



Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 842

Otto Lerke

**Entwicklung eines Steuerungssystems für eine Laderaupe zur
Durchführung vollautomatisierter Ladeprozesse unter Einsatz
bildverarbeitender Robottachymeter und adaptiver Regelung**

München 2020

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5254-3



Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 842

Entwicklung eines Steuerungssystems für eine Laderaupen zur
Durchführung vollautomatisierter Ladeprozesse unter Einsatz bildverarbeitender
Robottachymeter und adaptiver Regelung

Von der Fakultät Luft- und Raumfahrt und Geodäsie
der Universität Stuttgart zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Otto Lerke

Geboren am 26.02.1977 in Karaganda, Kasachstan

München 2020

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5254-3

Adresse der DGK:



Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München
Telefon +49 – 331 – 288 1685 • Telefax +49 – 331 – 288 1759
E-Mail post@dgk.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Prüfungskommission:

Vorsitzender: Prof. Dr. techn. Thomas Hobiger

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Hans Neuner (TU Wien)
Prof. Dr. Andreas Wieser (ETH Zürich)

Tag der mündlichen Prüfung: 22.08.2019

Zusammenfassung

Die Automatisierung von Bauprozessen spielt eine immer wichtigere Rolle auf Baustellen. Automatisierung ermöglicht es, Arbeiten in kürzerer Zeit durchzuführen und gleichzeitig eine Erhöhung der Arbeitsqualität zu erreichen. Daneben kann auch die Arbeitssicherheit gesteigert werden.

Der Baubetrieb ist im Allgemeinen in mannigfaltige und vielschichtige Prozesse unterteilt. Viele Prozesse werden von automatisierten Baumaschinen durchgeführt. Für den Bereich Erdbewegungen werden Rad- oder Raupenfahrzeuge mit entsprechenden Ladewerkzeugen eingesetzt, die jedoch zum jetzigen Zeitpunkt nicht automatisiert sind.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein System zu entwickeln, welches es ermöglicht, Belade- und Entladevorgänge vollautomatisch durchzuführen. Dies dient dazu, das Spektrum erhältlicher Systeme bei Erdbewegungsmaschinen, um semi-automatische und vollautomatische 3D Systeme zu erweitern. Die Funktionsweise des Systems wird anhand eines Laderaupenmodells im Massstab 1:14 demonstriert. Die Innovationen sind die bildbasierte Positionsbestimmung mit bildverarbeitenden Tachymetern und die Konzeption einer adaptiven Regelung zur automatischen Führung von Raupenfahrzeugen.

Das System ist in insgesamt vier Module unterteilt. Diese sind das Positionierungsmodul, das Trajektorienmodul, das Fahrmodul und das Werkzeugmodul. Das Positionierungsmodul erkennt und erfasst die Belade- und Entladestationen sowie die Laderaupe und bestimmt deren Positionen. Für die Objekterkennung werden bildverarbeitende Robottachymeter eingesetzt, die unter Nutzung eines eingebauten Kameramoduls in Kombination mit Bildverarbeitungsalgorithmen und tachymetrischen Standardverfahren funktionieren. Dazu ist eine Tachymetersteuerung entwickelt worden, die es ermöglicht, die Kamera zur Bilderfassung anzusteuern und die erfassten Bilder mittels des Bildbearbeitungsalgorithmus SURF merkmalsbasiert auszuwerten. Für die Merkmale der zu bestimmenden Objekte können unter Nutzung des Pixel-zu-Winkel Verhältnisses die horizontalen und vertikalen Fernrohrwinkel abgeleitet werden. Aus diesen werden dann, in Kombination mit reflektorlosen Distanzmessungen, Koordinaten der Objekte berechnet. Aus den bestimmten Positionen errechnet das Trajektorienmodul eine zusammenhängende Referenztrajektorie. Das Fahrmodul führt die Laderaupe entlang dieser Trajektorie. Die im Fahrmodul integrierte Steuerung umfasst die Quer- und Längsregelung der Laderaupe. Die Querregelung (Lenkung) erfolgt dabei mittels einer adaptiven Regelung, bei der sich der Regler automatisch an die Fahrumgebung (Bodenbeschaffenheit) anpasst. Die Längsregelung (Geschwindigkeit) ist mittels eines statischen PID-Reglers realisiert. Beim Erreichen einer Station wird nach dem Halt das Werkzeugmodul aktiviert, das die jeweils anstehende Operation (Beladen oder Entladen) ausführt. Die Abfolge der Systemoperationen erfolgt vollautomatisch, ohne Eingriffe eines Operators. Eingriffsmöglichkeiten sind jedoch zu jeder Zeit gegeben.

Für eine optimale Wirkungsweise des Systems sind verschiedene Regelkreise konzipiert und implementiert. Für den Entwurf der Regelkreise ist, neben der Auswahl adäquater Regler, die Aufstellung geometrischer und stochastischer Modelle notwendig, um Bewegungen abzubilden. Zusätzlich sind Entscheidungen über die Auswahl geeigneter Sensorik zu treffen. Mittels einer lokalen Sensitivitätsanalyse wird ferner untersucht inwieweit sich gewonnene Erkenntnisse vom Modell auf eine reale Maschine übertragen lassen.

Alle Systemmodule werden abschließend einem Funktionsnachweis und einer Evaluierung unterzogen. Daraus lässt sich eine abschließende Bewertung des Gesamtsystems unter den Aspekten der Genauigkeit und der grundsätzlichen funktionalen Leistungsfähigkeit ableiten.

Die Evaluierung zeigte für die bildbasierte Positionsbestimmung unter Laborbedingungen eine Standardabweichung für die Lage von 7 Millimetern. Für die adaptive Regelung wurde unter Laborbedingungen eine Regelgüte von 3 bis 4 Millimetern festgestellt. Die Qualität der Regelung bei Outdoor-Experimenten erreichte 7 bis 9 Millimeter.

Abstract

Automation of construction processes plays an increasingly important role on construction sites. Automation allows to perform working tasks within shorter periods of time and, at the same time, to achieve higher working quality. In addition, it enables to improve work safety.

Construction operations are generally subdivided into various multi-layered processes. Many of these processes can be performed by automated construction machines. In the field of earthwork, wheeled and tracked loaders equipped with appropriate loading tools are used. Though, these loaders are not automated to the present time.

The objective of this contribution is the development of a system to provide automated loading and unloading processes. This intends to widen the spectrum of available systems of earthmoving machinery by semi-automated and fully-automated 3D systems. The operating principle will be demonstrated by the use of a tracked loader model at scale 1:14. The innovations are the image-based positioning using Image Assisted Robotic Total Station (IATS) and the design of an adaptive controller for automatic guidance of tracked vehicles.

The system is subdivided into four modules which are the positioning module, the trajectory module, the driving module and the tool module. The positioning module recognizes and detects the loading and unloading stations as well as the tracked loader and determines their positions. The detection is performed by the camera module of the IATS. Therefore, a combination of image processing algorithms and standard tachymetric procedures is employed. For this purpose a steering algorithm for the IATS has been developed, which enables the camera to capture images. Subsequently, the images are processed by the feature-based image processing algorithm SURF. Based on pixel positions of the object features, appropriate telescope directions can be derived by using the pixel-to-angle relation in terms of horizontal and vertical angles. An additional reflectorless distance measurement allows the calculation of the objects' positions. These positions are used by the trajectory module to calculate a continuous trajectory. The driving module guides the vehicle along the trajectory provided by the trajectory module. The control algorithm, integrated into the driving module, comprises the lateral and the longitudinal control. Lateral control (steering) is accomplished by an adaptive controller with controller parameters automatically adjusted according to the driving scenario (ground conditions). The longitudinal control (speed) is accomplished by a static PID controller. Upon arrival at one of the stations (loading or unloading station) the vehicle stops, and the tool module is activated in order to perform the appropriate loading or unloading operation. The sequence of system operations is executed in a fully automated manner without any interventions by the operator. However, interventions are possible at any point of time.

For an optimal mode of action different closed-loops are designed and implemented. The choice of controllers, as well as the setup of geometric and stochastic models are necessary for the design of closed-loop systems. Additionally, suitable sensors must be chosen. By means of a local sensitivity analysis it is further investigated to what extent knowledge gained from the model can be transferred to a real machine.

Finally, all system modules are tested in the course of a functional conformity test and evaluated in order to assess the accuracy and the general performance of the entire system.

For the image-based positioning the evaluation has indicated a standard deviation of 7 millimeters. This value is valid for laboratory conditions. For the adaptive control a control quality of 3 to 4 millimeter was determined for laboratory experiments, whereas the outdoor experiments have shown a control quality of 7 to 9 millimeter.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Abstract.....	4
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung.....	7
1.1 Motivation.....	7
1.2 Stand der Wissenschaft und Technik	8
1.3 Thematik und Ziele dieser Arbeit	9
1.4 Aufbau der Arbeit	12
2 Grundlagen für das Systemdesign.....	13
2.1 Fahrzeugmodelle.....	13
2.1.1 Antriebstechnik.....	14
2.1.2 Lenkmethode	14
2.2 Werkzeug	17
2.2.1 Geometrisches Modell des Ladewerkzeugs.....	17
2.2.2 Stochastisches Modell des Ladewerkzeugs und lokale Sensitivitätsanalyse	20
2.2.3 Werkzeugsteuerung	24
2.3 Sensorik und Sensorkombinationen.....	25
3 Regelkreise und adaptive Regelung.....	29
3.1 Regelkreise.....	29
3.2 Adaptive Regelung.....	33
3.2.1 Selbsteinstellender Regler innerhalb des Regelprozesses.....	35
3.3 Verwendung des selbsteinstellenden Reglers im Steuerprozess der Laderaupe	40
3.3.1 Analyse und Diskussion	42
4 Einsatz bildverarbeitender Robottachymeter zur statischen Positionsbestimmung	45
4.1 Eigenschaften des eingesetzten bildverarbeitenden Robottachymeters	45
4.2 Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung.....	47
4.2.1 Bildverarbeitungsalgorithmen zur Merkmalsextraktion	50
4.2.2 Objekterkennung und Matching	53
4.3 Bildbasierte Positionsbestimmung von Objekten	54
5 Systemarchitektur und Implementierung	57
5.1 Architektur des Gesamtsystems und Struktur des Algorithmus.....	59
5.2 Positionierungsmodul	64
5.3 Trajektorienmodul.....	69

5.4	Fahrmodul	72
5.5	Werkzeugmodul	80
6	Funktionsnachweis und Evaluation	86
6.1	Funktionsnachweis und Evaluation des Positionierungsmoduls	87
6.2	Funktionsnachweis des Fahrmoduls und Evaluation der adaptiven Regelung	91
6.3	Funktionsnachweis des Werkzeugmoduls	100
6.4	Beurteilung des Gesamtsystems	104
6.5	Vergleich zwischen Raupenmodell und realer Laderaupe mittels lokaler Sensitivitätsanalyse	106
7	Zusammenfassung und Ausblick	112
Literatur		114
Anhang		120
Anhang A		120
<i>A1 Ergebnisse der lokalen Sensitivitätsanalyse</i>		120
Anhang B		124
<i>B1 Messwerte für die Evaluation des Positionierungsmoduls</i>		124
<i>B2 Zufällige Abweichungen der Koordinatenkomponenten</i>		125
Danksagung		126
Lebenslauf		127

1 Einleitung

1.1 Motivation

Automatisierung spielt eine immer wichtigere Rolle in Bauprozessen. Der Automatisierungsprozess findet in fast allen Bereich des Baubetriebs, wie z.B. im Tiefbau, Hochbau oder bei der Errichtung von Ingenieurbauwerken statt (Asadi et. al. 2018, Cai et al. 2018, Yang et al. 2018). Dabei ist die Entwicklung neuer Technologien im Bereich der robotergestützten Arbeitsprozesse entscheidend für die Innovationsschritte, die eng mit der Digitalisierung und Automatisierung verknüpft sind und immer schneller Einzug auf Baustellen halten. Eine solche aktuelle Entwicklung ist zum Beispiel das Building Information Modeling (BIM). Dafür hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) auf Grundlage der Reformkommission zum Bau von Großprojekten im Jahr 2015 einen Drei-Stufen-Plan zur Umsetzung des Digitalen Planens und Bauens aufgestellt (BMVI 2018).

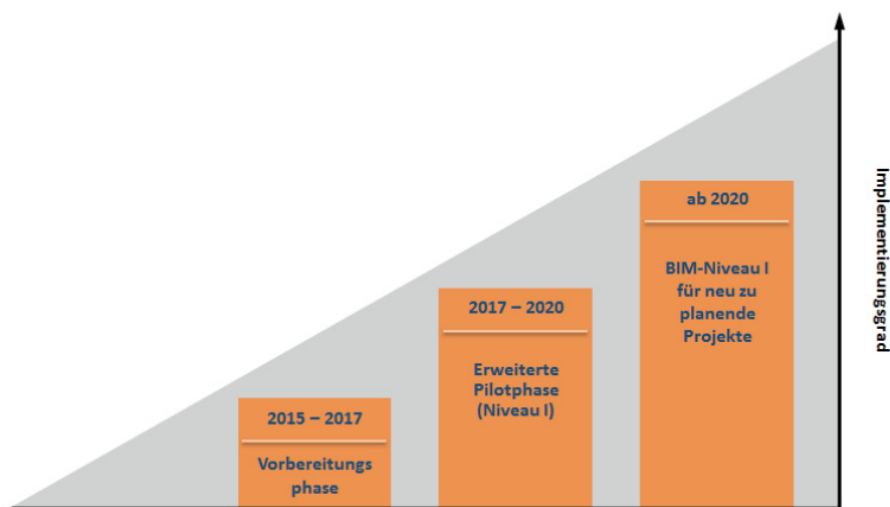


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung des Stufenplans zur Umsetzung des Programms digitales Planen und Bauen BMVI (2018)

Die Automatisierung auf Baustellen hat aber auch noch weitere Aspekte, die eine wichtige Rolle spielen. Zum einen können durch Automatisierung signifikante Effizienzsteigerungen erreicht werden, die gleichzeitige Zeit- und Kostenreduktionen mit sich bringen, zum anderen ergibt sich z.B. durch die automatische Führung von Baumaschinen eine Verbesserung der Arbeitsqualität (Heikkilä and Jaakkola 2003, Gläser et al. 2008, Kilpeläinen et al. 2011). Nicht zuletzt spielt auch die Erhöhung der Sicherheit für Personal und Dritte durch Minimierung der Unfallrisiken, durch Wegfall menschlich verursachter Fehler bzw. fehlerhafter Bedienungen von Maschinen, Systemen und Geräten eine sehr wichtige Rolle. So hat sich die Zahl der Arbeitsunfälle im Bauwesen seit 2013 zwar nicht signifikant geändert, diese lag fast konstant zwischen 17.000 und 18.000 Arbeitsunfällen (AUVA 2017). Jedoch stieg im gleichen Zeitraum die Anzahl der genehmigten Bauprojekte (DESTATIS 2018).

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Prozessautomatisierung im Baubetrieb leisten. Der Fokus liegt hierbei auf dem Bereich Erdbewegungen im Tiefbau. Das Ziel ist es aufzuzeigen, dass Belade- und Entladevorgänge grundsätzlich vollautomatisch durchgeführt werden können. Hierzu wird ein automatisches Steuerungssystem konzipiert, das alle notwendigen Funktionalitäten modelliert und abbildet. Anschließend werden diese implementiert und deren Wirkungsweise anhand einer Modell-Laderaupen (Maßstab 1:14) nachgewiesen.

1.2 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Abschnitt soll ein kurzer Abriss über den aktuellen Stand der Entwicklungen in Forschung und Industrie aufgezeigt werden. Der Fokus soll verstärkt auf den Bereich Tiefbau gerichtet werden.

Aus Sicht der Wissenschaft sei beispielsweise auf die im Folgenden aufgeführten Arbeiten verwiesen. Cannon (1999) beschreibt die Automatisierung von Ausrüstungen zur Erdbewegung. Im Detail geht es um automatisierte Baggeroperationen für den Erdaushub, wobei der Fokus auf der Modellierung und Umsetzung von Aushubprozessen liegt. In Retscher (2001) ist die Entwicklung von 3D-Maschinenführungssystemen ausgeführt. Der Beitrag behandelt plattformabhängige Orientierungsbestimmungen sowie die kinematische Bestimmung der Maschinentrajektorie. Lutzenberger (2002) behandelt eine simulationsbasierte Lösung des Problems der Fahrzeug-Fahrweg-Interaktion unter Verwendung algebraischer Differentialgleichungen. Jedoch sind die Ausführungen auf Radfahrzeuge (LKW) beschränkt. Eine Evaluierung der Effizienz von unterschiedlichen Arbeitsabläufen mit 13 beispielhaft ausgewählten und automatisierten Baumaschinen haben Heikkilä und Jaakkola (2003) durchgeführt. Darin wurden Bewertungskriterien für das Automatisierungspotenzial unterschiedlicher Baumaschinen aufgestellt. Stempfhuber (2008) behandelt die Nutzung von 3D-Echtzeitmessungen unterschiedlicher Sensoren zur 3D-Regelung von Maschinen in Baustellenumgebungen, sowie in landwirtschaftlichen Einsatzumgebungen. Das Thema Baumaschinensteuerung wird von Stempfhuber und Ingesand (2008) im Kontext der Ingenieurgeodäsie betrachtet. Im Rahmen der ingenieurgeodätischen Betrachtung erfolgt eine Einteilung der bestehenden Systeme in Führungs- und Steuerungssysteme sowie eine Einteilung nach Anwendungsgebieten. Ebenfalls wird die Rolle der geodätischen Messtechnik, wie GNSS und Robottachymeter, verdeutlicht. In Kilpeläinen et al. (2011) wird ein Prototyp eines automatischen Steuerungs- und Regelungssystems für einen Mehrzweck-Asphaltfertiger vorgestellt. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf den Aspekten der Kostenreduktion und der Erhöhung der Arbeitsqualität durch Automatisierung von Baumaschinen. Beetz (2012) beschreibt in seiner Arbeit den Aufbau eines modularen Simulationskonzeptes, welches zum Testen und Evaluieren verschiedener Sensoren sowie Filter- und Regelalgorithmen für Baumaschinen und ihre Werkzeuge verwendet werden kann. Schwieger und Beetz (2017) beschreiben die Integration der Ingenieurgeodäsie in den Bauprozess und verdeutlichen die Bedeutung der Ingenieurgeodäsie auf dem Gebiet der Baumaschinensteuerung.

Im Bereich bildverarbeitender Robottachymeter und bildbasierter Positionierungsverfahren existiert bereits eine Vielzahl von Arbeiten und Untersuchungen, die die Effizienz bildgebender Verfahren nachweisen. Im Folgenden sind die für diese Arbeit relevanten Beiträge genannt. Walser (2004) beschreibt wie eine Erhöhung der Genauigkeit von Tachymetermessungen mittels automatisch ablaufender Bildverarbeitungsalgorithmen erreicht werden kann. Die Zielsetzung war dort strukturierte Ziele mittels eines Theodoliten und einem integrierten Bildsensor ohne Einsatz von Prismen zu bestimmen. Wasmeier (2009) untersuchte das Genauigkeitspotenzial von Videotachymetern für Deformationsbestimmungen unter den Gesichtspunkten des Auflösungsvermögens von bildgebenden Sensoren, Reproduzierbarkeit und Kontinuität. Dabei wurden neben unterschiedlichen Fernrohransichtungen auch verschiedene Detektionsalgorithmen getestet. Zur Unterstützung eines geometrischen Alignements setzten Ullrich et al. (2012) bildgebende Sensoren einer Okularkamera ein. Wagner und Wasmeier (2014) beschäftigten sich mit dem Einsatz bildverarbeitender Robottachymeter zur Überwachung von Bauwerken und Hangbewegungen. Die Nutzung der Kamera und die Implementierung photogrammetrischer Konzepte und Methoden zielten auf die Überwachung von signalisierten und nichtsignalisierten Strukturen ab. Für den Entwurf von Überwachungskonzepten für Bauwerke und natürliche Strukturen haben Wagner et al. (2016) Kalibriermethoden und mathematische Systembeschreibungen aufgestellt, die als Basis für Monitoringaufgaben angewendet werden können. Weitere Kalibrierverfahren zur photogrammetriebasierten automatischen Zielerfassung mittels bildverarbeitender Robottachymeter wurden von Zhou et al. (2017) vorgestellt. Die Kalibrierung basierte hier auf der Nutzung der in der Photogrammetrie üblichen codierten Zielzeichen. Wiedemann et al. (2017) stellten in ihrem Beitrag ein auf Videotachymetrie basiertes Nivellement vor. Es wurden dabei Methoden zur relativen Höhenübertragung unter Einsatz von Barcodelatten aufgezeigt, wo mit Hilfe von Grauwertbildern der Lattencode extrahiert und anschließend entsprechend zugeordnet werden konnte. Ein weiterer Beitrag zur Überwachung von Infrastrukturbauten stellten Lienhart und Ehrhart (2019) vor. Dort wurde unter Nutzung von der in der Totalstation verbauten Kamera Eigenfrequenzen von Bauwerken erfasst. Der Fokus lag dabei auf der Auswahl der Bildauswerteverfahren.

Derzeit sind teil- und vollautomatisierte Systeme im Bereich der Baumaschinen stark verbreitet. Diverse Maschinenhersteller, wie z.B. Volvo, CAT oder Liebherr bieten bereits Komplettlösungen zur automatischen Baumaschinensteuerung, z.B. für Planiertraupen, Grader und Bagger, an. Des Weiteren gibt es eine große Anzahl von Anbietern für Zubehör und Umrüstungssets. Damit können Standardmaschinen zu automatisierten Systemen umgerüstet werden. Für alle Systeme gelten jedoch die gleichen Rahmenbedingungen: Der automatische Betrieb benötigt, je nach Anwendungsbereich und Aufgabe, entsprechende Sensorik und dazu gehörige Fusionsalgorithmen, die Sensordaten unterschiedlicher Natur prozessieren. Zuvor müssen Sensordaten eventuell vorverarbeitet und mit geeigneten Filtermethoden geglättet werden. Am Ende der Prozessierungskette steht die Ableitung relevanter Informationen, die für Steuer- und Regelungsoperationen verwendet werden. In diesem Zusammenhang sollen hier einige Beispiele, sowohl zu Entwicklungen in der Messtechnik, als auch aus dem Bereich Fahrzeug- und Maschinenbau gegeben werden.

Neben dem Einsatz von RTK-GPS Systemen zur Positionsbestimmung und Führung von Maschinen entlang einer Trajektorie (Retscher 2001) konnten bewegte Ziele mit dem Aufkommen der motorisierten Tachymetersysteme, den so genannten Robottachymetern, auch mit diesen verfolgt und kinematisch gemessen werden (Deumlich und Staiger 2002). Damit ergab sich die Möglichkeit, Positionen von bewegten Objekten mit ingenieurgeodätischen Methoden zu bestimmen. Parallel wurde auch nichtgeodätische Messtechnik stark weiterentwickelt. Vor allem durch die Miniaturisierung konnten sich MEMS-Sensoren (Micro-Electro-Mechanical Systems) stark verbreiten. Diese Sensoren sind durch die Großserienproduktion erschwinglich geworden und sind als Massenprodukt beliebig verfügbar (Wild-Pfeiffer und Schäfer 2011).

Aktuell bieten fast alle einschlägigen Hersteller von geodätischen Messinstrumenten Maschinensteuerungssets an. Diese bestehen aus Hardware und Software und sind fast universell, also für fast alle Bauarten von Baumaschinen geeignet. Unternehmen, die traditionell Vermessungsinstrumente gebaut und vermarktet haben, wie z.B. Leica, Trimble oder Topcon, bieten in der Zwischenzeit komplette 1D-, 2D- und 3D- Maschinensteuerungssysteme an. Viele Unternehmen, wie z.B. MTS haben neben einer 3D Baggersteuerung, komplette Autopilot Lösungen auf dem Markt (MTS 2018).

Die Entwicklungen im Fahrzeug- und Maschinenbau sind ebenfalls beachtlich. Volvo hat z.B. ein System realisiert, das eine Interaktion zwischen einem manuell gesteuerten Radlader und einem automatisch gesteuerten Muldenkipper innerhalb einer kontrollierten Umgebung ermöglicht. CAT hat mit dem MineStar™ ein System entwickelt, das einzelne Bergbaulastwagen oder sogar ganze Flotten positioniert. Weiterhin berechnet das System wie und wo sich die Fahrzeuge für das Beladen positionieren müssen und zu welchen Verladestellen sie danach fahren sollen (Klickrent 2017). Der Fahrprozess erfolgt automatisch, ohne Fahrer. Das Unternehmen Wirtgen Group hat mit dem Zukauf der HAMM AG 2017 eine Designstudie einer autonomen Walze vorgestellt (Wirtgen 2019). Leica iCON grade iGx3 ist ein Steuerungssystem der Firma Leica für Planiermaschinen. Hier erfolgt die Steuerung über GNSS oder eine Totalstation sowie Schallsensoren (Leica 2019). Trimble bietet 2D-Steuerungen für Motorgrader an, die mittels Laser, GNSS oder einem Robottachymeter positioniert und gesteuert werden (Trimble 2019). Topcon mm-GPS kombiniert zur Steuerung GNSS und Zonenlaser (Topcon 2019). Die Realisierung der MOBA Gradersteuerung HBM MPC-210 basiert auf der Nutzung unterschiedlicher Sensoren, wie z.B. Schallsensoren, Neigungssensoren und GNSS (Code-sys 2012).

1.3 Thematik und Ziele dieser Arbeit

Diese Arbeit knüpft an die vorgestellten Entwicklungen aus der Wissenschaft und Industrie an. Der wissenschaftlichen Weiterentwicklung wird durch die Anwendung einer innovativen Positionsbestimmung und der eingesetzten adaptiven Regelung Rechnung getragen. Die hier vorgestellte Entwicklung hat das konkrete Ziel, eine vollständige Prozessautomatisierung eines Belade- und Entladevorgangs zu realisieren. Der Prozess soll für den Betrieb einer Laderaupen entwickelt werden. Der Aspekt der industriellen Weiterentwicklung beinhaltet die Ausweitung der Automatisierung auf eine bisher nicht automatisierte Baumaschinenkategorie.

Nach Schwieger und Beetz (2017) ist der größte Teil der Baumaschinen, die in Bezug zu Automatisierungen mittels geodätischer Methoden stehen, dem Straßenbau zugeordnet. Das hier entwickelte und vorgestellte

System soll die Vollautomatisierung um den Bereich der Erd- und Schüttgutbearbeitung sowie Transport- und Fördermaschinen erweitern. Des Weiteren soll die nach Stempfhuber und Ingensand (2008) vorgenommene Einteilung und Klassifizierung erweitert werden. Danach können die Systeme in Führungssysteme (I), semi-automatische Systeme (II) und vollautomatische Systeme (III) kategorisiert werden. Tabelle 1-1 gibt die im Jahre 2008 auf dem Markt erhältlichen Systeme zur Baumaschinensteuerung wieder. Für die Laderaupe werden größtenteils die Angaben für den Radlader für die Betrachtung herangezogen. Zur besseren Übersicht und Abgrenzung wird dort ein entsprechender neuer Eintrag vom Autor eingefügt. Bis auf die Spalte „Geschwindigkeit“, die bei Raupenfahrzeugen deutlich niedriger ist, können die Angaben als gültig angenommen werden, da das Ladewerkzeug und die Aufgaben gleich sind.

Im vorgestellten Ansatz ist die Verwendung eines lokalen oder globalen Koordinatensystems möglich. Die Wahl des Koordinatensystems spielt nur eine untergeordnete Rolle. Die statische Positionsbestimmung soll in dieser Arbeit durch bildgebende und bildverarbeitende Verfahren unter Nutzung eines bildverarbeitenden Robottachymeters erfolgen. Hierzu soll die im Tachymeter eingebaute Kamera nicht mehr nur für Dokumentationszwecke verwendet, sondern um die Funktion der bildbasierten Positionsbestimmung erweitert werden. Dazu sollen Methoden der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt werden. Für die Zielverfolgung und die kinematische Positionsbestimmung wird weiterhin ein Reflektor verwendet. Da keine Signalisierung der Ziele mit Reflektoren für statische Positionsbestimmung mehr notwendig ist, wird der Prozessablauf beschleunigt und ferner, durch die Positionsbestimmung beliebiger Objekte in beliebiger Anzahl, eine Steigerung der Flexibilität erreicht.

Die Kontrolle und Steuerung von Maschinen werden momentan, je nach Anwendungsart, meistens innerhalb geschlossener Regelkreise mit PID-Reglern oder mit deren Grundanteilen P, I, bzw. deren Kombinationen PI oder PD realisiert (Mann et al. 2005). Bei hydraulischen Systemen, die geregelt werden sollen, wie z.B. Auslegerarme, sind aufgrund der Trägheit und der daraus resultierenden niedrigen Stellgenauigkeiten der Hydraulik sehr häufig reine P-Regler eingesetzt. Für das Steuern und Regeln hydraulischer Werkzeugsysteme sind diese in den meisten Fällen ausreichend. Das Einstellen der Regelparameter bleibt jedoch weiterhin ein aufwändiges Unterfangen, da entweder empirisch, nach diversen Einstellverfahren oder durch Nutzung von Expertenwissen vorgegangen wird. Da sich jedoch auch im Baumaschinensektor die Elektrifizierung der Stellmotoren immer mehr durchsetzt, wird der Einsatz adaptiver Regelalgorithmen, die in dieser Arbeit konzipiert und untersucht werden, in Zukunft von Interesse sein. Des Weiteren werden durch den Einsatz der adaptiven Regelung wechselnde Fahrumgebungen, die in der Regel auf Baustellen vorliegen, berücksichtigt.

Tabelle 1-1: Erweiterte Klassifizierung der Baumaschinen nach Anwendungsgebieten (nach Stempfhuber und Ingensand 2008)

Maschine	Höhen- genauigkeit	Positions- genauigkeit	Geschwindigkeit	Erhältliche Systeme
Motorgrader	10-20 mm	20-30 mm	bis 9 m/s	I + II
Raupe/ Scraper	20-30 mm	20-50 mm	bis 3 m/s	I + II
Bagger	20-30 mm	20-50 mm	-	I + II
Radlader	20-30 mm	20-50 mm	bis 3 m/s	I
Asphaltfertiger	5 mm	5 mm	bis 0.16 m/s	I + II + III
Betonfertiger	5 mm	5 mm	bis 0.05 m/s	I + II + III
Randsteinfertiger (Curb & Gutter)	5 mm	5 mm	bis 0.08 m/s	I + II + III
Fräse	5-10 mm	10-20 mm	bis 0.30 m/s	I + II
Walze	-	10-20 mm	bis 3 m/s	I + II
Laderraupe	20-30 mm	20-50 mm	~ 1 m/s	I*

*Momentan sind für Laderraupe, analog zu Radladern, nur Führungssysteme (I) erhältlich. Die in dieser Arbeit entwickelten Methoden haben zum Ziel die „Erhältlichen Systeme“ um die Klassen *semi-automatische Systeme (II)* und *vollautomatische 3D-Systeme (III)* erweitern.

Neben den beiden methodischen Ansätzen, der Positionsbestimmung von Objekten mittels eines bildverarbeitenden Robottachymeters und der adaptiven Regelung, wird im Rahmen dieser Arbeit die vollständige Entwicklung eines Systems zur automatischen Durchführung von Belade- und Entladeprozessen vorgenommen. Dabei sollen die verschiedenen Komponenten, bestehend aus Fahrzeug, Werkzeug und Sensorik zu einem Gesamtsystem fusioniert werden. Die Methodik wird an einem physischen Modell erprobt.

Die Art der vorgelegten Arbeit kann wie folgt definiert werden: es werden bestehende Methoden für anspruchsvolle und komplexe Problemstellungen aus dem Fachbereich der Ingenieurgeodäsie weiterentwickelt. Das Thema ist der ingenieurgeodätischen Sparte „Maschinensteuerung“ zugeordnet. Zum einen werden methodische Instrumente der Bildverarbeitung eingesetzt, um mit einer bildverarbeitenden robotischen Totalstation Positionen von Objekten zu bestimmen. Zum anderen kommen adaptive Filter- und Regelalgorithmen zur automatisierten Führung eines unbemannten Landfahrzeugs (Unmanned Ground Vehicle (UGV)) in Form eines Laderaupenmodells zum Einsatz.

Das übergeordnete Ziel ist es, ein System zu entwickeln, welches in der Lage ist, Laderaupen so zu kontrollieren, dass damit vollautomatische Belade- und Entladevorgänge durchgeführt werden können. Zwischen den Belade- und Entladestationen soll sich das Fahrzeug automatisch entlang einer zuvor berechneten Trajektorie bewegen. Die Festlegung der Trajektorien basiert auf zuvor durchgeführten Positionsbestimmungen sowohl der Modellraupe, als auch der Ladung und der Entladestation. Die Trajektorie soll in der ersten Ausbaustufe des Systems die kürzeste Verbindung zwischen den Zielen abbilden. Erweiterungen um Hindernisumfahrungen sind für weitere Ausbaustufen denkbar, werden jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die Funktionalität der Positionsbestimmung und der Führung des Fahrzeugs wird dabei von einem bildverarbeitenden Robottachymeter übernommen. Die kontrollierte Führung entlang der Trajektorie wird mittels adaptiver Regelung realisiert. Die adaptive Regelung soll dabei den in der realen Welt vorkommenden wechselnden Einsatzszenarien und Fahroberflächen Rechnung tragen.

Im Folgenden sind die Ausgangssituation, das Ziel sowie die gewählte Methodik zusammenfassend erläutert.

Ausgangssituation:

Bisher werden Ziele bei Tachymetermessungen überwiegend reflektorbasiert erfasst. Vor allem wenn bestimmte Genauigkeitsanforderungen gelten. Dies bringt die Notwendigkeit mit sich, die Ziele entsprechend mit Reflektoren auszustatten und so zu signalisieren. Die momentan eingesetzten Regelungsaufgaben im Baumaschinenbereich erfolgen überwiegend mit statischen Reglern. Diese sind nicht adaptiv, so dass die Regelparameter vor jedem Betrieb neu eingestellt werden müssen. Bei Änderungen der Einsatzumgebung muss der Einstellschritt erneut vorgenommen werden.

Ziele:

Die Ziele sind zum einen den reflektorbasierten Positionierungsansatz durch eine reflektorlose Methode zu ersetzen, so dass auf eine Signalisierung der Ziele mit Reflektoren verzichtet werden kann. Dies bedingt eine Zeitersparnis und folglich eine erhöhte Wirtschaftlichkeit. Zum anderen soll durch den Einsatz der adaptiven Regelung die aufwändige und unter Umständen häufige Regelparametereinstellung entfallen. Der Mehrwert ist hier ebenfalls die damit einhergehende Zeitersparnis und eine entsprechende Steigerung der Wirtschaftlichkeit.

Methodik:

Die Verortung der Objekte (Laderaupe, Ladung, Entladestation) wird durch die Neuentwicklung der bildbasierten Positionsbestimmung gewährleistet. Die Trajektorienberechnung basiert auf standardisierten Gleichungen zur Lösung von Randwertproblemen. Die automatische Fahrzeugführung entlang der berechneten Trajektorie basiert auf einer, speziell für Raupenfahrzeuge entwickelten, adaptiven Regelung. Die Lade- bzw. Entladeoperationen werden durch eine entwickelte Werkzeugsteuerung, die mit statischen Reglern ausgestattet ist, übernommen.

Die Betrachtungen in dieser Arbeit sind ausschließlich auf Laderaupen begrenzt. Die Methode der bildbasierten Positionsbestimmung ist jedoch ohne Weiteres auf andere Baumaschinen, wie z.B. Radlader übertragbar. Die adaptive Regelung ist nur auf Raupenfahrgerüste zugeschnitten und kann nicht, ohne umfangreiche Modifikationen, auf Radfahrgerüste angewendet werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Zur Lösung der in Kapitel 1.3 formulierten Ziele sollen im zweiten Kapitel die benötigten Grundlagen ausführlich beschrieben werden. Es behandelt zunächst unterschiedliche Fahrzeugmodelle sowie Antriebstechniken und Lenkmethoden von Raupenfahrzeugen. Des Weiteren werden die Maschinenwerkzeuge behandelt. Die Methodik der lokalen Sensitivitätsanalyse wird vorgestellt, um A-priori-Aussagen über die Eignung eingesetzter Sensorik, die in dieser Arbeit als Randbedingung vorgegeben ist, ableiten zu können und die Qualität der Steuerung zu beurteilen. Anschließend folgt eine Beschreibung der eingesetzten Sensorik zur Positions- und Lagebestimmung des Fahrzeugs und des Werkzeugs. Es folgt ein Abschnitt über Möglichkeiten, unterschiedlichste Sensoren zum Zwecke der Positions- und Lagebestimmung zu kombinieren, sowie die Nennung und Beschreibung der Methoden zur Fusionierung der Messdaten und Ableitung von Zielgrößen.

Eine Beschreibung der Regelkreise sowie der adaptiven Regelung zur automatisierten Führung der Modellraupe erfolgt in Kapitel 3. Hier werden die Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile beim Einsatz adaptiver Regler beschrieben. Es werden unterschiedliche Schemata der Regelung sowie theoretische Grundlagen vorgestellt. Anschließend erfolgt die Beschreibung der Konzeption und des Aufbaus des in dieser Arbeit eingesetzten adaptiven Reglers.

Kapitel 4 gibt einen Einblick in die Thematik bildverarbeitender Robottachymeter und deren Einsatz in der statischen Positionsbestimmung. Außerdem werden die eingesetzten Bildverarbeitungsalgorithmen und die zum Erreichen der Arbeitsziele konzipierte und implementierte Prozessierungskette vom Bild zur Position beschrieben.

Die Beschreibung der Systemarchitektur sowie die softwaretechnische Umsetzung und Implementierung aller benötigten Teilmodule zur Realisierung der Ladearbeiten erfolgen in Kapitel 5.

In Kapitel 6 werden die mit dem System durchgeführten Messfahrten beschrieben und die Ergebnisse hinsichtlich der Kombination aus bildverarbeitenden Robottachymeter und adaptiver Regelung evaluiert und beurteilt. Da für diese Arbeit nur eine Modellraupe eingesetzt werden konnte, wird im Schlussteil des Kapitels ein Vergleich zwischen dem Modell und einer realen Raupe gleicher Bauart durchgeführt. Damit soll geklärt werden, inwieweit sich die gewonnen Erkenntnisse aus dieser Arbeit auf reale Systeme übertragen lassen.

Die erreichten Ergebnisse werden in Kapitel 7 zusammengefasst. Ebenfalls werden hier ein Ausblick sowie Anregungen für zukünftige Forschungsansätze geliefert.

2 Grundlagen für das Systemdesign

2.1 Fahrzeugmodelle

Baumaschinen können in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Kunze (2011) teilt diese in 7 Hauptkategorien ein: Erd- und Schüttgutbearbeitungsmaschinen, Verdichtungsmaschinen, Hebemaschinen, Aufbereitungsmaschinen, Bohrmaschinen, Fertigungsmaschinen sowie Transport- und Fördermaschinen. Die Einteilung erfolgt dabei nach Anwendungsfeld und Einsatzgebiet. Eine weitere Klassifizierung kann unter Berücksichtigung der Fahrgestelle einer Baumaschine erfolgen. Es gibt eine generelle Unterteilung in Rad- und Raupenfahrgestelle (Gebhardt 2010). Dabei haben die Raupenfahrzeuge aufgrund der besseren Gewichtsverteilung Vorteile gegenüber den Radfahrzeugen in den Bereichen Traktion und Erdverdichtung. Die Nachteile sind die mangelnde Mobilität außerhalb des Einsatzgebietes und die niedrigere Arbeitsgeschwindigkeit. Tabelle 1 fasst die Vor- und Nachteile von Raupen- und Radfahrzeugen zusammen.

Tabelle 2-1: Vergleich zwischen Raupen- und Radfahrzeugen

	Raupenfahrzeug	Radfahrzeug
Stärken	Geländegängigkeit Manövrierbarkeit Bodenverdichtung	Mobilität (kein Transportaufwand) Arbeitsgeschwindigkeit
Schwächen	Arbeitsgeschwindigkeit Mobilität (hoher Transportaufwand)	Geländegängigkeit Manövrierbarkeit Bodenverdichtung

Die Raupenfahrzeuge sind weiterhin unterteilt in Zweiraupen- und Mehrraupenfahrwerke. Die Mehrraupenfahrwerke können als Dreiraupen- oder Vierraupenfahrwerke realisiert sein oder haben einen symmetrischen oder unsymmetrischen Aufbau (Beetz 2012a).

