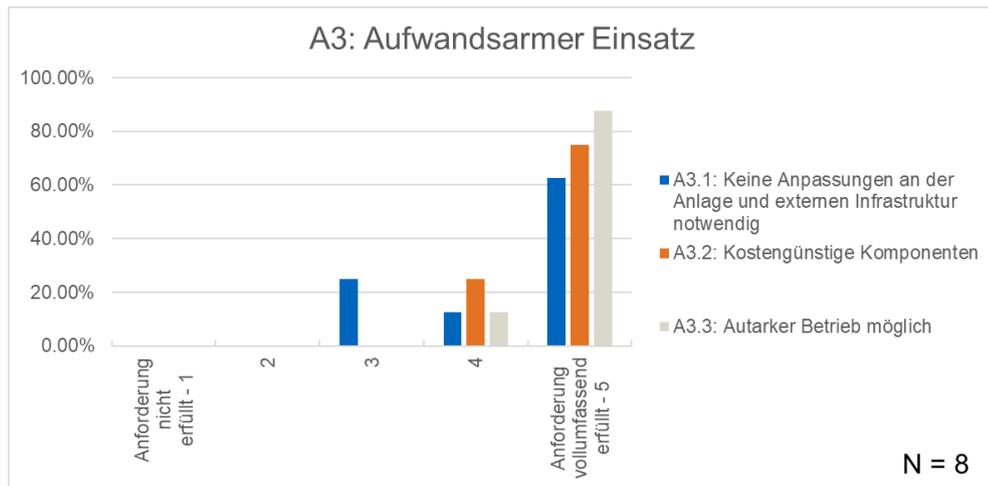


Abbildung 7-4: Bewertung der Anforderungserfüllung A3

Bewertung der Wahrscheinlichkeit des Einsatzes

Abschließend folgt die Einschätzung der Experten, wie wahrscheinlich (1-sehr unwahrscheinlich bis 5-sehr wahrscheinlich) sie das Erfassungssystem, also den intelligenten Behälter in der im Projekt umgesetzten Form einsetzen würden. Dabei bewerteten 25 % der Teilnehmer die Wahrscheinlichkeit mit einem neutralen Wert (3) und 62,5 % mit der Punktzahl 4. 12,5 % gaben an, den umgesetzten intelligenten Behälter sehr wahrscheinlich einzusetzen (s. Abbildung 7-5). Um dieses Ergebnis zu verbessern, sollten insbesondere die in den Anforderungen schlechter bewerteten Kategorien analysiert und bei einer möglichen industriellen Umsetzung beachtet werden.

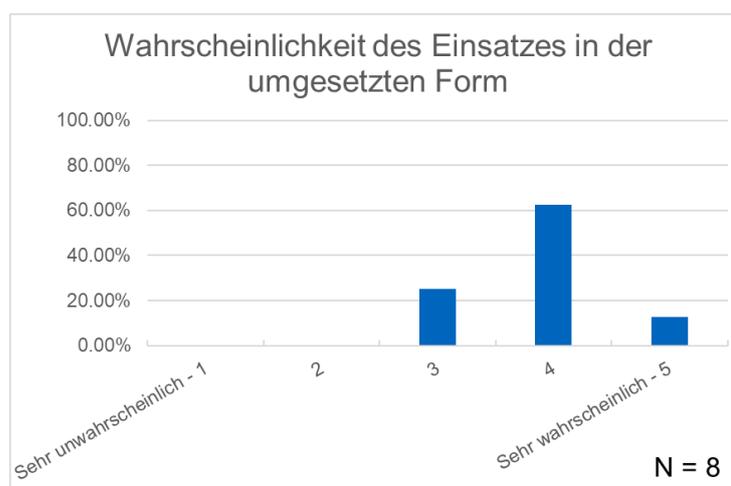


Abbildung 7-5: Einschätzung zum Einsatz in der Praxis

7.3 Bewertung des Nutzens der rekonstruierten Daten

Zur Bewertung des tatsächlichen Nutzens der rekonstruierten Daten, welche in 4.2.2 abgeleitet wurden, wurde analog zum vorhergehenden Absatz eine Online-Umfrage unter acht Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Die Umfrage setzt sich aus vier Hauptfragen zusammen, welche in Abbildung B-10 einsehbar sind. Als Bewertungskriterien sind wiederum Punkte zwischen *1-Kein Nutzen* und *5-Hoher Nutzen* vorgesehen.

Die erste Kategorie der rekonstruierten Modellierungsdaten stellen die Informationen zum Layout dar. Die Anzahl der enthaltenen Förderer sowie die Ermittlung der Bewegungstypen wurde dabei mit einem durchschnittlichen Nutzen von 4,57 bewertet. Der exakte Förderertyp erreichte einen Durchschnittswert von 4,29. Die Nutzenbewertung der Verbindung zwischen den Förderern fiel mit einem Wert von 4,71 am höchsten in dieser Kategorie aus (Aufteilung der Bewertungen s. Abbildung 7-6). Die Bewertungen des Nutzens mit dem neutralen Wert von 3 in den Kategorien „Anzahl der enthaltenen Förderer“ sowie „Förderertyp“ lässt sich unter anderem damit begründen, dass diese Werte in der Regel bei einer Modellerstellung nicht direkt benötigt werden. Sie bilden aber die Grundlage für weitere Rekonstruktionsschritte und können daher trotz der schlechteren Nutzeneinschätzung nicht vernachlässigt werden.

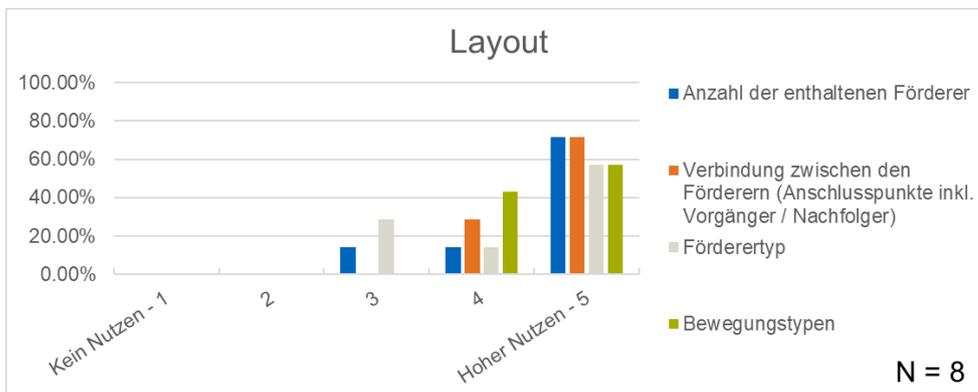


Abbildung 7-6: Bewertung des Nutzens der rekonstruierten Layoutdaten

In der Bewertung des Nutzens der rekonstruierten Geometrieinformationen erreichen die Daten zu Maßen und Positionen der Fördererelemente in 100 % der Fälle einen hohen Nutzen mit der Bewertung 5 bestätigt. Der Nutzen der exakten Breite der Bewegungsabschnitte der Fördererelemente wird hingegen mit einem durchschnittlichen Nutzen von 3,86 eher gering eingeschätzt und kann daher für eine mögliche industrielle Umsetzung geringer priorisiert werden. Die Verteilung der einzelnen Bewertungen ist in Abbildung 7-7 dargestellt

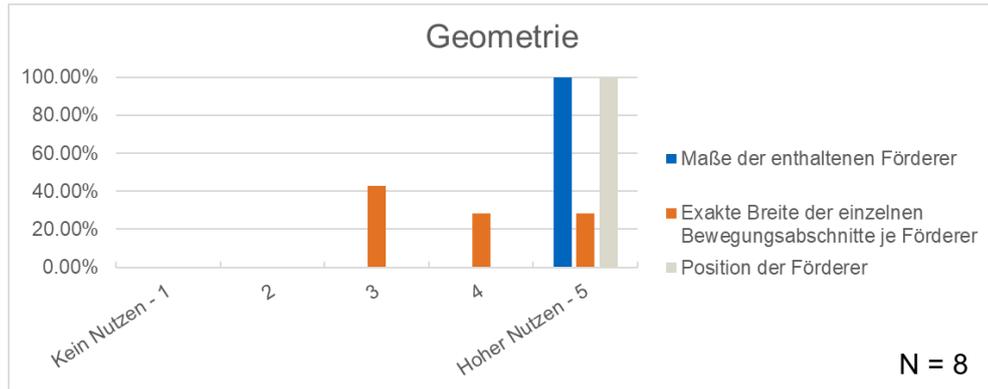


Abbildung 7-7: Bewertung des Nutzens der rekonstruierten Geometriedaten

In der letzten Kategorie der rekonstruierten Daten wird die Bewertung des Nutzens der erfassten Zusatzattribute erfragt. Ebenso wie bei der exakten Breite der Bewegungsabschnitte fällt die Bewertung der Erfassung der Oberfläche mit einer durchschnittlichen Punktzahl von 3,57 relativ gering aus und kann somit in einer industriellen Umsetzung niedriger priorisiert werden. Die Identifikation der Art der Umsetzer wird hingegen mit einer Bewertung von 4,43 als nützlich eingeschätzt. Gleiches trifft für die Ermittlung der exakten Position der Lichtschranken sowie das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil der Bewegungsabschnitte zu, welche mit 4,57 eine hohe Durchschnittsbewertung erhielten. Die Verteilung der Bewertungen in den Unterkategorien ist in Abbildung 7-8 dargestellt.

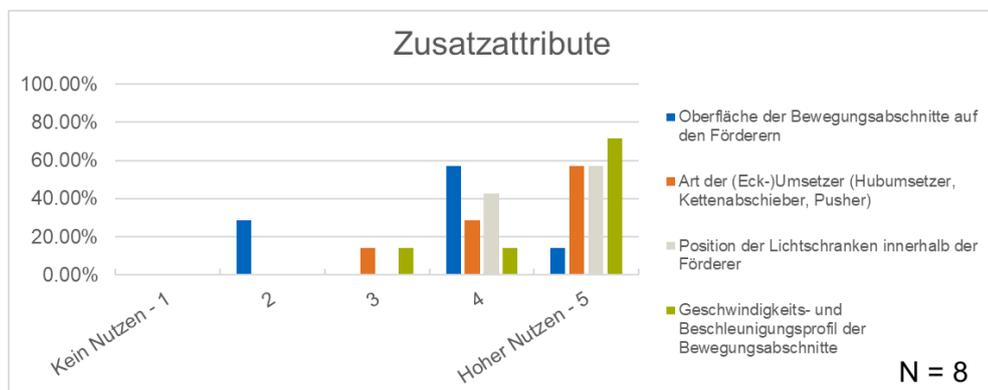


Abbildung 7-8: Bewertung des Nutzens der rekonstruierten Zusatzattribute

Abschließend wurden die Experten nach ihrer Einschätzung hinsichtlich des Nutzens des gesamten Rekonstruktionsverfahrens gefragt. 85,71 % schätzen den Nutzen dabei als hoch ein, 14,29 % bewerten den Nutzen mit der zweitbesten Punktzahl. Somit ergibt sich eine sehr hohe Gesamtbewertung des Nutzens von 4,86. Wie eingangs in Abschnitt 1.1 dargestellt, ist ein hoher Nutzen unter anderem ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit, weshalb diese Bewertung als positive Wertung für die Erreichung der Projektziele gesehen werden kann.

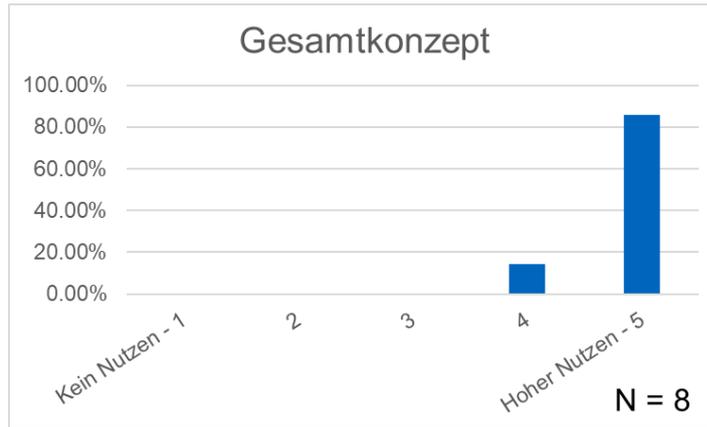


Abbildung 7-9: Bewertung des Rekonstruktionskonzepts

8 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojekts *AGenDa - Automatisierte Generierung digitaler Daten von bestehenden Intralogistikanlagen für eine aufwandsarme Modellerstellung* war es, einen Beitrag dazu zu leisten, dass der Aufwand bei der Datenbeschaffung für eine Modellerstellung für bestehende Förderanlagen der Intralogistik reduziert wird. Dazu sollte ein Verfahren erarbeitet werden, mit dem Daten aufwandsarm in den Förderanlagen aufgenommen werden können und so verarbeitet werden, dass daraus Modellierungsdaten für eine (teil)automatische Modellerstellung entstehen.

Ausgehend von einer Analyse der Grundlagen zu Förderanlagen und deren Modellierung wurde zunächst der Betrachtungsraum des Forschungsprojekts definiert. Dieser setzt sich aus Referenz-Anlagenkonfigurationen und einem definierten Modellierungszweck zusammen. Für den definierten Einsatzzweck in Behälter- und Palettenfördertechnik wurden zwölf Kombinationen aus Förderelementen und verschiedenen Ausprägungen als besonders relevant identifiziert, welche in den Referenzszenarios weiter betrachtet wurden. Als zu erfüllender Modellierungszweck wurde die virtuelle Inbetriebnahme im Rahmen von Retrofit Projekten als vielversprechend identifiziert.

In der Erstellung des Gesamtkonzepts wurde erarbeitet, dass die Datenaufnahme durch einen intelligenten Behälter erfolgt, welcher während seiner Überfahrt über Förderanlagen Daten erfasst. Diese Daten sollten weiterhin für die Ableitung der notwendigen Modellierungsdaten dienen. Hierfür wurden zunächst Anforderungen an die Umsetzung eines intelligenten Behälters erarbeitet und identifiziert, welche Modellierungsdaten letztlich generiert werden müssen, um für eine virtuelle Inbetriebnahme entsprechend (teil)automatisch Modelle erstellen zu können. Basierend darauf wurde ein Grobkonzept entwickelt, welches aus den drei Schritten der *Datenaufnahme* von Messdaten, der *Dateninterpretation* in Bewegungs- und Umgebungsdaten und der *Rekonstruktion* in Modellierungsdaten besteht. Für dieses Gesamtkonzept wurde zudem ein Vorgehen zur Durchführung in der Praxis erarbeitet.

Die drei beschriebenen Schritte wurden anschließend in Feinkonzepten detailliert. Ein Fokus lag zudem darauf, klare Schnittstellen zu definieren, um das Gesamtkonzept unabhängig von einer möglichen technischen Implementierung zu gestalten. Dies ist

insbesondere notwendig, da sich durch einen laufenden technologischen und wissenschaftlichen Fortschritt immer wieder Optimierungspotenziale für eine mögliche Umsetzung ergeben.

Die konzipierten Feinkonzepte wurden im nächsten Schritt umgesetzt. Dabei entstand ein intelligentes Erfassungssystem, welches in einem Modulpaket die Messsensorik und Elektronik enthält und auf die standardisierten Behältermaße angepasst werden kann. Das entstandene Erfassungssystem steht als Demonstrator am Lehrstuhl zur Verfügung. In der Dateninterpretation wurden als „Proof-of-Concept“ verschiedene Module umgesetzt, welche aus den erfassten Messdaten den Bewegungspfad und den Bewegungsabschnitt des Behälters, die Oberfläche der Förderanlage sowie die Position von Lichtschranken ermitteln. Entkoppelt von den entstehenden Bewegungs- und Umgebungsdaten aus der Dateninterpretation wurde das Rekonstruktionsverfahren in Matlab umgesetzt und mittels synthetischer Daten getestet. Durch das zusätzlich implementierte Verfahren zur Generierung synthetischer Daten kann auch das Rekonstruktionsverfahren als Demonstrator mit verschiedenen Anlagenlayouts getestet werden.

Abschließend erfolgte eine qualitative Bewertung der Umsetzbarkeit der Feinkonzepte sowie in diesem Zuge eine Ableitung von Optimierungspotenzialen für eine mögliche industrielle Umsetzung. Hieraus ergaben sich zum einen technische Potenziale für die Umsetzung der Erfassungseinheit. Zum anderen wurde verdeutlicht, dass die Umsetzung der Module der Dateninterpretation teilweise von einer großen Datenbasis an Messdaten abhängig ist, welche im Vorfeld erzeugt werden muss. Eine quantitative Validierung der Anforderungen sowie die quantitative Bewertung des Nutzens der rekonstruierten Modellierungsdaten schließt die Bewertung ab. Die Bewertung der Anforderungserfüllung sowie des Nutzens der rekonstruierten Daten fiel dabei in allen Kategorien sehr positiv aus, was eine breite Akzeptanz des Gesamtkonzepts verspricht.

Entstanden ist ein bewertetes Konzept für die automatische Generierung von Modellierungsdaten für bereits bestehenden Förderanlagen der Intralogistik zur Reduktion des Aufwands bei der Erstellung von Modellen. Gerade bei bestehenden Anlagen sind notwendige Daten oft nicht vollständig, aktuell oder digital vorhanden, sodass der Datenerfassung ein hoher Aufwand zugeschrieben wird. Können Unternehmen diesen Aufwand nicht stemmen, so bleiben für diese die Potenziale der Modellierung und allgemein des datenbehafteten Konzepts der Digitalisierung oft ungenutzt. Somit liefert das Forschungsprojekt einen Beitrag dazu, dass auch für bestehende Förderanlagen neue Technologien zum Einsatz kommen können, wodurch sich zudem deren Lebenszyklus erhöhen kann.

8.2 Ausblick

Für eine mögliche Realisierung im industriellen Umfeld dient dieser Forschungsbericht als Basis für die Umsetzung. Es wurde ein Gesamtkonzept vorgestellt, welches adaptiv für Unternehmen angepasst werden kann, abhängig vom letztlich zu erreichenden Ziel der Datenerfassung und Interpretation. Für diese mögliche Umsetzung sollten jedoch die in Kapitel 7 adressierten Einschränkungen beachtet werden, um die erkannten Optimierungspotenziale vollumfänglich zu nutzen.

Durch das abgeschlossene Projekt wurde zudem ein Grundstein für weitere mögliche Forschungsaktivitäten gelegt. In diesem Projekt lag der Fokus primär auf der Rekonstruktion der Daten zum mechanischen Aufbau von Förderanlagen. Mit der Erfassung von Sensorelementen (hier in der Form von Lichtschranken) wird zudem eine weitere Ebene adressiert. Um eine virtuelle Inbetriebnahme am Steuerungscode im Rahmen von Optimierungen oder Retrofit-Projekten durchführen zu können, müssen aber neben der Sensorik auch die Funktionen der Aktoren bekannt sein. Zudem ist es essenziell für die Verbindung zur Steuerung, dass die Zuordnung der Sensoren zu den Eingängen der Steuerung bzw. die von Aktoren zu den Ausgängen der Steuerung bekannt sind. Durch die Hinzunahme der Analyse von bestehendem Steuerungscode stellt dies eine interessante Fragestellung für weitere Forschungsansätze dar. Ebenso kann neben der mechanischen und elektronischen Rekonstruktion der Anlage auch eine logische Rekonstruktion in Betracht gezogen werden, indem auch hierbei die Erkenntnisse eines intelligenten Behälters mit einer Codeanalyse des bestehenden Steuerungscode verknüpft werden. Dies kann Potenziale für die Ableitung von direkten Optimierungsmöglichkeiten des Steuerungscode beispielsweise im Sinne einer Industrie 4.0 oder einer Identifikation von Energieeinsparpotenzialen bieten.