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den Raupenfahrzeugen mit Zweiraupenfahrwerk und es werden alle experimentellen Untersuchungen mit einem Modell einer Laderaupen von Liebherr im Maßstab 1:14 durchgeführt. Die Klassifizierung des eingesetzten Fahrzeugmodells kann unter den oben genannten Gesichtspunkten wie folgt vorgenommen werden: Erd- und Schüttgutbearbeitungsmaschine mit Raupenfahrgestell und stufenlosem Antrieb.

Aus Vollständigkeitsgründen sei hier noch auf weitere Klassifizierungen wie z.B. die von Stempfhuber und Ingesand (2008) verwiesen. Die Einteilung erfolgt hierbei nach dem Automatisierungsgrad. Es werden drei Kategorien, darunter Führungssysteme, semiautomatische sowie vollautomatische Systeme definiert. Eine andere Einteilung von Heikkilä und Jaakkola (2003) beschreibt das Automatisierungspotenzial einzelner Straßenbaumaschinen und teilt diese nach folgenden Kriterien ein: vollständige Lage- und Höhenregelung von Fahrzeug und Werkzeug, automatische Höhenregelung des Werkzeugs und keine automatische Regelung.

Die Klassifizierung des mit Hilfe des Laderaupenmodells in dieser Arbeit entworfenen Systems nach den Kriterien des Automatisierungsgrades ist das eines vollautomatischen Systems mit einer vollständigen Lage- und Höhenregelung des Fahrzeugs und Werkzeugs.

Für nachfolgende Betrachtungen und Ausführungen in dieser Arbeit wird für die eingesetzte Laderaupen das lokale Maschinenkoordinatensystem entsprechend Abbildung 2-1 definiert.

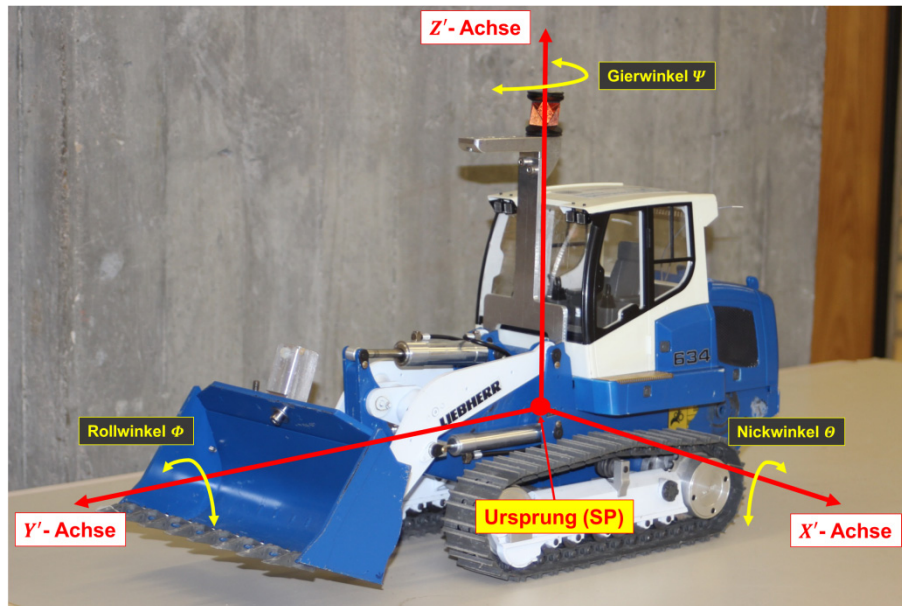


Abbildung 2-1: Lokales Maschinenkoordinatensystem

2.1.1 Antriebstechnik

Raupenfahrzeuge können mit unterschiedlichen Antrieben ausgestattet sein. Nach Gebhardt (2010) existieren mechanische, hydrostatische und elektrische Antriebe. Alle genannten Antriebe sind als stufenlose oder mit Getrieben abgestufte Ausführungen auf dem Markt verfügbar. Antriebe, die mit Getrieben abgestuft sind, benötigen jedoch auf Grund der Komplexität einen höheren Wartungsaufwand. Hydrostatische Antriebe sind am weitesten verbreitet. Der Antrieb erfolgt auf Grundlage hydrostatischer Wandlung (Gebhardt 2010). Die Vorteile eines hydrostatischen Antriebs sind eine verschleißarme Lenkung, einfaches Reversieren und die Möglichkeit, Drehmanöver auf einer Stelle auszuführen. Diese Manöver werden als Spotturns bezeichnet. Allerdings erreichen die hydrostatischen Antriebe bei Lenkmanövern keinerlei Vorteile gegenüber konventionellen mechanischen Antrieben (Gebhardt 2010). Elektrische Antriebe spielten in der Vergangenheit keine Rolle, gewinnen aber in jüngster Zeit immer mehr an Bedeutung. Im Jahr 2015 stellte Liebherr einen Fahrtrieb mit Elektromotor für Raupenfahrzeuge bis 40 Tonnen vor. Der Antrieb basiert auf Permanentmagnet-Technologie und ist laut Hersteller besonders robust und wartungsarm (Liebherr 2018). Im Jahre 2016 wurde die Technologie von der Firma Hartl e-power GmbH als Patent angemeldet und mit der Patentnummer EP 3 281 817 A1 unter dem Namen „Elektrisches Raupenfahrzeug sowie die Verwendung des elektrischen Raupenfahrzeugs“ im Jahre 2018 veröffentlicht (European Patent Office 2018). Jedoch muss bei elektrischen Antrieben der benötigte Strom immer noch durch einen Verbrennungsmotor, z.B. Diesel- oder Gasaggregat generiert werden. Alternative Ansätze, wie im beschriebenen Patent, sehen einen Energiespeicher (Batterie) vor, der auch extern aufgeladen werden kann.

Die eingesetzte Modellraupe ist mit einem stufenlosen elektrischen Antrieb ausgestattet. Somit entspricht der Antrieb dem aktuellsten Stand der Technik realer, mit Raupenfahrgeräten, ausgestatteter Baumaschinen. Der Antrieb wird somit für die Untersuchungen in dieser Arbeit als legitim und geeignet betrachtet. Im Weiteren sind die Ausführungen auf Zweiraupenfahrwerke beschränkt, da Laderaupen ausschließlich mit einem solchen Fahrwerk ausgestattet werden.

2.1.2 Lenkmethode

Die Lenkmethoden bei Raupenfahrzeugen unterscheiden sich grundsätzlich von denen der Radfahrzeuge. Charakteristisch für Raupenfahrzeuge sind eine hohe Richtungsstabilität und Spurtreue bei Geradeausfahrten (Gebhardt 2010). Vor allem bei Kurvenfahrten gibt es fundamentale Unterschiede. Während bei Radfahrzeugen eine oder mehrere Achsen lenkbar sind, also beweglich, sind Zweiraupenfahrzeuge im Allgemeinen

mit starren Achsen ausgestattet. Die einfachste Art, einen Richtungswechsel mit solch einer Konstruktion einzuleiten, ist die Verlangsamung der kurveninneren Kette. Diese Methode wird im Allgemeinen als Antriebslenkung bezeichnet (Beetz 2012a, Le 1999). So unterschiedlich die Einsatzgebiete von Raupenfahrzeugen sind und so groß die Anzahl der Hersteller, so groß ist auch die Anzahl der unterschiedlichsten Realisierungen von Lenksystemen. Ausführungen wie Differentiallenkungen, hydrostatische oder pneumatische Lenksysteme sind nur einige Beispiele. Ausführliche und vollständige Beschreibungen der Lenksysteme sind z.B. in Kühn (1991), Gebhardt (2010) oder Kunze et al. (2002) zu finden.

Die Lenkung der Modellraupe basiert auf der genannten Festlegung des stufenlosen, elektrischen Antriebs. Der Antrieb ist mittels zweier Motoren, jeweils einer für die linke und einer für die rechte Kette, konstruktiv umgesetzt. Seitens der Hersteller gibt es für Antriebsarten keine allgemeine Normung (Kunze et al. 2002, Beetz 2012a).

Die Antriebslenkung setzt die Lenkbewegung durch die Verlangsamung der kurveninneren Kette um. Jedoch liegt der Nachteil dieser Methode darin, dass sich die Gesamtgeschwindigkeit des Fahrzeugs verringert. Dieser Effekt lässt sich mit Gleichung (2-1) erklären, die besagt, dass das Mittel der beiden Kettengeschwindigkeiten der resultierenden Gesamtgeschwindigkeit entspricht.

$$v_g = \frac{1}{2} \cdot (v_l + v_r), \quad (2-1)$$

mit

- v_g : Gesamtgeschwindigkeit des Fahrzeugs,
 v_l, v_r : Geschwindigkeit der linken und rechten Kette.

Um diese negative Eigenschaft zu unterdrücken, wird im Folgenden eine Lenkmethode vorgestellt, die die eingestellte Geschwindigkeit während der Kurvenfahrten beibehält. Die im Folgenden vorgestellten Formeln zur Lenkmethode beschreiben Bewegungen, bei denen der Schlupf nicht berücksichtigt wird.

Der mathematische Ansatz basiert auf dem kinematischen Modell für Raupenfahrzeuge nach Le (1999). Abbildung 2-2 stellt die geometrischen Zusammenhänge während einer Kurvendurchfahrt dar. Das zugrunde liegende Koordinatensystem ist in Abbildung 2-1 definiert.

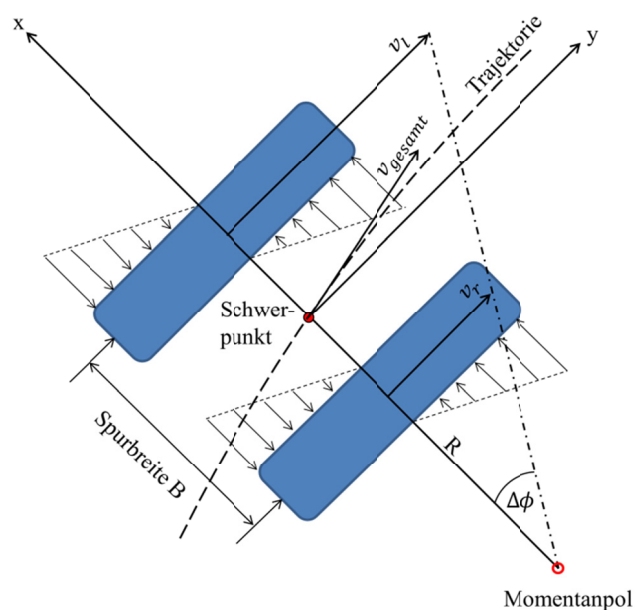


Abbildung 2-2: Kinematisches Bewegungsmodell für Raupenfahrzeuge ohne Schlupf (nach Le 1999)

Die Änderung des Orientierungswinkels $\Delta\phi$ wird nach Beetz (2012a) und Le (1999) mit Gleichung (2-2) berechnet.

$$\Delta\phi = \arctan \frac{(v_l - v_r) \cdot \Delta t}{B}, \quad (2-2)$$

mit

Δt : Zeitintervall,

B : Spurbreite.

Nach Abbildung 2-2 lässt sich weiterhin folgender Zusammenhang zwischen dem Kurvenradius, der Spurbreite und den beiden Kettengeschwindigkeiten ableiten:

$$R = \frac{B \cdot (v_l + v_r)}{2 \cdot (v_l - v_r)}, \quad (2-3)$$

mit

R : Radius,

v_l : Kettengeschwindigkeit links,

v_r : Kettengeschwindigkeit rechts.

Nach Lerke und Schwieger (2017) wird die Gleichung (2-3) nach den Kettengeschwindigkeiten v_l und v_r aufgelöst:

$$v_l = v_r \cdot \frac{(2R+B)}{(2R-B)}, \quad (2-4)$$

$$v_r = v_l \cdot \frac{(2R-B)}{(2R+B)}. \quad (2-5)$$

Die Ausdrücke $\frac{(2R+B)}{(2R-B)}$ und $\frac{(2R-B)}{(2R+B)}$ der Gleichungen (2-4) und (2-5) sind reziprok. Somit kann ein Skalierungsfaktor n für die beiden Kettengeschwindigkeiten nach Gleichung (2-6) definiert werden.

$$n = \frac{(2R+B)}{(2R-B)}. \quad (2-6)$$

Die Gleichungen (2-4) und (2-5) können mit Hilfe dieses Skalierungsfaktors wie folgt umformuliert werden:

$$v_l = v_r \cdot n, \quad (2-7)$$

$$v_r = \frac{v_l}{n}. \quad (2-8)$$

Der Skalierungsfaktor erlaubt es, die Antriebskräfte der beiden Ketten abhängig vom Kurvenradius zu skalieren. Unter der Annahme einer Geradeausfahrt ist der Skalierungsfaktor $n = 1$ und es gilt:

$$v_g = v_l = v_r. \quad (2-9)$$

Gleichung (2-1) kann dann unter Verwendung von (2-7) und (2-8) wie folgt reformuliert werden:

$$v_g = \frac{1}{2} \cdot \left((v_r \cdot n) + \left(\frac{v_l}{n} \right) \right) = \frac{v_r \cdot n}{2} + \frac{v_l}{2 \cdot n}. \quad (2-10)$$

Nun kann die Gleichung (2-10) erneut nach den beiden Kettengeschwindigkeiten v_l und v_r aufgelöst werden, um eine Funktion in Abhängigkeit der Gesamtgeschwindigkeit zu erhalten (Lerke und Schwieger 2017):

$$v_l = (2 \cdot n \cdot v_g - v_r \cdot n^2), \quad (2-11)$$

$$v_r = \frac{2 \cdot v_g}{n} - \frac{v_l}{n^2}. \quad (2-12)$$

Durch Substitution von v_r in (2-10) und unter Verwendung von (2-8) erhält man für die linke Kettengeschwindigkeit die folgende Gleichung:

$$v_l = v_g \cdot \frac{2 \cdot n}{1+n}. \quad (2-13)$$

Durch Substitution von v_l in (2-12) und unter Verwendung von (2-7) erhält man für die rechte Kettengeschwindigkeit:

$$v_r = v_g \cdot \frac{2}{1+n}. \quad (2-14)$$

$\frac{2 \cdot n}{1+n}$ und $\frac{2}{1+n}$ repräsentieren die Skalierungsterme, mit denen die eingestellte Gesamtgeschwindigkeit v_g , in Abhängigkeit des zu fahrenden Radius skaliert wird, da n nach (2-6) von Radius R und bekannten Spurbreite B abhängig ist.

2.2 Werkzeug

Hinsichtlich der in Kapitel 1 formulierten Ziele spielt das Werkzeug eine entscheidende Rolle. Das Zusammenspiel zwischen der Bewegung der Trägermaschine und den Werkzeugoperationen zur Be- und Entladung kann nur optimal umgesetzt werden, wenn das Werkzeug hinsichtlich Geometrie und Bewegung hinreichend genau beschrieben ist.

Zunächst erfolgen die Beschreibung der Geometrie des Werkzeugs sowie die Aufstellung des resultierenden geometrischen Modells. Um Beurteilungen hinsichtlich Arbeitsgenauigkeit durchführen zu können, wird das geometrische Modell mit einem stochastischen Modell ergänzt.

Für ausführliche Abhandlungen über Trägermaschinen und deren Werkzeuge sei auf die Arbeiten von Kühn (1991), Gebhard (2010) oder Kunze (2011) verwiesen.

2.2.1 Geometrisches Modell des Ladewerkzeugs

Das Werkzeug der Modellraupe besteht aus zwei Hauptkomponenten, dem Ausleger und der Ladeschaufel (Abbildung 2-4). Für diese zwei Komponenten können jeweils die Freiheitsgrade, die zur Beschreibung der Bewegung und anschließender Parametrisierung benötigt werden, definiert werden. Der Ausleger hat genau einen Freiheitsgrad. Es handelt sich um eine Drehung um die im Drehpunkt A gelagerte Drehachse und die damit verbundene Höhenänderung des Drehpunktes B. Die Ladeschaufel hat ebenfalls einen Freiheitsgrad, der Lageänderungen ermöglicht. Diese sind durch Drehungen um die im Drehpunkt B gelagerte Drehachse realisiert und ermöglichen Kippbewegungen (Nicken) der Schaufel. Die Bewegungen der beiden Komponenten sind mittels hydraulischer Kreisläufe realisiert.

Zur Aufstellung der Modellgleichung ist zunächst zu klären, welche geometrischen Positionen am Werkzeug wichtig sind. Nach Beetz (2012a) kann für jedes Werkzeug der sogenannte Arbeitspunkt (AP) definiert werden. Dies ist im Allgemeinen der Kontaktpunkt zwischen der Maschine und dem zu bearbeitenden Material. Im Falle der eingesetzten Laderaupen wird hierfür ein Punkt an der äußersten Spitze der Ladeschaufel definiert (Abbildung 2-3).

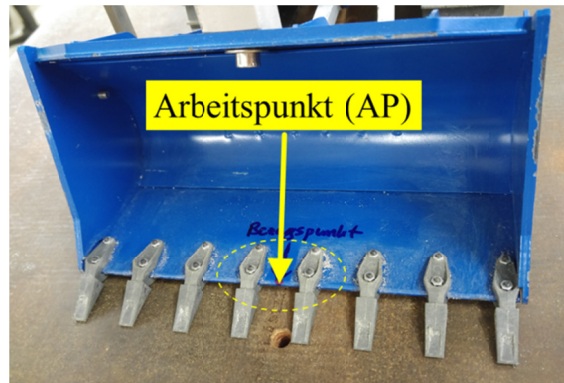


Abbildung 2-3: Position des Arbeitspunkts (AP) an der Ladeschaufel

Als weiterer wichtiger Punkt ist die Position des Reflektors anzunehmen, da hier die Maschinenposition mittels eines Tachymeters gemessen wird. Bei der Modellierung spielen die beiden Drehpunkte A und B eine entscheidende Rolle. Abbildung 2-4 zeigt alle für die Modellierung relevanten Größen der Modellraupe. Das Modell wird, ausgehend von der gemessenen Position P, als räumlicher Polygonzug entwickelt. Aufgrund der einfachen Geometrie des Ladewerkzeugs sowie dem Vorliegen von nur zwei Freiheitsgraden, die ausschließlich Bewegung in der $Y'-Z'$ -Ebene zulassen, wird keine in der Robotik übliche, kinematische Modellierung (Connette 2013, Wiest 2001) des Werkzeugs vorgenommen. In Abbildung 2-4 sind die Größen dy und dz invariante Hebelarme. Ebenso verhält sich es mit den Größen $L1$ und $L2$. Hingegen sind die Drehwinkel θ_1 und θ_2 um die Drehpunkte A und B, variant und abhängig von der Stellung des Auslegers und der Ladeschaufel. Lässt man den Ausleger $L1$ um Drehpunkt A rotieren, so bewegt sich Punkt B auf einem Kreisbogen. Dabei kann die Höhe des Punktes B in Abhängigkeit des Öffnungswinkels mit einer einfachen trigonometrischen Funktion wie folgt beschrieben werden (Gruber 2001):

$$h = \sin \theta_1 \cdot L1, \quad (2-15)$$

mit

- h : resultierende Höhe des Punktes B über dem Fahruntergrund,
- θ_1 : gemessener Neigungswinkel um Punkt A,
- $L1$: Länge des Auslegers (Abstand zwischen Punkt A und Punkt B).

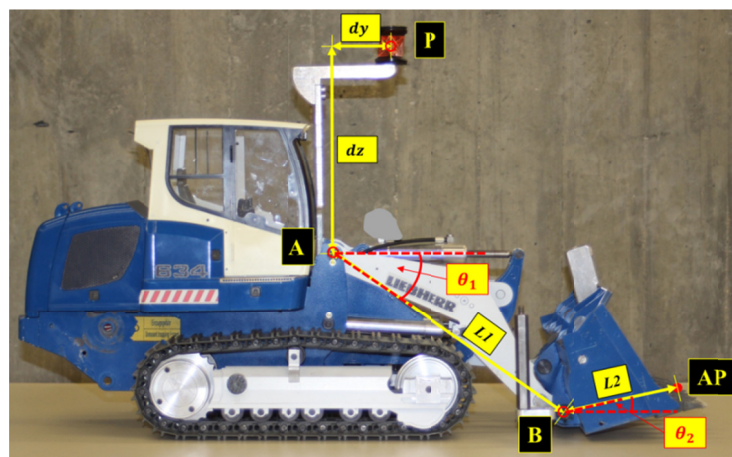


Abbildung 2-4: Lage relevanter geometrischer Punkte der Laderaupe: P-Position des Reflektors für tachymetrische Messungen, A-Drehpunkt des Auslegers, B-Drehpunkt der Ladeschaufel, AP-Arbeitspunkt, θ_1 -Neigungswinkel am Punkt A, θ_2 -Neigungswinkel am Punkt B.

Ausgehend von den aufgestellten Definitionen und Festlegungen lässt sich unter Nutzung von Abbildung 2-4 der Vektor des Arbeitspunktes $\mathbf{X}_{AP}^l$ im lokalen 3D-Maschinenkoordinatensystem (Abbildung 2-1) aufstellen. Dabei stellt $\mathbf{X}_{AP}^l$ die lokalen Koordinatenunterschiede zum Prismenpunkt $\mathbf{P}$ dar.

$$\mathbf{X}_{AP}^l = \begin{pmatrix} Y' \\ X' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -dy + \cos\theta_1 \cdot L1 + \cos\theta_2 \cdot L2 \\ 0 \\ -dz - \sin\theta_1 \cdot L1 - \sin\theta_2 \cdot L2 \end{pmatrix}, \quad (2-16)$$

mit

Y', X', Z' : Vektorkomponenten des Arbeitspunktes $\mathbf{X}_{AP}^l$ im lokalen 3D-Maschinenkoordinatensystem,

dy : Abstand Reflektor – Punkt A in Y' -Richtung,

dz : Abstand Reflektor – Punkt A in Z' -Richtung,

θ_2 : Gemessener Neigungswinkel um Punkt B,

$L2$: Länge der Ladeschaufel (Abstand zwischen Punkt B und Punkt AP).

Anzumerken ist die Definition der X' -Komponente. Diese ist in der Gleichung (2-16) Null, da das Werkzeug in X' -Richtung starr montiert ist und keinen Freiheitsgrad aufweist. Eine Änderung in X' -Richtung ist nur durch einen Richtungswechsel des Trägerfahrzeugs möglich was jedoch nur in einem übergeordneten Koordinatensystem (nicht im Maschinenkoordinatensystem) möglich ist.

Nach Kahmen und Retscher (1999) soll die Positionsbestimmung und Orientierung einer Baumaschine in einem übergeordneten 3D-Koordinatensystem geschehen, um diese vollständig im Raum zu beschreiben. Dies schließt die Positions- und Lagebestimmung des Werkzeugs mit ein. Dazu wird eine Transformation benötigt, die den lokalen Arbeitspunktvektor in einen globalen überführt. Die Transformationsgleichung kann wie folgt aufgestellt werden:

$$\mathbf{X}_{AP}^g = \mathbf{X}_{SP}^g + \mathbf{R}(\Psi, \Phi, \Theta) \cdot \mathbf{X}_{AP}^l, \quad (2-17)$$

mit

$\mathbf{X}_{AP}^g$: Vektor des Arbeitspunktes im globalen 3D-Koordinatensystem,

$\mathbf{X}_{SP}^g$: Gemessener Vektor der Position des Reflektors im globalen 3D-Koordinatensystem,

$\mathbf{R}(\Psi, \Phi, \Theta)$: Rotationsmatrix um die Lagewinkel Gieren Ψ , Nicken Θ und Rollen Φ .

Die Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ setzt sich wie folgt zusammen:

$$\mathbf{R}(\Psi, \Phi, \Theta) = \mathbf{R}(\Theta) \cdot \mathbf{R}(\Phi) \cdot \mathbf{R}(\Psi). \quad (2-18)$$

Dabei entspricht $\mathbf{R}(\Phi)$ der Drehung um die Y' -Achse, $\mathbf{R}(\Theta)$ der Drehung um die X' -Achse und $\mathbf{R}(\Psi)$ der Drehung um die Z' -Achse des Maschinenkoordinatensystems nach Abbildung 2-1. Die Ausrichtung der Achsen entspricht dabei der geodätischen Definition eines Koordinatensystems. Es ergeben sich hierfür folgende Rotationsmatrizen:

$$\mathbf{R}(\Theta) = \begin{pmatrix} \cos\Theta & 0 & -\sin\Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Theta & 0 & \cos\Theta \end{pmatrix}, \quad (2-19)$$

$$\mathbf{R}(\Phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi \\ 0 & -\sin\Phi & \cos\Phi \end{pmatrix}, \quad (2-20)$$

$$\mathbf{R}(\Psi) = \begin{pmatrix} \cos\Psi & \sin\Psi & 0 \\ -\sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2-21)$$

Aus den Gleichungen (2-16), (2-17), (2-18), sowie (2-19) bis (2-21) lassen sich für den Arbeitspunkt folgende Modellgleichungen für die Vektorkomponenten des Arbeitspunktes im globalen 3D Koordinatensystem aufstellen:

$$Y_{AP}^g = Y_m + (\cos\Psi \cdot \cos\theta - \sin\Psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\Phi) \cdot (L1 \cdot \cos\theta_1 - dy + L2 \cdot \cos\theta_2) - \cos\Phi \cdot \sin\theta \cdot (L1 \cdot \sin\theta_1 + dz + L2 \cdot \sin\theta_2), \quad (2-22)$$

$$X_{AP}^g = X_m + \sin\Phi \cdot (L1 \cdot \sin\theta_1 + dz + L2 \cdot \sin\theta_2) - \cos\Phi \cdot \sin\Psi \cdot (L1 \cdot \cos\theta_1 - dy + L2 \cdot \cos\theta_2), \quad (2-23)$$

$$Z_{AP}^g = Z_m + (\cos\Psi \cdot \sin\theta + \cos\Psi \cdot \cos\theta \cdot \sin\Psi \cdot \sin\Phi) \cdot (L1 \cdot \cos\theta_1 - dy + L2 \cdot \cos\theta_2) + \cos\theta \cdot \cos\Phi \cdot (L1 \cdot \sin\theta_1 + dz + L2 \cdot \sin\theta_2), \quad (2-24)$$

mit

Y_m, X_m, Z_m : Elemente des Vektors $\mathbf{X}_{SP}^g$.

Die geometrische Modellierung kann nun dazu verwendet werden, die Position des Arbeitspunktes der Laderaupe im globalen 3D-Koordinatensystem darzustellen. Diese Bestimmung erfolgt in der Praxis mittels Sensordaten, die die benötigten Größen ausgeben. So werden die gemessenen Positionen der Trägermaschine im Rahmen dieser Arbeit mit einem Tachymeter bestimmt. Andere Methoden, wie z.B. GNSS-Messungen, sind ebenfalls denkbar. Die Drehwinkel des Auslegers θ_1 und der Ladeschaufel θ_2 werden mittels Neigungsmessern bestimmt. Aufgrund der baulichen Ausführung der Modellraupe können keine Winkelgeber an den Drehachsen direkt installiert werden. Die weiteren Lagewinkel der Maschine, der Nickwinkel θ , der Rollwinkel Φ und der Gierwinkel Ψ , können entweder mit zusätzlichen Sensoren erfasst oder aus A-priori-Informationen, z.B. einem Geländemodell oder einer vordefinierten Trassendefinition, entnommen werden. Die Größen $dy, dz, L1$ und $L2$ werden als unveränderbar und fehlerfrei bestimmt angenommen.

2.2.2 Stochastisches Modell des Ladewerkzeugs und lokale Sensitivitätsanalyse

Das stochastische Modell wird benötigt, um im späteren Verlauf die Stellgenauigkeit des Arbeitspunktes (AP) zu untersuchen. Es basiert auf dem Varianzfortpflanzungsgesetz. Die Varianzen der Zufallsgrößen werden mit Hilfe linearer Funktionen berechnet und auf die Zufallsvariablen angewendet (Niemeier 2008). Im vorliegenden Fall sind die Funktionen jedoch nicht linear. Somit müssen die Modellgleichungen (2-22), (2-23) und (2-24) zunächst linearisiert werden. Die Zufallsvariablen in den Modellgleichungen sind die beschriebenen Messgrößen $Y_m, X_m, Z_m, \theta_1, \theta_2, \theta, \Phi$ und Ψ . Diese werden im Allgemeinen als Beobachtungen bezeichnet. Das Varianzfortpflanzungsgesetz kann nun wie folgt aufgestellt werden (Niemeier 2008):

$$\Sigma_{ff} = \mathbf{F}^T \cdot \Sigma_{ll} \cdot \mathbf{F}, \quad (2-25)$$

mit

Σ_{ff} : Kovarianzmatrix der Unbekannten als Ausgangsgrößen,

Σ_{ll} : Kovarianzmatrix der Beobachtungen als Eingangsgrößen,

$\mathbf{F}$: Jacobi-Matrix.

Die Eingangsgrößenmatrix Σ_{ll} wird für die folgende Betrachtung ohne Korrelationen eingeführt. Informationen über Kovarianzen liegen nicht vor. Auf Annahmen wurde verzichtet. Somit hat diese für den vorliegenden Fall die Form:

$$\Sigma_{ll} = \begin{pmatrix} \sigma_{Ym}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Xm}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Zm}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\theta_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\theta_2}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\theta}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\psi}^2 \end{pmatrix}. \quad (2-26)$$

Als nächstes erfolgt die Aufstellung der Jacobi-Matrix F . Die Matrixelemente setzen sich aus den partiellen Ableitungen der Modellgleichungen nach den Beobachtungen zusammen. Theoretisch besteht die Möglichkeit, die als fest angenommenen Parameter dy , dz , $L1$ und $L2$ in die Varianzfortpflanzung einzubeziehen. Dieses Vorgehen wäre bei einer realen Maschine sicherlich sinnvoll, weil dort aufgrund großer dynamischer Lastzustände die mechanischen Bauteile einer Veränderung unterliegen. Jedoch ist beim eingesetzten Modell aufgrund geringer Lastzustände eine mechanische Verformung der Bauteile und somit eine Änderung der Größen nicht zu erwarten.

$$F = \begin{pmatrix} \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial Y_m} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial X_m} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial Z_m} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial \theta} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial \phi} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial \psi} \\ \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial Y_m} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial X_m} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial Z_m} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial \theta} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial \phi} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial \psi} \\ \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial Y_m} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial X_m} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial Z_m} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial \theta} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial \phi} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial \psi} \end{pmatrix}. \quad (2-27)$$

Durch die Anwendung der Gleichung (2-25) können aus der resultierenden Matrix Σ_{ff} die Standardabweichungen der Vektorkomponenten des Arbeitspunktes Y_{AP}^g , X_{AP}^g und Z_{AP}^g wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{Y_{AP}^g} = \sqrt{\Sigma_{ff}(1,1)}, \sigma_{X_{AP}^g} = \sqrt{\Sigma_{ff}(2,2)}, \sigma_{Z_{AP}^g} = \sqrt{\Sigma_{ff}(3,3)}. \quad (2-28)$$

Somit ist es nun möglich, nicht nur die exakte Position des Arbeitspunktes, sondern auch dessen Genauigkeit zu bestimmen. Diese Genauigkeit ist ausschlaggebend für die Beurteilung der an die maschinelle Durchführung der Arbeiten gestellten Qualitätsanforderungen.

Lokale Sensitivitätsanalyse

Nach Siebertz et al. (2010) ist die lokale Sensitivitätsanalyse wie folgt beschrieben: eine lokale Sensitivitätsanalyse untersucht, welche Einflüsse bestimmte Faktoren an einem bestimmten Funktionswert der Ausgangsvariablen haben (z.B. lokales Minimum). Dabei wird durch Variation der Eingangswerte um kleine Beträge die Reaktion an Ausgangsvariablen betrachtet. Im Gegensatz dazu werden bei der globalen Sensitivitätsanalyse die Einflüsse von Faktoren über den gesamten Definitionsbereich untersucht.

Mittels lokaler Sensitivitätsanalyse sollen hier die Einflüsse der Werkzeuggeometrie sowie die Wirkung des Zusammenspiels aus Geometrie und Sensorik auf die Arbeitsqualität untersucht werden. Für solche Untersuchungen kann die lokale Sensitivitätsanalyse angewendet werden. Diese hat den Vorteil, dass eine Bewertung des Systems a-priori, auf Basis theoretischer Annahmen, vorgenommen werden kann. Somit können bei der Entwicklung und Herstellung eines Produkts unnötige Kosten während der Entwicklung gespart werden. Außerdem können damit auch verschiedene Designvarianten gerechnet, überprüft und verglichen werden. Ein wichtiger Aspekt ist die Berechnung der Genauigkeit des Arbeitspunktes und dessen Abhängigkeit von den Genauigkeiten der eingesetzten Sensoren und der Geometrie.

Zur Berücksichtigung der Geometrieinflüsse wird, im Gegensatz zu den Ausführungen über das stochastische Modell, die Einbeziehung der Maschinenbauteile wie Auslegerlänge und Schaufellänge bedeutsam. Des Weiteren wird zur Erhöhung der Zuverlässigkeit eine redundante Messung mittels eines zusätzlichen Sensors eingeführt und untersucht. Dabei handelt es sich um einen Ultraschallsensor, der parallel zum Neigungssensor die Höhe des Auslegerpunktes B (vgl. Abbildung 2-4) ausgibt. Diese Erweiterungen sind Vorgriffe auf die später folgenden Kapitel 2.3, welches Sensoren und Sensorfusionen behandelt und Kapitel 6.5, in dem ein Vergleich zwischen einer realen Laderaupen (Massstab 1:1) und dem Laderaupenmodell (Massstab 1:14) durchgeführt wird.

Im vorliegenden Fall handelt es sich um die Eingangswerte folgender Variablen: Position der Laderaupen im globalen 3D-Koordinatensystem, repräsentiert durch die Elemente des Vektors $\mathbf{X}_{SP}^g$, die Höhenmessung h^S eines Ultraschallsensors, die Neigungsmessungen des Auslegers und der Ladeschaufel um die Punkte A und B, repräsentiert durch die Neigungswinkel θ_1 und θ_2 , die Lagewinkel der Trägermaschine Nicken θ , Rollen Φ und Gieren Ψ , sowie die beiden Hebelarme $L1$ als Länge des Auslegers und $L2$ als Länge der Ladeschaufel (vgl. Abbildung 2-4). Durch den lotrechten Anbau des Ultraschallsensors am Ausleger misst dieser im vorliegenden Fall die Höhendifferenz zwischen der Auslegerspitze (Punkt B, Abb. 2-4) und dem Fahruntergrund. Die Ausgangsvariablen sind die Standardabweichungen der Vektorkomponenten des Arbeitspunktes $\sigma_{Y_{AP}}^g$, $\sigma_{X_{AP}}^g$ und $\sigma_{Z_{AP}}^g$.

Das zu analysierende Modell ist in der Grundform durch die Gleichungen (2-16) und (2-22) bis (2-24) beschrieben. Allerdings muss das Modell aus Gleichung (2-16) um den genannten Parameter der Höhenmessung h^S des Ultraschallsensors erweitert werden. Für die Koordinaten des Arbeitspunktes im lokalen System ergibt sich damit folgende, gegenüber Gleichung (2-16) modifizierte Gleichung:

$$\mathbf{X}_{AP}^l = \begin{pmatrix} Y' \\ X' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -dy + \cos\theta_1 \cdot L1 + \cos\theta_2 \cdot L2 \\ 0 \\ -dz - \left(\frac{\sin\theta_1 \cdot L1 + h^S}{2} \right) - \sin\theta_2 \cdot L2 \end{pmatrix}. \quad (2-29)$$

Die Höheninformationen für den Ausleger, repräsentiert durch die Terme „ $\sin\theta_1 \cdot L1$ “ für den Neigungsmesser und „ h^S “ für den Ultraschallsensor, werden in der Z' -Komponente gewichtet gemittelt eingeführt.

Die Überführung des Arbeitspunktvektors in das globale System erfolgt nach Gleichung (2-17). Damit ergeben sich folgende modifizierte Modellgleichungen für den Arbeitspunkt im globalen System:

$$Y_{AP}^g = Y_m + (\cos\Psi \cdot \cos(\theta) - \sin(\Psi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin\Phi) \cdot (L1 \cdot \cos\theta_1 - dy + L2 \cdot \cos\theta_2) - \cos\Phi \cdot \sin(\theta) \cdot \left(\frac{h^S + L1 \cdot \sin\theta_1}{2} - dz + L2 \cdot \sin\theta_2 \right), \quad (2-30)$$

$$X_{AP}^g = X_m + \sin\Phi \cdot \left(\frac{h^S + L1 \cdot \sin\theta_1}{2} - dz + L2 \cdot \sin\theta_2 \right) - \cos\Phi \cdot \sin(\Psi) \cdot (L1 \cdot \cos\theta_1 - dy + L2 \cdot \cos\theta_2), \quad (2-31)$$

$$Z_{AP}^g = Z_m + (\cos\Psi \cdot \sin(\theta) + \cos(\theta) \cdot \sin\Psi \cdot \sin\Phi) \cdot (L1 \cdot \cos\theta_1 - dy + L2 \cdot \cos\theta_2) + \cos(\theta) \cdot \cos\Phi \cdot \left(\frac{h^S + L1 \cdot \sin\theta_1}{2} - dz + L2 \cdot \sin\theta_2 \right). \quad (2-32)$$

Für die stochastische Modellierung der Eingangsgrößen wird die Hauptdiagonale der Matrix Σ_{ll} in (2-27) um die zusätzlichen Parameter h^S , $L1$ und $L2$ erweitert sowie ihre Reihenfolge umgestellt. Auf die Einführung von Korrelationen wird hier aus den gleichen Gründen wie bei Formel (2-26) verzichtet.

$$\Sigma_{ll} = \begin{pmatrix} \sigma_{Y_m}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{X_m}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Z_m}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{h^S}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\theta_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\theta_2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\theta}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\Phi}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\Psi}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{L1}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{L2}^2 \end{pmatrix}. \quad (2-33)$$

Durch die Erweiterung um zusätzliche Parameter ändern sich ebenfalls die Größe und die Form der Jacobi-Matrix $\mathbf{F}$.

$\mathbf{F} =$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial Y_m} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial X_m} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial Z_m} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial h^S} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial \theta} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial \Phi} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial \Psi} & \frac{\partial Y_{AP}^{gl}}{\partial L1} & \frac{\partial Y_{AP}^g}{\partial L2} \\ \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial Y_m} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial X_m} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial Z_m} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial h^S} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial \theta} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial \Phi} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial \Psi} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial L1} & \frac{\partial X_{AP}^g}{\partial L2} \\ \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial Y_m} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial X_m} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial Z_m} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial h^S} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Z_{AP}^{gl}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial \theta} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial \Phi} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial \Psi} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial L1} & \frac{\partial Z_{AP}^g}{\partial L2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} & f_{16} & f_{17} & f_{18} & f_{19} & f_{110} & f_{111} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} & f_{25} & f_{26} & f_{27} & f_{28} & f_{29} & f_{210} & f_{211} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} & f_{35} & f_{36} & f_{37} & f_{38} & f_{39} & f_{310} & f_{311} \end{pmatrix}. \quad (2-34)$$

Auf die Darstellung der partiellen Ableitungen der Jacobi-Matrix wird aus Übersichtsgründen verzichtet. Für deren Berechnungen wurde die „Symbolic Toolbox“ von Matlab verwendet. Alternativ wäre eine numerische Bestimmung der partiellen Ableitungen möglich.

Für die Modellauswertung wird zunächst das Varianzfortpflanzungsgesetz nach Gleichung (2-25) angewendet und die Standardabweichungen der Vektorkomponenten des Arbeitspunktes $\sigma_{Y_{AP}^g}$, $\sigma_{X_{AP}^g}$ und $\sigma_{Z_{AP}^g}$ nach Gleichung (2-28) berechnet. Anschließend werden die Varianzanteile der Eingangsgrößen an den Varianzen der Ausgangsgröße nach den Gleichungen (2-35), (2-36) und (2-37) berechnet. Die Berechnung der relativen Varianzanteile wird nach Gleichungen (2-38), (2-39) und (2-40) vorgenommen.

$$\sigma_{m,Y_{AP}^g}^2 = f_{1,m}^2 \cdot \sigma_m^2, \quad (2-35)$$

$$\sigma_{m,X_{AP}^g}^2 = f_{2,m}^2 \cdot \sigma_m^2, \quad (2-36)$$

$$\sigma_{m,Z_{AP}^g}^2 = f_{3,m}^2 \cdot \sigma_m^2, \quad (2-37)$$

mit

$m = 1, 2, \dots, 11$: Index der Eingangsvariablen/ Anzahl der Spalten der Jacobi-Matrix $\mathbf{F}$,
 σ_m^2 : m -tes Diagonalelement in der Matrix Σ_{ll} .

Die Darstellung relativer Varianzanteile lässt sich durch Division der Varianzanteile durch die jeweilige Komponente der Gesamtvarianz, aus den Diagonalelementen von Σ_{ff} , berechnen.

$$P_{m,Y_{AP}^g} = \frac{\sigma_{m,Y_{AP}^g}^2}{\sigma_{Y_{AP}^g}^2} = \frac{f_{1,m}^2 \cdot \sigma_m^2}{\sigma_{Y_{AP}^g}^2}, \quad (2-38)$$

$$P_{m,X_{AP}^g} = \frac{\sigma_{m,X_{AP}^g}^2}{\sigma_{X_{AP}^g}^2} = \frac{f_{2,m}^2 \cdot \sigma_m^2}{\sigma_{X_{AP}^g}^2}, \quad (2-39)$$

$$P_{m,Z_{AP}^g} = \frac{\sigma_{m,Z_{AP}^g}^2}{\sigma_{Z_{AP}^g}^2} = \frac{f_{3,m}^2 \cdot \sigma_m^2}{\sigma_{Z_{AP}^g}^2}. \quad (2-40)$$

Die Durchführung der lokalen Sensitivitätsanalyse erfolgt in Kapitel 6.5.

2.2.3 Werkzeugsteuerung

Für die Werkzeugsteuerung wurden zwei unterschiedliche Ansätze untersucht. Zum einen wurde versucht, eine Steuerung gänzlich ohne Sensoren zu entwerfen. Diese Methode wird im Folgenden als „mathematische Steuerung“ bezeichnet. Der zweite Ansatz basiert auf der Verwendung von Sensordaten.

Mathematisches Modell des dynamischen Systems Werkzeug

Das mathematische Modell für das dynamische System Werkzeug basiert auf dem in Kapitel 2.2.1 vorgestellten geometrischen Modell. Das geometrische Modell kann nun dazu verwendet werden, das zeitliche Verhalten (Lageänderung innerhalb eines Zeitintervalls) der angesteuerten Werkzeugkomponenten zu studieren. Die dem zu Grunde liegende Problemstellung ist als Kalibrierung zu verstehen, mit dem Ziel, eine geeignete Übertragungsfunktion zu finden.

Folgende Forderung wird in diesem Zusammenhang gestellt: Gesucht wird eine Funktion, die den Zusammenhang zwischen der Winkeländerung am Drehpunkt A und der resultierenden Höhenänderung am Drehpunkt B, bei bekannter Auslegerlänge, beschreibt. Die Basisgleichung für einen solchen Zusammenhang kann wie folgt formuliert werden:

$$\Delta h(\Delta t) = \sin(\dot{\theta}_1 \cdot \Delta t) \cdot L1, \quad (2-41)$$

mit

- Δh : Höhenänderung am Drehpunkt B,
- Δt : Zeitintervall der Winkeländerung,
- $\dot{\theta}_1$: Drehrate am Drehpunkt A,
- $L1$: bekannte Länge des Auslegers.

Diese Gleichung gilt unter der Annahme, dass sich der Nickwinkel der Trägermaschine nicht ändert.

Um nun eine sensorlose, mathematische Steuerung durchführen zu können, kann auf zwei Weisen vorgegangen werden, die im Folgenden als Typ A und Typ B bezeichnet werden. In diesem Zusammenhang können zwei Überlegungen angestellt werden.

Typ A: Wie groß ist der Drehwinkel θ_1 am Drehpunkt A, wenn ein bestimmter aber variabler Spannungswert U für ein festes Zeitintervall Δt angelegt wird? Mathematisch kann der Zusammenhang wie folgt formuliert werden:

$$f_1(U) = \theta_1(U). \quad (2-42)$$

Die zweite Frage kann wie folgt formuliert werden:

Typ B: Wie groß ist der Drehwinkel θ_1 am Drehpunkt A, wenn ein fester Spannungswert für ein bestimmtes, aber variables Zeitintervall Δt angelegt wird? Mathematisch kann dieser Zusammenhang wie folgt formuliert werden:

$$f_2(\Delta t) = \theta_1(\Delta t). \quad (2-43)$$

Für beide Fragestellungen ist ein Systemmodell notwendig, das in Kapitel 5.5 vorgestellt wird.

Sensorgestützter Ansatz der Werkzeugregelung

Bei dieser Methode werden Sensordaten zur Regelung der Werkzeugkomponenten eingesetzt. Entsprechend muss eine Auswahl der Sensoren stattfinden und die Sensorpositionen am Werkzeug festgelegt werden. Der sensorgestützte Ansatz entspricht der klassischen Vorgehensweise bei der Automatisierung von Werkzeugkomponenten. In diesem Fall muss das Werkzeug mit entsprechender Sensorik ausgestattet sein. Die Sensorausstattung beinhaltet zwei Inertialmesseinheiten (vgl. Kapitel 2.3), die am Ausleger und Ladeschaufel montiert sind und Neigungsmessungen an diesen Werkzeugkomponenten durchführen. In Kapitel 5.5 wird dieser Ansatz detailliert beschrieben.

2.3 Sensorik und Sensorkombinationen

In Rahmen dieser Arbeit werden das Tachymeter zur statischen und kinematischen Positionsbestimmung, sowie zwei inertielle Messeinheiten (IMU) zur Neigungsmessung eingesetzt. Diese beiden Messsysteme können als Multisensorsysteme bezeichnet werden. In einem Multisensorsystem erfolgt die Integration mehrerer Sensoren in einem System. Multisensorsysteme können wie folgt eingeteilt werden: räumlich verteilt, redundant oder ergänzend (Elmenreich 2001). Bei räumlich verteilten Systemen sind gleiche Sensoren an verschiedenen Messpunkten installiert. Diese erfassen räumlich verteilte Werte. Bei redundanten Systemen erfassen unterschiedliche Sensoren die gleiche Messgröße. Ergänzende Systeme erfassen mit unterschiedlichen Sensoren unterschiedliche Messgrößen. Die Kombination der erfassten Größen ist erforderlich, um eine Zielgröße zu berechnen. Ein Multisensorsystem kann entweder modular oder integral aufgebaut werden. Beim modularen Aufbau arbeiten die unterschiedlichen Sensoren unabhängig voneinander. Die Messwerte werden dann kombiniert. Dies ermöglicht es, das System flexibel zu gestalten. Die Flexibilität ermöglicht es, das Multisensorsystem auf Basis der Anforderungen immer wieder neu zusammenzuführen (Elmenreich 2001). Beim integralen Aufbau werden die verschiedenen Sensoren bereits auf der Beobachtungsebene kombiniert (direkte Kopplung). Dieser Aufbau kann anforderungsspezifische Qualitätssteigerungen erreichen, ist jedoch nicht flexibel. Beim Tachymeter und der IMU handelt es sich somit um ergänzende Multisensorsysteme, bei denen durch unterschiedliche Sensoren unterschiedliche Messgrößen erfasst und so kombiniert werden, dass sich eine Zielgröße ableiten lässt. Eine ausführliche Beschreibung des Tachymeters findet in Kapitel 4 statt.

Inertialmesseinheiten stellen relative Koordinaten bezüglich einer Anfangsposition und Anfangsorientierung zur Verfügung (Schwieger und Beetz 2017). Die IMU erfasst primär Beschleunigungen und Drehraten bezüglich der drei Achsen x , y und z . Die Drehraten werden durch Datenprozessierung und unter Verwendung von Zusatzinformationen zu Lagewinkeln bezüglich der drei Achsen kombiniert. Die Lagewinkel sind Nickwinkel – Drehungen um die X' -Achse, Rollwinkel – Drehungen um die Y' -Achse und Gierwinkel – Drehungen um die Z' -Achse (vgl. Abb. 2-1). Die Koordinaten eines Bezugspunktes am Sensor im inertialen Koordinatensystem können durch zweifache Integration der gemessenen Beschleunigungen und unter Berücksichtigung der Sensororientierung, die sich aus den Lagewinkeln ergibt, berechnet werden. Inertielle Messeinheiten sind heutzutage durch den Einsatz von MEMS (Microelectromechanical Systems) Technologien für den breiten Markt zugänglich. Moderne Fertigungsmethoden in der Computerchip-Industrie haben zur Kostenreduzierung und der daraus resultierenden schnellen Verbreitung beigetragen. Die Sensorik setzt sich aus einem 3D-Beschleunigungsmesser und einem 3D-Drehratengeber zusammen. Manche Ausführungen verfügen darüber hinaus über einen 3D-Magnetometer. Die IMU ist in der Lage, eine 3D-Positions- und

Lagebestimmung im lokalen Sensorkoordinatensystem durchzuführen. Bei manchen Bauarten sind zusätzlich Temperatur- und Drucksensoren verbaut, deren Daten für Korrekturen der Inertialsensorik verwendet werden. Zur Anwendung auf einer mobilen Plattform, wie z.B. einer Baumaschine, muss eine Transformation vom Sensorsystem in das Plattformsystem durchgeführt werden. Um mit dem Sensor im globalen System zu arbeiten, bedarf es einer weiteren Transformation vom Plattformsystem in das globale System (Wild-Pfeiffer und Schäfer 2011).

Im Allgemeinen wird beim Einsatz in der Baumaschinensteuerung neben den genannten Messverfahren Tachymeter und IMU eine Vielzahl weiterer Sensoren eingesetzt. Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über die gängigen Messsysteme, deren Messgröße, Genauigkeit im kinematischen Modus sowie die maximale Messfrequenz.

Tabelle 2-2: Überblick Sensoren nach Beetz (2012a)

Sensor	Messgröße	Genauigkeit	Max. Messfrequenz
GNSS Empfänger	Positionen und Zeit	horizontal: 2–3 cm vertikal: 3–5 cm im RTK Modus	100Hz
Rotationslaser	Höhendifferenzen	2–5 mm/ 100 m	10 Hz
Neigungssensor	Längs- und Querneigung	0.1°–0.3°	> 100 Hz
Kreisel/Drehratensensor	Roll-, Nick- oder Gierwinkelrate (je nach Ausrichtung)	0.001°/s	> 100 Hz
Seilzugsensor	Distanz	0.3–1 mm/ 0.01 % der Länge	> 100 Hz
Ultraschallsensor	Distanz	1 mm	> 100 Hz
Tachymeter	Horizontal-, Vertikalwinkel und Strecken	1–3 mm	20 Hz
IMU	3D-Beschleunigungen 3D-Drehraten 3D-Magnetfeld	+/- 0.02 m/s, +/- 0.22°	>100 Hz

Sensorkombinationen und Fusion unterschiedlicher Sensordaten

Die Anforderungen an eine Sensorkombination hängen sehr oft mit dem Automatisierungspotenzial und dem angestrebten Automatisierungsgrad zusammen. Beispielsweise benötigt man für die automatische Führung des Werkzeugs einer Laderaupen insbesondere Höheninformationen für den Ausleger sowie Lageinformationen für die Schaufel. Dabei können die für den Ausleger benötigten Höheninformationen auf unterschiedliche Weisen gewonnen werden. Zum einen kann man mit einem Tachymeter die Höhe eines am Werkzeug befestigten Reflektors direkt erfassen. Eine andere Möglichkeit wäre es, Auslegerhöhen mittels eines Schallsensors zu messen. Es besteht auch die in Kapitel 2.2 vorgestellte Möglichkeit, Neigungssensoren einzusetzen und unter Nutzung des geometrischen Modells die Auslegerhöhe zu bestimmen. Denkbar sind auch Kombinationen von Messverfahren, wie z.B. die Kombination aus Schall- und Neigungsmessungen. Dieses Beispiel zeigt, dass eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten existiert, um bestimmte Größen, die relevant für die automatische Führung sind, zu erhalten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Trägermaschine ausschließlich mit einem Tachymeter gesteuert. Für das Werkzeug sind vier Sensorkombinationen getestet worden. Tabelle 2-3 stellt exemplarisch die möglichen, getesteten sensorischen Ausstattungsvarianten des Werkzeugs zusammen. Die endgültige Ausstattung des Werkzeugs wurde als Konfigurationstyp 3 realisiert. Diese Konfiguration repräsentiert die sensorische Minimalausstattung des Werkzeugs, die zur Durchführung der definierten Funktionalität des automatischen Steuerungssystems benötigt wird. Damit kann die größte Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

Tabelle 2-3: Mögliche Sensorkombinationen zur Automatisierung des Werkzeugs

<i>Konfigurationstyp</i>	<i>Ausleger</i>	<i>Schaufel</i>
1	Tachymeter	Neigungsmesser
2	Schallsensor	Neigungsmesser
3	Neigungsmesser	Neigungsmesser
4	Neigungsmesser + Schallsensor	Neigungsmesser

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnt, wird angenommen, dass die Hinzunahme zusätzlicher Sensoren die Robustheit und die Zuverlässigkeit des Steuerungssystems erhöht. Anhand des Konfigurationstyps 4 soll beispielhaft aufgezeigt werden, wie im Falle einer Systemerweiterung um einen zusätzlichen Sensor redundante Informationen für die weitere Verwendung im Regelkreis zusammengeführt werden können.

(Dieser Konfigurationstyp ist ebenfalls Gegenstand der Untersuchung mittels lokaler Sensitivitätsanalyse, die in Kapitel 2.2.2 beschrieben wurde und in Kapitel 6.5 durchgeführt wird.)

Beim Konfigurationstyp 4 wird die Auslegehöhe mittels zweier Sensoren bestimmt. Nach der aufgestellten Definition handelt es sich um ein redundantes System, bei dem unterschiedliche Sensoren die gleiche Messgröße, hier die Höhe des Auslegers, erfassen. Die redundanten Höhenmessungen müssen für die weitere Verwendung zusammengeführt, bzw. fusioniert werden. Dies kann mittels einer Ausgleichung nach der Methode kleinster Quadrate umgesetzt und daraus die Zielgröße H „Höhe des Punktes B“ (s. Abbildung 2-4) abgeleitet werden. Zur Anwendung kommt dabei das Gauss-Markov-Modell und die Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (Pelzer 1980). Im Folgenden wird die Methode exemplarisch vorgestellt.

Die gesuchte Unbekannte dieser Problemstellung wird als Unbekanntenvektor $\mathbf{x}$ bezeichnet. Dieser ist im vorliegenden Fall ein Skalar.

$$\mathbf{x} = H. \quad (2-44)$$

Die Beobachtungen liefern die beiden am Ausleger angebrachten Sensoren in Form eines Neigungswinkels θ_1 durch den Neigungsmesser und einer Höhenmessung h_s durch den Schallsensor. Diese werden im Beobachtungsvektor $\mathbf{l}$ zusammengefasst.

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ h_s \end{bmatrix}. \quad (2-45)$$

Das Funktionale Modell kann allgemein wie folgt formuliert werden:

$$\mathbf{l} = \varphi(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \varphi_1(\mathbf{x}) \\ \varphi_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix}. \quad (2-46)$$

Dabei sind für $\varphi_1(\mathbf{x})$ und $\varphi_2(\mathbf{x})$ wie folgt definiert:

$$\varphi_1(\mathbf{x}): H = \sin\theta_1 \cdot L1, \quad (2-47)$$

$$\varphi_2(\mathbf{x}): H = h_s. \quad (2-48)$$

Die nichtlineare Verbesserungsgleichung lautet:

$$\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l} + \mathbf{v} = \varphi(\hat{\mathbf{x}}), \quad (2-49)$$

mit

$\mathbf{v}$: Verbesserungsvektor der Beobachtungen.

Zu Bildung der Designmatrix müssen die Beobachtungsgleichungen aufgestellt werden. Dazu werden die Ausdrücke in (2-47) und (2-48) nach den Beobachtungen aufgelöst. Es ergeben sich dadurch folgende Beobachtungsgleichungen:

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{H}{L_1}\right), \quad (2-50)$$

$$h_S = H. \quad (2-51)$$

Die Designmatrix $\mathbf{A}$ wird wie folgt gebildet:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial H} \\ \frac{\partial h_S}{\partial H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{H^2}{L_1^2}}} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2-52)$$

Das linearisierte funktionale Modell lautet:

$$\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}. \quad (2-53)$$

Es erfolgt die Aufstellung des stochastischen Modells. Dieses wird durch die Kofaktormatrix der Beobachtungen repräsentiert:

$$\mathbf{Q}_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha_N}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{h_S}^2 \end{bmatrix}. \quad (2-54)$$

Mit $\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1}$ wird die Gewichtsmatrix aufgestellt.

Nun kann die unbekannte Größe x wie folgt geschätzt werden:

$$\hat{x} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{l}. \quad (2-55)$$

Somit liegt nun die ausgeglichene Höhe H des Punktes B vor. Das vorgestellte Verfahren wird während des Betriebs in jedem Iterationsschritt durchlaufen.

3 Regelkreise und adaptive Regelung

3.1 Regelkreise

Um das gesetzte Ziel der Prozessautomatisierung in dieser Arbeit zu erreichen, werden Methoden aus der Steuerung- und Regelungstheorie benötigt. Die Methodik basiert auf Regelkreisen, in die das zu automatisierende Objekt oder eine Komponente des Objekts eingebettet wird.

Nach Busch (2012) besteht ein Regelkreis aus einem Regler und einer Regelstrecke. Die Regelstrecke kann z.B. eine Maschine, ein Kraftwerk oder ein chemischer oder physikalischer Prozess sein. Die Wirkung der Regelstrecke wird durch den Regler beeinflusst. Um eine optimale Wirkung zu erzielen, muss der Regler entsprechend eingestellt werden. Regelungssysteme können als offene oder geschlossene Realisierungen eingesetzt werden. Bei offenen Regelungssystemen wird das Ausgangssignal ohne Rückkopplung weitergegeben. Es handelt sich somit um eine Steuerung, wohingegen bei geschlossenen Regelungssystemen, als Regelkreise bezeichnet, eine Rückkopplung des Ausgangssignals mit dem Eingang stattfindet. Regelkreise haben im Allgemeinen die Funktion, Prozesse so zu steuern, dass diese gewünschte Eigenschaften oder Zustände annehmen. Abbildung 3-1 stellt die Systemskizze eines geschlossenen Regelkreises dar.

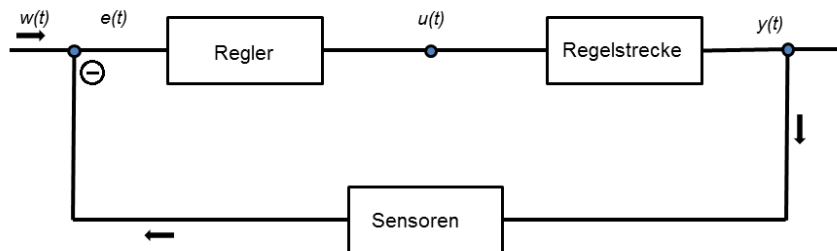


Abbildung 3-1: Geschlossener Regelkreis

Im Folgenden sollen zunächst die Begriffe Steuern und Regeln definiert werden.

Nach DIN 19226 „(...) ist das *Steuern*, die *Steuerung*, der *Vorgang* in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als *Eingangsgrößen* andere Größen als *Ausgangsgrößen* aufgrund der dem System *eigenständigen Gesetzmäßigkeiten* beeinflussen“.

„Das *Regeln*, die *Regelung* ist ein *Vorgang*, bei dem fortlaufend eine Größe, die *Regelgröße* (die zu regelnde Größe) erfasst, mit einer anderen Größe, der *Führungsgröße*, verglichen und im Sinne einer *Angleichung* an die *Führungsgröße* beeinflusst wird“ (DIN 1994).

Nach Gläser et al. (2008) kann das Regelziel, wie für den Fall der Baumaschinensteuerung, zeitlich variabel formuliert werden und ist als Führungsgröße im Sinne der Regelungstechnik zu verstehen. Dabei stellt die Führungsgröße $w(t)$ das geforderte zeitliche Verhalten der Regelgröße $y(t)$ dar. Liegt hiervon eine Abweichung vor, so wird von einer Regelabweichung $e(t)$ gesprochen. Diese wird vom Regler beeinflusst, der wiederum eine Stellgröße $u(t)$ erzeugt, die die Baumaschine, die sogenannte Regelstrecke (auch dynamisches System), beeinflusst. Der Zustand dieser Regelstrecke kann messtechnisch als Regelgröße $y(t)$ erfasst werden und wiederum mit der Führungsgröße verglichen werden.

Die Variablen eines Regelkreises sind in Tabelle 3-1 zusammengestellt.

Tabelle 3-1: Variablen des Regelkreises nach Busch (2012)

Variable	Regelkreis
$w(t)$	Führungsgröße
$e(t)$	Regelabweichung
$u(t)$	Stellgröße
$y(t)$	Regelgröße

Je nach Anforderung und Einsatzgebiet können Regler unterschiedlichste Aufbauarten haben. Nach Mann et al. (2005) kann eine Unterteilung in unstetige und stetige Regler vorgenommen werden. Unstetige Regler sind z.B. Zweipunkt-, Dreipunkt- oder Mehrpunktregler. Diese Art von Reglern kann die Stellgröße nur in groben Stufen einstellen, so dass die Regelgröße permanent um ihren Sollwert pendelt (Busch 2012). Stetige Regler haben den Nachteil einer pendelnden Regelgröße nicht. Ihre Stellgröße kann, im definierten Stellbereich, jeden beliebigen Wert annehmen. Zu dieser Gruppe gehören die PID-Regler, mit ihren Untergruppen P, PI, und PD. Zu einer gesonderten Gruppe gehören Regler, die weder den unstetigen noch den stetigen Reglern zugeordnet werden können. Zu dieser Gruppe gehören die Fuzzy-Regler. Fuzzy-Regler basieren auf der Fuzzy-Logik, die auf unscharfen Begriffen der Umgangssprache basiert, wie z.B. „heiß“, „kalt“, „groß“, „klein“, „mittelgroß“ und ähnlich. Es gibt dabei Fuzzy-Regler, die stetig arbeiten und auch solche, die unstetig arbeiten (Mann et al. 2005).

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die Steuerung der Trägermaschine vorwiegend stetige Regler eingesetzt. Die P-, I-, und D-Reglerkombinationen werden durch adaptive Regler ergänzt. Die adaptive Regelung wird in Kapitel 3.2 gesondert behandelt, da diese einen der Schwerpunkte der Arbeit repräsentiert. Die Steuerung des Werkzeugs erfolgt sowohl mit stetigen als auch mit unstetigen Reglern. Aus diesem Grund erfolgt eine knappe Ausführung über den Aufbau eines PID-Reglers, als Vertreter der stetigen Reglergruppe und eines Dreipunktreglers, als Vertreter der unstetigen Reglergruppe.

PID Regler

Der PID-Regler besteht aus 3 Anteilen, dem P-, dem I- und dem D- Anteil. Diese Anteile werden als Reglergrundtypen bezeichnet (Busch 2012).

Beim P-Regler ist das Ausgangssignal proportional zum Eingangssignal. Bei einer Änderung des Eingangssignals erfolgt entsprechend eine proportionale Änderung des Ausgangssignals ohne zeitliche Verzögerung. Der Vorteil beim Einsatz des P-Reglers ist seine kurze Reaktionszeit ohne zeitliche Verzögerung. Nachteilig ist die Tatsache, dass Störungen nie vollständig ausgeglichen werden und somit immer eine Regeldifferenz bleibt (Busch 2012). Mathematisch kann zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße folgender Zusammenhang aufgestellt werden:

$$u = K_p \cdot e, \quad (3-1)$$

mit

K_p : Proportionalbeiwert,
 e : Eingangssignal,
 u : Ausgangssignal.

Beim I-Regler ist die Geschwindigkeit der Änderung der Ausgangsgröße proportional zur Eingangsgröße. Die Reaktion der Ausgangsgrößen erfolgt ohne zeitliche Verzögerung. Ist die Eingangsgröße konstant ungleich Null, dann steigt die Ausgangsgröße linear, also mit konstanter Änderungsgeschwindigkeit, an. Die Stärke dieses Reglers liegt darin, dass Störungen ohne bleibende Regeldifferenz ausgeglichen werden. Allerdings fällt die Reaktionszeit auf Änderungen des Eingangssignals oder etwaige Störungen lang aus (Busch

2012). Der mathematische Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße kann, unter der Annahme dass das Eingangssignal konstant ist, wie folgt dargestellt werden:

$$u = K_I \cdot e \cdot \Delta t + x_{a0}, \quad (3-2)$$

mit

- K_I : Integralbeiwert,
 Δt : Zeitdifferenz zwischen Auswertzeitpunkt und Beginn der Integrationszeit,
 x_{a0} : Anfangswert des Ausgangssignals.

Beim D-Regler ist die Ausgangsgröße proportional zur Änderung seiner Eingangsgröße. In Kombination mit anderen Grundtypen bewirkt der D-Anteil eine schnellere Ausregelung von starken Störungen. Allerdings ist ein D-Regler alleine nicht zur Ausregelung von Störungen geeignet, da er nur im Falle eines sich ändernden Eingangssignals eine Stellgröße ausgibt. Liegt eine konstante Regeldifferenz vor, so kann diese nicht ausgeglichen werden (Busch 2012). Der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße ist durch die Gleichung (3-3) repräsentiert:

$$u = K_D \cdot \frac{\Delta e}{\Delta t}, \quad (3-3)$$

mit

- K_D : Differentialbeiwert.

Der PID-Regler kann mathematisch als eine Addition der Wirkungen der drei Grundtypen beschrieben werden. Das Ausgangssignal kann somit als Summe der Grundanteile wie folgt formuliert werden:

$$u_{PID} = K_P \cdot e + K_I \cdot e \cdot \Delta t + x_{a0} + K_D \cdot \frac{\Delta e}{\Delta t}. \quad (3-4)$$

Nach Busch (2012) kann das Ausgangssignal auch als Funktion der Vorhaltezeit T_v und der Nachstellzeit T_n formuliert werden:

$$u_{PID} = K_P \cdot \left(e + \frac{1}{T_n} \cdot e \cdot \Delta t + T_v \cdot \frac{\Delta e}{\Delta t} \right) + x_{a0}. \quad (3-5)$$

Beim PID-Regler kommen die Stärken der einzelnen Grundtypen in der Kombination zum Tragen. Somit genügt dieser Regler den hohen Anforderungen an Regelgeschwindigkeit und Genauigkeit. Allerdings ist für ein optimales Regelverhalten eine exakte Abstimmung der drei Parameter K_P , K_I , K_D bzw. K_P , T_v , T_n notwendig. Diese Abstimmung kann unter Umständen sehr kompliziert ausfallen (Busch 2012). Sind die Parameter der Regelstrecke bekannt, so kann z.B. ein Näherungsverfahren nach Chien, Hrones und Reswick (CHR) angewendet werden. Die Parameter werden dabei empirisch über die Analyse der Sprungantwort bestimmt (Mann et al. 2005). Bei unbekannten Kenngrößen der Regelstrecke eignet sich das Verfahren nach Ziegler und Nichols besser (Mann et al. 2005). Dieses experimentelle Verfahren basiert auf der Analyse der Reglerstabilitätsgrenze.

Dreipunktregler

Nach Mann et al. (2005) besitzt der Dreipunktregler drei Schaltstellungen. Es existiert eine Nullstellung, die so genannte Ruhelage. Darüber hinaus existieren zwei weitere Stellungen, die eingenommen werden können. Dies ist der Fall, wenn die Regelabweichung kleiner, bzw. größer ist als die Nullstellung. Liegt die Regelabweichung $e(t)$ in einem bestimmten Intervall $-e_{ref} \leq e(t) \leq e_{ref}$, so schaltet der Regler in seine Nullstel-

lung. Ist $e(t) < -e_{ref}$, wird der Regler so geschaltet, dass die Stellgröße $u(t)$ positive Werte annimmt. Ist $e(t) > e_{ref}$ wird $u(t)$ negativ. Gleichung (3-6) fasst die funktionelle Eigenschaft des Reglers zusammen.

$$\begin{aligned} \text{Fall 1:} & \quad -e_{ref} \leq e(t) \leq e_{ref} \Rightarrow u = 0, \\ \text{Fall 2:} & \quad e(t) < -e_{ref} \Rightarrow u > 0, \\ \text{Fall 3:} & \quad e(t) > e_{ref} \Rightarrow u < 0. \end{aligned} \tag{3-6}$$

Regelgüte

Unabhängig von ihrer Art haben alle Regler die Minimierung der Regelabweichung $e(t)$ zum Ziel. Die sich daraus ergebenden Fragen sind: wie schnell erfolgt die Minimierung und kann die Regelabweichung komplett weggestellt werden? Um diese Fragen zu beantworten wird der Begriff Regelgüte eingeführt und im Folgenden erklärt.

Die Regelgüte hängt ursächlich von der Wahl der Regler ab. Nach Busch (2012) ist die Regelgüte von der optimalen Reglereinstellung abhängig. Als Maß für die Regelgüte ist die verbleibende Regeldifferenz Δx angegeben. Diese sollte bei einer optimalen Reglereinstellung Null sein. Als weitere Kriterien für die Regelgüte sind die Überschwingweite x_m , die Anregelzeit T_{an} , die Ausregelzeit T_{aus} sowie die verbleibende Regeldifferenz Δx angegeben. Mit den Parametern T_{an} und T_{aus} kann die Geschwindigkeit, mit der die Regelabweichung minimiert wird, quantifiziert werden. Der Parameter Δx gibt Aufschluss über die verbleibende Regelabweichung, wobei es das Ziel der Regelung ist, den Zustand $\Delta x = 0$ zu erreichen.

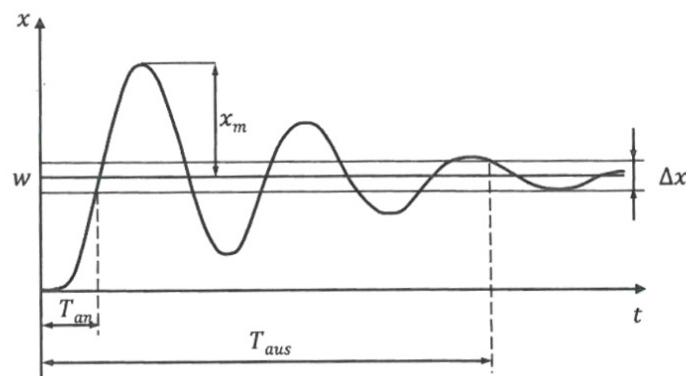


Abbildung 3-2: Überschwingweite, An- und Ausregelzeit (Busch 2012)

Betrachtet man nicht nur die Einschwingzeit, sondern den Gesamtverlauf der Regelung, so wurde in Beetz (2012) gezeigt, dass sich das Kriterium der Betragsflächen besser für die Beschreibung der Regelgüte eignet. Dabei werden alle vorangegangenen Kriterien in einem Kriterium vereint. Die Voraussetzung für einen guten Regler bei dieser Definition ist, dass die Summe aller Teilflächen ($A_1, A_2, \dots$) in Abbildung 3-3 minimal wird.

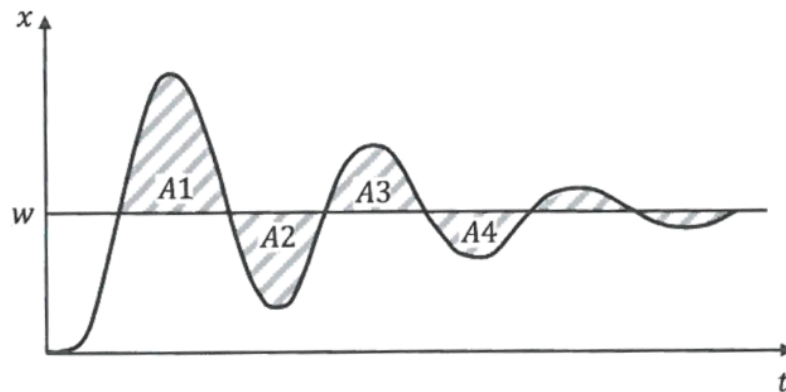


Abbildung 3-3: Kriterium der Betragsfläche (Busch 2012)

Diese Beitragsfläche kann wie folgt berechnet werden:

$$A_{ges} = A_1 + A_2 + \dots + A_n = \int_0^{\infty} |e| dt. \quad (3-7)$$

In Mann et al. (2005) wird des Weiteren beschrieben, wie durch die Integration der Regelabweichung über die Zeit, die Fläche unter der Kurve in Abbildung 3-3 zunächst als „betragslineare Regelfläche“ und anschließend als „quadratische Regelfläche“ formuliert werden kann. Beetz (2012a) beschreibt, wie durch Diskretisierung und Normierung dieser „quadratischen Regelfläche“ die Gleichung (3-8) hergeleitet wird, welche den RMS als Gütekriterium definiert:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}. \quad (3-8)$$

3.2 Adaptive Regelung

Die Regelung von Prozessen oder Systemen bedarf, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, einer exakten Einstellung der Regelparameter. Die optimale Einstellung ist sehr wichtig, damit das zu regelnde System den Anforderungen an die Regelgüte entspricht. Jedoch kann die Einstellungsprozedur, z.B. für die PID-Regler, sehr zeitaufwändig und arbeitsintensiv ausfallen. Letztlich wird die Parametereinstellung so vorgenommen, dass ein möglichst breites Spektrum an Einsatzbedingungen und Einsatzumgebungen abgedeckt wird (Seborg et al. 1986). Bei signifikanten Änderungen der Einsatz- und/ oder Umgebungsbedingungen, aber auch Prozessänderungen, müssen jedoch erneute Einstellungen der Regelparameter vorgenommen werden, um die Regelgüte auf hohem Niveau zu halten. Für den Fall einer Laderaupen ist die Situation naturgemäß so, dass sich die Betriebsumgebung oft und schnell ändern kann. Eine alternierende Umgebungsvariable ist z.B. die Bodenbeschaffenheit, die sich selbst innerhalb eines räumlich eingegrenzten Einsatzgebietes ändern kann. Um trotzdem ein optimales Regelverhalten zu gewährleisten, müssen entweder die PID-Parameter immer wieder neu eingestellt werden oder man setzt eine adaptive Regelung ein. Adaptive Regler haben die Eigenschaft, sich an alternierende Umgebungs-, Betriebsbedingungen und Prozessänderungen automatisch anzupassen, bzw. die entsprechenden Regelparameter automatisch neu zu setzen. Damit ist auch die Forderung an eine adaptive Regelung formuliert, nämlich die Fähigkeit sich an ändernde Betriebsbedingungen in Echtzeit anzupassen.

Die Idee der adaptiven Regelung kam in den frühen 1950er Jahren auf, in denen versucht wurde, ein Autopilotensystem für Hochleistungsfluggeräte zu implementieren (Kalman 1958, Whitaker 1959). Solche Fluggeräte werden in sehr unterschiedlichen Höhen und in sehr unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen betrieben. Innerhalb solcher Bedingungen haben sich Regelkreise mit konstanten Regelparametern als ungeeignet er-

wiesen. Somit wurde ein Regelkreisdesign gesucht, der eine optimale Performance innerhalb dieser Höhen- und Geschwindigkeitsbereiche garantieren konnte (Åström und Wittenmark 1989).

Nach Åström (1983) gibt es drei Konzepte der adaptiven Regelung. Diese sind: Regelung mit Parameterumschaltung (Gain Scheduling), Modell-Referenz-Regelung (Model-Reference Adaptive Systems) und selbst-einstellende Regler (Self-Tuning Regulators). Die Lösung des Autopilotenproblems wurde letztendlich mit dem Konzept der Parameterumschaltung gelöst. Bei diesem Ansatz stehen prinzipiell beliebig viele PID Parametersets in einer Tabelle oder Datenbank zur Verfügung, die dann, je nach sich aus der Einsatzumgebung ergebenden Anforderungen, automatisch abgerufen und in den Regler eingesetzt werden.

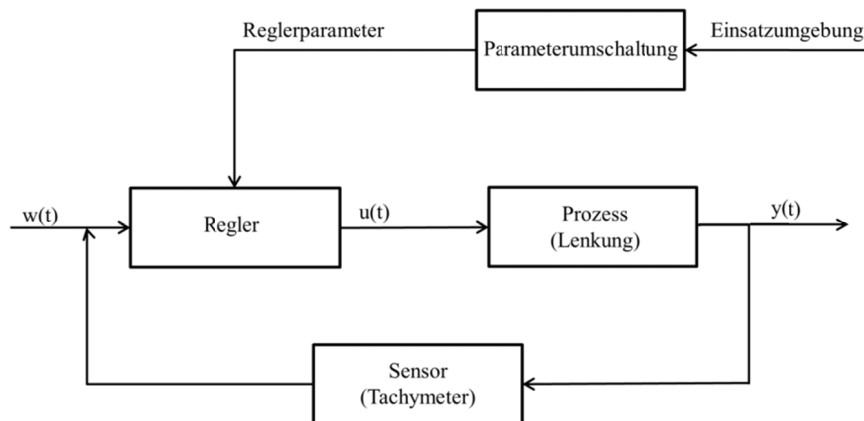


Abbildung 3-4: Grundschemata der Regelung mit Parameterumschaltung (nach Åström und Wittenmark 1989)

Die Modell-Referenz-Regelung wurde 1958 von H. Philip Whitaker, Joseph Yamron und Allen Keezer, ebenfalls für das genannte Flugregelungsproblem entwickelt (Åström 1983). Das Konzept basiert auf einem idealen Prozessverhalten, das durch ein Referenzmodell beschrieben wird. Das Referenzmodell ist dabei selbst ein Teil des Regelungssystems. Das Regelungssystem versucht, den Fehler zwischen dem wahren Prozessausgang und dem Ausgang des Referenzmodells zu minimieren.

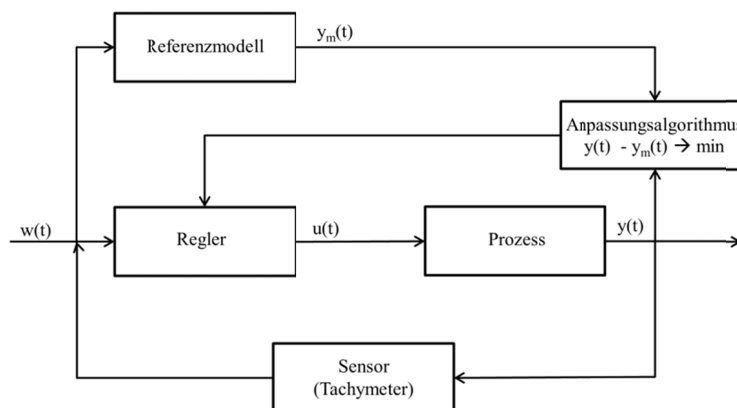


Abbildung 3-5: Grundschemata der Modell-Referenz Regelung (nach Åström und Wittenmark 1989)

Die dritte Methode der adaptiven Regelung ist der selbst-einstellende Regler. Dieser Ansatz wurde 1958 durch Rudolf Emil Kalman vorgestellt (Åström und Wittenmark 1989, Landau et al. 2011). Das Konzept basiert auf der Systemidentifikation aus den Ein- und Ausgangssignalen des zu regelnden Prozesses und daraus abgeleiteten Berechnungen der Reglerparameter.

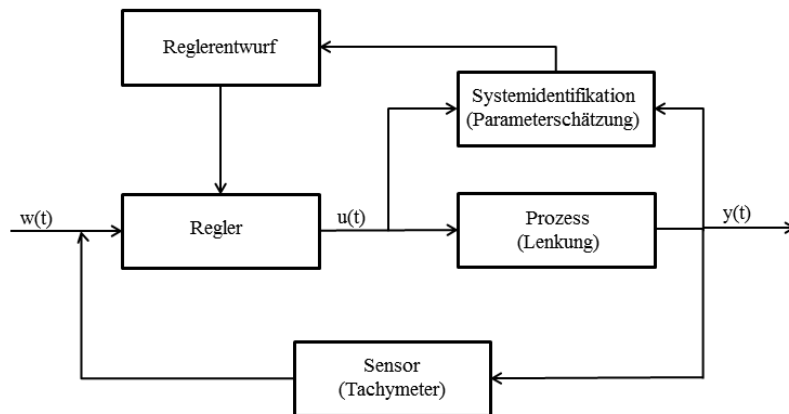


Abbildung 3-6: Grundschemata der selbsttastellenden Regler (nach Åström 1983)

Eine ausgedehnte Literatursammlung zur adaptiven Regelung ist z.B. in Åström (1983), Seborg et al. (1986), Åström und Wittenmark (1989) oder Black et al. (2014) zu finden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der selbsttastellende Regler auf seine Eignung zur Steuerung von Raupenfahrzeugen untersucht. Diese Wahl soll im Folgenden begründet werden. Bei der parametergesteuerten Regelung müssen die PID-Parametersets in zeitaufwändigen Laborversuchen bestimmt werden oder mit Hilfe von Expertenwissen festgelegt werden. Jedoch können längst nicht alle möglichen Einsatzszenarien mit entsprechenden Parametersets abgedeckt werden. Die Methode der Modell-Referenz-Regelung wurde nicht bevorzugt, da bei der vorliegenden Steuerungs- und Regelungsaufgabe die Festlegung des Referenzmodells nur bedingt möglich ist. Ein Ansatz wäre z.B. die Trajektorie als Referenzmodell zu definieren. Da jedoch die Trajektorien oft beliebig sind und von der Anwendung abhängig, müssten verschiedene Teilstücke einzeln parametrisiert und modelliert werden. Dies ist in der Praxis für die vorliegende Problemstellung jedoch nicht durchführbar, da die Geometrie von Fall zu Fall variiert. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die beiden zuerst genannten Methoden Vorinformationen benötigt werden. Dagegen benötigt der selbsttastellende Regler keinerlei Vorinformationen und ist somit für beliebige Szenarien einsetzbar.