Die Einbeziehung des bestehenden Steuerungscode bietet daher in vielen Aspekten interessante Möglichkeiten für eine weitere Detaillierung des entworfenen Rekonstruktionsverfahrens und sollte daher Gegenstand weiterer Forschung sein.

Literaturverzeichnis

- [Ank-2018] Anker: PowerCore II 10000 – User Manual, 2018.
- [Arn-2008] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K.: Handbuch Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [Arn-2019] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [Ber-2013] Bergmann, S.: Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2013.
- [Ber-2020] Bergmann, S.; Straßburger, S.: Automatische Modellgenerierung – Stand, Klassifizierung und ein Anwendungsbeispiel. In: Mayer, G., et al. (Hrsg.): Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. Springer Vieweg, Berlin, 2020, S. 333–347.
- [Bof-2021] Bofferding, S.: Verarbeitung und Auswertung von IMU Daten zur Ermittlung der Bewegung eines Behälters auf Förderanlagen der Intralogistik. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching b. München, 2021.
- [Bur-2016] Burger, W.; Burge, M. J.: Digital Image Processing – An Algorithmic Introduction Using Java. Springer, London, 2016.
- [Cal-2010] Calonder, M.; Lepetit, V.; Strecha, C.; Fua, P.: BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features. In: Daniilidis, K.; Maragos, P.; Paragios, N. (Hrsg.): Computer vision - ECCV 2010. ECCV; European Conference on Computer Vision, Berlin, 2010, S. 778–792.
- [Cor-1995] Cortes, C.; Vapnik, V.: Support-Vector Networks. In: Machine Learning, Jg. 20 (1995) Nr. 3, S. 273–297.

- [Dal-2005] Dalal, N.; Triggs, B.: Histograms of Oriented Gradients for Human Detection. In: IEEE (Hrsg.): 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), 2005, S. 886–893.
- [Dan-2010] Daniluk, D.; Chisu, R.: Simulation und Emulation im Internet der Dinge. In: Günthner, W.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010, S. 149–166.
- [DIN-30781-1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Transportkette - Grundbegriffe. DIN Nr. 30781-1, 1989.
- [Eck-2002] Eckardt, F.: Ein Beitrag zu Theorie und Praxis datengetriebener Modellgeneratoren zur Simulation von Produktionssystemen. Shaker, Aachen, 2002.
- [Erh-2008] Erhardt, A.: Einführung in die Digitale Bildverarbeitung – Grundlagen, Systeme und Anwendungen. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2008.
- [Gün-2010] Günthner, W. A.; Hompel, M. ten: Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Hae-2021] Haentges, J.: Automatisierte Bilderzeugung und -klassifikation verschiedener Förderelemente der Intralogistik. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching b. München, 2021.
- [Har-1988] Harris, C.; Stephens, M.: A Combined Corner and Edge Detector. In: Taylor, C. J. (Hrsg.): Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988, 1988, S. 23.1-23.6.
- [Has-2018] Hassaballah, M.; Abdelmgeid, A. A.; Alshazly, H. A.: Image Features Detection, Description and Matching. In: Awad, A. I.; Hassaballah, M. (Hrsg.): Image Feature Detectors and Descriptors. Springer International Publishing, Cham, 2018, S. 11–45.
- [Hom-2011] Hompel, M. ten; Heidenblut, V.: Taschenlexikon Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.

- [Hom-2018] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [Hou-1962] Hough, P. V. C.: Method and Means for Recognizing Complex Patterns. Patentschrift, 1962.
- [Hsu-2002] Hsu, C.-W.; Lin, C.-J.: A comparison of methods for multiclass support vector machines. In: IEEE transactions on neural networks, Jg. 13 (2002) Nr. 2, S. 415–425.
- [Hu-1962] Hu, M.-K.: Visual pattern recognition by moment invariants. In: IEEE Transactions on Information Theory, Jg. 8 (1962) Nr. 2, S. 179–187.
- [Int-2020] Intel RealSense Technology: Intel® RealSense™ Camera D400 Series Product Family Datasheet, 2020.
- [Jer-2021] Jerez Arnau, P.: Pattern recognition in images to determine the width of roller conveyors. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching b. München, 2021.
- [Jia-2009] Jiang, X.: Feature extraction for image recognition and computer vision. In: IEEE (Hrsg.): 2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2009, S. 1–15.
- [Jün-1989] Jünemann, R.: Materialfluß und Logistik – Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Springer-Verl., Berlin, 1989.
- [Jün-1998] Jünemann, R.; Beyer, A.: Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen, 1998.
- [Krä-2002] Krämer, K.: Automatisierung in Materialfluss und Logistik – Ebenen, Informationslogistik, Identifikationssysteme, intelligente Geräte. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2002.
- [Low-1999] Lowe, D. G.: Object recognition from local scale-invariant features Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, 1999, S. 1150-1157 vol.2.

- [Low-2004] Lowe, D. G.: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: International Journal of Computer Vision, Jg. 60 (2004) Nr. 2, S. 91–110.
- [Muc-2018] Muchna, C.; Brandenburg, H.; Fottner, J.; Gutermuth, J.: Grundlagen der Logistik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018.
- [Muj-2009] Muja, M.; Lowe, D. G.: FAST APPROXIMATE NEAREST NEIGHBORS WITH AUTOMATIC ALGORITHM CONFIGURATION. In: SciTePress - Science and Technology Publications (Hrsg.): Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision Theory and Applications, S. 331–340.
- [Mül-2021] Müller, S.; Ahmed, M.; Fottner, J.: Aufwandsarme Rekonstruktion von Bestandsanlagen. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 116 (2021) Nr. 5, S. 322–326.
- [O'M-2020] O'Mahony, N.; Campbell, S.; Carvalho, A.; Harapanahalli, S.; Hernandez, G. V.; Krpalkova, L.; Riordan, D.; Walsh, J.: Deep Learning vs. Traditional Computer Vision. In: Arai, K.; Kapoor, S. (Hrsg.): Advances in Computer Vision. Springer International Publishing, Cham, 2020, S. 128–144.
- [Pfe-1989] Pfeifer, H.: Grundlagen der Fördertechnik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1989.
- [Pri-2015] Priese, L.: Computer Vision. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Pun-2017] Puntel-Schmidt, P.: Methoden zur simulationsbasierten Absicherung von Steuerungscode fertigungstechnischer Anlagen. Dissertation, Helmut Schmidt Universität, Hamburg, 2017.
- [Ras-2019] Raspberry Pi (Trading) Ltd.: Raspberry Pi 4 Model B – Datasheet. Raspberry Pi (Trading) Ltd. Nr. Release 1, 2019.
- [Rub-2011] Rublee, E.; Rabaud, V.; Konolige, K.; Bradski, G.: ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In: IEEE (Hrsg.): 2011 International Conference on Computer Vision, S. 2564–2571.

- [Sah-1988] Sahoo, P.K.; Soltani, S.; Wong, A.K.C.: A survey of thresholding techniques. In: Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Jg. 41 (1988) Nr. 2, S. 233–260.
- [San-2021] San Antonio de Benito, S.: Rekonstruktion einer Bewegung auf Förderanlagen der Intralogistik mittels Visual Odometry. Semesterarbeit. Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching b. München, 2021.
- [Sch-2012] Schulz, H.; Behnke, S.: Deep Learning. In: KI - Künstliche Intelligenz, Jg. 26 (2012) Nr. 4, S. 357–363.
- [Sch-2019] Schmidt, T.: Innerbetriebliche Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [Spi-2018] Spindler, M.: Zwei-Schichten-Architektur zur modellbasierten Erstellung der Steuerungssoftware für automatisierte Materialflusssysteme. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching b. München, 2018.
- [Str-2009] Strigl, T.: Materialflusssimulation zur schnellen Inbetriebnahme realer Steuerungen. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 104 (2009) Nr. 1-2, S. 76–80.
- [Süß-2014] Süße, H.; Rodner, E.: Bildverarbeitung und Objekterkennung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [VDI-3633a] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Begriffe. VDI-Richtlinien Nr. 3633, 2018.
- [VDI-3633b] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Grundlagen. VDI-Richtlinien Nr. 3633 Blatt 1, 2014.
- [VDI-3693] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Virtuelle Inbetriebnahme: Modellarten und Glossar. VDI/VDE-RICHTLINIEN Nr. 3693 Blatt 1, 2016.