3.2.1 Selbsttastellender Regler innerhalb des Regelprozesses

Als Ausgangspunkt für den Entwurf eines selbsttastellenden Reglers ist ein regulärer, geschlossener Regelkreis (Abbildung 3-1) definiert, bei dem das rückgekoppelte Ausgangssignal im Regler so verarbeitet wird, dass die Regelabweichung minimiert wird. Dieser Standardregelkreis wird nun um einen weiteren, so genannten „äußeren“ Regelkreis erweitert. Der äußere Regelkreis führt auf Grundlage der Ein- und Ausgangssignale des zu regelnden Prozesses eine Systemidentifikation durch und berechnet daraus die Reglereigenschaften (vgl. Abbildung 3-6).

Somit sind zwei zusätzliche Funktionalitäten für den Aufbau eines adaptiven, selbsttastellenden Regelungssystems notwendig. Diese sind zum einen die Systemidentifikation und zum anderen der Reglerentwurf. Im Folgenden werden diese beiden Schritte detailliert beschrieben.

Systemidentifikation

Die Systemidentifikation kann als impliziter Ansatz charakterisiert werden, weil das Prozessmodell in eine prädiktive Form überführt wird, bei der zukünftige Prozessausgänge aus aktuellen und vergangenen Werten der Eingangs- und Ausgangsvariable berechnet werden (Seborg et al. 1986). Die Echtzeit-Parameterschätzung basiert auf einem linearen Modell, das als lineare Differenzengleichung formuliert ist und in Form eines ARMA (Autoregressive Moving Average)-Modells dargestellt werden kann:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = b_0 u(t-k) + b_1 u(t-k-1) + \dots + b_m u(t-k-m) + c_0 \xi(t) + c_1 \xi(t-1) + \dots + c_n \xi(t-n) + d(t), \quad (3-9)$$

mit

y :	Regelgröße,
u :	Stellgröße,
ξ :	Rauschen (stochastisch modelliert),
d :	Störgröße,
t :	Abtastzeitpunkt,
m, n :	Grad und Ordnung der Differenzengleichung,
k :	Zeitverzögerung,
a_i, b_i, c_i :	Modellparameter.

Das Ziel der Systemidentifikation ist es, ein Modell basierend auf den Schätzungen der Modellparameter $\hat{a}_i$, $\hat{b}_i$, $\hat{c}_i$ aus einem vorliegenden Datensatz zu erstellen. Die Schätzung soll, unter Berücksichtigung des dynamischen Systemverhaltens, in Echtzeit erfolgen. Eine üblicher und oft eingesetzter Echtzeit-Schätzer ist der Rekursive Kleinste Quadrate Algorithmus, RLS (recursive least squares algorithm), der z.B. in Åström und Wittenmark (1989) oder Wang and Tang (2014) vorgestellt wurde. Der Algorithmus eignet sich auf Grund der Aktualisierungsabfolge, die iterationsweise ausgeführt wird, besonders gut für Echtzeit-Anwendungen und ähnelt in seinem Grundsatz der sequentiellen Ausgleichung. Der Zusammenhang wird im Verlauf dieses Abschnitts aufgezeigt.

Im nächsten Abschnitt wird der RLS-Algorithmus nach Seborg et al. (1986) vorgestellt. Aus Gründen der Vereinfachung werden die Größen c_i , ξ und d in Gleichung (3-9) zu Null gesetzt. Des Weiteren wird die Zeitverzögerung zu $k = 1$ gesetzt. Die Gleichung kann dann in Vektorschreibweise wie folgt umformuliert werden:

$$\mathbf{y}(t) = \boldsymbol{\psi}^T(t-1) \cdot \boldsymbol{\theta}(t-1), \quad (3-10)$$

mit

$\boldsymbol{\psi}$:	Regressorvektor,
$\boldsymbol{\theta}$:	Parametervektor.

Dabei haben $\boldsymbol{\psi}$ und $\boldsymbol{\theta}$ folgende Struktur:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}(t-1) &= [y(t-1) \ y(t-2) \ \dots \ y(t-n) \ u(t-1) \ u(t-2) \ \dots \ u(t-n)]^T, \\ \boldsymbol{\theta}(t-1) &= [-a_1 \ -a_2 \ \dots \ -a_n \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]. \end{aligned}$$

Die Gleichung (3-10) kann auch als Sonderform eines linearen Gleichungssystems verstanden werden, welches mittels Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate gelöst werden kann.

$$\mathbf{l} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}, \quad (3-11)$$

mit

$\mathbf{l} \triangleq \mathbf{y}(t)$:	Beobachtungsvektor,
---	---------------------

$\mathbf{A} \triangleq \boldsymbol{\psi}(t-1)$: Jacobi-Matrix,
 $\mathbf{x} \triangleq \boldsymbol{\theta}(t-1)$: Parametervektor.

Nach Pelzer (1980) wird die Lösung des linearen Gleichungssystems für vermittelnde Beobachtungen aus (3-11), hier ohne Berücksichtigung der Kovarianzmatrix, wie folgt generiert:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{l}. \quad (3-12)$$

Die Schätzung des Parametervektors des ARMA-Modells für die Systemidentifikation erfolgt mit dem RLS-Algorithmus. Das rekursive Verfahren nach Seborg et al. (1986) ist im Folgenden aufgeführt.

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) + \mathbf{K}(t) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(t), \quad (3-13)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \mathbf{y}(t) - \boldsymbol{\psi}^T(t-1) \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1), \quad (3-14)$$

$$\mathbf{K}(t) = \mathbf{P}(t-1) \cdot \boldsymbol{\psi}(t-1) \cdot (\lambda + \boldsymbol{\psi}^T(t-1) \cdot \mathbf{P}(t-1) \cdot \boldsymbol{\psi}(t-1))^{-1}, \quad (3-15)$$

$$\mathbf{P}(t) = \frac{1}{\lambda} \cdot [\mathbf{I} - \mathbf{K}(t) \cdot \boldsymbol{\psi}^T(t-1) \cdot \mathbf{P}(t-1)], \quad (3-16)$$

mit

$\mathbf{K}$: Kalman-Verstärkungsmatrix,
 $\mathbf{P}$: Kovarianzmatrix der Parameter,
 $\mathbf{I}$: Einheitsmatrix,
 λ : Gewichtungsfaktor,
 $\boldsymbol{\varepsilon}$: Fehlervektor der Schätzung.

Der Gewichtungsfaktor λ , auch als „Forgetting factor“ bezeichnet, dient dazu, die Sensitivität der geschätzten Parameter gegenüber Änderungen aufrecht zu erhalten. Bei geringen Änderungen der Modellparameter tendiert der adaptive Regler, vor allem beim Einsatz in geschlossenen Regelkreisläufen, zu einem Verlust der Sensitivität gegenüber diesen Änderungen und der Fähigkeit diese zu detektieren. Der Faktor λ dient dann dazu, die neueren Datensätze für die Systemidentifikation stärker zu gewichten als die alten und somit auch die Detektion geringster Änderungen zu ermöglichen. λ kann unter Verwendung des Fehlervektors der Schätzung $\boldsymbol{\varepsilon}$ bestimmt werden (Seeborg et al. 1986). Dies kann z.B. mit dem von Ydstie et al. (1985) entwickelten Algorithmus durchgeführt werden.

$$\lambda(t) = \frac{N_0}{N_0 + \boldsymbol{\varepsilon}^2(t) \cdot (1 + \boldsymbol{\psi}^T(t-1) \cdot \mathbf{P}(t-1) \cdot \boldsymbol{\psi}(t-1))^{-1}} \quad (3-17)$$

mit

N_0 : Einstellungsparameter.

In Ydstie et al. (1985) wird des Weiteren vorgeschlagen den Wert $N_0 = 10^4$ zu verwenden. In dieser Arbeit wird $\lambda = 1$ gesetzt.

Die Gleichungen (3-13) bis (3-16) entsprechen im Wesentlichen dem Korrekturschritt einer sequentiellen Ausgleichung, des Kalman-Filters. Wie bereits zuvor die Analogie zwischen Gleichungen (3-10) und (3-11) aufgezeigt wurde, so kann auch hier eine direkte Zuordnung zwischen den Schritten des RLS-Algorithmus und denen des Kalman-Filters gemacht werden. Die Formeln des Korrekturschrittes können z.B. Kuhlmann und Klingbeil (2017) entnommen werden.

Die RLS-Gleichung (3-13) entspricht der Aufdatierung des Zustandsvektors im Korrekturschritt des Kalman-Filters:

$$\mathbf{x}_k = \bar{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k \cdot \mathbf{d}_k. \quad (3-18)$$

Dabei ist $\mathbf{x}_k$ der aufdatierte Zustandsvektor, $\mathbf{K}_k$ ist die Kalmanverstärkungsmatrix und $\mathbf{d}_k$ die Innovation.

Gleichung (3-14) entspricht der Innovation:

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{l}_k - \mathbf{A} \cdot \bar{\mathbf{x}}_k. \quad (3-19)$$

Der Vektor $\mathbf{l}_k$ enthält die Beobachtungen, $\mathbf{A}$ ist die Designmatrix, die die Ableitungen der Beobachtungsgleichungen nach den Elementen des Zustandsvektors enthält und $\bar{\mathbf{x}}_k$ ist der prädizierte Zustandsvektor.

Gleichung (3-15) wird im RLS-Algorithmus als Kalman-Verstärkungsmatrix bezeichnet und ist äquivalent zur Kalman-Verstärkungsmatrix des Kalman-Filters:

$$\mathbf{K}_k = \boldsymbol{\Sigma}_{\bar{\mathbf{x}}\bar{\mathbf{x}},k} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{\bar{\mathbf{a}}\bar{\mathbf{a}},k}^{-1}, \quad (3-20)$$

mit $\boldsymbol{\Sigma}_{\bar{\mathbf{a}}\bar{\mathbf{a}},k} = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{\bar{\mathbf{x}}\bar{\mathbf{x}},k} \cdot \mathbf{A}^T + \boldsymbol{\Sigma}_u$.

Die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}(t-1)$ des RLS Algorithmus entspricht der prädizierten Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\bar{\mathbf{x}}\bar{\mathbf{x}},k}$. Die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}(t)$ entspricht der aufdatierten Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{x}\mathbf{x},k}$. Die Kovarianzmatrix der Beobachtungen $\boldsymbol{\Sigma}_u$ kommt im RLS nicht vor.

Reglerentwurf

Das vereinfachte ARMA-Modell aus (3-10) kann weiterhin wie folgt umgeschrieben werden (Åström and Wittenmark 1989):

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{y} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{u}. \quad (3-21)$$

Dabei sind $\mathbf{a}$ und $\mathbf{b}$ Vektoren, die die Schätzungen der Parameter $\hat{a}_i$ und $\hat{b}_i$ enthalten. Des Weiteren kann das allgemeine lineare Regelgesetz durch die folgende Gleichung formuliert werden (Åström and Wittenmark 1989):

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{t} \cdot \mathbf{w} - \mathbf{s} \cdot \mathbf{y}. \quad (3-22)$$

In der Gleichung (3-22) sind $\mathbf{r}$, $\mathbf{s}$ und $\mathbf{t}$ ebenfalls Parametervektoren, die die Schätzungen $\hat{r}_i$, $\hat{s}_i$ und $\hat{t}_i$ enthalten und mit denen der Regelkreis definiert wird. Für die Stellgröße gilt somit:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{t} \cdot \mathbf{r}^{-1}) \cdot \mathbf{w} - (\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}^{-1}) \cdot \mathbf{y}. \quad (3-23)$$

Um die Stellgröße u berechnen zu können, müssen folglich Lösungen für diese Parametervektoren gefunden werden. Dazu wird zunächst die Gleichung (3-22) nach u und y aufgelöst und in die Gleichung (3-21) eingesetzt. Durch dieses Vorgehen können folgende Zusammenhänge für den geschlossenen Regelkreis aufgestellt werden:

$$\mathbf{y} = (\mathbf{b} \cdot \mathbf{t}) \cdot (\mathbf{a} \cdot \mathbf{r} + \mathbf{b} \cdot \mathbf{s})^{-1} \cdot \mathbf{w}, \quad (3-24)$$

$$\mathbf{u} = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{t}) \cdot (\mathbf{a} \cdot \mathbf{r} + \mathbf{b} \cdot \mathbf{s})^{-1} \cdot \mathbf{w}. \quad (3-25)$$

In den Gleichungen (3-24) und (3-25) symbolisieren die Terme $\mathbf{b} \cdot \mathbf{t}$ und $\mathbf{a} \cdot \mathbf{t}$ ein Skalarprodukt. Dabei ist zu beobachten, dass der Nenner in Gleichung (3-24) und Gleichung (3-25) identisch ist. Zur Lösung des vorliegenden Polynomproblems kann für den Nenner der folgende Zusammenhang angenommen werden (Åström and Wittenmark 1989):

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{r} + \mathbf{b} \cdot \mathbf{s} = \zeta, \quad (3-26)$$

mit $\zeta \in \mathbb{Z}$.

Gleichung (3-26) repräsentiert eine Diophantische Gleichung und wird nach Åström und Wittenmark (1989) als charakteristisches Polynom des vorliegenden geschlossenen Regelkreises definiert. Mit den vorliegenden, bekannten Größen $\mathbf{a}$ und $\mathbf{b}$ aus der Systemidentifikation können nun die Lösungen für die Größen $\mathbf{r}$ und $\mathbf{s}$ ermittelt werden. Für eine Diophantische Gleichung existiert immer eine Lösung, wenn die Polynome einen größten gemeinsamen Teiler besitzen und durch Eins oder sich selbst teilbar sind. Eine gängige Methode zur Lösung von Diophantischen Gleichungen ist z.B. der Euklidische Algorithmus. Eine andere Methode ist die Lösung des linearen Gleichungssystems bei vorliegenden Werten.

Die letzte unbekannte und zu lösende Größe in Gleichung (3-22) ist der Vektor $\mathbf{t}$. In (3-24) wird gefordert, dass die Verstärkung des Regelkreises zwischen der Führungsgröße w und der Regelgröße y innerhalb einer Iteration statisch ist. Der gewünschte optimale Zustand des geschlossenen Regelkreises wäre erreicht, wenn die Regelgröße den Wert der Führungsgröße annehmen würde, so dass gilt: $y = w$. In diesem Fall würde die Stellgröße $u = 0$ werden. Das Regelgesetz (3-22) reduziert sich dann auf den folgenden Ausdruck:

$$\mathbf{t} \cdot w = \mathbf{s} \cdot y. \quad (3-27)$$

Daraus kann Folgendes abgeleitet werden:

$$\frac{y}{w} = (\mathbf{t} \cdot \mathbf{s}^{-1}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{t}) \cdot (\mathbf{a} \cdot \mathbf{r} + \mathbf{b} \cdot \mathbf{s})^{-1} = v, \quad (3-28)$$

mit

v : Verstärkungsfaktor des geschlossenen Regelkreises.

Somit lautet die allgemeine Lösung für $\mathbf{t}$:

$$\mathbf{t} = v \cdot \mathbf{s}. \quad (3-29)$$

Es kann prinzipiell ein beliebiger Verstärkungsfaktor v , mit $v \in \mathbb{R}_+^*$, gewählt werden. Im einfachsten Fall kann die Verstärkung als Eins angenommen werden, so dass gilt:

$$\mathbf{t} \cdot \mathbf{s}^{-1} = 1. \quad (3-30)$$

Nun liegen alle benötigten Größen zur Berechnung der Stellgröße u nach (3-23) vor.

Für eine Echtzeitanwendung kann es jedoch unter Umständen aufwändig und nicht praktikabel sein, innerhalb jeder Iteration die benötigten Polynome mit Hilfe Diophantischer Gleichungen zu ermitteln. Es kann zu einem deutlichen Anstieg der Rechenzeit kommen. Dieser Anstieg kann die Echtzeitfähigkeit gefährden oder im Extremfall nicht mehr gewährleisten. Des Weiteren ist mit Konfigurationen zu rechnen, in denen die Diophantische Gleichung nicht lösbare Konfigurationen einnimmt. Aus diesem Grund wird ein alternatives Schema, das sogenannte „direkte Modell“, verwendet (Åström and Wittenmark 1989). Im direkten Modell

werden die System- und Regelparameter direkt geschätzt. Dazu wird die Gleichung (3-10) mit Parametern aus dem allgemeinen linearen Regelgesetz reparametrisiert.

$$y(t)^* = \psi^T(t-1) \cdot \theta^*(t-1). \quad (3-31)$$

Der neu eingeführten Parametervektor θ^* hat die Form:

$$\theta^* = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n \ s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n]^T.$$

Das Schema des direkten selbsteinstellenden Reglers ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

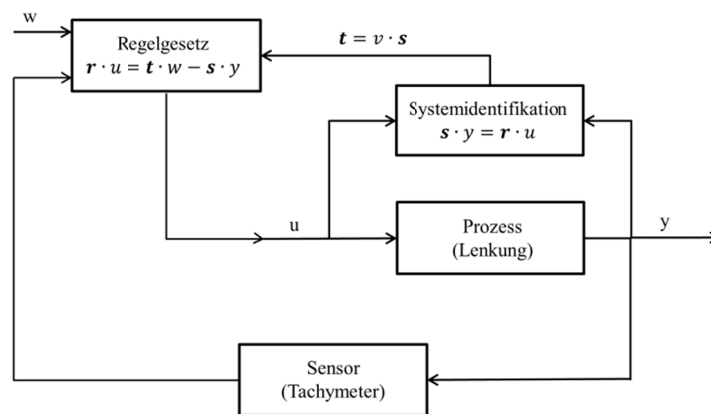


Abbildung 3-7: Schema des direkten selbsteinstellenden Reglers (nach Åström 1983)

In Abbildung 3-7 fällt auf, dass der Block „Regler“ gänzlich entfallen ist. Stattdessen geht aus dem Block „Regelgesetz“ eine Stellgröße zu den Blöcken „Prozess“ und „Systemidentifikation“. Somit werden beim direkten selbsteinstellenden Regler die Komponenten „Reglerentwurf“ und „Regler“ im Block „Regelgesetz“ vereint.

Die Bestimmung der Vektoren r und s bzw. des Parametervektors θ^* erfolgt weiterhin mittels des oben vorgestellten RLS Algorithmus. Anschließend wird unter Nutzung von s nach Gleichung (3-29) das Polynom t ermittelt. Im darauffolgenden Schritt kann dann unter Verwendung der Führungsgröße w das Regelgesetz (3-22) angewendet werden, um die Stellgröße u nach Gleichung (3-23) zu berechnen.

3.3 Verwendung des selbsteinstellenden Reglers im Steuerprozess der Laderaupe

Die automatisierte Führung der Laderaupe entlang einer vordefinierten Trajektorie ist ein wichtiger Baustein innerhalb dieser Arbeit. Deswegen soll im Verlauf dieses Abschnitts aufgezeigt werden, wie die adaptive Regelung in den Steuerprozess der Laderaupe integriert wird.

Im letzten Abschnitt wurde gezeigt, wie aus der Systemidentifikation und der anschließenden Anwendung des linearen Regelgesetzes die Stellgröße u generiert werden kann. In diesem Zusammenhang ist es von besonderer Wichtigkeit zu klären, wie die Stellgröße im Steuerprozess definiert wird und auf welche Parameter sich diese Stellgröße auswirkt, um eine Steuerung zu realisieren. Aus dem Kapitel 2.1.2 geht hervor, dass sich die Modellraupe durch Anlegen von Spannungswerten auf den linken und rechten Antrieb bewegen und lenken lässt. Des Weiteren konnten dort Skalierungsterme für die Gesamtgeschwindigkeit abgeleitet werden, die die individuellen Kettengeschwindigkeiten so manipulieren, dass im Resultat ein bestimmter Kurvenradius durchfahren wird. Aus diesen Vorüberlegungen wird die Stellgröße u mit dem im Skalierungsterm ent-

haltenen Skalierungsfaktor n (vgl. Gleichung (2-6)), der auch als Lenkparameter bezeichnet wird, gleichgesetzt. Auf dieser Festlegung basierend erfolgen nun der Entwurf und die Implementierung des Steueralgorithmus für die Führung der Raupe.

Bezugnehmend auf Abbildung 3-1 stellt die Regelgröße $y(t)$ die gemessene 3D-Position des Fahrzeugs bzw. des Prismenpunktes P dar. Die Führungsgröße $w(t)$ ist die Referenztrajektorie, die durch eine Folge von 3D-Punkten repräsentiert wird. Aus den beiden Größen lässt sich die Querabweichung $e(t)$ berechnen. Es handelt sich dabei um die Länge der Lotlinie, die durch den geometrischen Schwerpunkt des Fahrzeugs orthogonal auf die Referenztrajektorie gefällt wird (Beetz 2003). Aus der Querabweichung wird nun der Lenkwinkel ermittelt, den das Fahrzeug umsetzen muss, um zurück auf die Solltrajektorie zu gelangen. Dabei zwingt der eingenommene Lenkwinkel das Fahrzeug auf eine Kurvenfahrt mit dem Lenkradius R . Zu beachten ist, dass es sich hierbei nicht um den Radius der Referenztrajektorie handelt. Es kann nun mit dem aus der Querabweichung ermittelten Lenkradius R und bekannter Spurbreite B der Modellraupe, unter Verwendung der Gleichung (2-6), der Skalierungsfaktor n berechnet werden. Dieser wird dann in die Gleichungen (2-13) und (2-14) eingesetzt, um die entsprechenden Geschwindigkeiten für die linke und rechte Kette zu erhalten. Die Führungsgröße, in Form der Solltrajektorie, wird mathematisch als eine Reihe von Koordinatentripeln Y, X, Z repräsentiert. Die Tripel werden zusätzlich mit einer Punktnummer indiziert. Die Regelgröße, die mit dem Tachymeter gemessen wird, besteht ebenfalls aus solchem Koordinatentripel. Das Bindeglied zwischen den beiden Einheiten ist die Querabweichung, die wiederum mit dem Lenkradius R verknüpft ist. Für die Struktur des Reglerschemas wird deshalb der geforderte Lenkradius, bzw. die Krümmung $\kappa = \frac{1}{R}$, als Führungsgröße w definiert.

Tabelle 3-2 zeigt den Zusammenhang zwischen den Variablen des direkten, selbsteinstellenden Reglerschemas nach Abbildung 3-7 und deren korrespondierende Bedeutung innerhalb des Regelkreises der Modellraupe.

Tabelle 3-2: Variablen des selbsteinstellenden Reglerschemas und ihre Bedeutung im Regelkreis

Variable	Bedeutung im Reglerschema	Bedeutung im Steuerregelkreis
$w(t)$	Führungsgröße	Geforderter Lenkradius R
$u(t)$	Stellgröße	Lenkparameter n
$y(t)$	Regelgröße	Aktuelle Fahrzeugposition y

Für die Realisierung des adaptiven Reglers wurden für das Systemmodell Polynome zweiter Ordnung ausgewählt. Diese Wahl stellt ein Mittelweg zwischen einer Unterparametrisierung mittels Polynomen erster Ordnung und einer Überparametrisierung mittels Polynomen höherer Ordnung dar (Seborg et al. 1986). Beim Einsatz von Polynomen erster Ordnung besteht die Gefahr, dass das zu analysierende System nicht richtig modelliert wird und somit das Reglerdesign auf Grundlage eines minderwertigen Modells durchgeführt wird. Polynome höherer Ordnung können das zu regelnde System hinreichend gut modellieren, allerdings steigen dabei sowohl der Programmieraufwand, als auch die für die Prozessierung benötigte Rechenzeit. Im Extremfall kann das Reglersystem die Echtzeitanforderung nicht einhalten. Auch das Auftreten von Alias-Effekten oder Schwingungen können bei Überparametrisierung nicht immer ausgeschlossen werden (Seborg et al. 1986).

Für die Systemidentifikation benötigt der RLS-Algorithmus (Gleichungen (3-13) bis (3-16)) Werte für die Größen $\theta^*(0)$, $P(0)$, $y(0)$ und $u(0)$ als Startwerte. Seborg et al. (1986) geben einen Hinweis auf eine vorteilhafte Wahl unter dem Aspekt einer schnellen Konvergenz. Die Startwerte werden daher wie folgt gesetzt:

$$r_1(0) = 1 \cdot 10^{-3},$$

$$r_2(0) = 1 \cdot 10^{-3},$$

$$s_1(0) = 1 \cdot 10^{-3},$$

$$s_2(0) = 1 \cdot 10^{-3},$$

$$y(0) = 1,$$

$$u(0) = 1,$$

$$\lambda = 1,$$

$$\mathbf{P}(0) = \begin{bmatrix} 1 \cdot 10^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 \cdot 10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \cdot 10^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \cdot 10^3 \end{bmatrix}.$$

Die Werte der Parameter $r_1(0)$, $r_2(0)$, $s_1(0)$, $s_2(0)$, $y(0)$ und $u(0)$ sind dabei beliebig gewählt. Die Werte für die Diagonalelemente der Kovarianzmatrix $\mathbf{P}(0)$ sind groß gewählt, um eine schnelle Konvergenz der Parameter zu erreichen. Im Vergleich dazu wird für die Startwerte der Kovarianzmatrix des Kalman-Filters Σ_{II} die Einheitsmatrix $\mathbf{I}$ empfohlen, die mit einem beliebigen Faktor $f_i > 0$, $i = 1, 2, \dots, m$ multipliziert wird. Für den Parametervektor werden, ebenso wie beim RLS-Algorithmus, beliebig kleine oder möglichst optimale Schätzungen der wahren Werte empfohlen (Kamen und Su 1999).

3.3.1 Analyse und Diskussion

Die Diagonalelemente p_{ii} der Kovarianzmatrix $\mathbf{P}(0)$ werden groß gewählt, um die Gewichtung der Anfangswerte des Parametervektors $\theta^*(0)$ gering zu halten. Analysen des RLS-Algorithmus zeigen, dass die Wahl großer numerischer Werte für die Diagonalelemente eine schnelle Anpassung und Konvergenz des Parametervektors mit sich bringt, wohingegen kleine numerische Werte eine langsame Anpassung und Konvergenz implizieren (Seborg et al. 1986). Dieses Verhalten soll mit Hilfe einer durchgeführten Simulation demonstriert werden.

Es werden zwei Simulationsdurchläufe ausgeführt. Die Simulationen sollen das Einschwingverhalten des RLS-Algorithmus bei Wahl verschiedener Startwerte verdeutlichen. In den Simulationen ist die Führungsgröße, zur besseren Veranschaulichung, zu $w = 1$ gesetzt und konstant gehalten. Im ersten Durchlauf werden die Diagonalelemente zu $p_{11} = p_{22} = p_{33} = p_{44} = 1 \cdot 10^{-2}$ gesetzt und im zweiten Durchlauf zu $p_{11} = p_{22} = p_{33} = p_{44} = 1 \cdot 10^2$. Die folgenden Abbildungen zeigen die Simulationsergebnisse.

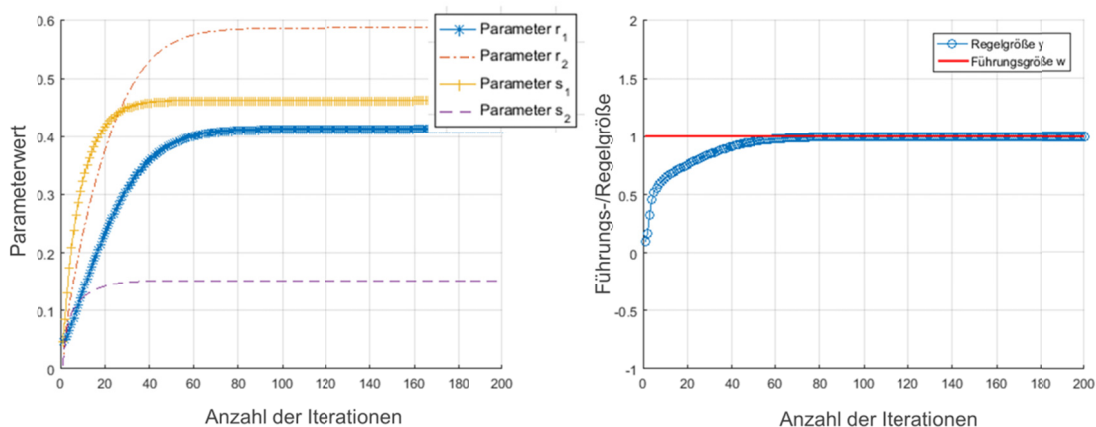


Abbildung 3-8: Simulation 1 - kleine Diagonalelemente der Kovarianzmatrix; links - Verlauf der Parameterschätzungen; rechts - Verlauf der Regelgröße und Führungsgröße

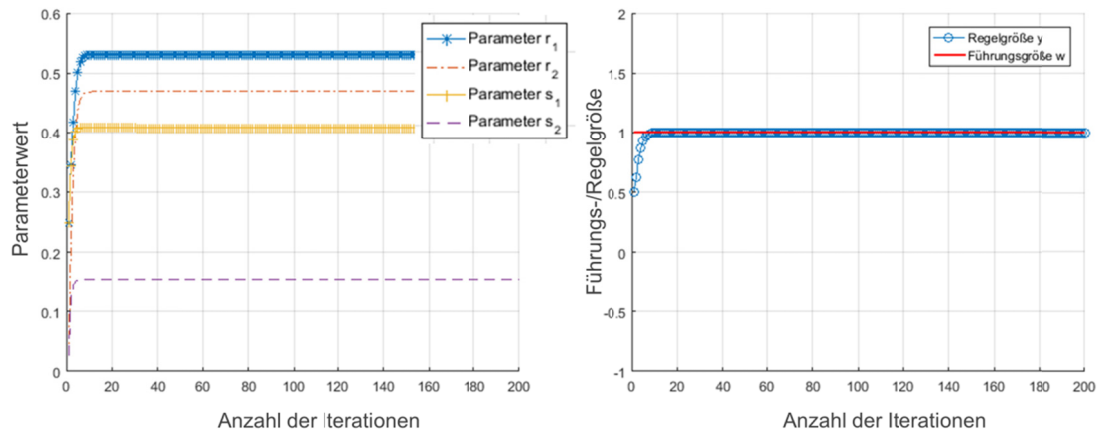


Abbildung 3-9: Simulation 2 - große Diagonalelemente der Kovarianzmatrix; links - Verlauf der Parameterschätzungen; rechts - Verlauf der Regelgröße und Führungsgröße

Der Verlauf der Schaubilder zeigt deutlich, dass die Konvergenzzeit bei groß gewählten Diagonalelementen deutlich kürzer ist als bei klein gewählten Diagonalelementen. In Abbildung 3-9 konvergiert der Algorithmus bereits nach 7 Iterationen, wohingegen in Abbildung 3-8 ca. 80 Iterationen bis zur Konvergenz aller Parameter benötigt werden. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Systemidentifikation, in Form der Schätzungen der Parametervektoren, unterschiedlich ausfällt. Obwohl die Parameterschätzung der Systemidentifikation für die zwei gezeigten Simulationen jeweils unterschiedliche Werte aufweist, passen sich beide Systeme trotzdem der gewählten Führungsgröße 1 an. Die Kovarianzmatrix kann als Indikator für die Verschlechterung der Regelperformance dienen. Dazu können die Werte überwacht werden. Vergrößern sich diese, ist dies ein Indiz dafür, dass die Regelungseigenschaft sich verschlechtert. Bei konstanten Parametern wird der adaptive Regler zu einem konstanten Regler und kann somit mit einem solchen ersetzt werden. Eine Möglichkeit wäre z.B., das adaptive System dann einzusetzen, wenn das Monitoring der Kovarianzmatrix indiziert, dass die Regelgüte abnimmt. In dem Fall kann die adaptive Regelung zugeschaltet werden, um den Parametervektor erneut zu schätzen. Diese Strategie wird im Rahmen dieser Arbeit nicht verfolgt.

Der RLS-Algorithmus benötigt außerdem eine Anregung. Eine solche Anregung ist im Fall der Raupenlenkung die Querabweichung von der Soll-Trajektorie, die im Sinne der Regelung als Regelabweichung bezeichnet wird. Durch die Rückkoppelung ist jedoch diese Anregung nicht immer gegeben. Die Querabweichungen können dann Werte von $< 1 \text{ mm}$ annehmen oder im Extremfall zu Null werden. Eine gute Regelung impliziert jedoch kleine Anregungen, da die Eingangsgrößen des Schätzers in einem solchen Fall konstant oder fast konstant sind. Somit besteht die Gefahr, dass die Stellgröße u aus der Vorepoche und der nachfolgenden Epoche klein werden, bzw. klein bleiben und die Regelgüte y konstant bleibt. Andererseits können im Extremfall die Elemente der Kovarianzmatrix in Gleichung (3-16) sehr groß werden, was zu einer Instabilität des Parametervektors führt. Das System neigt dadurch zum Aufschwingen und im schlechtesten Fall zum kompletten Zusammenbruch der Stabilität, wie in Abbildung 3-10 gezeigt wird.

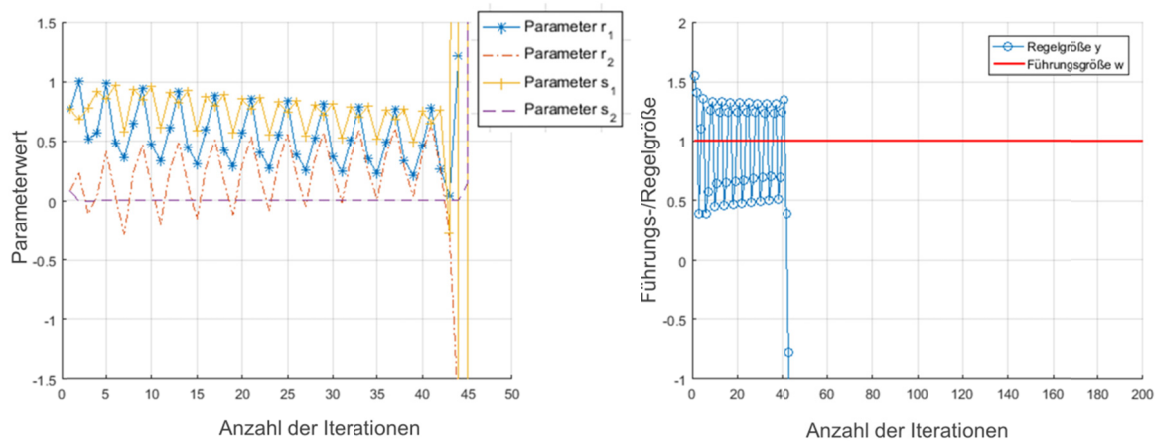


Abbildung 3-10: Simulation 3 - Instabilität durch geringe Anregung des Regelkreises

Eine Gegenmaßnahme wäre die entsprechende Wahl eines geeigneten Gewichtungsfaktors $\lambda < 1$. In dem hier vorliegenden System tritt jedoch eine solche Instabilität nur sehr selten auf, da die Änderungen der Führungsgröße eine Anregung des Systems impliziert, die Führungsgröße jedoch ein dynamisches Verhalten aufweist.

Ein weiterer, individuell den hier entwickelten Algorithmus betreffender Aspekt im Zusammenhang mit der Führungsgröße, konnte zusätzlich aufgedeckt werden. Hierbei spielt die zwischen der Führungsgröße und der Regelgröße resultierende Querabweichung eine Rolle. Bei den Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass durch eine künstliche Verstärkung der Querabweichung im Algorithmus eine Steigerung der Intensität der Reglerantwort zu beobachten war. Das bedeutet, dass bei einer Verstärkung der Querabweichung, z.B. um einen Faktor 10 (Multiplikation mit 10), eine deutlich schnellere und intensivere Reaktion des adaptiven Regelkreises eintritt, was sich in einer Zunahme der Direktheit und Schnelligkeit der Lenkung niederschlägt. Dies ist hauptsächlich der Berechnung des Lenkparameters n geschuldet, der in Tabelle 3-2 als Stellgröße definiert ist. Dabei verursacht eine künstliche Verstärkung der Querabweichung auf Grund der Zusammenhänge in Gleichung (2-6), Abschnitt 2.1.2, eine gleichzeitige Verstärkung des Lenkparameters. Der verstärkte Lenkparameter beeinflusst wiederum die Verteilung der Antriebskräfte auf die Ketten, die somit deutlich sensibler reagieren. Das Resultat sind deutlich kleinere Regelabweichungen aufgrund der sensibleren Lenkung, was einer höheren Regelqualität bzw. Regelgüte entspricht. Gleichzeitig ist die erhöhte Sensitivität der Lenkung nachteilig für die Reglerstabilität. Durch die exakte Lenkung werden die erforderlichen Anregungen des Adaptors und somit auch die Werte der Kovarianzmatrix reduziert. Somit kann ein Zusammenbruch der Stabilität, wie in Abbildung 3-10 dargestellt, schneller eintreten. Zusätzlich verändert sich durch die sensiblere Lenkung die Fahrdynamik des Fahrzeugs. Die „direkten“ und „aggressiven“ Lenkmanöver können, je nach Fahruntergrund, schneller zu Traktionsverlusten führen. Das wiederum kann zu einem abnormalen und instabilen Reglerzustand und in Folge zum Zusammenbruch der Stabilität führen. Es ist also ein entsprechender Verstärkungsfaktor zu finden, der eine direkte, sensitive Lenkung und ein stabiles Regler- und Fahrverhalten kombiniert. Dieser Faktor ist für jedes Fahrzeug empirisch zu bestimmen, da jedes Fahrzeug eine andere Fahrdynamik aufweist.

Die Einführung des Verstärkungsfaktors wirkt, im Gegensatz zum Gewichtungsfaktor λ , nicht auf die Kovarianzmatrix $\mathbf{P}$ und die Stabilität des RLS-Algorithmus, sondern auf die physikalischen Eigenschaften der Rau-
penlenkung.

4 Einsatz bildverarbeitender Robottachymeter zur statischen Positionsbestimmung

Das Tachymeter erfasst und bestimmt 3D Positionen im statischen und kinematischen Modus. Tachymeter haben in den letzten Jahrzehnten eine ständige Entwicklung durchlaufen. Dabei wurden zunächst aus Theodoliten durch Hinzunahme von Distanzmesseinrichtungen Tachymeter. Diese wurden im weiteren Entwicklungsverlauf motorisiert. Die gleichzeitige Entwicklung und Massenproduktion von elektronischen Chips führte zur Digitalisierung des Messinstruments. Heutzutage sind moderne Tachymeter Multisensorsysteme mit einer komplexen Systemarchitektur. Die Architektur wird nach Jöckel et al. (2008) in folgende Komponentengruppen eingeteilt: Sensoren, Stellantriebe, Speicher, Stromversorgung, Eingabeschnittstellen (Keyboard, Touchscreen) und Ausgabeschnittstellen. Zusammengeführt werden diese Komponenten in einem gemeinsamen Mikroprozessor, der die unterschiedlichen Informationen verarbeitet und koordiniert. Allein die Komponentengruppe Sensoren weist eine Vielzahl von Elementen, wie z.B. Winkelerfassungssensoren, Distanzmesser, optische Sensoren zur Zielverfolgung, elektronische Libellen, Kompensatoren, Temperatur- und Druckmesser, auf. In der aktuellen Evolutionsstufe wurden die Tachymetersysteme um optische Kamerasysteme und Laserscannerfunktionalitäten erweitert. Somit ist das Tachymeter zu einem vielseitig einsetzbaren Instrument geworden, das fast allen ingenieurgeodätischen Anforderungen gerecht wird. Abbildung 4-1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines modernen Tachymeters.

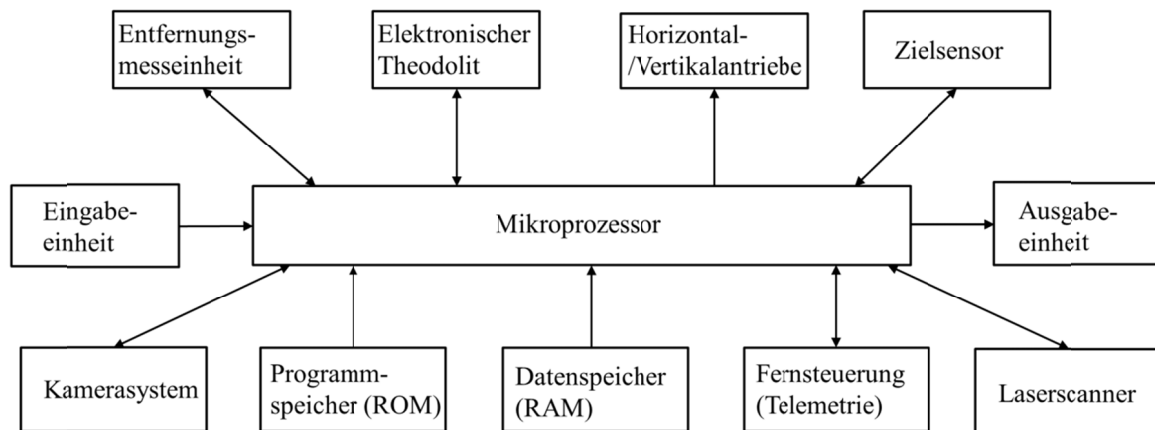


Abbildung 4-1: Prinzipieller Aufbau eines Tachymeters (verändert nach Joeckel et al. 2008)

Dieser Abschnitt behandelt den Einsatz bildverarbeitender Tachymeter. Das Anwendungsgebiet des Kameramoduls soll dabei über die reine Dokumentationsfunktion hinaus, erweitert werden. Zunächst werden die Eigenschaften des eingesetzten Tachymeters vorgestellt. Anschließend erfolgt eine ausführliche Abhandlung über die statische Positionsbestimmung mit der Methodik der digitalen Bildverarbeitung.

4.1 Eigenschaften des eingesetzten bildverarbeitenden Robottachymeters

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Tachymeter als Sensor für die Aufgabe der statischen und kinematischen Positionsbestimmung verwendet. Dazu wurde das bildverarbeitende Robottachymeter Trimble S7 ausgewählt, da dieses neben den für Vermessungen benötigten Standardfunktionen über ein Bilderfassungsmodul verfügt. Das Instrument ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

Mit dem mobilen Handgerät TSC3 ist eine ferngesteuerte Bedienung des Instrumentes möglich. Im Rahmen der Verwendung in dieser Arbeit wird das Instrument jedoch über ein USB (Universal Serial Bus)-Kabel direkt mit einem Messrechner verbunden. Dies ermöglicht zum einen die Ansteuerung über benutzerdefinierte Programme, zum anderen eine direkte und unmittelbare Verarbeitung der erfassten Messdaten, einschließlich Bildern, in den Positionierungs- und Regelungsalgorithmen des hier vorgestellten Systems. Die Leistungsspezifikationen des Instruments sind in Tabelle 4-1 zusammengestellt.



Abbildung 4-2: Trimble S7 Total Station mit mobilem Handgerät TSC3

Tabelle 4-1: Spezifikationen Trimble S7 Total Station (Trimble 2018)

Antrieb	Magnet-Technologie („MagDrive“)	
max. Rotationsgeschwindigkeit	128 gon/s 115 °/s	
Genauigkeit Winkelmessung	1“/ 0.3 mgon	
Genauigkeit Streckenmessung	statisch:	2 mm + 2 ppm
	kinematisch:	4 mm + 2 ppm
	reflektorlos:	2 mm + 2 ppm
Fernrohrsichtfeld bei 100 m	2.6 m	
Reichweite „Autolock“ auf passive Prismen	0.2 m bis 700 m	
Kamera	Auflösung:	2048 x 1536 Pixel
	Brennweite:	23 mm
	Sichtfeld:	16.5° x 12.3°
	Zoom:	4 Stufen (1, 2, 4, 8)
	Dateiformat:	JPG
Laserscanner	Reichweite:	1 bis 250 m
	Geschwindigkeit:	max. 15 Punkte/S.
	Auflösung:	10 mm
	Standardabweichung:	1.5 mm auf ≤ 50 m

Die Bilderfassung erfolgt über die eingebaute Weitwinkelkamera des Instruments. Das Instrument ist nicht mit einer Koaxialkamera ausgestattet. Die Anordnung von Fernrohr- und Kameraachse ist exzentrisch ausgeführt (vgl. Abbildung 4-3). Somit ergeben sich parallele Abbildungsstrahlen zwischen der Kamera und dem Fernrohr.

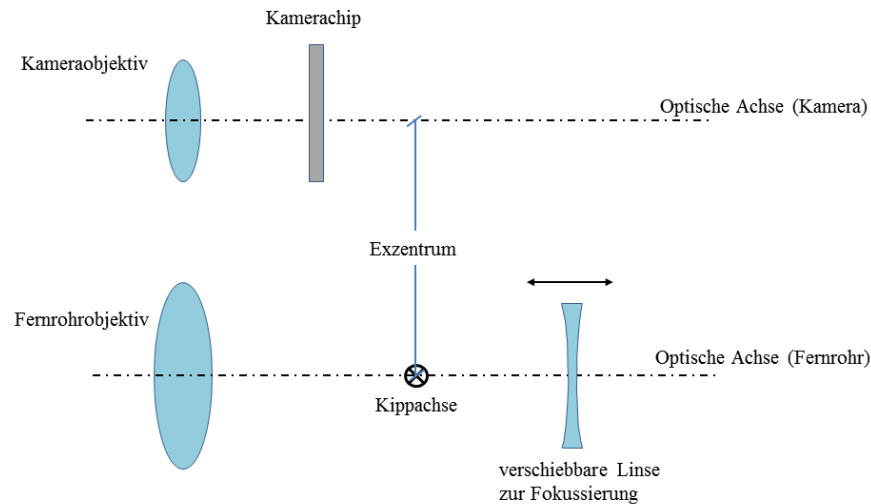


Abbildung 4-3: Prinzipskizze Exzentrische Achsanordnung von Fernrohr- und Kameraachse (nach Vogel 2006)

Trimble SDK

Für die bildbasierte statische (und reguläre kinematische) Positionsbestimmung erfolgt eine benutzerdefinierte Ansteuerung des Tachymeters. Dazu wird das Trimble Software Development Kit (SDK) als Schnittstelle verwendet.

Beim Trimble Software Development Kit handelt es sich um eine Anwendungsoberfläche mit der es möglich ist, die im Tachymeter verbauten Aktuatoren und Sensoren, wie z.B. die Servomotoren oder Temperatur- und Drucksensoren, anzusteuern und deren Daten auszulesen. Das SDK besteht aus folgenden Komponenten (Trimble 2018):

- Controller Software Interface (CSI),
- Spatial Image Library (SIL),
- Sensor Software Interface (SSI),
- Trimble Survey Calculation Interface (TSC).

Von Bedeutung für die Positionsbestimmung ist hier ausschließlich das Sensor Software Interface (SSI). Das SSI beinhaltet die entsprechenden Programmbausteine in Form von Dynamic Link Libraries (DLL), um die Aktuatoren sowie die Sensorik entsprechend anzusteuern. Ebenfalls sind hier die für den USB-Betrieb benötigten Treiber zur Verfügung gestellt. Damit lässt sich das Instrument über den USB-Port, mittels einer Kabelverbindung mit dem Steuercomputer verbinden. Die Steuerprogramme wurden in der Programmiersprache C# erstellt. Der Programmcode wurde in Microsoft Visual Studio entwickelt.

4.2 Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung

Für Positionsbestimmungen mit optischen Sensoren werden Methoden aus dem Fachgebiet der Photogrammetrie und der Machine Vision bzw. Computer Vision, zu Deutsch „Maschinelles Sehen“, angewendet. Unter dem Begriff „Maschinelles Sehen“ wird die maschinelle Nachbildung des neuronengebundenen, menschlichen Seh- und Erkennungsvermögens verstanden (Guilboud 2013, Lowe 1999). Die Realisierung erfolgt bei bildbasierten Methoden durch digitale Bildverarbeitung. Der Bildverarbeitungsprozess wird allgemein nach Luhmann (2010) in folgende Schritte eingeteilt: Bildaufnahme, Vorverarbeitung, Segmentierung, Erkennung, Gruppierung, Konfigurationen und Darstellung der Ergebnisse.

Den mit der Kamera erzeugten Bildern liegt ein Pixelkoordinatensystem zugrunde, welches von entscheidender Bedeutung für das Lösen von Bildbearbeitungsaufgaben ist. Es ist als linkshändiges x-y-System von Zeilen und Spalten definiert, wobei die x-Achse in Zeilenrichtung und die y-Achse in Spaltenrichtung zeigt (Luhmann 2010, Sonka et al. 1994). Ein vorliegendes Objekt überdeckt im Bild in der Regel mehrere Pixel. Diese Pixel sind zusammenhängend.

Für die effiziente Bildverarbeitung steht das Werkzeug der Bildpyramiden zur Verfügung. Bildpyramiden repräsentieren hierarchische Datenstrukturen (Sonka et al. 1994). Unter einer Bildpyramide versteht man eine Bildserie, in der das jeweils folgende Bild gegenüber seinem Vorgänger um einen Faktor n in der Auflösung reduziert und in der Größe (Anzahl der Pixel) verkleinert ist. Das verkleinerte Bild ist in der Regel mit Filtern geglättet. Somit verschwinden kleine Bildstrukturen mit abnehmender Bildauflösung, weil der Informationsgehalt mit jeder Pyramidenstufe abnimmt (Luhmann 2010). Damit ist es möglich, zunächst in Bildern geringster Auflösung nach groben Bildmerkmalen zu suchen. Anschließend kann die Suche in den interessanten, zuvor ermittelten Bereichen durch Nutzung der Bilder höherer Auflösung verfeinert werden.

Die vorgenommenen Filterungen können im Ortsraum durch Faltungen und im Frequenzraum durch Multiplikationen mit dem Filteroperator realisiert werden. Für Filteroperationen im Frequenzraum muss dazu das Bild, z.B. durch eine Fourier-Transformation, in diesen überführt werden (Sonka et al. 1994, Luhmann 2010).

Bei Faltungen wird ein Faltungskern schrittweise über das Bild „geschoben“. Der Faltungskern kann dabei unterschiedliche Formen annehmen. Der Pixelwert des Bildes unter dem Kern wird mit dem korrespondierenden Wert des Filterkerns multipliziert. Diese Produkte werden aufsummiert und mit der Summe der Filterkernwerte multipliziert (Luz 2018). Dieses Ergebnis wird dem Pixel zugewiesen, der dem mittleren Wert des Filterkerns entspricht (Luhmann 2010).

Einer der einfachsten Glättungsfilter ist der lineare Box-Filter. Dieser hat die Eigenschaft eines Tiefpassfilters. Sein Faltungskern hat z.B. für die Dimension 3 die folgende Form:

$$H = \frac{1}{9} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4-1)$$

Der Nachteil des Box-Filters ist seine Anisotropie. Die Glättung erfolgt nicht gleich in alle Richtungen, da alle Pixel gleich gewichtet werden, ohne ihre Entfernung zum Mittelpixel zu berücksichtigen (Luz 2018).

Ein weiterer Filter aus der Gruppe der Tiefpassfilter ist der Gauss-Filter. Dessen Faltung mit sich selbst ergibt wiederum einen Gauss-Filter. Somit ist eine wiederholte Glättung identisch zu der ersten Glättung mit einem größeren Kern (Luz 2018). Der Gauss-Filter ist mathematisch wie folgt formuliert (Luhmann 2010):

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma^2} \cdot e^{-\left(\frac{x^2 + y^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)}, \quad (4-2)$$

mit

$G_{\sigma}(x, y)$: Impulsantwort am Ort x, y ,

σ : Formparameter.

Mit Gleichung (4-2) können die Koeffizienten des Faltungskerns gebildet werden. Beispielsweise nimmt der Kern für die Dimension 3 die folgende Form an:

$$H = \frac{1}{16} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4-3)$$

Neben der Gruppe der Glättungsfilter spielen die Kantenfilter eine übergeordnete Rolle. Diese werden zur Kantendetektion eingesetzt. Sie basieren auf numerischen Ableitungen der Grauwertfunktionen und sind somit in der Lage, Grauwertänderungen zu detektieren. Grauwertänderungen wiederum deuten auf Kanten hin (Luz 2018).

Der einfachste Kantenfilter ist der Ableitungsfilter 1. Ordnung, der auch als Roberts-Gradient bezeichnet wird (Luhmann 2010). Wie bereits aus dem Namen hervorgeht, wird die erste Ableitung in x- oder y- Richtung auf Pixelebene durchgeführt (Girod 2013). Seine Faltungskerne haben die folgende Form:

$$R_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, R_y = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4-4)$$

Der Sobel-Operator kombiniert eine Ableitung mit einer Glättung. Somit wird vorhandenes Rauschen nicht zusätzlich durch die Ableitung verstärkt (Luz 2018). Gleichung (4-5) stellt die Faltungskerne dar:

$$S_x = \frac{1}{8} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, S_y = \frac{1}{8} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}. \quad (4-5)$$

Ist zusätzlich die Information über die Krümmung der Kante von besonderem Interesse, kann der Laplace-Operator verwendet werden. Dieser basiert auf der zweiten Ableitung der Grauwertfunktion. Dabei werden die Kanten durch Vorzeichenwechsel repräsentiert. Die Summe der beiden partiellen Ableitungsoperatoren wird als Laplace-Operator ∇^2 bezeichnet (Luhmann 2010).

$$\nabla^2 = \frac{1}{8} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4-6)$$

Nachteilig auf die Rauschempfindlichkeit wirkt sich hier die zweite numerische Ableitung aus. Um dies zu reduzieren, kann das Bild vor der Ableitung durch einen Gauss-Filter geglättet werden. Wird beides kombiniert, ergibt sich der Operator mit dem Namen Laplacian of Gaussian, *LoG*:

$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \cdot \left(1 - \frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}. \quad (4-7)$$

Der Faltungskern hat die folgende Form:

$$\nabla_{LoG}^2 = \frac{1}{16} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4-8)$$

Zur Erhöhung der Verarbeitungsgeschwindigkeit kann der *LoG* durch eine Differenz zweier Gauss-gefilterter Bilder mit unterschiedlichen Standardabweichungen σ approximiert werden (Luz 2018).

$$D_\sigma = G_{k\sigma}(x, y) - G_\sigma(x, y). \quad (4-9)$$

Der Nachteil der Kantenfilter ist die Instabilität ihrer Position. Bei vielen Bilderkennungsalgorithmen werden jedoch Merkmale benötigt, die eine stabile Position haben. Die Kanten sind nur in eine Richtung fest lokalisiert. Entlang einer Kante ist die Lokalisierung nicht fest, da Ableitungen in beide Richtungen maximal werden. Eckpunkte dagegen sind in zwei Richtungen fest lokalisiert. Somit handelt es sich bei Eckpunkten um Bildpunkte mit geringer Selbstähnlichkeit. Selbstähnlichkeit bedeutet, dass bei Vergrößerungen eines Bildes die Merkmale ähnliche Strukturen aufweisen wie in nicht vergrößerten Bildern. Somit wirkt sich Selbstähnlichkeit negativ auf Merkmalsdetektionen aus. Im Folgenden wird die Eckendetektion über den so genannten Hesse-Detektor vorgestellt.

Die Selbstähnlichkeit der Punkte beim Hesse-Detektor wird über die Eigenwerte der Hesse-Matrix dargestellt. Der Detektor basiert auf der Nutzung der Determinanten der Hesse-Matrix. Diese ist nach Merziger und Wirth (2010) wie folgt definiert:

$$\mathcal{H}_f = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_1}(x) & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n}(x) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1}(x) & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_n}(x) \end{pmatrix}. \quad (4-10)$$

Für den Punkt $\mathbf{x} = (x, y)$ im Bild I hat die Hesse-Matrix die folgende Form:

$$\mathcal{H}(\mathbf{x}, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(\mathbf{x}, \sigma) & L_{xy}(\mathbf{x}, \sigma) \\ L_{xy}(\mathbf{x}, \sigma) & L_{yy}(\mathbf{x}, \sigma) \end{bmatrix}, \quad (4-11)$$

mit

- $L_{xx}(\mathbf{x}, \sigma)$: Faltung des Bildes mit der 2. Ableitung des Gauss-Kernels $\frac{\partial^2}{\partial x^2} g(\sigma)$ am Punkt $\mathbf{x}$,
- $L_{xy}(\mathbf{x}, \sigma)$: Faltung des Bildes mit der 2. Ableitung des Gauss-Kernels $\frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{\partial^2}{\partial y^2} g(\sigma)$ am Punkt $\mathbf{x}$,
- $L_{yy}(\mathbf{x}, \sigma)$: Faltung des Bildes mit der 2. Ableitung des Gauss-Kernels $\frac{\partial^2}{\partial y^2} g(\sigma)$ am Punkt $\mathbf{x}$.

Der Parameter σ symbolisiert die Anwendung des Gauss-Filters auf das Bild. Zur Detektion von Bildmerkmalen wird nun die Determinante der Hesse-Matrix verwendet. An der Stelle, an der die Determinante ein Maximum aufweist, befindet sich ein Bildmerkmal. Des Weiteren lassen sich damit einzelne Punkte untereinander vergleichen. Die Determinante der Hesse-Matrix ist wie folgt formuliert (Mertziger und Wirth 2010):

$$\det \mathcal{H} = L_{xx} \cdot L_{yy} - (L_{xy})^2. \quad (4-12)$$

Die Elemente D_{xx} , D_{yy} und D_{xy} sind so genannte Blob-Filter-Antworten am Bildpunkt $\mathbf{x}$. Diese repräsentieren einen 9 x 9 Box-Filter. w wird hier als das relative Gewicht bezeichnet.

4.2.1 Bildverarbeitungsalgorithmen zur Merkmalsextraktion

Zur Merkmalsextraktion werden im Allgemeinen zwei Schritte benötigt: Detektion von Merkmalen und Beschreibung dieser Merkmale. Dazu stehen zwei gängige Bildverarbeitungsalgorithmen zur Verfügung, der Scale Invariant Feature Transform Algorithmus (SIFT) und der Speeded-Up Robust Features Algorithmus (SURF). Im Folgenden werden die beiden Algorithmen in kompakter Form beschrieben.

SIFT-Algorithmus

Der SIFT-Algorithmus wird z.B. in Lowe (1999) vorgestellt. Die Anforderung an die bildbasierte Objekterkennung aus einer realen Welt ist, dass die beliebig angeordneten und teilweise verdeckten Bildobjekte oder Bildmerkmale, so genannte Features, eindeutig identifiziert und erkannt werden. Die Features sollen invariant gegenüber Bildtranslationen, Skalierungen, Rotationen und Beleuchtungsänderungen sein. Des Weiteren sollen die Features unbeeinflusst von Bildverzerrungen sein und der Einfluss von Bildrauschen soll minimiert werden. Die Bildobjekte müssen jedoch charakteristische Formeigenschaften besitzen, damit diese eindeutig identifizierbar sind. Der SIFT-Algorithmus zerlegt ein Bild in eine endlich große Anzahl von Objekten, die mit lokalen Eigenschaftsvektoren beschrieben werden. Für jeden einzelnen Eigenschaftsvektor sollen die oben aufgeführten Anforderungen gelten.

Nach der Bilderfassung erfolgt die Lokalisierung der charakteristischen Bildmerkmale (Features). Dabei müssen die Positionen der identifizierten Bildmerkmale die gestellten Invarianzanforderungen erfüllen. Die notwendigen Operationen zur Lokalisierung sind im sogenannten Detektor zusammengefasst.

Der Detektor basiert auf einer zweifachen Faltung des Bilds mit dem Gauss-Filter und einer anschließenden Bildung der Gauss-Differenz D_σ (vgl. Gleichung 4-9). Die Gauss-Differenz approximiert den *LoG*-Operator (Gleichung 4-7). Somit wird eine Verkürzung der Prozessierungszeit erreicht. Nach der anschließenden Resampling-Operation mittels bilinearer Interpolation (Luhmann 2010) erfolgt die Detektion von Maxima und Minima durch Nachbarschaftsvergleiche für jedes Pixel. Die Nachbarschaftsvergleiche werden in jeder Ebene der Bildpyramide durchgeführt, bis nur noch Maxima übrigbleiben.

Anschließend kann die Charakterisierung der Features durchgeführt werden. Dazu erfolgt die Berechnung der Feature Gradienten und die jeweilige Orientierung der Features. An jedem Pixel $A_{i,j}$ wird die Bildgradientenmagnitude $M_{i,j}$ und die Orientierung $R_{i,j}$ berechnet (Lowe 1999):

$$M_{i,j} = \sqrt{(A_{i,j} - A_{i+1,j})^2 + (A_{i,j} - A_{i,j+1})^2}, \quad (4-13)$$

$$R_{i,j} = \arctan\left(\frac{A_{i,j} - A_{i+1,j}}{A_{i,j+1} - A_{i,j}}\right). \quad (4-14)$$

Die Feature-Charakterisierungen werden in einem Merkmalsvektor, dem so genannten Deskriptor, zusammengefasst (Abb. 4-4). Dieser besteht aus einer Hauptorientierung, einer stabilen Position und dem Merkmals- bzw. Featurevektor. Um die Position des Features bzw. den Mittelpunkt des Features werden 16 Sub-Regionen definiert. Innerhalb dieser Sub-Regionen werden Gradienten betrachtet. Die jeweils größte Gradientenmagnitude bestimmt die Zuordnung zu einem Winkelbereich.

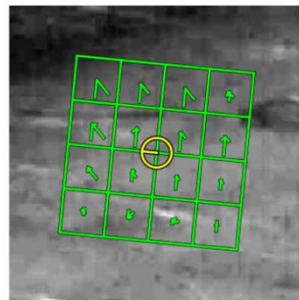


Abbildung 4-4: Feature Merkmale; gelb: Pixelmittelpunkt mit Hauptorientierung R ; grün: Gradientenmagnituden $M_{i,j}$ und Orientierungen

Insgesamt existieren 8 Winkelbereiche der Größe 45° . Der Featurevektor in SIFT hat somit die Dimension $n = 16 \times 8 = 128$.

SURF-Algorithmus

Nach Bay et al. (2008) ist die wichtigste Eigenschaft eines Detektors die Wiederholbarkeit. Die Wiederholbarkeit bedeutet in diesem Zusammenhang die Verlässlichkeit des Detektors, das gleiche physikalische Objekt bei unterschiedlichen Sichtbedingungen zu finden. Dazu wird die Nachbarschaft eines jeden relevanten Bildpunktes durch den Deskriptor beschrieben. Der Deskriptor soll unverwechselbar und zusätzlich robust gegenüber Rauschen, Verschiebungen und geometrischen Deformationen sowie photogrammetrischen Verzerrungen sein. Mit zwei Deskriptoren können zwei unterschiedliche Bildaufnahmen einander zugeordnet werden. Die Zuordnung basiert z.B. auf dem euklidischen Abstand dieser Vektoren. Die Dimension eines Deskriptors hat einen direkten Einfluss auf die Zuordnungszeit. Somit sind auf der einen Seite kleine Dimensionen erwünscht, auf der anderen Seite sind kleindimensionale Deskriptoren weniger einzigartig und somit weniger unverwechselbar (Bay et al. 2008). Der SURF-Algorithmus bietet einen Mittelweg zwischen kurzen

Prozessierungszeiten und einer hinreichenden Beschreibung, um die Unverwechselbarkeit sicherzustellen. Der Fokus beim SURF-Algorithmus liegt auf skalierungs- und rotationsinvarianten Detektoren und Deskriptoren (Bay et al. 2008). Wie beim SIFT werden keine Farbinformationen verwendet, weder beim Detektor noch beim Deskriptor.

Der Detektor basiert, identisch zu SIFT, auf der Bildung der Hesse-Matrix. Für diese wird dann, im Gegensatz zu SIFT bei dem eine Gauss-Differenz gebildet wird, die Determinante berechnet und weiterverwendet. Hierfür sind Integralbilder von Bedeutung. Integralbilder dienen der schnellen Berechnung von Pixelsummen innerhalb rechteckiger Bildausschnitte (Bay et al. 2008). Der Eingang eines Integralbildes $I_x(\mathbf{x})$ an der Stelle $\mathbf{x} = (x, y)^T$ ist die Summe aller Pixel des Eingangsbildes I innerhalb einer rechteckigen Region, aufgespannt zwischen dem Ursprung und dem Punkt $\mathbf{x}$.

$$I_x(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^{i \leq x} \sum_{j=0}^{j \leq y} I(i, j). \quad (4-15)$$

Nun werden die Blob-Antworten des Hesse-Detektors, wie in Gleichung (4-12) definiert, in einer Blob-Antwort-Karte mit unterschiedlichen Skalierungen gespeichert. Mit deren Hilfe können nun die lokalen Maxima bestimmt werden. Die Karte repräsentiert den Bildmaßstabsraum. Dieser ist über Bildpyramiden implementiert und in so genannte Oktaven eingeteilt. Eine Oktave repräsentiert eine Serie von Filterantworten, die durch Faltung bestimmt wurden. Jede Oktave ist wiederum in eine konstante Anzahl von Skalierungsebenen unterteilt.

Der zur Punktlokalisierung eingesetzte Detektor beinhaltet die folgenden zwei Hauptschritte: Entstörung des Eingangsbildes und Bestimmung der Features mittels des beschriebenen Ansatzes über die Determinante der Hesse-Matrix.

Der Deskriptor basiert auf einer intensitätsbasierten Beschreibung der Features. Dabei wird beim SURF, im Gegensatz zum gradientenbasierten SIFT, eine Verteilung der Antworten erster Ordnung der Haar-Wavelets in x- und y- Richtung verwendet. Details zum Haar-Wavelet können z.B. Talukder und Harada (2007) entnommen werden. Die Nutzung der Integralbilder erhöht dabei die Rechengeschwindigkeit und verbessert die Robustheit (Bay et al. 2008). Diese Tatsache rechtfertigt den Namen SURF (speed-up robust features).

Für den Aufbau des Deskriptors wird zunächst eine Rechteckregion/Quadrat um den relevanten Punkt (Mittelpunkt des Features) aufgespannt und deren Orientierung mittels Detektorschritt bestimmt. Die Rechteckregion wird weiter in 4 kleinere Sub-Regionen geteilt. Für jede dieser Sub-Regionen wird eine Haar-Wavelet-Antwort berechnet. Dabei ist dx die Antwort in x-Richtung und dy die Antwort in y-Richtung bezüglich des ausgewählten Punktes. dx und dy werden mit w gewichtet und über alle Regionen aufsummiert. Aus den Beträgen $|dx|$ und $|dy|$ erhält man Informationen über Polarität und Intensitätsänderung. Für jede Sub-Region kann nun für die zugrunde liegende Intensitätsstruktur ein 4-dimensionaler Deskriptorvektor der Form $\mathbf{v} = (\sum dx, \sum dy, \sum |dx|, \sum |dy|)$ aufgestellt werden. Die Zusammenführung dieser Vektoren für alle Sub-Regionen führt auf den allgemeinen Deskriptorvektor mit guten Wiedererkennungseigenschaften. Der Deskriptor für jedes Feature ergibt sich folglich aus einem 4-dimensionalen Vektor $\mathbf{v}$, der für 4×4 Sub-Regionen aufgestellt wird und somit von Dimension $n = 16 \times 4 = 64$ ist.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich zwischen den beiden Algorithmen folgender Unterschied ausmachen: der SIFT-Algorithmus interpretiert die Gradienteninformationen jeder Sub-Region, wohingegen der SURF-Algorithmus nur die Orientierung des individuellen Sub-Region-Gradienten berücksichtigt.

Tabelle 4-2: Vergleich zwischen SIFT und SURF

	SIFT	SURF
Eingangsdaten	Grauwertbilder	Grauwertbilder
Benutzter Filter	Original Filter	Approximierte Filter
Struktur der Bildraum-pyramide	Unterschiedliche Auflösungen des Bildes	Unterschiedliche Auflösungen des Filters
Grundlage des Deskriptors	Gradienten	Filterantwort von Haar-Wavelets
Dimension des Deskriptors	$n = 128$	$n = 64$
Eigenschaft/ Performance	zuverlässiger	schneller

Abschließend lässt sich festhalten, dass der SURF-Algorithmus auf dem SIFT-Algorithmus aufbaut, jedoch Modifikationen enthält, die die Prozessierungszeit entscheidend verkürzen.

4.2.2 Objekterkennung und Matching

Nachdem die Merkmale mit Hilfe eines der beiden zuvor beschriebenen Algorithmen extrahiert wurden, erfolgt im letzten Schritt der Bildverarbeitung das Matching, also die Zusammenführung der extrahierten Schlüsselpunkte des Referenzbildes mit den Schlüsselpunkten des gemessenen Bildes. Durch gefundene Übereinstimmungen kann validiert werden, ob sich das Objekt im Testbild befindet und an welcher Stelle des gemessenen Bildes dieses lokalisiert ist (Sonka et al. 1994).

Beim Matching wird der n -dimensionale Merkmalsvektor (SIFT: $n = 128$, SURF: $n = 64$) als eine Position im n -dimensionalen Raum definiert. Die Aufgabe ist es nun, für jeden Schlüsselpunkt den nächsten Nachbarn zu finden. Dazu wird in dieser Arbeit der Best-Bin-First-Algorithmus nach Muja und Lowe (2012) verwendet. Das Verfahren basiert auf der binären Codierung des Merkmalsvektors und liefert, im Gegensatz zu anderen existierenden Verfahren, eine Näherungslösung, jedoch bei gleichzeitig deutlich verkürzter Verarbeitungszeit.

Die dem Algorithmus übergebenen Punkte werden zunächst in k Gruppen, so genannte Cluster, unterteilt. Dazu werden k zufällige Punkte ausgewählt, die das Clusterzentrum bilden. Die restlichen Punkte werden jeweils dem Cluster zugeordnet, zu deren Clusterzentrum sie den geringsten Abstand haben. Ist dabei ein Cluster größer als ein festgelegter Schwellwert, werden neue Clusterzentren ausgewählt und der Algorithmus beginnt von vorn. Dadurch wird verhindert, dass durch ungünstig gewählte Zentren einzelne Cluster viel größer werden als andere. Jedes Cluster bildet nun einen k -dimensionalen Baum (KD-Baum). Da die Bäume parallel abgearbeitet werden, hat der Algorithmus Vorteile beim Aufbau und Durchsuchen der Bäume. Die Suche nach dem nächsten Nachbar wird im Baum von oben nach unten durchgeführt. Dabei wird an jeder Abzweigung der Knoten markiert, der dem Anfangspunkt am nächsten ist. Die nicht markierten Knoten werden in einer separaten Prioritätsliste abgespeichert. Beim Erreichen des Blattes werden die dort enthaltenen Punkte nacheinander durchsucht. Nachdem alle Bäume einmalig durchsucht worden sind, geht die Suche weiter, in dem man den nächsten Knoten zum Anfangspunkt aus der Prioritätsliste wählt. Die Suche endet, wenn eine zuvor festgelegte Anzahl von Punkten erreicht ist. Jetzt werden die jeweiligen nächsten Nachbarn der einzelnen KD-Bäume verglichen und die beiden Punkte mit dem geringsten Abstand ausgewählt. Die Anzahl der Punkte legt den Grad der Approximation fest. Je höher dieser ist, desto mehr Nachbarn werden gefunden, jedoch zum Preis einer entsprechend höheren Verarbeitungszeit.

Mit den nun gefundenen und bestimmten Punktepaaen lässt sich die Transformationsmatrix bestimmen, mit der Punkte aus dem Referenzbild ins gemessene Bild übertragen werden. Bevor dies erfolgen kann, muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Menge der Punktepaae fehlerbehaftet und nicht frei von Ausreißern ist (Hartley und Zisserman 2004). Aus diesem Grund wird zunächst eine Filterung mittels eines M-Estimator Sample Consensus Algorithmus (MSAC) durchgeführt. Auf die Behandlung des MSAC-Algorithmus wird hier verzichtet. Detaillierte Informationen darüber sind z.B. in Torr und Zisserman (2000) zu finden.

Um für jeden Bildpunkt im Referenzbild eine Entsprechung im gemessenen Bild zu bestimmen, wird eine affine Transformation angewendet. Das Verhältnis eines Referenzpunktes zu seinem Bildpunkt kann durch die affine Transformation wie folgt beschrieben werden (Lowe 1999):

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ m_3 & m_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}, \quad (4-16)$$

mit

u, v : Koordinaten der Bildpunkte,
 x, y : Koordinaten der Referenzpunkte,
 t_x, t_y : Translationsparameter,
 m_1, m_2, m_3, m_4 : Rotations- und Maßstabsparameter.

Die Bestimmung der Parameter kann durch die Aufstellung der Normalengleichung und über die Lösung des linearen Gleichungssystems, unter Anwendung der Methode kleinster Quadrate z.B. nach Niemeier (2008) durchgeführt werden. Somit ist die Mindestanzahl der Übereinstimmungen, die zwischen Bild- und Modellpunkten benötigt werden, auf drei festgelegt. Mit den gefundenen Transformationsparametern können nun alle Punkte des Referenzbildes in das Testbild transformiert werden.

4.3 Bildbasierte Positionsbestimmung von Objekten

Die entworfenen Steuerprogramme zielen darauf ab, das Tachymeter um die horizontalen und vertikalen Winkel zu bewegen und dabei Bilder mit dem eingebauten Bildsensor zu generieren. Die Fotofunktion des Trimble S7 Tachymeters ermöglicht es, Bilder zu erfassen, die einen 18,3 x 13,7 Gon großen Bereich abdecken. Es wird jeweils ein Bild aufgenommen und ausgewertet. Anschließend bewegt sich das Tachymeter um 12 Gon auf dem Horizontalkreis weiter, um das nächste Bild aufzunehmen. Diese Bewegungssequenz wird so lange wiederholt, bis die gesamte Umgebung erfasst ist oder bis alle gesuchten Objekte gefunden sind. Die Bilder werden einem der Bildverarbeitungsalgorithmen (SIFT oder SURF) zugeführt und ausgewertet.

Die Grundlage für die Bildauswertung bildet ein Referenzbildkatalog der gesuchten Objekte. Diese sind die Laderaupe, das Ladegut, sowie ein Container, der als Entladestation fungiert. Da das Ladegut immer unterschiedlich aussehen kann wird dieses für die vorgenommenen Untersuchungen mit einem Marker, der in das Ladegut gesteckt wird, signalisiert. Von jedem dieser Objekte sind im Katalog Aufnahmen aus unterschiedlichen Richtungen enthalten. Dies ist notwendig, da mit zunehmender Drehung der Objekte die Erkennbarkeit der Merkmale abnimmt. Aus diesen Bildern werden die charakteristischen Merkmale, die Features der jeweiligen Objekte extrahiert. Diese werden in Merkmalscontainern abgespeichert, so dass sie nicht bei jedem Durchlauf neu extrahiert werden müssen. Die Merkmalscontainer beinhalten jeweils die Merkmale einer Objektansicht. Wird ein neues Bild an die Bildverarbeitung übergeben, werden mittels SIFT/SURF die Merkmale extrahiert. Anschließend werden diese mit dem Inhalt jedes Merkmalscontainers verglichen. Dies geschieht mit Hilfe der in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Matchingmethode. Die Methode ermöglicht es, für die Merkmalsvektoren des Referenzbildes übereinstimmende Merkmalsvektoren im gemessenen Bild zu finden. Für die Merkmale werden Horizontal- und Vertikalwinkel der Aufnahme für die Bestimmung der Position und Orientierung der Objekte im Bild gespeichert (Luz 2018).

Zur Bestimmung der Objektpositionen im Zielkoordinatensystem, hier dem Tachymeterkoordinatensystem, werden die horizontalen und vertikalen Fernrohrwinkel sowie eine Streckenmessung benötigt.

In jedem Referenzbild werden Schlüsselpunkte definiert, von denen sowohl die Pixelkoordinaten im Referenzbild, als auch die Koordinaten in einem Objektkoordinatensystem bekannt sind. Das Objektkoordinatensystem hat seinen Ursprung im Objekt selbst. Dabei ist die Geometrie des Objekts im Objektkoordinatensystem vollständig beschrieben. Mit den vorgestellten Methoden aus den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 können die Transformationsparameter der Pixel-zu-Pixel-Transformation zwischen dem Referenzbild und dem gemess-

senen Bild für die Schlüsselpunkte ermittelt werden. Im nächsten Schritt muss aus der Pixelkoordinate des jeweiligen Punktes die Zielrichtung des Teleskops ermittelt werden. Hierzu wird der Zusammenhang zwischen Pixel und Winkel benötigt. Dieser Zusammenhang, genannt Übertragungsfaktor i , ist für jedes Instrument unterschiedlich und wird entweder vom Hersteller angegeben oder muss durch Kalibrierung bestimmt werden. Die Kalibrierung zielt darauf ab, den Zusammenhang zwischen einem bestimmten Teleskopwinkel α und der im Bild verursachten Verschiebung p eines Punktes zu beschreiben. Für das Trimble S7 Tachymeter liegen keine Herstellerangaben vor. Details zur Kalibrierung können Luz (2018) entnommen werden. Der Übertragungsfaktor für das verwendete Instrument wurde mit folgendem Wert bestimmt:

$$i = \frac{p}{\alpha} = 141 \frac{\text{pix}}{\text{gon}}. \quad (4-17)$$

Aufgrund der exzentrischen Achsanordnung der beiden Strahlengänge der Kamera und des Fernrohrs (vgl. Abbildung 4-3) im eingesetzten Tachymeter Trimble S7 kann dieser Wert jedoch nicht direkt verwendet werden, da ein distanzabhängiger Richtungsfehler auftritt. Um diesen zu berücksichtigen, muss zusätzlich ein distanzabhängiger Korrekturfaktor, sowohl in horizontaler wie auch in vertikaler Richtung auf die Pixelmessung angebracht werden. Die Bestimmung dieses Faktors kann Luz (2018) entnommen werden. Dort wurden in Abhängigkeit von der Distanz die Abweichungen in Pixel bestimmt. Die Untersuchung ergab, dass für die horizontale Richtung der Faktor ein konstantes Verhalten aufweist. Für die vertikale Richtung musste jedoch eine distanzabhängige Korrekturfunktion aufgestellt werden. Die Korrekturen sind im Folgenden dargestellt:

$$\begin{aligned} k_h &= -6, \\ k_v(s) &= -278,8 \cdot s^{-1,051} + 27,61, \end{aligned} \quad (4-18)$$

mit

- k_h : horizontaler Korrekturfaktor in Pixeln,
- $k_v(s)$: vertikale distanzabhängige Korrekturfunktion in Pixeln,
- s : Distanz in Meter.

Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der vertikalen distanzabhängigen Korrekturfunktion für den Übertragungsfaktor i . Die Ordinatenwerte zeigen den Offset des Zielstrahls auf das Objekt zum Bildmittelpunkt. Die Abszisse stellt die gemessenen Distanzen dar. Aus der Abbildung geht hervor, dass bei kurzen Distanzen die exzentrische Achsanordnung zwischen Kamera und Objektiv (Abbildung 4-3) deutliche Auswirkungen von bis zu 160 Pixel auf die Berechnung von i aufweist. Mit zunehmender Distanz nimmt der Offset ab und nähert sich dem Wert 0 Pixel an.

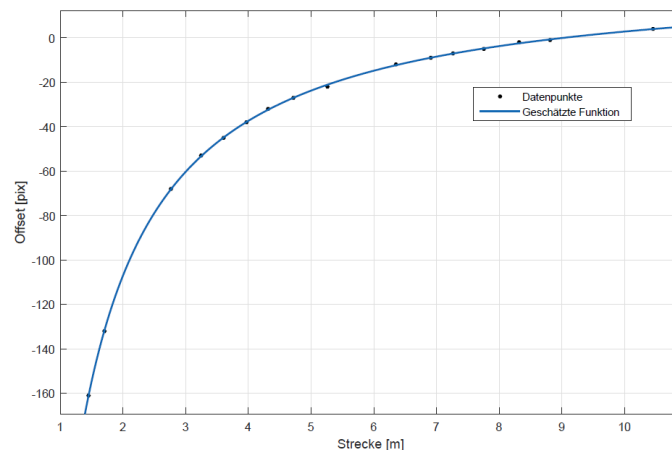


Abbildung 4-5: Vertikale distanzabhängige Korrekturfunktion

Für die Berechnung der horizontalen und vertikalen Fernrohrwinkel relativ zum Bildmittelpunkt aus den vorliegenden Bildpunkten kann nun der folgende Zusammenhang aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} Hz_{rel} &= i \cdot (r_g - (r_m + k_h)), \\ V_{rel} &= i \cdot (c_g - (c_m + k_v(s))), \end{aligned} \quad (4-19)$$

mit

r_g, c_g :	Pixelkoordinaten (Reihe und Spalte) des im Bild gemessenen Objekts,
r_m, c_m :	Pixelkoordinaten (Reihe und Spalte) des Bildmittelpunktes,
Hz_{rel} :	Horizontalwinkel des Fernrohrs relativ zum Bildmittelpunkt,
V_{rel} :	Vertikalwinkel des Fernrohrs relativ zum Bildmittelpunkt.