- [VDI-4465] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Modellierung und Simulation: Modellbildungsprozess. VDI-RICHTLINIEN Nr. 4465, 2021.
- [VDI-4497] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Einsatz der Emulation bei der Realisierung automatisierter Logistiksysteme (Entwurf). VDI-Richtlinien Nr. 4497, 2020.
- [Vis-2011] Vishay Semiconductors: BPW34, BPW34S - Datasheet Photodiode, 2011.
- [Weh-2020] Wehking, K.-H.: Technisches Handbuch Logistik 1. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [Win-2019] Windeck, C.; Storm, I. T.: Raspberry Pi 4: 4 GByte RAM, USB 3.0, 4K-Auflösung, mehr Rechenleistung. In: c't magazin für computer technik (2019) Nr. 15, S. 16ff.
- [Wün-2008] Wünsch, G.: Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2007, Technische Universität München, München, 2008.
- [You-2015] Yousif, K.; Bab-Hadiashar, A.; Hoseinnezhad, R.: An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM: Applications to Mobile Robotics. In: Intelligent Industrial Systems, Jg. 1 (2015) Nr. 4, S. 289–311.
- [Zui-1994] Zuiderveld, K.: Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization. In: Heckbert, P. S. (Hrsg.): Graphics Gems. Elsevier Science, Burlington, 1994, S. 474–485.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Beispiel für automatisierte Förderanlage in der Intralogistik	1
Abbildung 1-2: Möglichkeiten zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit beim Einsatz von Digitalen Modellen	2
Abbildung 1-3: Einordnung der Arbeitspakete zur Erreichung des Forschungsziels in die Kapitelstruktur des Forschungsberichts	4
Abbildung 2-1: Materialflusstechnische Aufgaben von Stückgutförderern	9
Abbildung 2-2: Systematik der Fördermittel nach	10
Abbildung 2-3: Ausprägungen von Steuerungssystemen für Förderanlagen	11
Abbildung 2-4: Automatisierungspyramide zur Steuerung von Materialflusssystemen	12
Abbildung 2-5: Einteilung berührungsloser Näherungssensoren	14
Abbildung 2-6: Systemdarstellung der Emulation als Nachbildung des Gesamtsystems	16
Abbildung 2-7: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie	17
Abbildung 3-1: Ergebnis der Analyse zur Relevanz und Häufigkeit von Fördererelementen in bestehenden Anlagen	21
Abbildung 3-2: Abhängigkeit des Detaillierungsgrads der Anlagenkomponenten im Modell vom Einsatzzweck	23
Abbildung 4-1: Vision eines Gesamtkonzepts mit intelligentem Fördergut als Erfassungssystem	27
Abbildung 4-2: Dreistufiges Verfahren zur Rekonstruktion von Modellierungsdaten aus bestehenden Förderanlagen	34
Abbildung 4-3: Prozess zur Durchführung der Datenaufnahme, Interpretation und Rekonstruktion	37
Abbildung 5-1: Module der Layoutrekonstruktion	40
Abbildung 5-2: 2D Bewegungstypen der betrachteten Fördererelemente	41
Abbildung 5-3: Beispiel der Fördereridentifikation für 18 Überfahrten in sechs Durchläufen	43
Abbildung 5-4: Art und Anzahl der Anschlusspunkte der Fördererelemente des vorherigen Beispiels	44
Abbildung 5-5: Module der Geometrierekonstruktion	45
Abbildung 5-6: Förderertypen - basierend auf den Elementen des Referenzlayouts	45
Abbildung 5-7: Beispiel für die Definition der Maße mit und ohne erfasster Breite	46
Abbildung 5-8: Module der Rekonstruktion von Zusatzattributen	47

Abbildung 5-9: Ein- und Ausgangsdaten sowie angestrebte Umsetzungsart des Moduls "Übergänge"	51
Abbildung 5-10: Ein- und Ausgangsdaten sowie angestrebte Umsetzungsart des Moduls "Bewegungspfad"	51
Abbildung 5-11: Ein- und Ausgangsdaten des Moduls "Bewegungsabschnitt"	52
Abbildung 5-12: Ein- und Ausgangsdaten sowie angestrebte Umsetzungsart des Moduls "Breitenerkennung"	53
Abbildung 5-13: Ein- und Ausgangsdaten sowie angestrebte Umsetzungsart des Moduls "Oberflächenerkennung"	53
Abbildung 5-14: Ein- und Ausgangsdaten des Moduls "Kinematik"	54
Abbildung 5-15: Ein- und Ausgangsdaten des Moduls "Umsetzertyp"	54
Abbildung 5-16: Ein- und Ausgangsdaten des Moduls "Sensorerkennung"	54
Abbildung 5-17: Internes Koordinatensystem (flächig) eines Förderguts sowie mögliche Bewegungsrichtungen auf einem Kreuzungselement	56
Abbildung 5-18: Elektronikkonzept zur Erfassung der Messdaten im Erfassungssystem	58
Abbildung 5-19: Beispiel zur Anordnung der Photodioden-Zeile auf einer Seite	59
Abbildung 5-20: Schaltung zur Verstärkung und Digitalisierung des von den Photodioden verursachten Photostroms	59
Abbildung 5-21: Schaltung für die zentrale Bediensteuerung	60
Abbildung 5-22: Grobkonzepte für die Grundgestelle der Erfassungseinheit nach den Vorgaben der Anpassbarkeit und Zentrierung	63
Abbildung 5-23: Grobkonzepte zur Befestigung des Gestells in einem vorhandenen KLT Behälter	64
Abbildung 5-24: Zu detaillierendes Gesamtkonzept	65
Abbildung 5-25: Darstellung der abstrakten Module für die Bauraummodelle	66
Abbildung 5-26: Bauraummodelle für die drei betrachteten KLT Behälter Grundmaße	67
Abbildung 6-1: Links: Einfallswinkel eines Lichtstrahls auf die Seite eines Behälters; Rechts: Relative Strahlungsempfindlichkeit bezogen auf die Winkelverschiebung	71
Abbildung 6-2: Resultierendes Layout der Verteilerplatine	72
Abbildung 6-3: Resultierendes Layout der Zentralplatine	73
Abbildung 6-4: Verbindungsplan der verwendeten Elemente inkl. Zuordnung zu Modulen der Erfassungseinheit	74
Abbildung 6-5: Konstruktionszeichnungen der Gesamtaufbauten für die Einpassung der Erfassungseinheiten in die KLT Größen	75
Abbildung 6-6: Grundplatten für die drei verschiedenen Behältergrößen (inkl. zu fertige Stückzahl)	75

Abbildung 6-7: Längsbefestigung für die drei verschiedenen Behältergrößen	76
Abbildung 6-8: Elemente zur Querzentrierung der Grundplatten im Behälter	77
Abbildung 6-9: Modulaufnahmeelemente für die beiden größeren Behältermaße als Gegenstück zur Längsaufnahme der kleineren Grundplatte	77
Abbildung 6-10: Zusammensetzung der Elemente des Modulpakets zur Aufnahme der Sensorik- und Elektronikelemente	78
Abbildung 6-11: Kamerahalter	79
Abbildung 6-12: Umsetzung des Akkumoduls	80
Abbildung 6-13: Umsetzung des Rechnermoduls	80
Abbildung 6-14: Umsetzung des Speicher- und Bedienmoduls sowie der Zentralplatine	81
Abbildung 6-15: Integration des Modulpakets in die verschiedenen Behältergrößen	81
Abbildung 6-16: Beispiel - Detektion von Schlüsselpunkten bei der Überfahrt auf einer Testanlage	84
Abbildung 6-17: Beispiel - Vergleich der Merkmale zum Aufnahmezeitpunkt t und zum Aufnahmezeitpunkt $t-1$ bei der Überfahrt über eine Testanlage	84
Abbildung 6-18: Kombination der Tiefenbilder mit den erkannten Schlüsselpunkten im Raum zur Bestimmung der Trajektorie	85
Abbildung 6-19: Ergebnis der Dateninterpretation von Kameradaten zum Bewegungspfad beim Durchlauf auf einer Testanlage	86
Abbildung 6-20: Beispiel - Ermittlung der Bewegungsart anhand der Beschleunigungen und Drehraten	88
Abbildung 6-21: Gegenüberstellung des klassischen Ansatzes zur Bildklassifizierung und des Ansatzes mit Deep Learning	89
Abbildung 6-22: Schritte der Bildverarbeitung anhand eines Beispielbilds	90
Abbildung 6-23: Visualisierung der HOG-Merkmale verschiedener Fördereroberflächen	93
Abbildung 6-24: Beschreibung der Phasen "Klassifikatortraining" und "Klassifikation"	94
Abbildung 6-25: Verfahren zur Messung der Rollenbreite und des Abstands zwischen den Führungsschienen	96
Abbildung 6-26: Beispiel zu Schwellwertoperation und k-means Clustering	96
Abbildung 6-27: Beispiel - Ergebnis des vierstufigen Verfahrens zur Breitenerkennung	97
Abbildung 6-28: Beispiel für Messdaten der Photodioden-Schaltung zur Detektion von Lichtstrahlen	98
Abbildung 6-29: Ermittlung des 2D-Bewegungstyps	100

Abbildung 6-30: Beispiel - Aufgenommene Positionsdaten während einer Behälterbewegung in Demo3D	103
Abbildung 6-31: Beispiel - Sensoren zur Erzeugung der synthetischen Daten zu den Übergängen zwischen Förderelementen	103
Abbildung 6-32: Beispiel - Detektion eines Sensors mit dem zugehörigen Signalverlauf	104
Abbildung 6-33: Umgesetztes Referenzszenario	105
Abbildung 6-34: Umsetzungsbeispiel - Runde 1	106
Abbildung 6-35: Umsetzungsbeispiel - Runde 2	106
Abbildung 6-36: Umsetzungsbeispiel - Runde 3	106
Abbildung 6-37: Umsetzungsbeispiel - Darstellung der Aufteilung des aufgenommenen Bewegungspfads in 46 Überfahrten	107
Abbildung 6-38: Umsetzungsbeispiel - Exemplarische Darstellung der Datenstruktur der Überfahrten nach der Einteilung in 2D-Bewegungstypen	108
Abbildung 6-39: Umsetzungsbeispiel - Darstellung der Überlappungsprüfung der Überfahrten mit dem Ziel der Identifikation der Förderelemente	109
Abbildung 6-40: Umsetzungsbeispiel - Zuordnung der Förderer inkl. deren Datenstruktur (Überfahrten, Anschlusspunkte) zu den Ebenentypen	109
Abbildung 6-41: Umsetzungsbeispiel - Auszug aus der resultierenden *.csv Datei	110
Abbildung 6-42: Umsetzungsbeispiel - Ergebnis des Rekonstruktionsverfahrens visualisiert durch ein Blocklayout	111
Abbildung 7-1: Bewertung der allgemeinen Umsetzung des Erfassungssystems	116
Abbildung 7-2: Bewertung der Anforderungserfüllung A1	117
Abbildung 7-3: Bewertung der Anforderungserfüllung A2	118
Abbildung 7-4: Bewertung der Anforderungserfüllung A3	119
Abbildung 7-5: Einschätzung zum Einsatz in der Praxis	119
Abbildung 7-6: Bewertung des Nutzens der rekonstruierten Layoutdaten	120
Abbildung 7-7: Bewertung des Nutzens der rekonstruierten Geometriedaten	121
Abbildung 7-8: Bewertung des Nutzens der rekonstruierten Zusatzattribute	121
Abbildung 7-9: Bewertung des Rekonstruktionskonzepts	122
Abbildung B-1: Resultierende Gesamtkonzepte für Kombination aus Grundgestellen und Befestigungsmechanismen	B-1
Abbildung B-2: Pinbelegung auf den beiden Raspberry Pis der Kamera 1 und Kamera 2	B-2

Abbildung B-3: Pinbelegung des Raspberry Pis für die Ansteuerung der IMU und Photodioden	B-2
Abbildung B-4: Schaltplan der Verteilerplatine	B-3
Abbildung B-5: Schaltplan der Zentralplatine	B-4
Abbildung B-6: Eingangsstruktur für das Rekonstruktionsverfahren in Matlab	B-5
Abbildung B-7: Analyse der Änderungen des Beschleunigungswinkels (Teil 1)	B-6
Abbildung B-8: Analyse der Änderungen des Beschleunigungswinkels (Teil 2)	B-6
Abbildung B-9: Umfrage zur Bewertung des Erfassungssystems	B-7
Abbildung B-10: Umfrage zum Nutzen der rekonstruierten Daten	B-8

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	KLT Maße	8
Tabelle 6-1:	Abgleich der in den Testanlagen enthaltenen Komponenten im Vergleich zur Referenz-Anlagenkonfiguration	82
Tabelle 6-2:	Mögliche Bewegungsarten auf den Förderelementen des Referenzszenarios	87
Tabelle 6-3:	Anzahl der vorkommenden Referenzelemente im Umsetzungsbeispiel	105
Tabelle A-1:	Umfrageergebnisse zur Einschätzung von Häufigkeit und Relevanz der Förderelemente	A-1
Tabelle A-2:	Ergebnis der Häufigkeitsanalyse in bestehenden Förderanlagen	A-2
Tabelle A-3:	Kompatibilitätsprüfung zwischen Grundgestell- und Befestigungskonzepten	A-2
Tabelle A-4:	Definition der Bewertungskriterien und des Bewertungsschemas für die Bewertung der Gesamtkonzepte	A-3
Tabelle A-5:	Gesamtergebnis der Bewertung der Gesamtkonzepte durch Stakeholder der Anwendung (A) und Fertigung (F)	A-3
Tabelle A-6:	Vergleich der Behälter-Innenmaße	A-4
Tabelle A-7:	Analyse möglicher Kombinationen der Beschleunigung und Drehrate für die Bewegungsarten	A-5

Anhang A Tabellen

Tabelle A-1: *Umfrageergebnisse zur Einschätzung von Häufigkeit und Relevanz der Fördereremente*

Name in Systematik	Alternativbezeichnungen	Ausprägungen	Art	Häufigkeit	Relevanz
Unterflurschleppkettenförderer			Palette	0.00	0.00
			Behälter	0.00	0.00
Rollenbahn, angetrieben	Rollenförderer, Rollenbahn	Staurollen, Kurve, Gerade	Palette	4.50	4.50
			Behälter	4.83	4.83
Tragkettenförderer	Kettenförderer		Palette	5.00	5.00
			Behälter	4.67	4.83
Bandförderer	Gurtförderer	Kurve, Gerade, Steigung	Palette	0.00	0.00
			Behälter	4.60	4.80
Wandertisch			Palette	0.00	0.00
			Behälter	0.00	0.00
Gliederbandförderer			Palette	0.00	0.00
			Behälter	0.00	0.00
S-/C-Förderer			Palette	0.00	0.00
			Behälter	3.00	4.00
Kettenfördersystem			Palette	0.00	0.00
			Behälter	0.00	0.00
Umsetzer	Eckumsetzer	Hubumsetzer, Gurtumsetzer, Kettenabschieber, Drehtisch, Pusher	Palette	5.00	5.00
			Behälter	4.60	4.80
Verschiebewagen	Querverschiebewagen, QVW, TV		Palette	4.67	4.00
			Behälter	4.00	4.00
Elektrotragbahn			Palette	0.00	0.00
			Behälter	0.00	0.00
Regalbediengerät	RBG, AKL		Palette	4.00	4.33
			Behälter	4.50	4.75
Automatisches Flurförderzeug			Palette	0.00	0.00
			Behälter	0.00	0.00
Aufzug/Senkrechtförderer	Heber, Lift, Hoist, Hubtisch, Vertikalförderer		Palette	4.75	4.25
			Behälter	4.50	5.00
Kanalfahrzeug / Verteilfahrzeug	Shuttle		Palette	0.00	0.00
			Behälter	4.00	3.50

Tabelle A-2: Ergebnis der Häufigkeitsanalyse in bestehenden Förderanlagen

Fördererart	Davon...	Anteil
Rollenbahn angetrieben		44%
	Staurolle	66%
	Gerade	22%
	Kurve	12%
Rollenbahn (Schwerkraft)		4%
Tragkettenförderer		5%
Bandförderer		12%
S-/C-Förderer		<1%
Umsetzer		33%
	Gurtumsetzer	92%
	Kettenabschieber	7%
	Drehtisch	<1%
	Pusher	<1%
Verschiebewagen		1%
Aufzug/Senkrechtförderer		1%

Tabelle A-3: Kompatibilitätsprüfung zwischen Grundgestell- und Befestigungskonzepten

		Grundgestelle					
		G1 - Platten	G2 - Schnellverstellung A	G3 - Schnellverstellung B	G4 - Getriebe A	G5 - Getriebe B	G6 - Kinematik
Befestigung	Gewindeverstellung - B1	3	3	3	3	1	3
	Handverstellung - B2	3	1	3	3	1	1
	Verschrauben - B3	3	3	1	9	9	9
	Selbstzentrierung - B4	9	0	0	0	0	0
	Federverspannung - B5	3	3	9	1	1	1

0 = Nicht kompatibel
 1 = Schlecht kompatibel
 3 = Mäßig Kompatibel
 9 = Sehr gut kompatibel

Tabelle A-4: Definition der Bewertungskriterien und des Bewertungsschemas (1=schlecht, 2=neutral, 3=gut) für die Bewertung der Gesamtkonzepte

ID	Kriterium	Definition der Bestbewertung (Bewertung = 3)
Handhabung	1.1. Hilfsmittel	System kommt ohne zusätzliche Hilfsmittel aus
	1.2. Stellelemente	Sehr geringe Anzahl an Stellelementen (1-2)
	1.3. Größe/Gewicht	Eingeklappt unter 300x200mm und unter 5kg (Ausgefahren nicht sperrig)
	1.4. Reibung im System	Mit der Hand unter keinem großem Druck zügig verstellbar
Messgrundlage	2.1. Toleranzen/Spiel	Wenige Toleranzstellen mit hoher Passgenauigkeit
	2.2. Messbarkeit	Ungenauigkeiten beim Einstellen können leicht rausgemessen werden
	2.3. Positionshaltung	Während des Einsatzes keine Verschiebung des Systems innerhalb Box
	2.4. Steifigkeit	Ausreichende Steifigkeit des Systems um Position zu halten
	2.5. Ausrichtung	Richtet sich automatisch selbst zur Mitte aus
Komplexität	3.1. Entwicklungsaufwand	Geringe Komplexität -> System einfach und schnell realisierbar
	3.2. Fertigungsaufwand	Keine Komplexe Montage und Kalibrierung des Systems nötig
	3.3. Einbauflexibilität	Eine einzelne Baugruppe, die auf verschiedene Boxgrößen anpassbar ist

Tabelle A-5: Gesamtergebnis der Bewertung der Gesamtkonzepte durch Stakeholder der Anwendung (A) und Fertigung (F)