Zur Bestimmung der absoluten Teleskopwinkel werden die eingestellten, abgelesenen Teleskopwinkel Hz_{vor} und V_{vor} zu den relativen Winkeln dazu addiert:

$$\begin{aligned} Hz &= Hz_{rel} + Hz_{vor}, \\ V &= V_{rel} + V_{vor}. \end{aligned} \quad (4-20)$$

Mit den Zusammenhängen aus den Gleichungen (4-19) und (4-20) können nun für alle Schlüsselpunkte die Fernrohrrichtungen berechnet werden, so dass diese durch die Aktivierung der Antriebe vom Fernrohr angefahren werden können. Durch eine reflektorlose Distanzmessungen s zum Objekt erhält man die benötigten Elemente zur Berechnung der Positionen im Tachymeterkoordinatensystem. Die Berechnung erfolgt nach Möser (2000):

$$\begin{aligned} x &= s \cdot \cos Hz \cdot \sin V, \\ y &= s \cdot \sin Hz \cdot \sin V, \\ z &= s \cdot \cos V. \end{aligned} \quad (4-21)$$

5 Systemarchitektur und Implementierung

In diesem Kapitel sollen die vorgestellten Grundlagen und Methoden aus den Kapiteln 2 bis 4 einfließen und in einem Gesamtsystem zusammengeführt werden.

Die definierte Aufgabe des Systems ist es, eine Laderaupe so zu kontrollieren, dass Belade- und Entladevorgänge vollautomatisch durchgeführt werden können.

Vom System durchgeführte Operationen:

1. Das bildverarbeitende Robottachymeter sucht automatisch die Raupe, die Ladung und die Entladestation und bestimmt deren Positionen.
2. Zwischen den positionsbestimmten Objekten wird im nächsten Schritt eine Trajektorie, bestehend aus einer Folge von Wegpunkten, berechnet.
3. Es erfolgt ein Zusammenfügen der Wegpunkte aus Schritt 2 zu einer 3D-Gesamtrajektorie, die auch ein Höhenprofil für die Führung des Werkzeugs beinhaltet.
4. Damit sich die Laderaupe zwischen der Entladestation und der Ladung hin- und herbewegen kann, erfolgt zwischen der Entladestation und der Ladung die Berechnung einer Umkehrtrajektorie.
5. Die Raupe setzt sich nun in Bewegung und steuert den Wegpunkt „Ladung“ an.
6. Beim Erreichen des Wegpunktes „Ladung“ erfolgt ein Halt und das System aktiviert selbständig das Werkzeug, um den Beladevorgang durchzuführen.
7. Nach der Ladungsaufnahme erfolgt eine Ausrichtung der Raupe in Richtung der Entladestation. Dabei wird die Fahrtrichtung aus der Orientierung der Teiltrajektorie bestimmt.
8. Die Raupe setzt sich erneut in Bewegung und steuert den Wegpunkt „Entladestation“ an.
9. Beim Erreichen des Wegpunktes „Entladestation“ erfolgt ein Halt und das System aktiviert erneut das Werkzeug, um nun den Entladevorgang durchzuführen.
10. Nach Beendigung des Entladevorgangs erfolgt eine erneute Ausrichtung des Fahrzeugs in Richtung Ladung. Die Kriterien für die Orientierung sind die gleichen wie in Schritt 7.
11. Die Raupe setzt sich erneut in Bewegung und steuert erneut den Wegpunkt „Ladung“ an.
12. Beim Erreichen des Wegpunktes „Ladung“ erfolgt ein Halt.
13. Nun kann vom Operator die Entscheidung getroffen werden, ob das System deaktiviert wird oder Punkt 6 erneut ausgeführt wird.

Dazu ist die Automatisierung der Fahrzeugkomponenten notwendig. Zusätzlich ist die Kenntnis über die 3D-Lage und Position der Laderaupe bzw. des Arbeitspunktes von Bedeutung. Aus diesem Grund ist zunächst zu klären, welche Fahrzeugkomponenten welche Aufgabe erfüllen und in welchem Umfang diese Komponenten einen Beitrag zur Lage und Position liefern.

Die Realisierung der 3D-Maschinensteuerung basiert auf geschlossenen Regelkreisen für die Kontrolle der Trägermaschine und des Ladewerkzeugs. Diese zwei Komponenten ergeben in ihrem Zusammenspiel eine automatische 3D-Steuerung der Laderaupe. Insgesamt werden für die Automatisierung vier geschlossene Regelkreise eingesetzt. Die vier Regelkreise können prinzipiell mit beliebigen Reglern ausgestattet werden. In Tabelle 5-1 sind die Fahrzeugkomponenten, die implementierten Regelkreise und deren Beiträge für die 3D-Lage und Position dargestellt.

Tabelle 5-1: Fahrzeugkomponenten und deren Beitrag zur 3D-Lage und Position

Fahrzeugkomponente	Regelungsart	Einzelbeiträge	Gesamtbeitrag
Trägermaschine	Querregelung: Orientierung des Fahrzeugs, bei bekannten Anfangswinkel	Relative 2D-Position und Orientierung + absolute 3D-Position	2D-Lage (Orientierung + Neigung) und absolute 3D-Position des Arbeitspunktes
	Längsregelung: zurückgelegte Strecke aus Geschwindigkeit und Zeit		
Werkzeug	Höhenregelung: Änderung der Auslegerstellung	Höhe und Neigung	
	Lageregelung: Änderung der Ladeschaufelstellung		

Unter dem Begriff „Querregelung“ sind die Lenkung und die auszuführenden Lenkmanöver der Trägermaschine zusammengefasst. Der Begriff „Längsregelung“ bezeichnet die Geschwindigkeitssteuerung. Somit lassen sich aus Lenkwinkeln und zurückgelegten Strecken 2D-Positionen und aus der zurückgelegten Trajektorie Orientierungen der Trägermaschine ableiten. Zusätzlich stehen direkte, tachymetrisch erfasste Positionsmessungen der Trägermaschine zur Verfügung. Der Beitrag der Höhenkomponente, bestehend aus der Höhen- und Lagesteuerung des Werkzeugs, komplementiert das Positions- und -Lagesystem. Der Rollwinkel steht hier nicht zur Verfügung und muss bei Bedarf, entweder aus einem digitalen Geländemodell des Fahruntergrunds entnommen oder mit einer zusätzlichen Messung, z.B. mit einer IMU, generiert werden.

Die Lenkung erfordert bei der Regelung die höchste Präzision. Hierfür wird der in Kapitel 3.2 vorgestellte adaptive Regler verwendet. Dieser kann Regelabweichungen gänzlich eliminieren und weist schnelle Reaktionszeiten bei Störungen auf. Zusätzlich verfügt der adaptive Regler über die Eigenschaft, sich eigenständig auf Änderungen der Betriebsumgebung einzustellen. Für die Geschwindigkeit wird ein PID-Regler eingesetzt. Für das Werkzeug werden einfachere Regler gewählt. Der Grund dafür ist, dass das Werkzeug der eingesetzten Modellladeraupe mittels einer Hydraulik bewegt wird. Die Hydraulik wird mit einer elektrischen Pumpe betrieben. Allerdings muss die Pumpe zwei Hydraulikkreisläufe, nämlich des Auslegers und der Ladeschaufel, versorgen. Der hydraulische Antrieb hat nachteilige Eigenschaften, wie Kriechen und Hysterese. Des Weiteren kann die Hydraulik aufgrund der Eigenschaften von Fluiden grundsätzlich nicht die Stellgenauigkeit von elektrischen Servomotoren erreichen. Aus diesem Grund wurde entschieden den Ausleger mit dem P-Regler zu betreiben, da der Einsatz von PID-Reglern keine verbesserten Regelungseigenschaften mit sich bringt. Für die Ladeschaufel müssen während des Betriebs nur bestimmte Stellungen eingenommen werden (siehe Kapitel 6.5, Abbildung 6-21). Zum einen können diese Stellungen beim Dreipunktreger schnell und einfach definiert werden, zum anderen wird die Ladeschaufel ebenfalls mittels Hydraulik angesteuert, so dass sich auch hier der Einsatz komplexerer Regler nicht auszahlt.

Das Fahrzeug hat im Gesamtsystem eine ausführende Funktion. Die Steuerung des Belade- und Entladesystems sowie deren Qualität sind maßgeblich vom Systemdesign abhängig. Da es der Anspruch dieser Arbeit ist, die vorgestellten Ansätze zum Systemdesign allgemeingültig zu gestalten und nicht nur auf das Laderaupe-Modell zu beschränken, ist eine nachvollziehbare und effiziente Struktur unabdingbar. Unter Berücksichtigung dieses Aspekts ist ein modularer Aufbau der Systemarchitektur gewählt worden. Dazu werden die benötigten Hauptfunktionalitäten in vier Module gegliedert:

- Positionierungsmodul, gewährleistet die Zielerfassung und die Zielbestimmung,
- Trajektorienmodul, gewährleistet die Berechnung der Trajektorie zwischen den Stationen,
- Fahrmodul, gewährleistet die Führung des Fahrzeugs entlang der errechneten Trajektorie,
- Werkzeugmodul, führt Werkzeugoperationen an den Stationen durch.

Eine fundamentale Voraussetzung für einen koordinierten Prozessablauf ist die Interaktion der vier Module untereinander. Dazu müssen folgende Kriterien erfüllt sein:

- die Abfolge der Aktionen der einzelnen Module muss definiert sein,
- die Moduloperationen müssen eindeutig definierte Start- und Endbedingungen haben,
- der Informationsfluss zwischen den Modulen muss gewährleistet sein und die Informationen müssen für die einzelnen Module zur Verfügung stehen und interpretierbar sein.

Unter Berücksichtigung der Kriterien müssen folglich modulspezifische Schnittstellen definiert werden, die einen koordinierten Prozessablauf ermöglichen.

Die genannten Module bestehen ferner aus einer Vielzahl von Unterfunktionen, die aus Übersichtsgründen nicht alle beschrieben werden. Die wichtigsten Bausteine des Gesamtalgorithmus sowie die Beschreibung der operativen Abfolge von Schritten innerhalb des Algorithmus werden im Verlauf dieses Kapitel vorgestellt. Es erfolgt ferner eine Beschreibung der Arbeitsweise des Systems. Die technische Umsetzung wird im Detail erörtert und die Funktionsweise anhand von Blockdiagrammen aufgezeigt.

5.1 Architektur des Gesamtsystems und Struktur des Algorithmus

Beim Start des Positionierungsmoduls besteht die Möglichkeit, entweder eine neue Stationierung durchzuführen oder eine bestehende Stationierung zu verwenden und diese entsprechend einzuladen. Nach der Stationierung erfolgt die bildbasierte Positionsbestimmung. Die Koordinaten der Ziele bzw. Stationen werden entsprechend Kapitel 4.2 und 4.3 bestimmt. Mit diesen Koordinaten erfolgt die Berechnung der Trajektorie im Trajektorienmodul. Diese wird abgespeichert und steht nun zur weiteren Nutzung zur Verfügung. Im nächsten Schritt ist das bewegte Ziel, die Laderaupen, vom Operator anzuzielen. Die Zielung erfolgt auf ein 360°-Miniprisma. Die kinematische Tachymetermessung wird gestartet. Im nächsten Schritt werden das Fahrmodul und das Werkzeugmodul gestartet. Der Operator wird aufgefordert, die zu fahrende Trajektorie in das Fahrmodul einzuladen. Erläuterungen zur Bestimmung der Trajektorie erfolgen in Kapitel 5.3. Die Laderaupen ist nun in der Lage, sich entlang dieser Trajektorie zu bewegen und die Werkzeughöhe entsprechend des hinterlegten Höhenprofils einzustellen. Die Fahrgeschwindigkeit kann vor dem Start eingestellt und während des Bewegungsvorgangs verändert werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, einen gewünschten Regler auszuwählen. Bei der Wahl eines nicht adaptiven Reglers müssen vor der Fahrt die Parameter gewählt und entsprechend eingestellt werden. Eine Kontrolleinheit des Fahrmoduls überwacht die verbleibende Distanz zur nächsten Station und löst beim Erreichen eines bestimmten Abstandsschwellwerts einen Stop-Befehl aus. Hier sind nun unterschiedliche Handlungsvarianten implementiert. Ist die erreichte Station das Ladegut, muss ein Befehl an das Werkzeugmodul erfolgen, der den Beladevorgang aktiviert. Handelt es sich um die Entladestation, erfolgt ein Befehl an das Werkzeug den Entladevorgang durchführen. Nach Beendigung der Werkzeugoperationen erfolgt darüber eine Mitteilung an das Fahrmodul, um die Fahrt fortzusetzen. Die Weiterfahrt kann entweder entlang des nächsten Trajektorienabschnitts oder zurück zur vorherigen Station erfolgen. Für die zweite Variante ist eine 200 Gon Drehung des Fahrzeugs notwendig. Hierfür wird das Spottturn-Manöver durchgeführt. Wie zuvor erwähnt, ist ein Informationsaustausch zwischen dem Fahrmodul und dem Werkzeugmodul notwendig. Im Detail enthält die Nachricht vom Fahrmodul Informationen über die Position des Ladewerkzeugs, relativ zum Ladegut bzw. der Entladestation. Umgekehrt versorgt das Werkzeugmodul das Fahrmodul mit Informationen über den Status der Belade- und Entladeaktivitäten. Ist die Werkzeugoperation abgeschlossen, erfolgt darüber eine Statusmeldung an das Fahrmodul, das das Fahrzeug daraufhin erneut in Bewegung setzt. Die Werkzeugsteuerung erfolgt während der Fahrt sensorgestützt. Das Werkzeug folgt im Automatikmodus dem vorgegebenen Höhenprofil aus der Trajektorie. Die einzustellende Höhe wird aus den Messdaten des Neigungsmessers abgeleitet, mit der Soll-Höhe verglichen und die Regelabweichung, in Form der resultierenden Höhendifferenz, mit einem P-Regler minimiert. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit, die Soll-Höhe die das Werkzeug einnehmen soll, auch manuell einzugeben. Das Höhenprofil ist so ausgelegt, dass an den jeweiligen Stationen die für die durchführende Werkzeugoperation optimale Höhe eingenommen wird. Dies wird durch eine sukzessive Anpassung der Soll-Höhe vom Startpunkt zum Zielpunkt der Teiltrajektorie erreicht. Für Belade- und Entladeoperationen kommt die mathematische Steuerung zum Einsatz.

Wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt, ist die Definition von modulspezifischen Schnittstellen sehr wichtig. Die Modulkommunikation stellt einen zentralen Aspekt des Prozessablaufs dar. Es ist somit für die Systemarchitektur unabdingbar, jedes der Module mit einer entsprechenden Schnittstelle auszustatten. Aus der erfolgten Funktionsbeschreibung und aus Vorüberlegungen können Festlegungen getroffen werden, welche Module während des Betriebs miteinander kommunizieren und welche Art von Daten und Informationen zwischen diesen ausgetauscht werden müssen. Im ersten Schritt kann für jedes Modul eine Kommunikationsliste aufgestellt werden. So kommuniziert das Positionierungsmodul mit dem Trajektorienmodul, dem Fahrmodul und dem Werkzeugmodul. Der Datenfluss führt ausschließlich vom Modul weg. Das Trajektorienmodul kommuniziert mit dem Positionierungsmodul, dem Fahr- und dem Werkzeugmodul. Dabei geht der Informations- und Datenfluss vom Positionierungsmodul zum Trajektorienmodul. Andererseits gehen Daten vom Trajektorienmodul zum Fahr- und Werkzeugmodul. Das Fahrmodul erhält Informationen und Daten vom Positions-, Trajektorien- und Werkzeugmodul, sendet dabei aber Informationen und Daten nur an das Werkzeugmodul. Ähnlich verhält sich es mit dem Werkzeugmodul, das Informationen und Daten von Positions-, Trajektorien- und Werkzeugmodul erhält und selbst nur an das Fahrmodul sendet.

Der Prozessablauf für das Gesamtsystem ist im Blockdiagramm Abbildung 5-1 dargestellt. Das Blockdiagramm zeigt die Interaktion und den Datenfluss zwischen den einzelnen Modulen unter Nutzung der Schnittstellen.

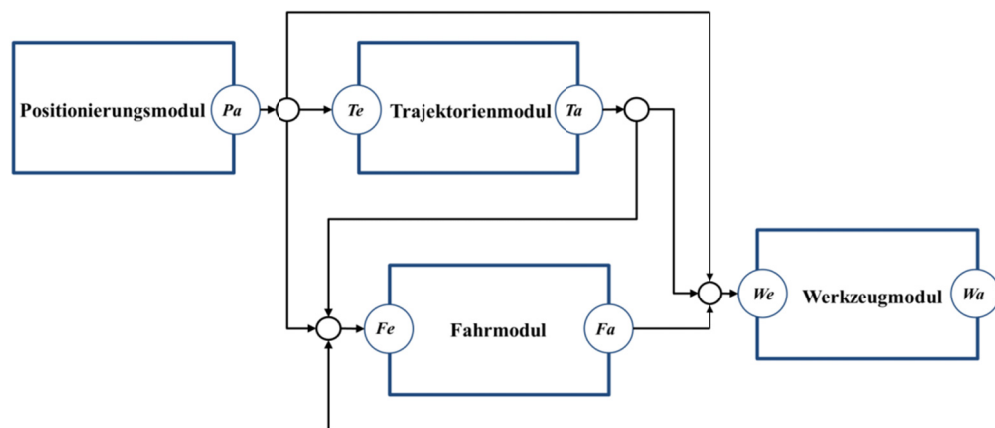


Abbildung 5-1:Blockdiagramm Gesamtsystem

Im Folgenden werden die Schnittstellen entsprechend den getroffenen Festlegungen definiert.

Tabelle 5-2: Schnittstelle **P**: Positionierungsmodul

Bezeichnung Knoten	Datenflussrichtung	Modulbezeichnung	Art der Daten/Informationen
Pa	Daten/Informationen nach:	Trajektorienmodul	- Koordinaten der Objekte (Ladearaupe, Belade-, Entladestation)
		Fahrmodul	- Kinematische 2D-Positionen (Lage y, x); - Statische 2D-Positionen der nächsten Station
		Werkzeugmodul	- Kinematische 1D-Positionen (Höhe z); - Statische 2D-Positionen der nächsten Station

Tabelle 5-3: Schnittstelle **T**: Trajektorienmodul

Bezeichnung Knoten	Datenflussrichtung	Modulbezeichnung	Art der Daten/Informationen
Te	Daten/Informationen von:	Positionierungsmodul	- Koordinaten der Objekte (Ladearaupe, Belade-, Entladestation)
Ta	Daten/Informationen nach:	Fahrmodul	- Trajektorie; 2D-Trajektorie (Lage y, x)
		Werkzeugmodul	- Trajektorie; 1D-Trajektorie (Höhenprofil)

Tabelle 5-4: Schnittstelle **F**: Fahrmodul

Bezeichnung Knoten	Datenflussrichtung	Modulbezeichnung	Art der Daten/Informationen
Fe	Daten/Informationen von:	Trajektorienmodul	- Trajektorie; 2D-Trajektorie (Lage y, x)
		Positionierungsmodul	- Kinematische 2D-Positionen (Lage y, x); - Statische 2D-Positionen der nächsten Station
		Werkzeugmodul	- Status Werkzeugmodul (Werkzeugaktion beendet?)
Fa	Daten/Informationen nach:	Werkzeugmodul	- Status Fahrmodul (Fahrt oder Halt?)

Tabelle 5-5: Schnittstelle **W**: Werkzeugmodul

Bezeichnung Knoten	Datenflussrichtung	Modulbezeichnung	Art der Daten/Informationen
We	Daten/Informationen von:	Trajektorienmodul	- Trajektorie; 1D-Trajektorie (Höhenprofil)
		Positionierungsmodul	- Kinematische 1D-Positionen (Höhe z); - Statische 2D-Positionen der nächsten Station
		Fahrmodul	- Status Fahrmodul (Fahrt oder Halt?)
Wa	Daten/Informationen nach:	Fahrmodul	- Status Werkzeugmodul (Werkzeugaktion beendet?)

Die Abfolge der Operationen nach der Stationierung, Zielbestimmung und Trajektorienberechnung wird des Weiteren in Sequenzen eingeteilt. Diese Sequenzen repräsentieren den Kern der Belade- und Entlade-prozedur. Sie bilden die dafür notwendigen Werkzeugbewegungen ab und beschreiben die Bewegung der Lade-raupe zwischen der Belade- und Entladestation. Sequenz 1 umfasst den Streckenabschnitt vom Startpunkt bis zur Ladestation. Sequenz 2 beschreibt die Operationen beim Halten an der Ladestation. Sequenz 3 definiert alle Operationen, die während der Bewegung zwischen der Lade- und Entladestation stattfinden. Die Sequenz 4 umfasst alle Operationen, die beim Halten an der Entladestation ausgeführt werden. In allen Sequenzen stellt das Positionierungsmodul entsprechend den definierten Schnittstellen dem Fahr- und Werkzeugmodul kinematisch gemessene Positionen zur Verfügung.

- Sequenz 1 aktiviert das Fahrmodul und das Werkzeugmodul. Das Fahrmodul führt das Fahrzeug entlang der berechneten Referenztrajektorie. Das Werkzeugmodul stellt die Auslegerhöhe entsprechend dem Höhenprofil ein. Dabei wird der sensorgestützte Automatikmodus für das Werkzeug verwendet.
- Beim Eintritt in die Sequenz 2 erfolgt ein „Halten“-Befehl, sodass das Fahrzeug an der Beladeposition hält. Das Werkzeugmodul wechselt eigenständig vom sensorgestützten in den mathematisch gesteuerten Automatikmodus und löst einen Beladevorgang aus. Dieser besteht aus koordinierten Bewegungen des Auslegers und der Ladeschaufel. Nach Beendigung des Beladevorgangs verharrt das Werkzeug in einem Zustand, der den Verlust der Ladung verhindert.
- In der Sequenz 3 ändert sich der Status des Fahrmoduls von „Halten“ auf „Fahren“ und es erfolgt die Weiterfahrt entlang der Referenztrajektorie. Alternativ kann ein Spotturn ausgeführt werden, wenn die Trajektoriengeometrie dies erfordert. Dies ist z.B. bei spitzen Winkeln für die Richtungsänderung notwendig. Das Werkzeugmodul ist aktiviert, jedoch erfolgen keine Bewegungen, die die Lage der Ladeschaufel aus Sequenz 2 verändern.
- Beim Erreichen der Entladestation geht das System in die Sequenz 4 über. Das Fahrmodul wechselt erneut in den Status auf „Halten“. Das Werkzeugmodul löst den Entladevorgang aus, der wiederum aus koordinierten Bewegungen der Ladeschaufel und des Auslegers besteht. Nach der Entladung wechselt das Werkzeugmodul in den sensorgestützten Automatikmodus und ist nun wieder in der Lage das Referenzhöhenprofil einzunehmen. Des Weiteren erfolgt eine Statusmeldung an das Fahrmodul, das das Fahrzeug erneut in Bewegung setzt. Das System kehrt zurück zur Sequenz 1.

Die Abfolge der Sequenzen ist in Abbildung 5-2 dargestellt.

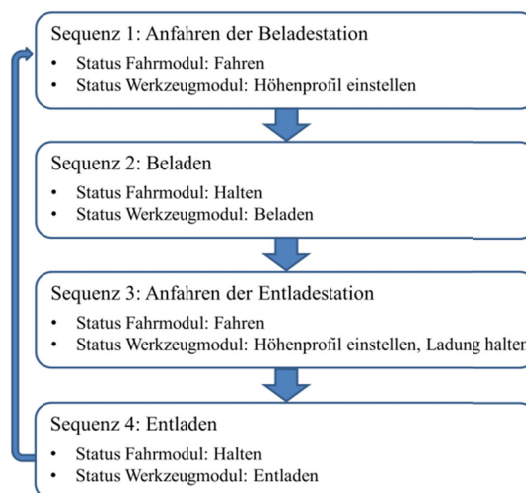


Abbildung 5-2: Sequenzabfolge

LabView von National Instruments

Der Algorithmus des Gesamtsystems wurde in der Programmiersprache LabView implementiert. LabView ist ein grafisches Programmiersystem von National Instruments. Das Akronym steht für **L**aboratory **V**irtual

Instrumentation Engineering Workbench. Die Umgebung besteht aus einer graphischen Benutzerschnittstelle, dem so genannten „Front Panel“ und dem „Blockdiagramm“, das den graphischen Quellcode beinhaltet. Die beiden Bereiche sind unmittelbar miteinander verknüpft. Wird ein Element oder Programmbaustein im Blockdiagramm hinzugefügt, so wird dessen Äquivalent automatisch im Front Panel erstellt, bzw. hinzugefügt. Der Hersteller National Instruments (NI) definiert die Entwicklungsumgebung LabView wie folgt (National Instruments 2019): „*LabView ist eine Systementwicklungssoftware für Prüf-, Mess-, Steuer- und Regelanwendungen, bei denen ein schneller Zugriff auf Hardware und zügiger Einblick in erfasste Daten erforderlich ist.*“

Abbildung 5-3 zeigt beispielhaft die graphische Benutzeroberfläche. Es ist analog zu einem GUI bei alphanumerischen Programmiersprachen und erlaubt es dem Nutzer mit dem Programm zu interagieren. Dafür stehen Felder mit „Knöpfen“ zur Verfügung, die bei Betätigung die Programmeigenschaften verändern. Des Weiteren können Graphen eingebettet werden, die Informationen über den Programmstatus, die Performance oder die Eigenschaft einer bestimmten Variable liefern.

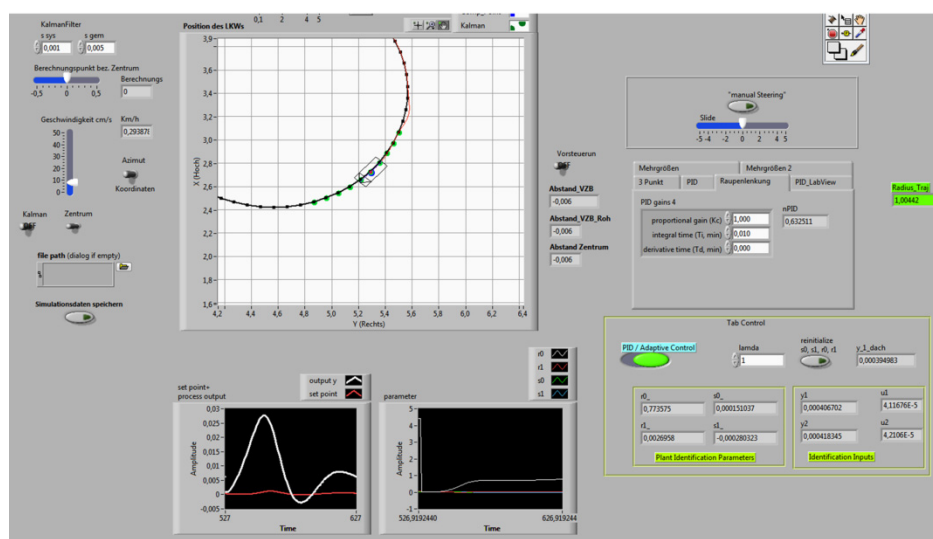


Abbildung 5-3: LabView Beispiel „Front Panel“

Abbildung 5-4 zeigt einen Ausschnitt des Blockdiagramms mit dem Quellcodebereich. Der Quellcode wird durch Hinzufügen von vordefinierten Funktionen, die mit Kabeln verbunden werden, erstellt. Einzelne Funktionen stehen dabei als Symbole zur Verfügung, die an ihren Seiten vordefinierte Ein- und Ausgänge besitzen, an die die Kabelverbindungen angeknüpft werden. Außerdem können Ein- und Ausgabevariablen definiert werden, die im Frontpanel ein Feld generieren, in dem diese Variable eingegeben oder angezeigt werden kann. Der Codeausschnitt zeigt exemplarisch die Implementierung der Lenkmethode (Kapitel 2.1.2). Die vertikal angeordneten, grauen Rechteckstrukturen stellen so genannte „Script-Nodes“ dar. Auf der linken Seite der Struktur befindet sich (in orangener Farbe gekennzeichnet) die Eingangsvariable der jeweiligen Script-Node und auf der rechten Seite die Ausgangsvariable. Die Aus- und Eingangsvariablen der benachbarten Nodes sind mit Kabeln verbunden. Durch die Nutzung der Script-Nodes lassen sich Codepassagen, die Gleichungen beinhalten auf direktem Wege (ohne aufwändige Verkabelung) umsetzen. Bei den orangenen Quadraten im rechten Teil der Abbildung handelt es sich um Anzeigen, die Werte vordefinierter Variablen im Front Panel anzeigen (Anzeigen innerhalb grüner Rechtecke in Abbildung 5-3). Im gezeigten Bildausschnitt handelt es sich um die Systemidentifikationsparameter der adaptiven Regelung. Die als blaues Quadrat mit rotem Rand dargestellte Struktur in der unteren Bildmitte symbolisiert ein so genanntes „Sub-Vi“, also ein Unterprogramm bzw. eine Unterfunktion des Hauptprogramms. Die hier dargestellte blaue Struktur beinhaltet im gezeigten Fall alle Gleichungen der adaptiven Regelung. Die Nutzung solcher Sub-VIs kann dazu beitragen den Quellcode übersichtlich zu halten und eine bestimmte Ordnung im Gesamtprogramm aufrechtzuerhalten. Erwähnenswert ist ebenfalls das dunkelrote Quadrat mit der Überschrift „set point + process output“. Hierbei handelt es sich um eine graphische Ausgabevariable, bzw. ein Schaubild. Dieses ist

ebenfalls direkt mit dem Front-Panel verknüpft und ist in Abbildung 5-3 als das Linke der beiden unteren Schaubilder zu sehen.

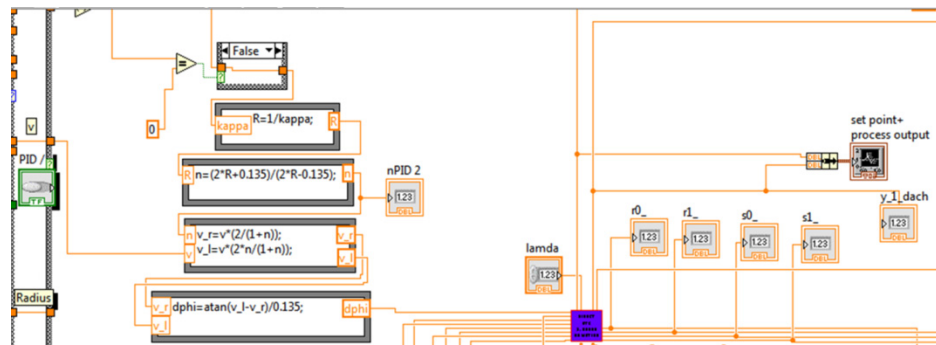


Abbildung 5-4: LabView Beispiel „Blockdiagramm“

In den folgenden Abschnitten werden die vier Systemmodule im Detail beschrieben und ihre Funktionsweisen erläutert.

5.2 Positionierungsmodul

Das Positionierungsmodul basiert auf der Erfassung und Verarbeitung von Daten des bildverarbeitenden Robottachymeters Trimble S7 und ist in zwei Submodule unterteilt. Zum einen wird im statischen Modus, unter Verwendung der Bildverarbeitungsalgorithmen, die Positionsbestimmung der Laderaupe, der Ladung und der Entladestation durchgeführt. Dies erfolgt nach den vorgestellten Methoden aus Abschnitten 4.2 und 4.3. Zum anderen erfolgt während der Fahrzeugbewegung eine permanente kinematische Positionsbestimmung der Laderaupe. Im statischen Modus wird für die Streckenmessung kein Prisma auf dem Objekt benötigt. Die Streckenmessung erfolgt reflektorlos. Für den kinematischen Modus wird ein Prisma verwendet, da zur Positionsbestimmung eine Zielverfolgung stattfinden muss und dies nach jetzigem Stand der Technik noch unter Verwendung eines Prismas durchgeführt wird.

Für die Umsetzung des Submoduls „statische Messung“ benötigt das Tachymeter eine gültige Stationierung in einem lokalen oder globalen Punktnetz. Die Stationierung kann entweder vor Ort durchgeführt werden oder unter Verwendung eines bekannten Standpunkts mit bekannter Orientierung eingelesen werden. Beim Submodul „kinematische Messung“ wird die gleiche Stationierung wie für den statischen Modus verwendet. Der kinematische Messmodus findet in der zeitlichen Reihenfolge nach Abschluss der statischen Messung statt. Die Fahrzeugposition wird dabei mit 20 Hertz pro Sekunde erfasst und dem Steueralgorithmus innerhalb des Fahrmoduls zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt. Die kinematische Messung erfolgt auf ein 360°-Miniprisma, das im vorgezogenen Berechnungspunkt (Beetz 2012a) der Laderaupe montiert ist. Bei der kinematischen Positionsbestimmung handelt es sich um eine Standardfunktion eines Robottachymeters. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieses Abschnitts auf diese nicht im Detail eingegangen.

Funktionen des Positionierungsmoduls

- Freie Stationierung oder Eingabe einer bekannten Stationierung,
- statische Positionsbestimmung: Start des Zielsuchmodus für bildbasierte Positionsbestimmung, wobei durch bildverarbeitende Verfahren die Koordinaten der drei Stationen, Raupe, Ladegut und Entladestation bestimmt werden,
- kinematische Positionsbestimmung nach Abschluss der statischen Positionsbestimmung: kinematische Zielverfolgung und Messungen der Raupenpositionen,
- Bereitstellung und Weitergabe der statischen und kinematischen Positionen an andere Module entsprechend Schnittstelle **P**.

Die Abfolge der Operationen des Positionierungsmoduls ist im Blockdiagramm in Abbildung 5-5 dargestellt. Die Schnittstelle **P** ist entsprechend Tabelle 5-2 definiert. Die Freie Stationierung ist im Blockdiagramm nicht berücksichtigt.

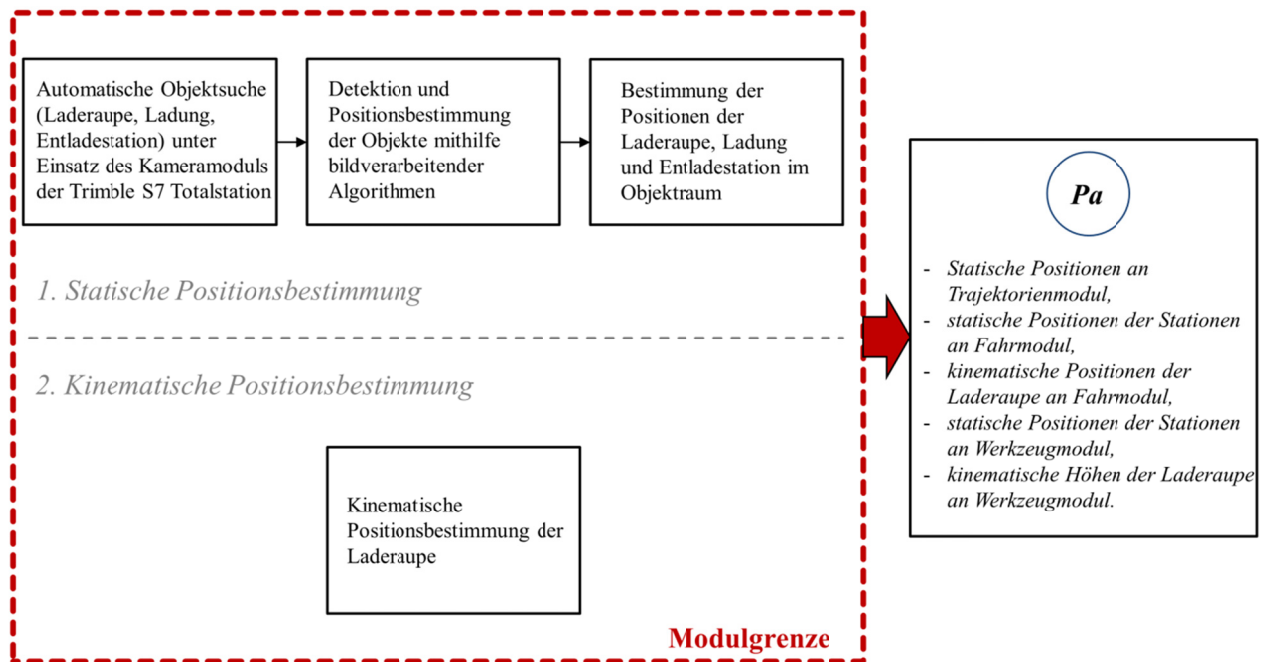


Abbildung 5-5: Ablaufdiagramm Positionierungsmodul

Die Funktionsweise der statischen, bildbasierten Positionsbestimmung soll im Folgenden anhand einiger Beispielabbildungen verdeutlicht werden.

Exemplarisch sind Beispiele der Merkmalerkennung und Zuordnung durch den SURF-Algorithmus dargestellt. Abbildung 5-6 zeigt ein Referenzbild der Modellladeraupen mit extrahierten Bildmerkmalen (grüne Umrandungen). Die Abbildung 5-7 zeigt die Modellladeraupen im gemessenen Bild vor und nach der Extraktion der Merkmale. Die Größe der grünen Kreise symbolisiert dabei den Grad der Auflösung eines Merkmals im Bild. Mit abnehmender Auflösung vergrößern sich die Kreise. Abbildung 5-8 zeigt die gefundenen Übereinstimmungen zwischen dem Referenzbild und dem gemessenen Bild. In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass Übereinstimmungen gefunden wurden, die nicht Teil der Laderaupen sind und somit fehlerhaft sind. Der erwähnte MSAC-Algorithmus bereinigt diese Fehlzuordnungen. Abbildung 5-9 zeigt die selektierten Übereinstimmungen nach der Anwendung des MSAC-Algorithmus. Diese werden nun im Weiteren für die Transformation nach Gleichung (4-16) verwendet. Abbildungen 5-10 und 5-11 zeigen die Endergebnisse der Merkmalerkennung für die Stationen Ladegut und Entladestation. Zu beachten ist, dass alle Aufnahmen von einer beliebigen Kameraposition durchgeführt wurden.