ID	Kriterium	Wichtung		Konzept 1		Konzept 2		Konzept 3		Konzept 4		Konzept 5		Konzept 6		Konzept 7		Konzept 8		Konzept 9		Konzept 10		
		F	A	F	A	F	A	F	A	F	A	F	A	F	A	F	A	F	A	F	A	F	A	
1.1.	Hilfsmittel	1	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	1	2	
1.2.	Stellelemente	3	3	2	3	1	2	2	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	3	3
1.3.	Größe/Gewicht	3	1	1	2	1	2	2	3	3	3	3	3	2	3	1	2	1	3	1	3	1	2	
1.4.	Reibung im System	1	3	3	3	3	3	2	1	2	2	1	3	1	1	1	2	1	2	1	2	2	3	
2.1.	Toleranzen/Spiel	9	3	2	2	3	2	2	1	2	1	1	2	1	2	1	3	1	3	1	2	2	2	
2.2.	Messbarkeit	9	9	2	3	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	3	1	3	2	2	2	3	
2.3.	Positionshaltung	9	9	3	3	2	2	2	1	3	1	1	2	2	2	3	3	2	2	2	2	3	3	
2.4.	Steifigkeit	3	9	3	3	3	2	2	1	3	1	1	1	2	2	3	3	3	2	2	2	3	3	
2.5.	Ausrichtung	9	3	3	2	2	1	2	2	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	2	3	3	
3.1.	Entwicklungsaufwand	9	3	1	3	3	3	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	1	1	
3.2.	Fertigungsaufwand	3	3	1	2	3	3	3	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
3.3.	Einbauflexibilität	1	3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	1	3	3	1	1	
Gewichtete Summe (Einzel):				125	137	139	110	125	75	146	84	90	105	102	108	123	134	115	120	115	102	127	131	
Gewichtete Summe (Gesamt):				262		249		200		230		195		210		257		235		217		258		
Rang:				1		4		9		6		10		8		3		5		7		2		

Tabelle A-6: Vergleich der Behälter-Innenmaße (Quelle: Datenblätter der Hersteller)

Behältertyp	Innenmaß - Länge (mm)			Innenmaß - Breite (mm)			min. Höhe (mm)		
	SSI Schäfer	Utz Group	DE Pack	SSI Schäfer	Utz Group	DE Pack	SSI Schäfer	Utz Group	DE Pack
R-KLT (Grundfläche außen)	i-berna			i-berna			i-berna		
	300 mm x 200 mm	2430	2430	1620	1620	1620	1295	1290	1295
	400 mm x 300 mm	3460	3460	2650	2650	2650	1095	1090	1095
600 mm x 400 mm	5440	5440	5440	3640	3640	3640	1095	1090	1095
RL-KLT (Grundfläche außen)	i-berna			i-berna			i-berna		
	300 mm x 200 mm	2430	2430	1620	1620	1620	1295	1290	1295
	400 mm x 300 mm	3450	3450	2600	2600	2600	1295	1290	1295
600 mm x 400 mm	5440	5440	5440	3590	3590	3590	1295	1290	1295
C-KLT (Grundfläche außen)	i-berna			i-berna			i-berna		
	300 mm x 200 mm	2600	2600	1360	1360	1360	1299	1280	-
	400 mm x 300 mm	3340	3340	2470	2470	2470	1055	1050	-
600 mm x 400 mm	5320	5320	5320	3460	3460	3460	1005	980	-
Minimum	2430	2430	2430	1360	1360	1620	1005	980	1095
	5440	5440	5440	3640	3640	3640	1360	980	980
Maximum	5440	5440	5440	3640	3640	3640	1360	980	1095
	5440	5440	5440	3640	3640	3640	1360	980	980
Resultierendes Minimum (mm):		2430		1360		1360		980	
Resultierendes Maximum (mm):		5440		3640		3640		980	

Tabelle A-7: Analyse möglicher Kombinationen der Beschleunigung und Drehrate für die Bewegungsarten (nach [Bof-2021, S. 30])
 (X: Faktor tritt sicher auf; XOR: genau einer der Faktoren tritt auf; -: Faktor tritt nicht auf)

	Beschleunigung			Drehrate		
	x-Richtung	y-Richtung	z-Richtung	um x-Achse	um y-Achse	um z-Achse
Rotation	X	X	-	-	-	X
Linear Steigung	XOR	XOR	X	XOR	XOR	-
Linear z	-	-	X	-	-	-
Linear x/y	XOR	XOR	-	-	-	-

Anhang B Abbildungen

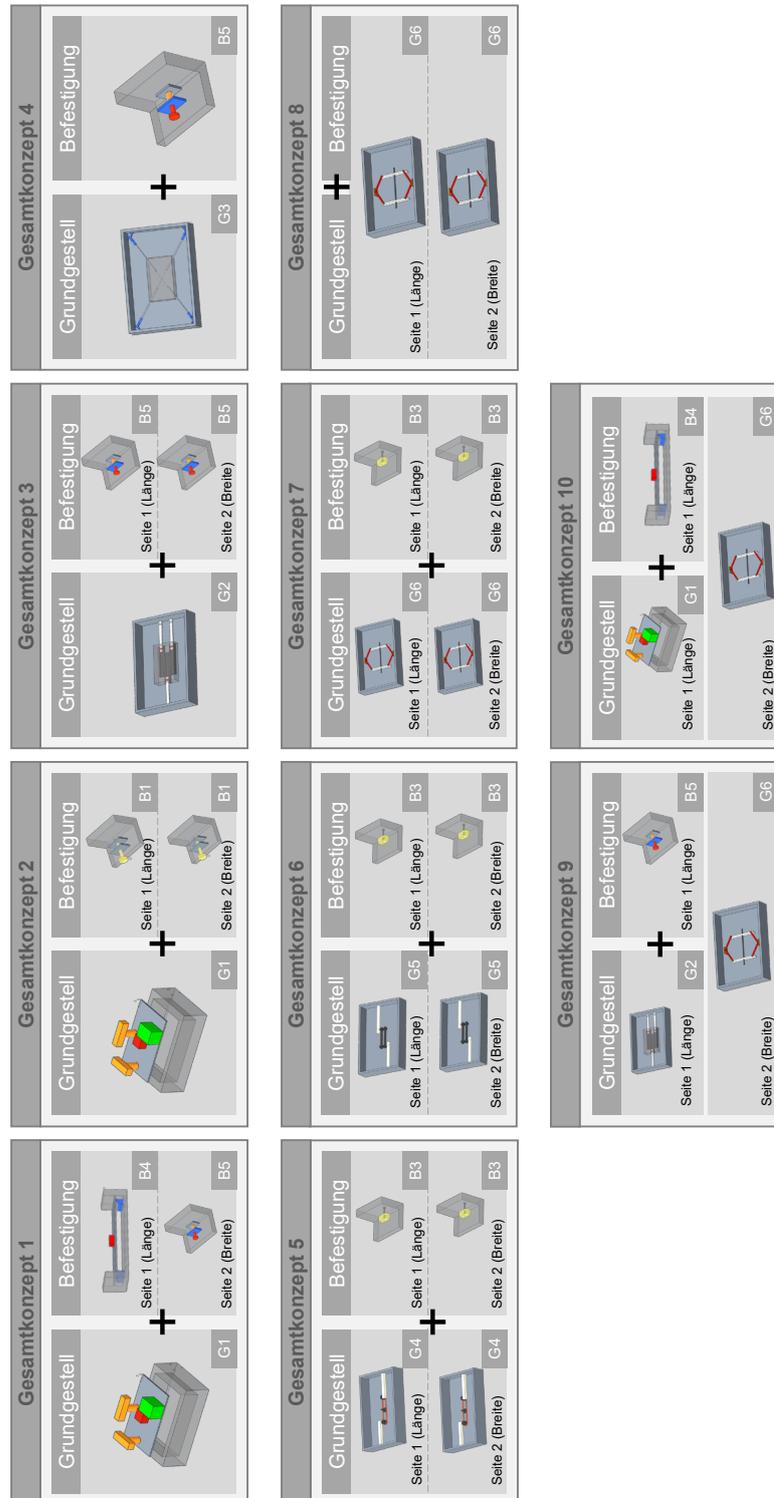


Abbildung B-1: Resultierende Gesamtkonzepte für Kombination aus Grundgestellen und Befestigungsmechanismen

Kamera K1 und K2					
3.3V (nur bei K2)	3.3V	01			02 5V
	GPIO 02	03			04 5V
Reset	GPIO 03	05			06 GND
	GPIO 04	07			08 GPIO 14
	GND	09			10 GPIO 15
	GPIO 17	11			12 GPIO 18
	GPIO 27	13			14 GND
	GPIO 22	15			16 GPIO 23
	3.3V	17			18 GPIO 24
	GPIO 10	19			20 GND
	GPIO 09	21			22 GPIO 25
	GPIO 11	23			24 GPIO 8
	GND	25			26 GPIO 7
	ID_SD	27			28 ID_SC
	GPIO 05	29			30 GND
	GPIO 06	31			32 GPIO 12
	GPIO 13	33			34 GND
	GPIO 19	35			36 GPIO 16
	GPIO 26	37			38 GPIO 20
	GND	39			40 GPIO 21

Abbildung B-2: Pinbelegung auf den beiden Raspberry Pis der Kamera 1 und Kamera 2

IMU / Photodioden					
	3.3V	01			02 5V
IMU SDA (Pin 17)	GPIO 02	03			04 5V
IMU SCL (Pin 18)	GPIO 03	05			06 GND
	GPIO 04	07			08 GPIO 14
	GND	09			10 GPIO 15
IMU LED grün	GPIO 17	11			12 GPIO 18
IMU LED rot	GPIO 27	13			14 GND
IMU Ein/Aus	GPIO 22	15			16 GPIO 23
	3.3V	17			18 GPIO 24
PD Din	GPIO 10	19			20 GND
PD Dout	GPIO 09	21			22 GPIO 25
PD CLK	GPIO 11	23			24 GPIO 8
	GND	25			26 GPIO 7
	ID_SD	27			28 ID_SC
	GPIO 05	29			30 GND
	GPIO 06	31			32 GPIO 12
	GPIO 13	33			34 GND
	GPIO 19	35			36 GPIO 16
	GPIO 26	37			38 GPIO 20
	GND	39			40 GPIO 21

Abbildung B-3: Pinbelegung des Raspberry Pis für die Ansteuerung der IMU und Photodioden