Abbildung 5-6: Referenzbild mit extrahierten Merkmalen

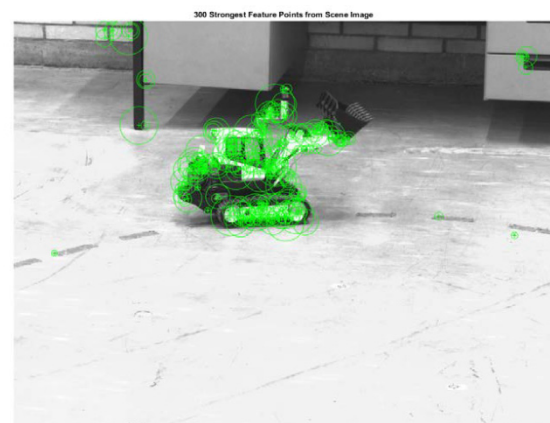


Abbildung 5-7: Links - gemessenes Bild vor Merkmalsextraktion; rechts - nach Merkmalsextraktion

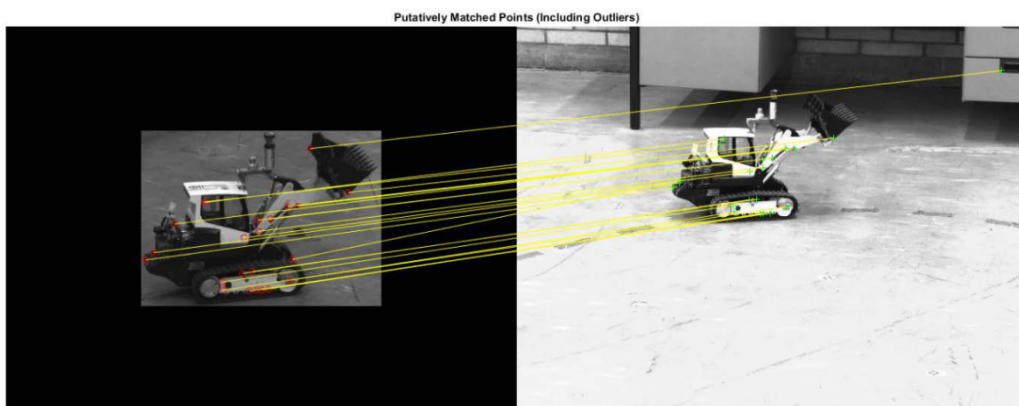


Abbildung 5-8: Gefundene Übereinstimmungen (vor MSAC-Filterung)

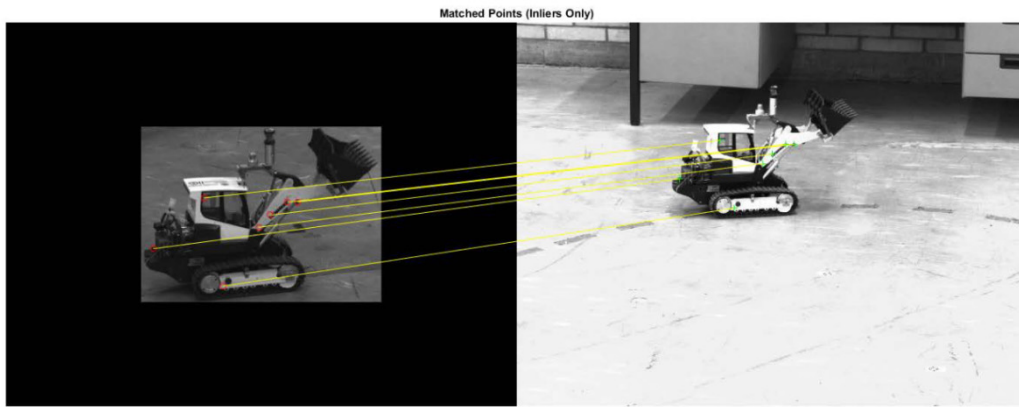


Abbildung 5-9: Für die Transformation verwendete Übereinstimmungen (nach MSAC-Filterung)

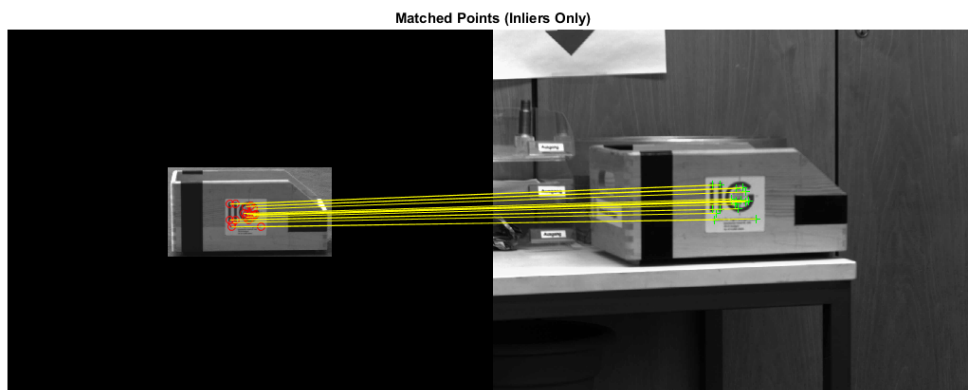


Abbildung 5-10: Gefundene Übereinstimmungen (nach MSAC-Filterung), Entladestation; links – Referenzbild; rechts - gemessenes Bild

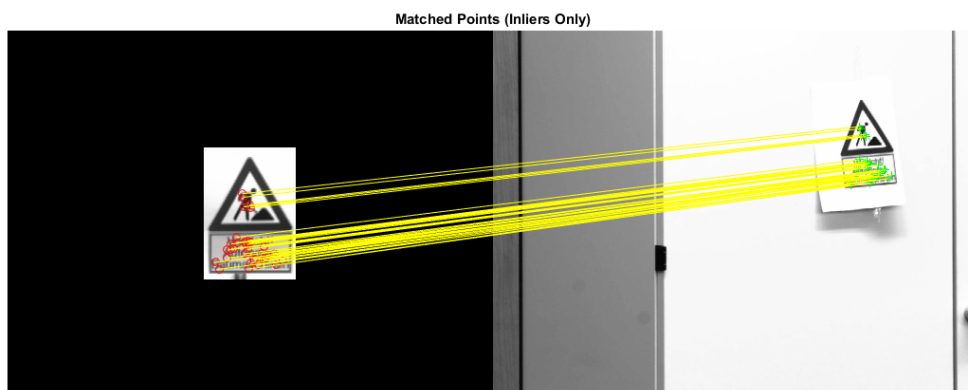


Abbildung 5-11: Gefundene Übereinstimmungen (nach MSAC-Filterung), Markierung der Beladestation; links – Referenzbild; rechts - gemessenes Bild

Da es sich bei der Beladestation im Allgemeinen um Schüttgut handelt, wird vorgesehen, das Medium mit einer einfachen Markierung zu signalisieren (Abbildung 5-11).

Für die Lokalisierung der Laderaupen und der Entladestation werden jeweils vier Referenzbilder verwendet, wobei von jeder Seite des jeweiligen Objektes ein Referenzbild vorliegt. Bei der Markierung des Lade-
guts/Beladestation (Abbildung 5-11) ist ein Referenzbild ausreichend. Die Referenzbilder sind senkrecht zum Objekt aufgenommen. Die Aufnahmeentfernungen entsprechen ungefähr den späteren Entfernungen während des Systembetriebs. Während der statischen Positionsbestimmung nimmt das Tachymeterfernrohr nacheinander vorbestimmte Horizontal- und Vertikalwinkel ein und erfasst ein Bild der Szene, die im Kamerablickfeld zu sehen ist. Anschließend wird das erfasste Bild mit den Referenzbildern verglichen und nach bekannten Merkmalen durchsucht. Sind Merkmale gefunden, erfolgen weitere Schritte der Bildverarbeitung nach Kapitel 4.2 und die abschließende Positionsbestimmung nach Kapitel 4.3. Ist ein Objekt erfolgreich identifiziert und positionsbestimmt wird dessen Referenzbild im Weiteren nicht mehr zur Identifikation verwendet. Somit steigt die Prozessierungsgeschwindigkeit mit jedem gefundenen Objekt an da in diesen Bildern nicht mehr nach Merkmalen gesucht werden muss. Die statische Positionsbestimmung endet, wenn alle Objekte (Laderaupen, Beladestation, Entladestation) gefunden und positionsbestimmt sind. Abbildung 5-12 zeigt das Ablaufdiagramm der statischen, bildbasierten Positionsbestimmung.

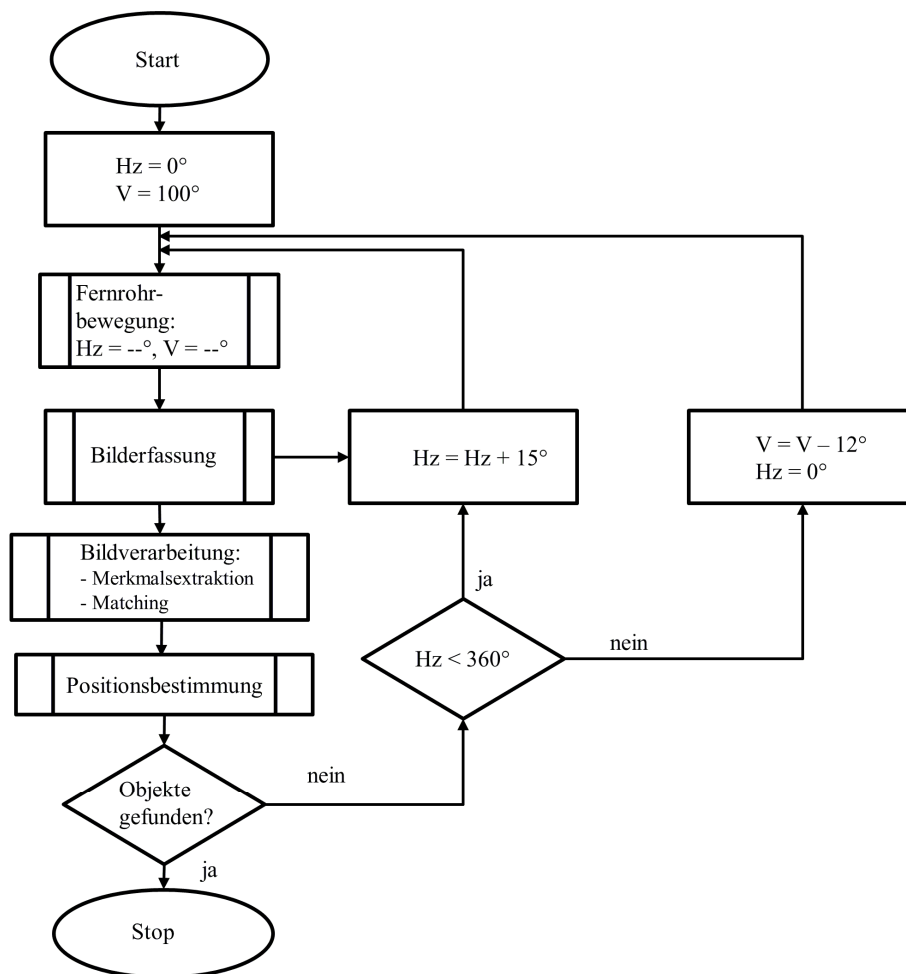


Abbildung 5-12: Ablaufdiagramm der statischen, bildbasierten Positionsbestimmung (Schwieger et al. 2020)

Abschließend ist zu erwähnen, dass der gesamte Prozess der Positionsbestimmung als Zusammenspiel unterschiedlicher Teilprogramme entwickelt wurde. Die Teilprogramme sind in unterschiedlichen Programmiersprachen implementiert. Die Trimble-SDK-Schnittstelle erfordert herstellerbedingt die Nutzung der Programmierungsumgebung C#. Dabei steuert das implementierte C#-Programm das Tachymeter. Hierbei wird das Fernrohr bewegt, Bildaufnahmen gemacht, sowie reflektorlose Distanzmessungen durchgeführt. Die Bilder werden zur Weiterverarbeitung bereitgestellt. In MATLAB sind die Algorithmen SIFT und SURF implementiert. Diese verarbeiten die aufgenommenen Bilder mit dem Ziel der Erkennung von Objekten. Beide Programmierungsumgebungen sind der graphischen Programmiersprache LabView untergeordnet, das als über-

geordnetes Kontrollprogramm verwendet wird. Dieses kontrolliert die Programmbauteile aus C# und MATLAB, führt diese zusammen und synchronisiert deren Einzelfunktionalitäten. Somit übernimmt LabView die Aufgabe der Prozessorganisation. Der prinzipielle Aufbau der Prozessorganisation ist in Abbildung 5-13 dargestellt.

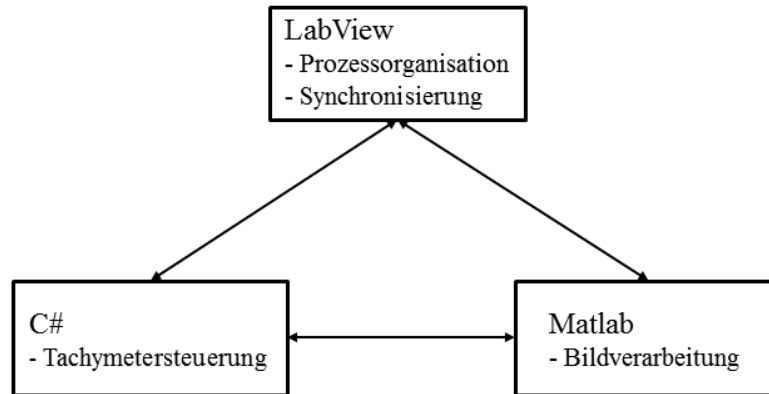


Abbildung 5-13: Prozessorganisation

5.3 Trajektorienmodul

Das Trajektorienmodul verwendet die Tachymeterdaten aus der statischen Messung, um aus den vorliegenden Koordinaten der Stationen (Laderaupen, Ladegut, Entladestation) eine Trajektorie zwischen diesen zu berechnen. Eine für navigatorische Zwecke verwendete Trajektorie benötigt dabei eine Information über ihre Länge und ihre Orientierung. Per Definition soll die Trajektorie aus diskreten Punkten in einem Abstand von jeweils 10 cm bestehen. Dieser Punktabstand ist für den Regelalgorithmus des Fahrmoduls entsprechend festgelegt. Die Trajektorie besteht aus zwei Lagekomponenten und einer Höhenkomponente und ist somit dreidimensional. Die Höhenkomponente ermöglicht eine permanente, kontrollierte Höheneinstellung des Ladewerkzeugs auf die entsprechend geforderte Operationshöhe während des Prozessablaufs.

Die aktuelle Konfiguration des Systems sieht vor, dass die Höhen für das Werkzeug sich auf den Fahruntergrund beziehen. Liegen große Höhenunterschiede zwischen den Stationen vor, wird die Höhe des Werkzeugs somit relativ zur Höhe der Fahrbahnoberfläche eingestellt. Andere Konfigurationen, wie z.B. die Einführung einer absoluten Höhe sind möglich, sind im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht umgesetzt.

Aus den Koordinaten der drei Stationen werden zunächst nacheinander die Teiltrajektorien zwischen Laderaupen und Ladegut sowie zwischen Ladegut und Entladestation berechnet (Abbildung 5-14). Die Trajektorienabschnitte werden nach dem Kriterium der kürzesten Strecken zwischen den Stationen berechnet. Es wird für den weiteren Verlauf die Einschränkung getroffen, dass keine Hindernisse diese direkte Verbindung blockieren. Das letzte Teilstück, d.h. die Trajektorie nach dem Entladen, kann wahlweise zwischen der Entladestation und dem Ladegut gerechnet werden (Route 1) oder zwischen der Entladestation und dem Startpunkt (Alternativroute 2). Diese Entscheidung ist dem Operator des Systems überlassen.

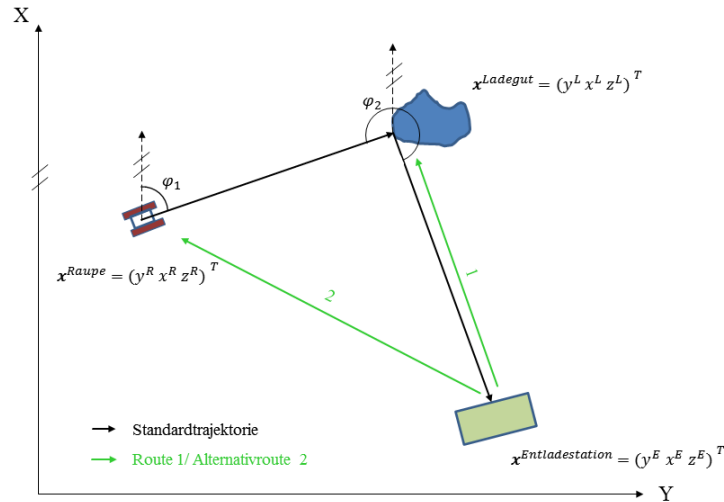


Abbildung 5-14: Prinzipskizze zur Bestimmung der Navigationstrajektorie

Für die Berechnung der Längen der Teiltrajektorien werden euklidische Distanzen verwendet.

$$d^{R,L} = |\mathbf{x}^L - \mathbf{x}^R|, \quad (5-1)$$

$$d^{L,E} = |\mathbf{x}^E - \mathbf{x}^L|, \quad (5-2)$$

$$d^{E,R} = |\mathbf{x}^R - \mathbf{x}^E|. \quad (5-3)$$

mit

$d^{R,L}$:	Abstand zwischen Ladepunkt und Ladegut,
$d^{L,E}$:	Abstand zwischen Ladegut und Entladestation,
$d^{E,R}$:	Abstand zwischen Entladestation und Startpunkt
$\mathbf{x}^R$:	Startpunkt/Positionsvektor Ladepunkt mit den Koordinaten y^R, x^R, z^R ,
$\mathbf{x}^L$:	Positionsvektor Ladegut mit den Koordinaten y^L, x^L, z^L ,
$\mathbf{x}^E$:	Positionsvektor Entladestation mit den Koordinaten y^E, x^E, z^E ,

Für die Berechnung der Richtungswinkel φ_1 - Orientierung zwischen Ladepunkt und Ladegut, φ_2 - Orientierung zwischen Ladegut und Entladestation und φ_{3_Route2} - Orientierung zwischen Entladestation und Startpunkt werden Standardformeln verwendet.

Die Größen $d^{E,R}$ und φ_{3_Route2} repräsentieren dabei die Trajektorienberechnung für die Route 2, also des letzten Teilstücks von der Entladestation zurück zum Startpunkt. Die Berechnungen für den Weg zurück zum Ladepunkt entsprechend Route 1 erfolgen wie folgt:

$$\varphi_{3_Route1} = \varphi_2 + 200 \text{ gon}, \quad (5-4)$$

$$d^{E,L} = d^{L,E}. \quad (5-5)$$

Dabei wird die Orientierung der Route 1 um 200 gon gegenüber der Orientierung zwischen Entladestation und Startpunkt verändert (Gleichung (5-4)). Der Abstand bleibt gleich (Gleichung (5-5)).

Nachdem nun die Informationen über die Längen und Orientierungen der Teilstücke vorliegen, erfolgt eine Verdichtung der Teiltrajektorien auf den Punktabstand von 10 cm. Bei einer Intervalllänge b und einer Trajektorienlänge d ergibt sich die Anzahl der Zwischenpunkte zu:

$$a = \frac{d}{b}. \quad (5-6)$$

Die Anzahl der Intervalle n ergibt sich zu:

$$n = a + 1. \quad (5-7)$$

Das Ergebnis ist eine verdichtete Teiltrajektorie mit einem Punktabstand von 10 cm. Die verdichteten Teiltrajektorien werden als Matrizen entsprechender Länge in folgender Form hinterlegt:

$$\mathbf{TT}_k = [\text{Punkt ID} \quad y_i \quad x_i \quad z_i], \quad (5-8)$$

mit

$\mathbf{TT}_k$: Matrix der verdichteten Teiltrajektorie Index k , mit $k = 1:3$,
 $y_i \quad x_i \quad z_i$: Koordinatentripel, als Elemente der Matrix der Teiltrajektorie, mit $i = 1:j$,
 j – Länge der Teiltrajektorie.

Der Parameter *Punkt ID* wird im Regelungsalgorithmus (Fahrmodul) zur Identifikation eines Trajektorienabschnittes und dessen Zuordnung zur aktuell gemessenen Fahrzeugposition benötigt.

Für die Routenoption 1 kann eine Umkehrtrajektorie gerechnet werden. Liegt dafür eine verdichtete Teilstück in Form einer Matrix $\mathbf{TT}_2$ von der Ladegutstation zur Entladestation vor, so kann das Teilstück $\mathbf{TT}_3$ für die Route 1 (Entladestation zum Ladegut) wie folgt erhalten werden:

$$\mathbf{TT}_3 = [\text{Punkt ID} \quad y_i \cdot \cos(\varphi_{3_{Route1}}) \quad x_i \cdot \sin(\varphi_{3_{Route1}}) \quad z_i]. \quad (5-9)$$

Nachdem nun alle verdichteten Teiltrajektorien als Matrizen vorliegen, müssen diese nur noch zu einer Gesamttrajektorie $\mathbf{T}_{gesamt}$ zusammengefasst werden. Dies geschieht durch eine Zusammenführung (Aneinanderreihung) der Teilstückmatrizen:

$$\mathbf{T}_{gesamt} = \begin{bmatrix} \mathbf{TT}_1 \\ \mathbf{TT}_2 \\ \mathbf{TT}_3 \end{bmatrix}. \quad (5-10)$$

Abhängig von der räumlichen Verteilung der anzufahrenden Stationen kann es vorkommen, dass der anzufahrende Stationszielpunkt nicht erreichbar ist, da die Station selbst den direkten Weg blockiert, wie in Abbildung 5-14 exemplarisch dargestellt. Dies betrifft insbesondere die Entladestation, da diese meist aus einem Container oder einem LKW mit entsprechendem Ladungsbehältnis besteht. Es sei hier beispielsweise angenommen, dass die Entladestation aus technischen Gründen nur von einer bestimmten, der Originaltrajektorie abgewandten Seite, anfahrbar ist. Würde die Laderaupen in so einem Fall der Originaltrajektorie folgen, so würde sie mit der Entladestation zusammenstoßen. Zur Vermeidung solcher Fälle wird standardmäßig ein zur Längsseite des Containers orthogonaler Vektor berechnet, dessen Länge so definiert ist, dass die Laderaupen aus jeder Position am Container vorbeifahren kann, ohne diesen zu berühren. Dies erweitert die Trajektorie um einen zusätzlichen Abschnitt $\mathbf{TT}_4$. Abbildung 5-15 zeigt exemplarisch eine „ungünstige“ räumliche Verteilung der Stationen. Die Originaltrajektorie (schwarz gestrichelte Linie) wird dabei durch die optimierte Trajektorie (rot durchgezogene Linie) ersetzt.

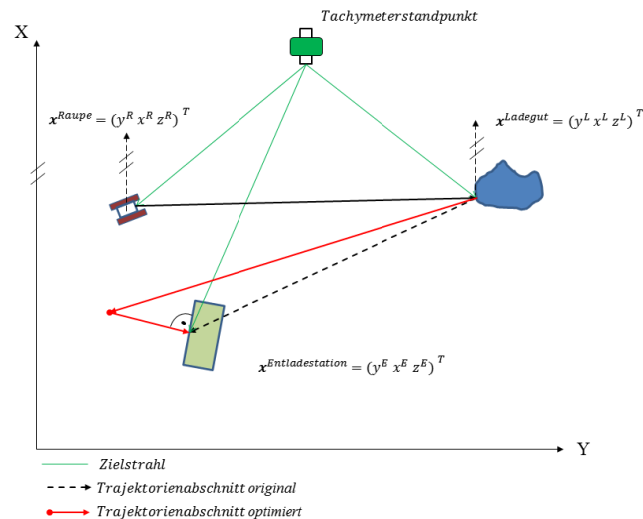


Abbildung 5-15: Räumliche Verteilung der Stationen und optimierte Trajektorienführung

Die Information über den Beginn und das Ende eines jeweiligen Teilabschnittes wird beibehalten und über die Schnittstellen als Eingangsinformation für die Steuersequenzen der Fahrtriebe und des Ladewerkzeugs verwendet. Im Folgenden werden die Funktionen des Trajektorienmoduls und die Interaktion des Moduls mit anderen Modulen aufgezeigt.

Funktionen des Trajektorienmoduls

- Trajektorienberechnung aus den vom Positionierungsmodul bestimmten Koordinaten der Stationen,
- Speicherung der Gesamttrajektorie,
- Bereitstellung und Weitergabe der Gesamttrajektorie an andere Module.

Die Abfolge der Operationen des Trajektorienmoduls ist im folgenden Blockdiagramm dargestellt.

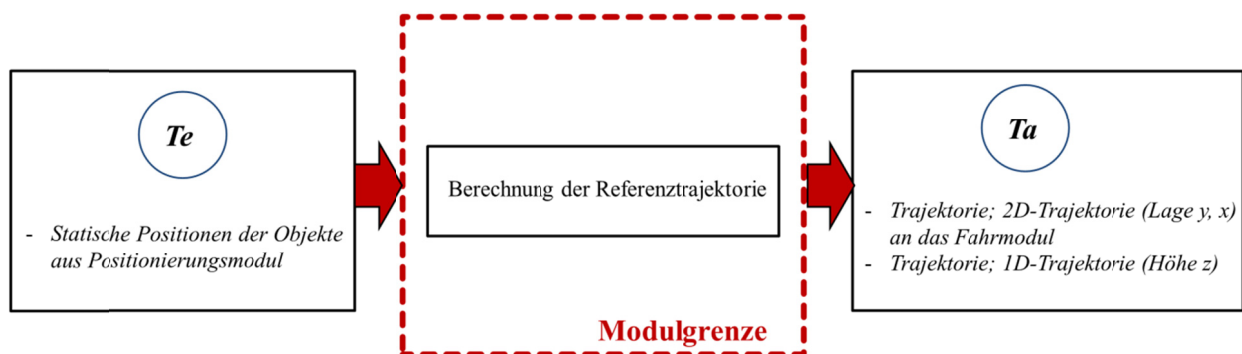


Abbildung 5-16: Ablaufdiagramm Trajektorienmodul

5.4 Fahrmodul

Das Fahrmodul gewährleistet das automatische Abfahren der aus dem Trajektorienmodul zur Verfügung gestellten Trajektorie. Es besteht aus zwei Hauptfunktionalitäten, der Längsregelung und der Querregelung. Zusätzlich ist eine Sonderfunktion für so genannte „Spottturn“-Manöver implementiert.

Die Längsregelung beinhaltet die Einstellung und Steuerung der Gesamtfahrgeschwindigkeit. Ein separater Steuerregelkreis gewährleistet, dass die eingestellte Geschwindigkeit gehalten wird. Die Führungsgröße in diesem Regelkreis ist die gewünschte Geschwindigkeit, die Regelgröße ist die aktuell gemessene Geschwindigkeit und die Regelabweichung ist die Differenz dieser beiden Größen.

Tabelle 5-6: Zuordnung zwischen Regelkreiskomponenten und Fahrmodulkomponenten für die Längssteuerung

Regelkreis	Fahrmodul
Führungsgröße	Soll-Geschwindigkeit
Regelabweichung	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Soll und Ist
Stellgröße	Steuerbefehle für die Antriebe
Regelgröße	Ist-Geschwindigkeit
Regler	PID-Regler
Regelstrecke	Modellraupe
Sensor	Tachymeter

Als Quersteuerung wird die Lenkung bezeichnet. Die verwendete Lenkmethode ist im Kapitel 2.1.2 beschrieben. Die Regelkreisstruktur basiert auf dem adaptiven Reglerschema nach Kapitel 3.2. Die Aufgabe dieses Steuerregelkreises ist es, die Laderaupen so genau wie möglich entlang der vorgegebenen Route zu führen. Als Führungsgröße werden die Positionen der im Trajektorienmodul generierten Soll-Trajektorie verwendet. Die Regelgröße ist die erfasste Ist-Position der Ist-Trajektorie und die Regelabweichung ist die Querabweichung zwischen der Soll- und Ist-Trajektorie. Die Berechnung der Querabweichungen erfolgt nach Beetz (2012a). Tabelle 5-7 zeigt den Zusammenhang zwischen den Komponenten eines Standardregelkreises und den für die Querregelung relevanten Fahrmodulkomponenten.

Tabelle 5-7: Zuordnung zwischen Regelkreiskomponenten und Fahrmodulkomponenten für die Quersteuerung

Regelkreis	Fahrmodul
Führungsgröße	Positionen der Soll-Trajektorie
Regelabweichung	Querabweichung zwischen Soll- und Ist-Trajektorie
Stellgröße	Lenkwinkel/ Skalierungsfaktor
Regelgröße	Positionen der Ist-Trajektorie
Regler	Adaptiver Regler nach STC Schema
Regelstrecke	Modellraupe
Sensor	Tachymeter

Beschreibung des Regelprozesses der Quersteuerung

Das Tachymeter erfasst die aktuelle Position und sendet diese an den Steuercomputer. Der Steueralgorithmus auf dem Steuercomputer verarbeitet die Position und errechnet die Querabweichung zur Solltrajektorie. Aus den Querabweichungen wird dann der optimale Lenkparameter errechnet. Über den Lenkparameter werden die Kettengeschwindigkeiten zunächst als digitale Spannungswerte ermittelt. Diese müssen im Digital/Analog-Wandler in eine physikalische Größe, eine analoge Spannung, konvertiert werden. Die analogen Spannungswerte werden anschließend über die Fernbedienung an die Antriebe gesendet. Diese Abfolge von Aktionen wiederholt sich 20-mal in der Sekunde. Diese Wiederholungsrate hängt von der Abtastrate des Trimble S7 Tachymeters ab, das nach herstellereitigen Modifikationen Messungen mit einer Rate von 20 Hertz im kinematischen Modus ermöglicht.

Abbildung 5-17 zeigt die im Regelprozess integrierten Hardwarekomponenten sowie deren Interaktion. In der hier vorgestellten Konfiguration sind diese das Laderaupenmodell, das Tachymeter, der Steuercomputer, sowie ein A/D-Wandler.

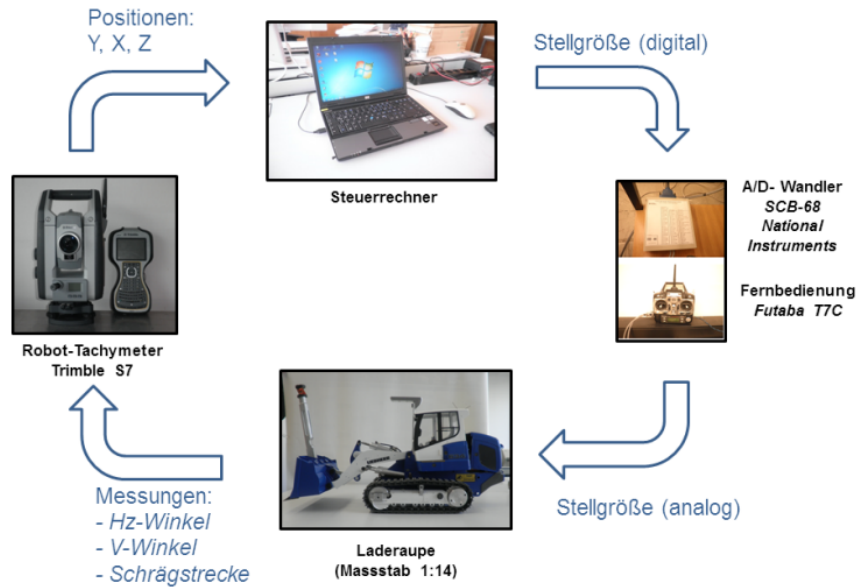


Abbildung 5-17: Hardware-Komponenten

Beschreibung der Spottturn-Manöver

Das Spottturn-Manöver erlaubt es, die Laderraupe auf der Stelle zu drehen. Dadurch ist dieses Manöver sehr platzsparend und eignet sich besonders für Einsätze in beengten Betriebsumgebungen. Die Durchführung dieses Manövers ist ausschließlich Raupenfahrzeugen vorbehalten. Dabei werden die beiden Ketten gleichzeitig und mit gleicher Geschwindigkeit in entgegengesetzte Richtungen bewegt. Je nach Orientierung der einzelnen Stationen zueinander kann das Manöver wie bereits erwähnt z.B. zum Wenden nach einem Belade- oder Entladevorgang durchgeführt werden. Somit kann der Betrieb effizienter organisiert werden. Jedoch ist es für eine Steuerung des Spottturn-Manövers notwendig, dass die Orientierung der Laderraupe zur Trajektorie bekannt ist. Diese kann, während der Bewegung, aus der Trajektorie selbst abgeleitet werden. Beim Stillstand wird dann die zuletzt berechnete Orientierung angenommen. Aus dieser Situation heraus ist für einen kontrollierten Spottturn um einen bestimmten Winkel der Einsatz eines zusätzlichen Sensors, z.B. eines Drehratensensors oder Kompasses, sinnvoll. Dieser ist jedoch im Gesamtsystem aus Platz- und Kostengründen bisher nicht vorgesehen. Deshalb wurde eine zeitliche Steuerung der Spottturn-Manöver realisiert. Die zeitliche Spottturn-Steuerung erfordert eine entsprechende Kalibrierung, die im späteren Verlauf dieses Abschnitts vorgestellt wird.

Im Folgenden sind die Aufgaben und Funktionen des Fahrmoduls aufgelistet.

Funktionen des Fahrmoduls

- Berechnung der Regelabweichung für die Längsregelung,
- Minimierung der Regelabweichung für die Längsregelung und Berechnung Antriebssteuerbefehle,
- Berechnung der Regelabweichung für die Querregelung,
- Minimierung der Regelabweichung für die Querregelung und Berechnung Antriebssteuerbefehle,
- Berechnung der Antriebssteuerbefehle für Spottturns,
- Monitoring des Abstandes zur nächsten Station,
- Bereitstellung der Informationen für das Werkzeugmodul.

Die Abfolge der Operationen des Fahrmoduls ist im Blockdiagramm in Abbildung 5-17 dargestellt.

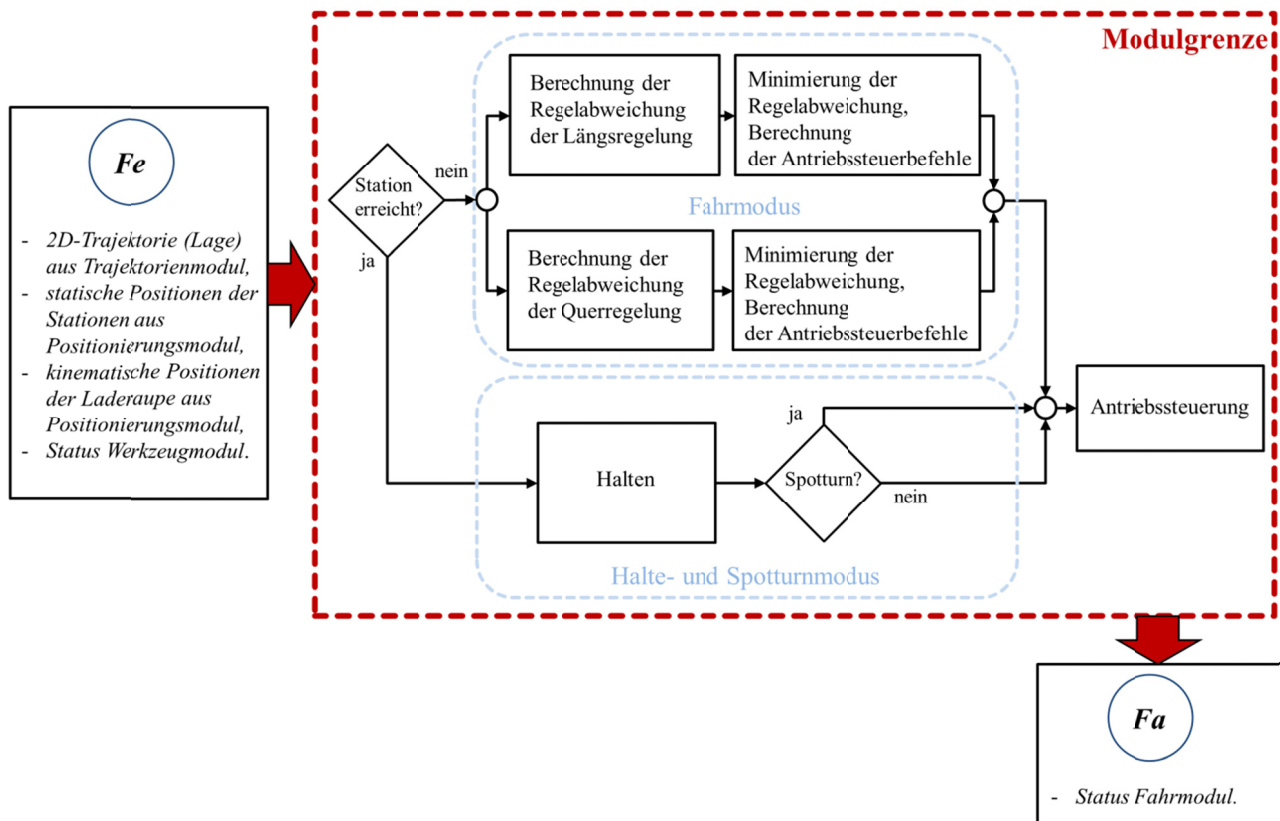


Abbildung 5-18: Ablaufdiagramm Fahrmodul

Kalibrierung des Fahrentriebs

Die Ansteuerung der stufenlosen elektrischen Raupenantriebe erfolgt spannungsbasiert. Dabei bedingen unterschiedliche Spannungswerte entsprechende Fahrgeschwindigkeiten. Für den Betrieb ist es jedoch sinnvoll, metrische Geschwindigkeitsangaben wie z.B. $\frac{m}{s}$ oder $\frac{km}{h}$ zu erhalten, um nicht mit abstrakten Spannungswerten zu operieren. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel Übertragungsfunktionen zwischen Spannungswerten und metrischen Geschwindigkeitsangaben mittels Kalibrierungen bestimmt. Des Weiteren werden für die Spottturn-Manöver zwei Übertragungsfunktionen für Links- und Rechtsdrehungen aufgestellt. Diese Funktionen beschreiben den Zusammenhang zwischen Winkeländerungen und zeitlicher Dauer der Drehungen.

Geschwindigkeitskalibrierung

Das Ziel der Kalibrierung für die Geschwindigkeit ist es, dem Benutzer des Systems metrische Größen zur Auswahl der Fahrgeschwindigkeit zur Verfügung zu stellen. Dazu wird eine Übertragungsfunktion gesucht, die das Verhältnis zwischen der am Antrieb angelegten Spannung in Volt und der daraus resultierenden Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde beschreibt. Für das mathematische Modell der Übertragungsfunktion wird ein Polynom angesetzt. Der Polynomgrad wird im Verlauf der Kalibrierung exakt festgelegt, da zunächst nicht klar ist, wie sich die Spannungswerte zu den Geschwindigkeitswerten verhalten. Die Übertragungsfunktion muss sowohl Spannungsbereiche für Vorwärtsbewegungen als auch für Rückwärtsbewegungen abdecken.

Das Modell der Laderaube ist mit einem elektronischen Fahrtenregler ausgestattet. Der Betriebsbereich der Antriebsmotoren liegt zwischen 0.7 und 2.6 Volt. Der elektronische Fahrtenregler ist so ausgelegt, dass beim Wert 0.7 Volt die maximale Leistung für die Vorwärtsbewegung an den Antrieben anliegt und diese somit das Fahrzeug mit Höchstgeschwindigkeit nach vorne bewegen. Der Wert 1.6 Volt ist als Ruhestellung defi-

niert. Bei diesem Spannungswert drehen sich die Antriebe nicht und die Laderaupen steht. Bei 2.6 Volt liegt die maximale Leistung für die Rückwärtsbewegung an den Antrieben an. Das Fahrzeug bewegt sich mit maximaler Geschwindigkeit rückwärts.

Die Kalibrierung wurde auf einem PVC-Boden durchgeführt. Die Kalibrierstrecke wurde mit 5 Metern als fest gewählt. Die kommunikationsbedingten zeitlichen Verzögerungen in der Fernsteuerung und dem Fahrzeug sowie die Beschleunigungsphasen wurden vernachlässigt. Der Kalibriervorgang basiert auf dem Vergleich zwischen den angelegten Spannungswerten und gemessenen Geschwindigkeiten. Es wird angenommen, dass diese Spannungswerte mit der per Software angeforderten Eingangsspannung identisch sind. Die Messung der Geschwindigkeit erfolgt indirekt. Diese wird aus den erfassten Koordinaten- und Zeitdifferenzen einer Tachymetermessung abgeleitet.

Während der Kalibrierung der Vorwärtsbewegung wurden die Eingangswerte der Fahrtriebe, beginnend bei 1.6 Volt, jeweils um 0.1 Volt verringert. Simultan wurde die Laderaupen mit einem zielverfolgenden Tachymeter (Leica TS 30) angemessen. Nach der Ermittlung eines Wertes der Kalibrierfunktion wurde die Eingangsspannung erneut um 0.1 Volt verringert und erneut die gefahrenen Positionen sowie Zeiten gemessen. Dies wurde für den kompletten Spannungsbereich der Vorwärtsbewegung, bis zum Wert 0.7 Volt, wiederholt. Für die Rückwärtsbewegung wurden die Spannungen, ausgehend von 1.6 Volt um 0.1 Volt pro Durchlauf bis zum Wert 2.6 Volt, erhöht. Als Ergebnis stehen Wertepaare, bestehend aus Geschwindigkeiten und den dazugehörigen Spannungswerten, zur Kalibrierung zur Verfügung. Diese können nun in einem Diagramm geplottet und ein geeignetes Polynom als Approximation durch die Wertepaare gelegt werden.