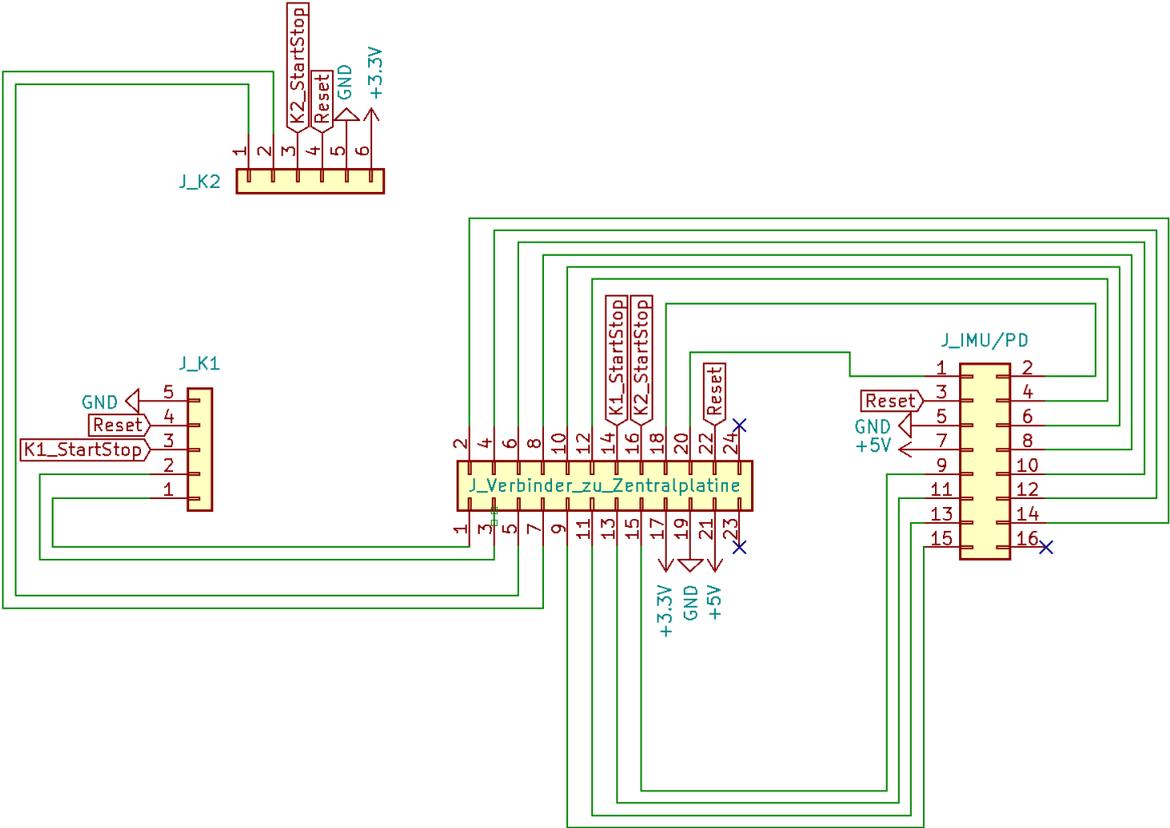


Abbildung B-4: Schaltplan der Verteilerplatine (erstellt mit der Software KiCAD)

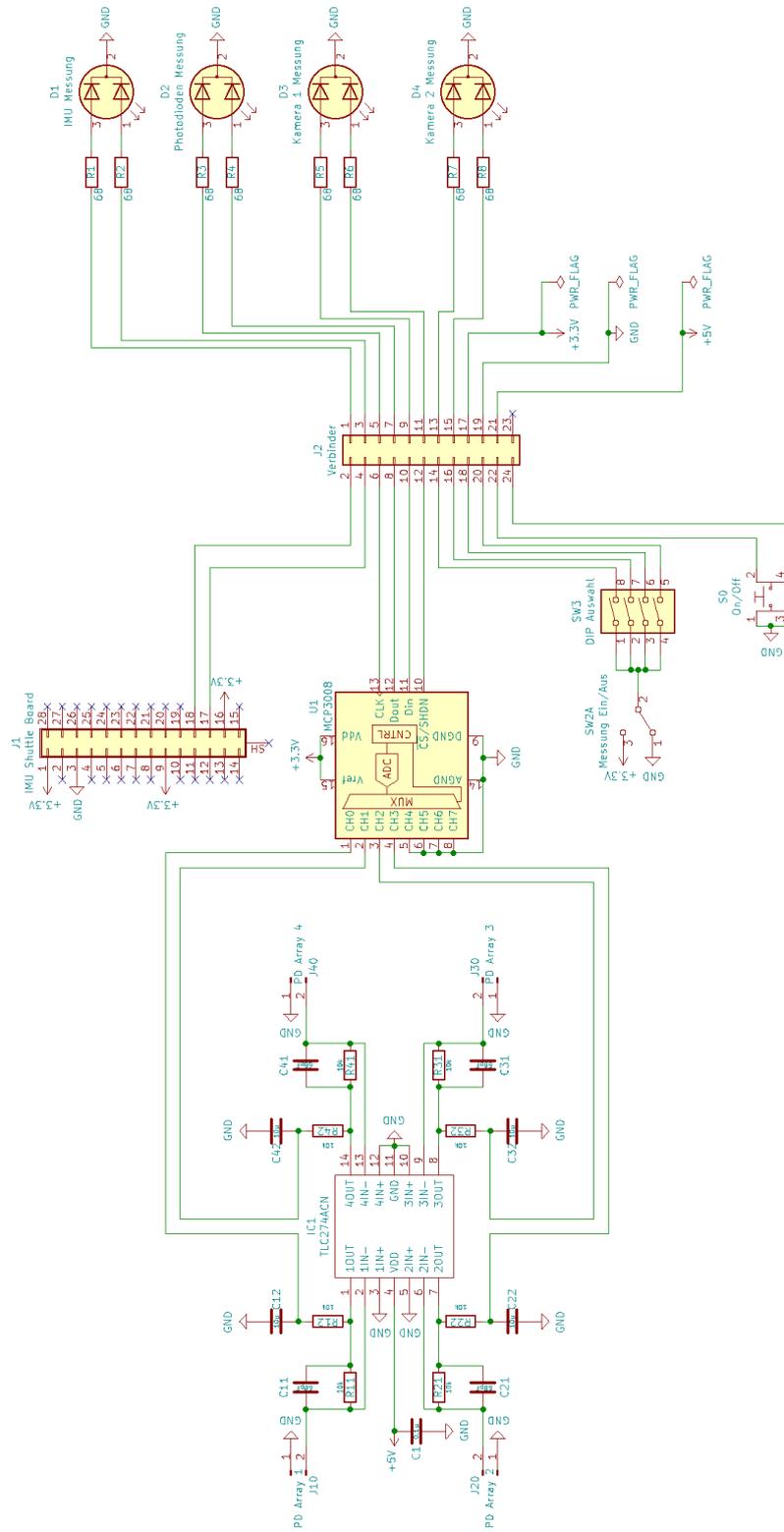


Abbildung B-5: Schaltplan der Zentralplatine (erstellt mit der Software KiCAD)

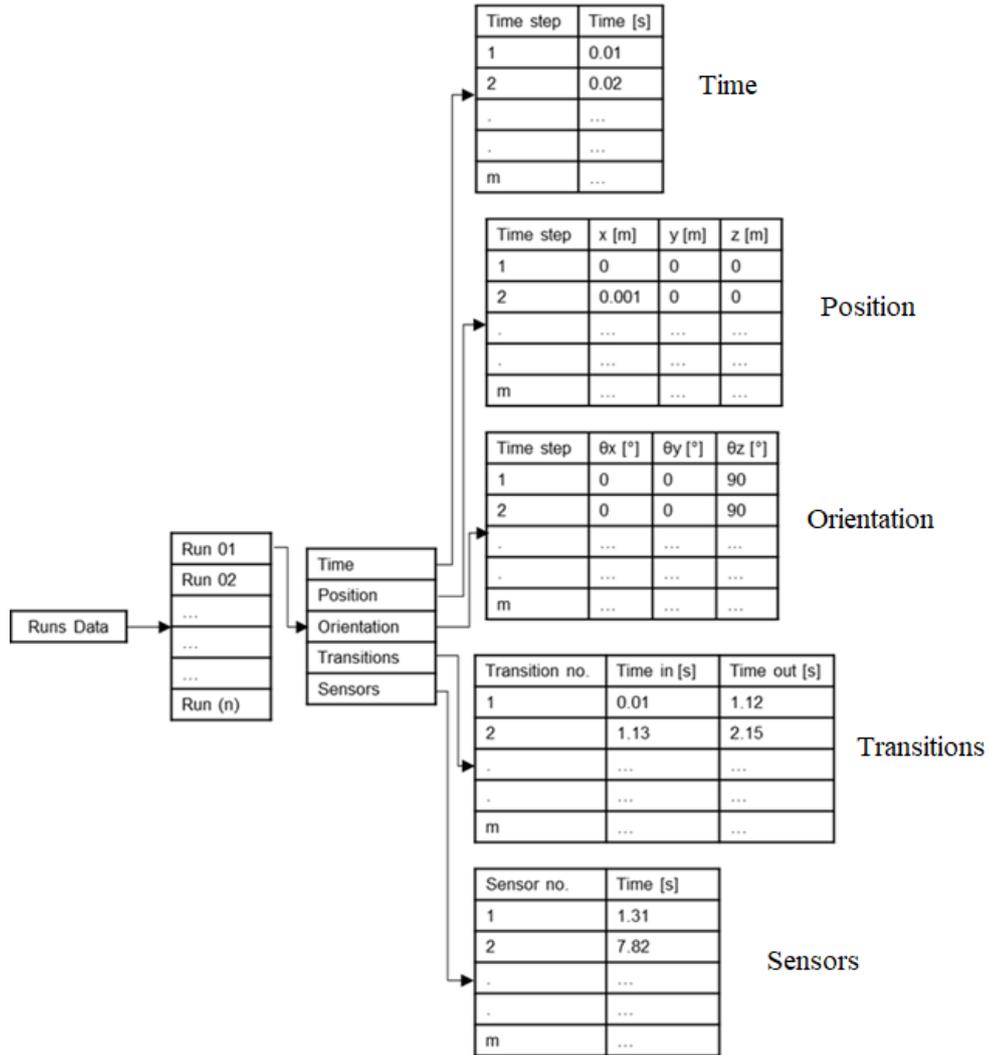


Abbildung B-6: Eingangsstruktur für das Rekonstruktionsverfahren in Matlab

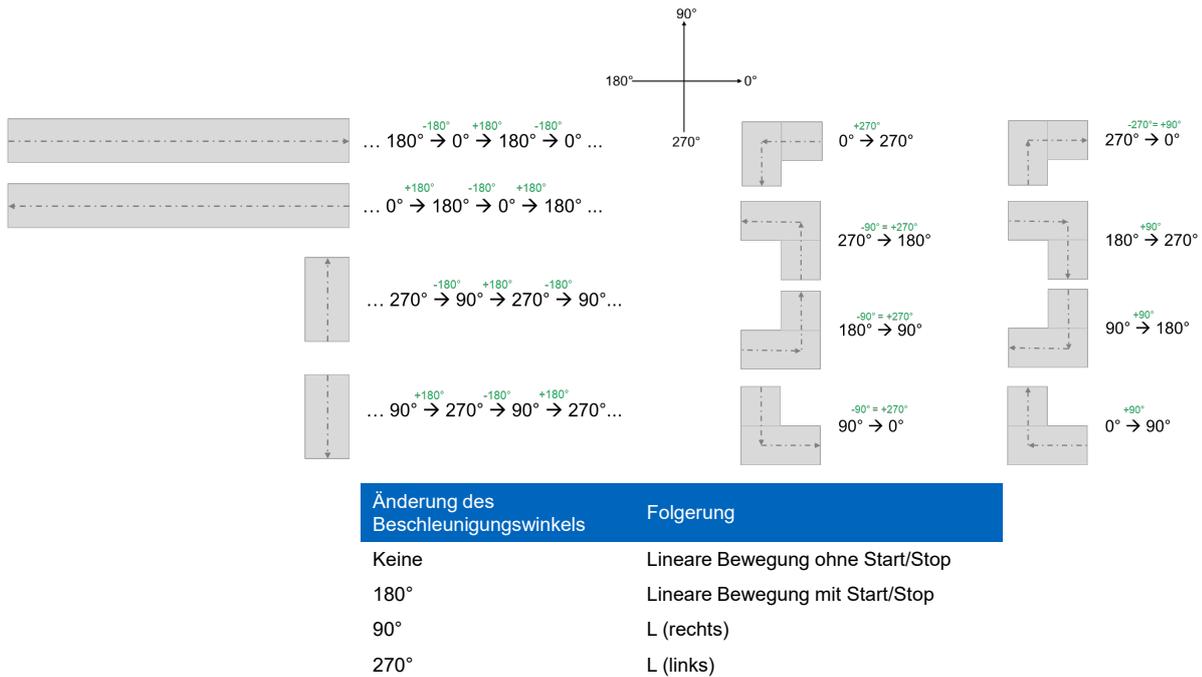


Abbildung B-7: Analyse der Änderungen des Beschleunigungswinkels (Teil 1)

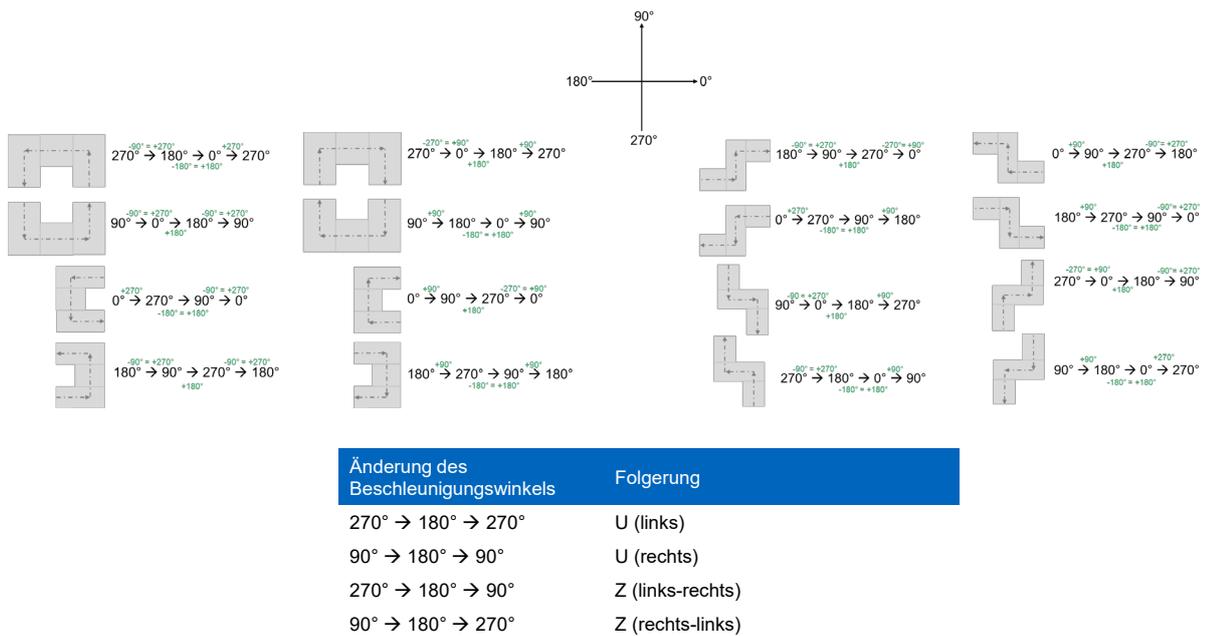


Abbildung B-8: Analyse der Änderungen des Beschleunigungswinkels (Teil 2)

Bewertung des Erfassungssystems

*Wie bewerten Sie die allgemeine Umsetzung des Erfassungssystems?

(1 = Umsetzung nicht gelungen, 5 = Umsetzung sehr gelungen)

1 2 3 4 5

*A1: Vermeidung von Störungen des Anlagenbetriebs

	Anforderung wurde <u>nicht</u> erfüllt 1	2	3	4	Anforderung wurde <u>vollumfassend</u> erfüllt 5
A1.1: Einsatz passiver Messsensorik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
A1.2: Integrierbarkeit anlagenspezifischer Merkmale	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
A1.3: Einhaltung der Eigenschaften des regulär verwendeten Förderguts	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

*A2: Mehrfach einsetzbar

	Anforderung wurde <u>nicht</u> erfüllt 1	2	3	4	Anforderung wurde <u>vollumfassend</u> erfüllt 5
A2.1: Einfacher Umbau	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
A2.2: Robuster Aufbau	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

*A3: Aufwandsarmer Einsatz

	Anforderung wurde <u>nicht</u> erfüllt 1	2	3	4	Anforderung wurde <u>vollumfassend</u> erfüllt 5
A3.1: Keine Anpassungen an der Anlage und externen Infrastruktur notwendig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
A3.2: Kostengünstige Komponenten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
A3.3: Autarker Betrieb möglich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

*Wie wahrscheinlich ist es, dass Sie ein Erfassungssystem in dieser Form zur Datenaufnahme einsetzen?

(1 = sehr unwahrscheinlich, 5 = sehr wahrscheinlich)

1 2 3 4 5

Absenden

Abbildung B-9: Umfrage zur Bewertung des Erfassungssystems

Nutzen der rekonstruierten Daten

***Wie hoch schätzen Sie den Nutzen des Gesamtkonzepts zur Rekonstruktion ein** (Voraussetzung: vollständig erfasste Daten liegen vor)?
 (1 = Gesamtkonzept weist keinen Nutzen auf, 5 = Gesamtkonzept weist einen sehr hohen Nutzen auf)

1
 2
 3
 4
 5

***Layout**
 Bitte bewerten Sie, wie hoch Sie den Nutzen der rekonstruierten Daten einschätzen.

	Daten weisen <u>kei- nen</u> Nutzen auf 1	2	3	4	Daten weisen <u>ei- nen sehr hohen</u> Nutzen auf 5
Anzahl der enthaltenen Förderer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Verbindung zwischen den Förderern (Anschlusspunkte inkl. Vorgänger / Nachfolger)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Förderertyp	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bewegungstypen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

***Zusatzattribute**
 Bitte bewerten Sie, wie hoch Sie den Nutzen der rekonstruierten Daten einschätzen.

	Daten weisen <u>kei- nen</u> Nutzen auf 1	2	3	4	Daten weisen <u>ei- nen sehr hohen</u> Nutzen auf 5
Oberfläche der Bewegungsabschnitte auf den Förderern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Art der (Eck-)Umsetzer (Hubumsetzer, Kettenabschieber, Pusher)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Position der Lichtschranken innerhalb der Förderer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil der Bewegungsabschnitte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

***Geometrie**
 Bitte bewerten Sie, wie hoch Sie den Nutzen der rekonstruierten Daten einschätzen.

	Daten weisen <u>kei- nen</u> Nutzen auf 1	2	3	4	Daten weisen <u>ei- nen sehr hohen</u> Nutzen auf 5
Maße der enthaltenen Förderer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Exakte Breite der einzelnen Bewegungsabschnitte je Förderer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Position der Förderer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Absenden

Abbildung B-10: Umfrage zum Nutzen der rekonstruierten Daten