Abbildung 5-19 stellt die Ergebnisse der Kalibrierung dar. Da die Funktion nicht linear ist, musste ein Polynom höheren Grades angesetzt werden. Ein zu niedriger Polynomgrad kann den Verlauf nur unzureichend beschreiben. Zu hohe Polynomgrade bringen im Vergleich dazu keine verbesserte Approximation und neigen zum Überschwingen. Prinzipiell wäre es denkbar die Übertragungsfunktion linear auszugestalten. Der Verlauf des Graphen zeigt, dass zwei lineare Bereiche existieren. Jedoch sind diese jeweils unterschiedlich in ihrer Steigung. Somit gäbe es zwar zwei Möglichkeiten für einen linearen Ansatz über die Gesamtfunktion, jedoch würden die linearen Abschnitte nur für die Spannungswerte zwischen 0.8 und 1.2 Volt oder zwischen 1.2 und 2 Volt gute Ergebnisse liefern. Alle anderen Spannungsbereiche müssten durch Extrapolation und um den Preis eines großen Extrapolationsfehlers abgedeckt werden. Aus diesem Grund ist ein Polynom 7. Grades angesetzt, der den Verlauf der Kalibrierwerte am besten approximiert.

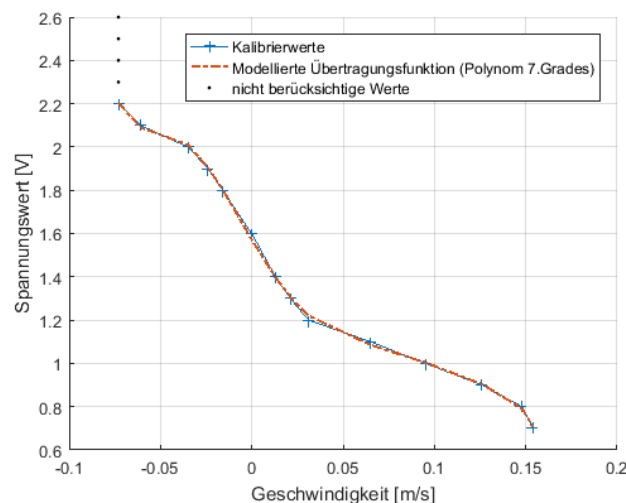


Abbildung 5-19: Kalibrierfunktion Fahrtrieb

Die angesetzte Übertragungsfunktion hat die Form:

$$U(v) = a_7 \cdot v^7 + a_6 \cdot v^6 + a_5 \cdot v^5 + a_4 \cdot v^4 + a_3 \cdot v^3 + a_2 \cdot v^2 + a_1 \cdot v + a_0, \quad (5-11)$$

mit

U : Eingangsspannung in Volt,

v : Vorgegebene Geschwindigkeit in $\frac{m}{s}$.

Tabelle 5-8 stellt die entsprechenden Parameter a_0 bis a_7 des Polynoms dar.

Tabelle 5-8: Parameter des Polynoms der Übertragungsfunktion für Geschwindigkeitskalibrierung

Parameter	Wert
a_0	1.572 Volt
a_1	$-14.44 \frac{\text{Volt}}{\left(\frac{m}{s}\right)}$
a_2	$46.90 \frac{\text{Volt}}{\left(\frac{m}{s}\right)^2}$
a_3	$2526 \frac{\text{Volt}}{\left(\frac{m}{s}\right)^3}$
a_4	$-21603 \frac{\text{Volt}}{\left(\frac{m}{s}\right)^4}$
a_5	$-193632 \frac{\text{Volt}}{\left(\frac{m}{s}\right)^5}$
a_6	$2823157 \frac{\text{Volt}}{\left(\frac{m}{s}\right)^6}$
a_7	$-8624351 \frac{\text{Volt}}{\left(\frac{m}{s}\right)^7}$

Zur Bewertung der durchgeführten Kalibrierung sind im Folgenden die Residuen dargestellt sowie die Standardabweichung s_p und das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben (Heunecke et al. 2013).

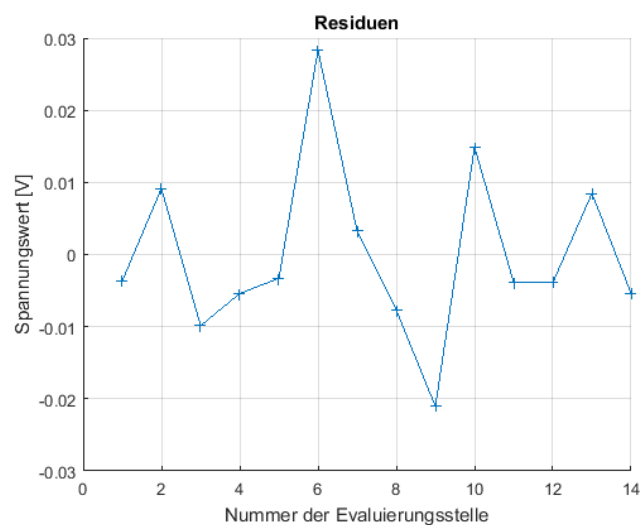


Abbildung 5-20: Residuen der Kalibrierfunktion

Für die Standardabweichung ist der Wert $s_p = 0.018 \text{ Volt}$ festgestellt worden. Das Bestimmtheitsmaß beträgt $R^2 = 0.9994 \approx 99.94 \%$, was eine sehr hohe Güte der Anpassung indiziert.

Spottturn-Kalibrierung

Die Kalibrierung der Spottturns wird unter Nutzung einer IMU (Microstrain 3DM-GX2) durchgeführt. Diese wird auf der Modellraupe parallel zum $Y'X'$ -Ebene des lokalen Maschinenkoordinatensystems befestigt (vgl. Abbildung 2-1). Bei dieser Konfiguration ist die sensitive Achse die Z' -Achse. Dies erlaubt es, während der Drehungen, den Gierwinkel Ψ abzugreifen und zu evaluieren. Außerdem wird die benötigte Zeit Δt für die Drehung erfasst.

Für die Kalibrierprozedur wurde separates ein Kalibrier-Steuerungssystem entwickelt, bei dem ein Zeitwert eingestellt werden kann, während dessen sich die Raupe in eine Richtung um die Z' -Achse, die durch den Schwerpunkt geht, dreht. Gleichzeitig wird der Gierwinkel mit der IMU erfasst. Somit kann eine Übertragungsfunktion aufgestellt werden, die das Verhältnis zwischen der Drehzeit und der Änderung des Gierwinkels beschreibt. Die Übertragungsfunktion ist jeweils nur für eine Art des Fahruntergrunds gültig. Das bedeutet, dass theoretisch für jede einzelne Fahruntergrundcharakteristik eine Übertragungsfunktion aufgestellt werden müsste. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dies für PVC-Böden durchgeführt. Bei Bedarf muss entsprechend auf anderen Böden kalibriert werden. Eine andere Möglichkeit wäre es, Schlupfparameter nach Le (1999) einzuführen, die die Bodenbeschaffenheit berücksichtigen.

Für die Kalibrierung werden Zeitintervalle zwischen 0 und 13 Sekunden verwendet. Die Kalibrierung erfolgte jeweils für die Linksdrehung und anschließend für die Rechtsdrehung. Dazu werden Spannungswerte für die Kettenantriebe bereitgestellt. Für die vorwärts drehende Kette wird der Spannungswert 0.7 Volt und für die rückwärts drehende Kette der Spannungswert 2.6 Volt angelegt.

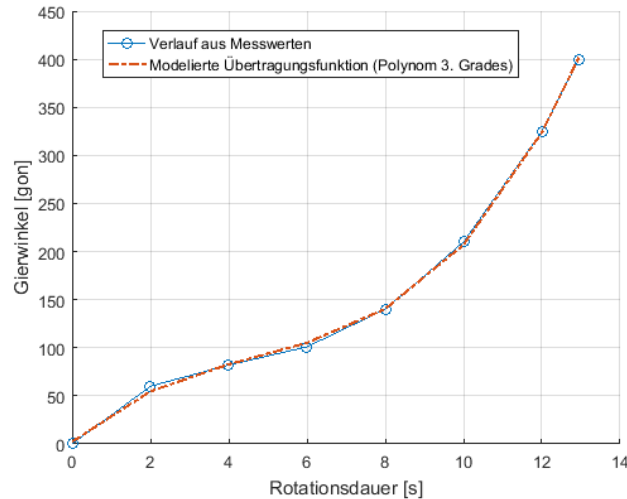


Abbildung 5-21: Kalibrierfunktion für „Spottturn links“

Die Polynomparameter der Übertragungsfunktion für den linken Spottturn sind in Tabelle 5-9 angegeben.

Tabelle 5-9: Parameter des Polynoms der Übertragungsfunktion für „Spotturn links“

Parameter	Wert
a_0	2.314 gon
a_1	$35.35 \frac{\text{gon}}{\text{s}}$
a_2	$-5.355 \frac{\text{gon}}{\text{s}^2}$
a_3	$0.387 \frac{\text{gon}}{\text{s}^3}$

Die Kriterien zur Beurteilung der Kalibrierung „Spotturn links“ sind im Folgenden dargestellt.

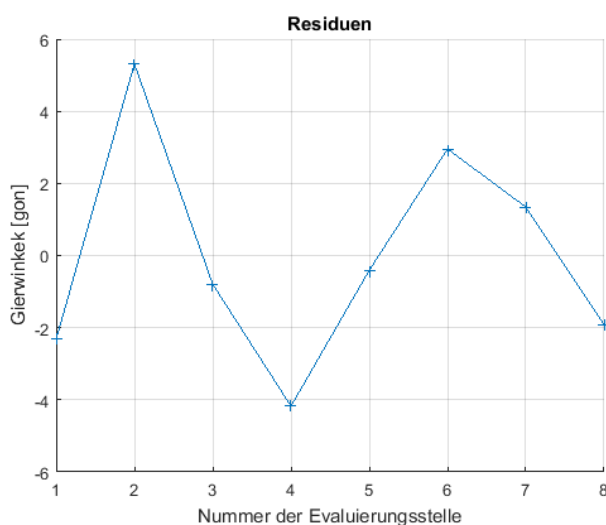


Abbildung 5-22: Residuen der Kalibrierfunktion „Spotturn links“

Die Standardabweichung s_{pl} beträgt 4.061 gon. Für das Bestimmtheitsmaß ist der Wert $R^2 = 0.9995 \approx 99.95\%$ festgestellt worden, was ebenfalls einer hohen Anpassungsgüte entspricht.

Abbildung 5-23 stellt die Kalibrierfunktion für den rechten Spotturn dar.

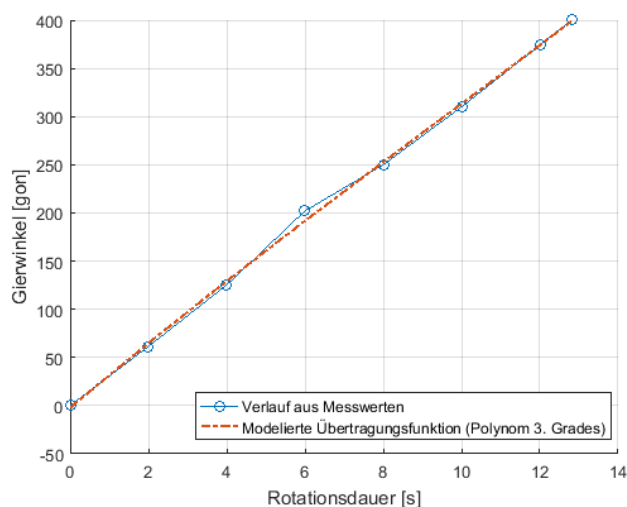


Abbildung 5-23: Kalibrierfunktion für „Spotturn rechts“

Die Polynomparameter der Übertragungsfunktion für den rechten Spotturn sind in Tabelle 5-10 angegeben.

Tabelle 5-10: Parameter des Polynoms der Übertragungsfunktion für „Spotturn rechts“

Parameter	Wert
a_0	-2.082 gon
a_1	$34.32 \frac{\text{gon}}{\text{s}}$
a_2	$-0.424 \frac{\text{gon}}{\text{s}^2}$
a_3	$0.015 \frac{\text{gon}}{\text{s}^3}$

Die Kriterien zur Beurteilung der Kalibrierung „Spotturn rechts“ sind im Folgenden angegeben.

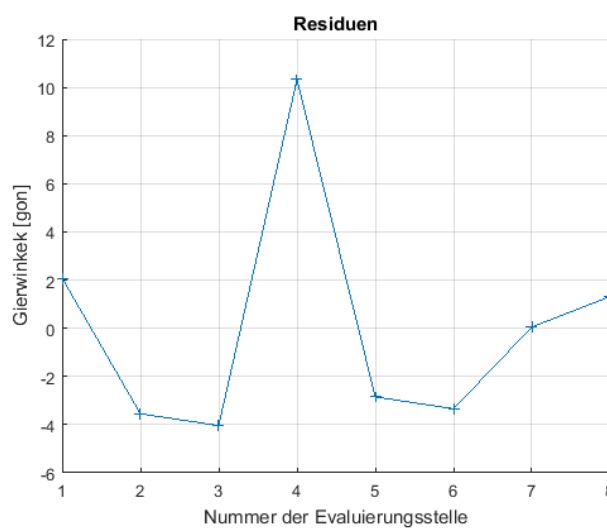


Abbildung 5-24: Residuen der Kalibrierfunktion „Spotturn rechts“

Die Standardabweichung der Kalibrierfunktion „Spotturn rechts“ beträgt $s_{pr} = 6.342 \text{ gon}$. Für das Bestimmtheitsmaß wurde der Wert $R^2 = 0.9989 \approx 99.89 \%$ berechnet.

Aus den unterschiedlichen Verläufen der Übertragungsfunktionen lässt sich ableiten, dass die Antriebscharakteristiken der linken und der rechten Kette unterschiedlich sind. Da die Bodenbeschaffenheit während der Kalibrierung gleichbleibend war, kann die Ursache nur auf die unterschiedliche Performance der verbauten Elektromotoren zurückgeführt werden.

5.5 Werkzeugmodul

Das Werkzeugmodul spielt für die Entwicklung der hier vorgestellten Prozessautomatisierung eine entscheidende Rolle. Die Integration in das Gesamtsystem erfordert eine vollständige Automatisierung des Ladewerkzeugs. Die Automatisierung basiert auf den in Kapitel 2.2 vorgestellten Grundlagen. Die Tabellen 5-11 und 5-12 zeigen jeweils den Zusammenhang zwischen den Komponenten des Standardregelkreises und den für die Höhensteuerung des Auslegers sowie die Lagesteuerung der Schaufel relevanten Modulkomponenten des Werkzeugs.

Tabelle 5-11: Zuordnung zwischen Regelkreiskomponenten und Werkzeugmodulkomponenten für den Ausleger

Regelkreis	Werkzeugmodul, Komponente Ausleger
Führungsgröße	Soll-Höhenprofil (z-Komponente der Solltrajektorie)
Regelabweichung	Höhendifferenz zwischen Soll und Ist
Stellgröße	Steuerbefehl für den Hydraulikkreislauf Ausleger
Regelgröße	Ist-Werkzeughöhe
Regler	P-Regler
Regelstrecke	Ausleger/Auslegerhydraulik
Sensor	Neigungsmesser

Tabelle 5-12: Zuordnung zwischen Regelkreiskomponenten und Werkzeugmodulkomponenten für die Ladeschaufel

Regelkreis	Werkzeugmodul, Komponente Schaufel
Führungsgröße	Soll-Lage
Regelabweichung	Differenz zwischen Soll- und Ist-Lage
Stellgröße	Steuerbefehl für den Hydraulikkreislauf Schaufel
Regelgröße	Ist-Lage
Regler	3-Punkt-Regler
Regelstrecke	Ladeschaufel/Ladeschaufelhydraulik
Sensor	Neigungsmesser

Die Ansteuerung der Werkzeugkomponenten erfolgt ebenfalls über einen Fahrtenregler. Dieser regelt die Spannungswerte, die die Hydraulikpumpe antreiben, die wiederum die zwei hydraulischen Kreise für den Ausleger und die Schaufel bedient. Der Betriebsbereich liegt für den Ausleger zwischen 0.5 und 2.7 Volt. Die Neutral-Stellung liegt bei 1.84 Volt. Die Spannungswerte zwischen 1.84 und 0.5 Volt bewegen den Ausleger nach oben, wobei bei 0.5 Volt die maximale Drehgeschwindigkeit um den Punkt A (vgl. Abbildung 2-4) erreicht wird. Entsprechend bewegt sich der Ausleger bei Werten zwischen 1.84 und 2.7 Volt nach unten, wobei hier die maximale Drehgeschwindigkeit bei 2.7 Volt vorliegt. Die Betriebscharakteristik bei der Schaufel ist ähnlich. Allerdings liegt die Neutralstellung hier bei 2.06 Volt vor. Bei Werten zwischen 2.06 und 2.7 Volt kippt die Schaufel nach vorne und bei Werten zwischen 2.06 und 0.5 Volt nach hinten. Hier werden die maximalen Drehgeschwindigkeit bei 2.7 Volt für die Rotation nach vorne bzw. bei 0.5 Volt für die Rotation nach hinten erreicht. Die Rotationen finden dabei um den Drehpunkt B statt (vgl. Abbildung 2-4).

Das Werkzeug wird mittels zweier unterschiedlicher Modi angesteuert. Für den Normalbetrieb auf dem Streckenabschnitt zwischen der Startposition und der Ladestation wird eine sensorgestützte, automatische Steuerung verwendet. Dafür ist ein Neigungssensor in Form einer IMU am Ausleger und ein weiterer Neigungssensor, ebenfalls eine IMU, an der Ladeschaufel angebracht. Die Sensordaten werden in separaten Regelkreisen (vgl. Tabellen 5-11 und 5-12) mit entsprechenden Reglern verarbeitet. Der Ausleger wird dabei entsprechend dem vorliegenden Höhenprofil der Referenztrajektorie eingestellt. Die Ladeschaufel wird in einer „neutralen“ Lage, die für eine Beladung günstig ist, gehalten. Die „neutrale“ Lage ist eingestellt, wenn die Unterseite der Ladeschaufel parallel zum Fahruntergrund ist (vgl. Abbildung 6-14, Kapitel 6.3).

Beim Erreichen der Ladestation wird der Automatikmodus abgeschaltet. Die Beladesequenz wird mit mathematischer Steuerung entsprechend Modus „Typ B“ (vgl. Kapitel 2.2.3) durchgeführt. Dieser Modus wird auch für die Entladesequenz verwendet. Auf dem Streckenabschnitt zwischen der Lade- und Entladestation bleibt der sensorgestützte Automatikmodus der Ladeschaufel abgeschaltet, damit das Ladegut durch etwaige

Änderungen der Ladeschaufelstellung nicht verloren geht. Nach abgeschlossener Entladesequenz wird der sensorgestützte Automatikmodus erneut aufgeschaltet. Die Ab- und Aufschaltung erfolgt dabei automatisch ohne Eingriffe des Operators.

Funktionen des Werkzeugmoduls

- Monitoring des Abstandes zur nächsten Station,
- Automatikmodus Ausleger: Berechnung der Regelabweichung für Auslegerhöhe und Minimierung der Regelabweichung durch Werkzeugsteuerbefehle,
- Automatikmodus Ladeschaufel: Berechnung der Regelabweichung für Ladeschaufel und Minimierung der Regelabweichung durch Werkzeugsteuerbefehle,
- Abschaltung der Automatikmodi beim Erreichen der Beladestation,
- zeitlich gesteuerte Beladesequenz,
- Aufschaltung des Automatikmodus Ausleger (Automatikmodus der Ladeschaufel bleibt bis zur Entladestation abgeschaltet, um Beibehaltung der Ladeschaufellage zu gewährleisten),
- Abschaltung des Automatikmodus Ausleger beim Erreichen der Entladestation,
- zeitlich gesteuerte Entladesequenz.

Die Abfolge der Operationen des Werkzeugmoduls ist im Blockdiagramm in Abbildung 5-25 dargestellt.

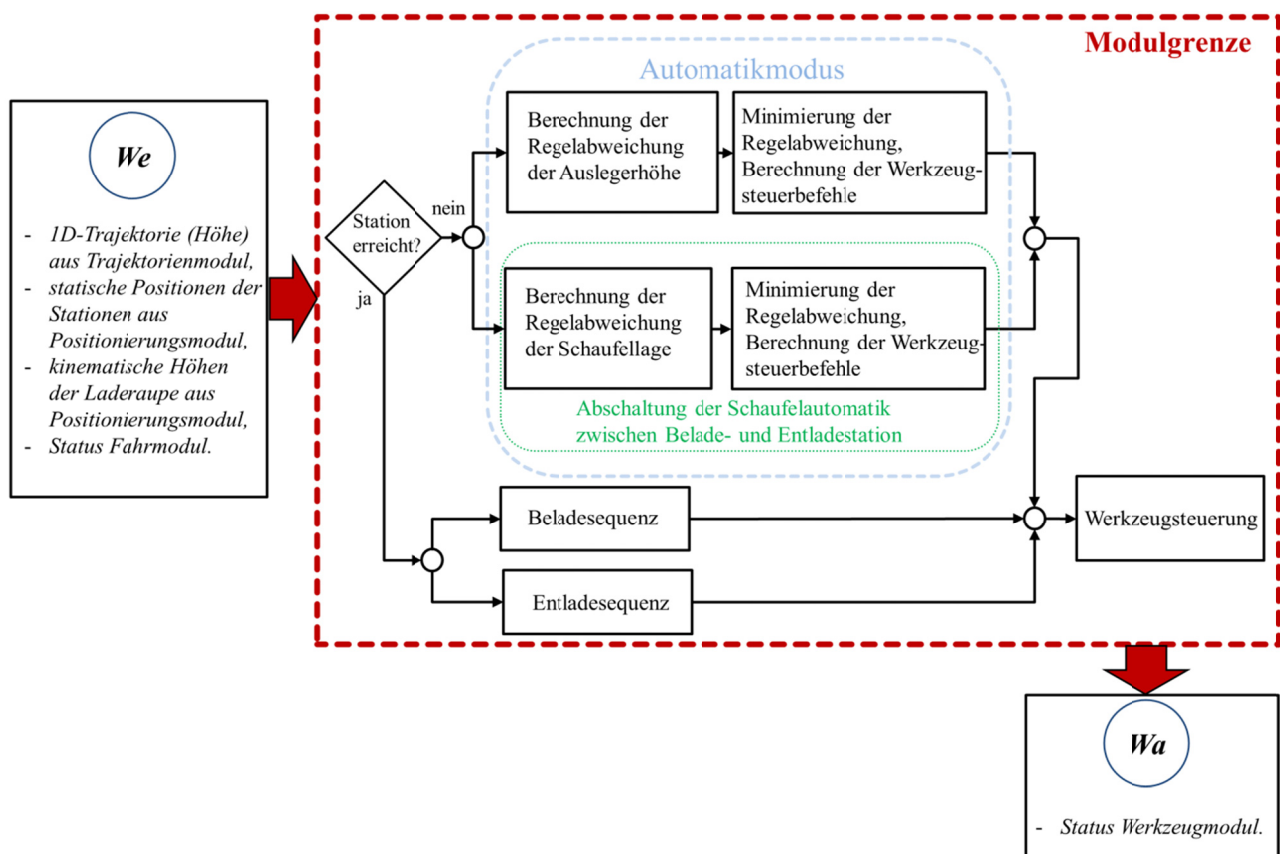


Abbildung 5-25: Ablaufdiagramm Werkzeugmodul

Kalibrierung des Werkzeugs

Wie in Abschnitt 2.2.3 gezeigt, konnten zwei Fragestellungen hinsichtlich der Steuerung des Auslegers formuliert werden. Aus diesen Fragestellungen können somit zwei mathematische Steuerungsansätze hergeleitet werden:

- Typ A: $f_1(x) \cong \Delta\alpha(U)$, mit $\Delta t = \text{const.}$,
- Typ B: $f_2(x) \cong \Delta\alpha(\Delta t)$, mit $U = \text{const.}$

Beim Steuerungsansatz Typ A wird das Zeitintervall konstant gehalten, während die Spannung entsprechend der Höhendifferenz variiert wird. Beim Steuerungsansatz Typ B wird die Spannung konstant gehalten und das Zeitintervall entsprechend der Höhendifferenz variiert.

Das Systemmodell für den Steuerungsansatz Typ A kann als Gleichung (5-12) formuliert werden.

$$f_1(x) = \Delta\alpha(U) = m \cdot x + d, \quad (5-12)$$

mit

- x : angelegter Spannungswert in Volt, Einheit [V],
 m : Übertragungsfaktor, Drehwinkel/Spannung, Einheit $\left[\frac{\text{gon}}{\text{V}}\right]$,
 d : Additionskonstante, Einheit [gon].

Das Systemmodell für den Steuerungsansatz Typ B kann als Gleichung (5-13) formuliert werden.

$$f_2(x) = \Delta\alpha(\Delta t) = m \cdot x + d, \quad (5-13)$$

mit

- x : Zeitintervall, Einheit [Δs],
 m : Übertragungsfaktor, Drehwinkel/Zeitintervall, Einheit $\left[\frac{\text{gon}}{\Delta s}\right]$,
 d : Additionskonstante, Einheit [gon].

Grundsätzlich sind beide Methoden realisierbar. Bei der Umsetzung ist die Entscheidung zu Gunsten des Typs B ausgefallen. Ausschlaggebend für diese Entscheidung war die Tatsache, dass die Maximalspannung als feste Spannungsgröße gewählt werden kann und somit die volle Leistung für die Aufwärts- und Abwärtsbewegung zur Verfügung steht. Das wiederum resultiert in maximalen Drehraten und hat einen positiven Effekt auf die Dauer der Auslegerbewegungen und impliziert folglich eine kürzere Belade- oder Entladesequenz. Aus diesem Grund wird die Kalibrierung ausschließlich für den Steuerungsansatz Typ B durchgeführt.

Wie Tabelle 5-11 entnommen werden kann, arbeitet der implementierte Regelkreis des Auslegers mit Höhen h bzw. Höhendifferenzen Δh . Der Drehwinkel $\Delta\alpha$ taucht im Regelkreisschema nicht explizit auf. Der Zusammenhang zwischen $\Delta\alpha$ und Δh ist jedoch durch die Gleichung (2-15), Kapitel 2.1.1 gegeben. Demnach impliziert eine Änderung von $\Delta\alpha$ eine Änderung der Höhe des Auslegers um Δh . Deshalb erfolgt die Aufstellung der Übertragungsfunktion zwischen Zeitintervall und Höhendifferenz. Die modifizierte Form des Systemmodells Typ B nimmt somit die folgende Form an:

$$f_2^*(x) = \Delta h(\Delta t) = m^* \cdot x^* + d^*, \quad (5-14)$$

mit

- x^* : Zeitintervall, Einheit [Δs],
 m^* : Übertragungsfaktor, Höhendifferenz/Zeitintervall, Einheit $\left[\frac{\text{m}}{\Delta s}\right]$,

d^* : Additionskonstante, Einheit [m].

Um das Gewicht des Auslegers und der daran befestigten Ladeschaufel zu berücksichtigen, müssen zwei Übertragungsfunktionen aufgestellt werden, eine für die Aufwärtsbewegung und eine für die Abwärtsbewegung.

Es ist zu beachten, dass die Übertragungsfunktion umgekehrt werden muss, um das Zeitintervall Δt aus der Regelabweichung $e(t)$ ableiten zu können. Somit ist es sinnvoll, einen linearen Verlauf der Übertragungsfunktion anzustreben.

Für die Durchführung der Kalibrierung werden für ein bestimmtes Zeitintervall Δt ein entsprechender Spannungswert U (0.5 Volt für Aufwärtsbewegungen, 2.7 Volt für Abwärtsbewegungen) am Auslegerantrieb angelegt. Ein Tachymeter (Leica TS 30) erfasst im kinematischen Modus gleichzeitig die Bewegung eines Prismas (GRZ101), das am Auslegerpunkt B (vgl. Abbildung 2-4) befestigt ist. Somit kann jedem Zeitintervall eine Höhendifferenz zugeordnet werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen den Verlauf der Höhendifferenz in Abhängigkeit vom Zeitintervall. Die Übertragungsfunktion in Abbildung 5-26 links repräsentiert den Verlauf der Aufwärtsbewegung. Die Übertragungsfunktion in Abbildung 5-26 rechts stellt den Verlauf der Abwärtsbewegung dar.

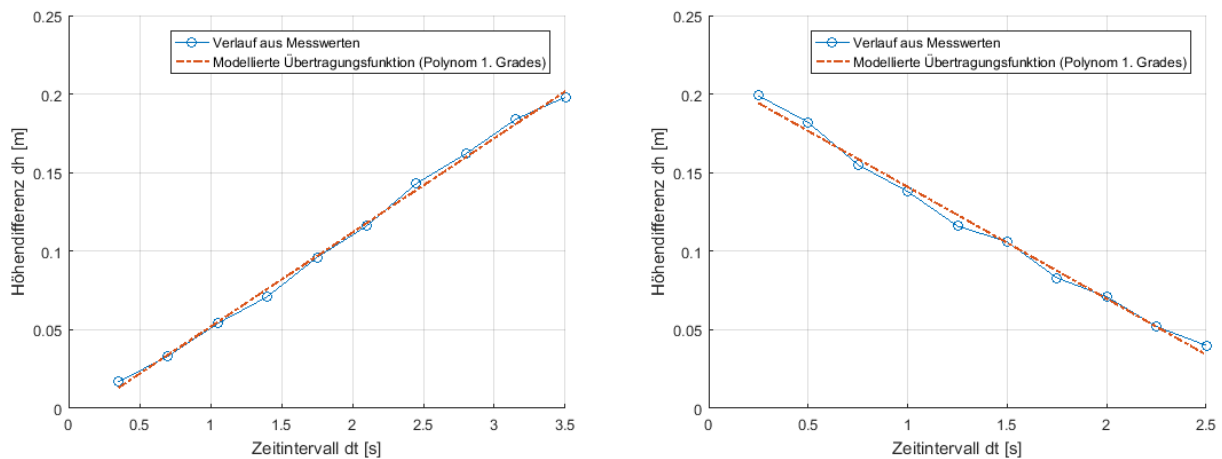


Abbildung 5-26: Kalibrierfunktion Ausleger; links: „Aufwärtsbewegung“; rechts: „Abwärtsbewegung“

Die Parameter der Übertragungsfunktion sind in der Tabellen 5-13 angegeben.

Tabelle 5-13: Parameter der Übertragungsfunktion

	Parameter	Wert
Aufwärtsbewegung	m^*	0.060 [m/ Δs]
	d^*	-0.008 [m]
Abwärtsbewegung	m^*	-0.071 [m/ Δs]
	d^*	0.212 [m]

Zur Bewertung der hergeleiteten Kalibrierfunktion für das Werkzeug sind im Folgenden die Qualitätskriterien der linearen Regression angegeben. Abbildung 5-27 stellt die Verläufe der Residuen der Kalibrierfunktionen für die Aufwärts- und Abwärtsbewegung dar.

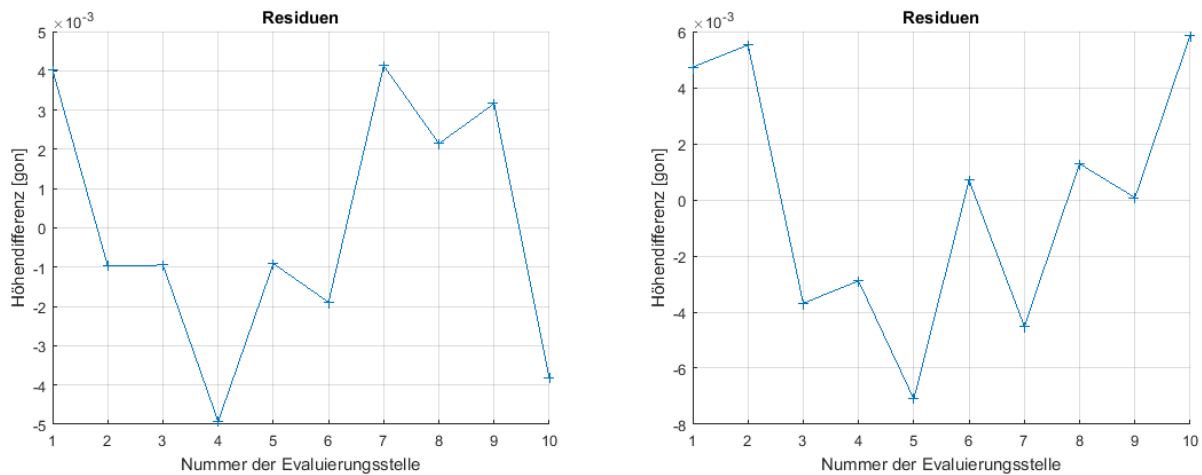


Abbildung 5-27: Residuen der Kalibrierfunktionen; links: Aufwärtsbewegung; rechts: Abwärtsbewegung

Die Standardabweichung für die Funktion der Aufwärtsbewegung beträgt $s_{auf} = 0.003 \text{ m}$. Die Standardabweichung für die Kalibrierfunktion der Abwärtsbewegung beträgt $s_{ab} = 0.004 \text{ m}$. Die Bestimmtheitsmaße liegen mit $R^2_{auf} = 0.9975 \approx 99.75 \%$ und $R^2_{ab} = 0.9931 \approx 99.31 \%$ beide auf sehr hohem Niveau.

Eine Kalibrierung der Ladeschaufel ist nicht notwendig, da diese im abgeschalteten sensorgestützten Automatikmodus nur zwei Maximalstellungen einnehmen darf: vollständig nach vorne gekippt oder vollständig nach hinten gekippt. Diese Maximalstellungen lassen sich bei der mathematischen Steuerung mit entsprechend langen Zeitintervallen, in denen die entsprechende Betriebsspannung angelegt wird, erreichen. Es ist zu beachten, dass bei gleichzeitigen Bewegungen des Auslegers und der Ladeschaufel, die Drehgeschwindigkeit des Auslegers um den Punkt A (vgl. Abbildung 2-4) abnimmt. Diese Variationen der Drehgeschwindigkeit sind deutlich im Verlauf der Kalibrierwerte zu sehen, wie man am Messwertsprung in Abbildung 5-28 erkennen kann. Der Messwertsprung ist ursächlich auf die gleichzeitige Aktivierung der Ausleger- und Ladeschaufelaktuatoren zurückzuführen. Aus diesem Grund ist für die Streckenabschnitte, bei denen die mathematische Steuerung eingesetzt wird, eine sequentielle Bewegungsabfolge von Ausleger und Schaufel implementiert.

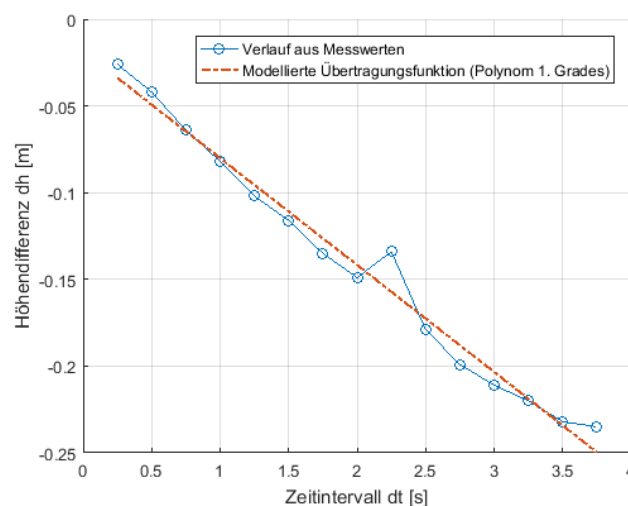


Abbildung 5-28: Exemplarischer Verlauf der Kalibrierfunktion mit Messwertsprüngen

6 Funktionsnachweis und Evaluation

In Verlauf dieses Kapitels soll für das implementierte System ein Funktionsnachweis durchgeführt werden, indem die Funktionen der Module anhand von operativen Vorgaben auf deren Einhaltung überprüft werden. Des Weiteren wird eine Evaluation durchgeführt, die eine qualitative Untersuchung der einzelnen Module vornimmt, um deren Leistungsfähigkeit zu bewerten.

Die Evaluation wird mit einem Laser Tracker API Radian™ des Herstellers Automated Precision Inc. durchgeführt. Dieses Instrument weist eine gleichwertige Winkelmessgenauigkeit und eine um ca. Faktor 250 für kinematische und Faktor 500 für statische Anwendungen höhere Streckenmessgenauigkeit als das Tachymeter auf (Automated Precision Inc., 2014a). Das Instrument wird als externes Messsystem eingesetzt. Durch die externe Konfiguration wird eine Abkoppelung von den systeminternen Funktionen und Regelkreisen erreicht. Die Messungen können somit als Kontrollmessungen angesehen und definiert werden. Abbildung 6-1 zeigt den eingesetzten Laser Tracker API Radian sowie die verwendeten Zielvorrichtungen.

Der Laser Tracker wird in zwei Konfigurationen betrieben. Für statische Kontrollmessungen kommt ein sphärischer Reflektor (SMR) (vgl. Abbildung 6-1, rechts) mit einer Zentriergenauigkeit von $\pm 2.5 \mu\text{m}$ als Ziel zum Einsatz (Automated Precision Inc. 2014a). Die kinematischen Kontrollmessungen erfolgen auf ein nachsteuerndes Prisma, das so genannte Active Target™ mit einer Zentriergenauigkeit von $\pm 3 \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 6-1, links). Das Active Target richtet sich, unabhängig von seiner Position, immer in Richtung des Laser Trackers aus. Somit ist bei kinematischen Anwendungen die Sichtverbindung zwischen dem Instrument und dem Ziel gewährleistet (Lerke und Schwieger 2015).



Abbildung 6-1: Links, Laser Tracker API Radian™ und Active Target™, rechts, Auswahl Sphärischer Reflektoren (SMR)

Die technischen Spezifikationen sind in Tabelle 6-1 und 6-2 zusammengestellt.

Tabelle 6-1: Technische Spezifikationen API Radian™ Laser Tracker (Automated Precision Inc. 2014a)

Winkelgenauigkeit	$3.5 \mu\text{m}/\text{m}$
Maximale Winkelgeschwindigkeit	$180^\circ/\text{s}$
Statische Streckenmessgenauigkeit (IFM)	$\pm 10 \mu\text{m}$ oder 5 ppm
Kinematische Streckenmessgenauigkeit (ADM)	10 ppm

Tabelle 6-2: Technische Spezifikationen Active Target™ (Automated Precision Inc. 2014b)

Zentriergenauigkeit	$\pm 3 \mu\text{m}$
Winkelgeschwindigkeit	$50^\circ/\text{s}$
Gewicht	0.9 kg

Im Folgenden werden die Module des Systems einzeln einem Funktionsnachweis unterzogen und evaluiert. Die Vorgehensweise ist dabei für jedes Modul individuell konzipiert. Die Beschreibung hierfür erfolgt in den jeweiligen Abschnitten.

Das Trajektorienmodul wird nicht gesondert überprüft, da dieses nur auf den Berechnungen der Koordinaten des Positionierungsmoduls basiert und mathematisch einfache Zusammenhänge nutzt. Die Funktionalität kann, ohne Beweisführung, als gegeben angenommen werden.

6.1 Funktionsnachweis und Evaluation des Positionierungsmoduls

Für den Funktionsnachweis des Positionierungsmoduls wird das Tachymeter und der Laser Tracker in einem gemeinsamen Punktnetz stationiert. Hierfür wird das Punktnetz des Messlabors des Instituts für Ingenieurodäsie an der Universität Stuttgart verwendet. Die vier verwendeten Punkte sind für Tachymetermessungen mit Leica Rundprismen GPH1P signalisiert. Die zu bestimmenden Ziele (Laderaupen, Ladegut und Entladestation) sind dabei räumlich beliebig verteilt (vgl. Abbildung 6-2, gelbe Objektmarkierungen 5, 6, 7). Nach dem Start des Positionierungsmoduls erfolgt automatisch die bildbasierte Positionsbestimmung der Ziele. Nachdem der Laser Tracker im Punktnetz des Messlabors frei stationiert wurde, wird mit diesem die Koordinatenbestimmung der Ziele vorgenommen. Die Signalisierung der Punkte wird mit einem SMR (vgl. Abbildung 6-1, rechts) realisiert. Dabei werden die Laser Tracker Messungen, aufgrund ihrer hohen Genauigkeit als Referenzmessungen definiert. Für die Evaluation werden nun die Koordinatensätze aus dem Positionierungsmodul und dem Laser Tracker miteinander verglichen. Zur Überprüfung wird die Koordinatenbestimmung mit dem Positionierungsmodul jeweils dreimal, in zwei unterschiedlichen räumlichen Konfigurationen, wiederholt. Die Koordinatenbestimmung mit dem Laser Tracker findet nur einmal statt. Die Überprüfung ist auf die Lagekoordinaten beschränkt, da die Höhenkomponente in diesem Kontext eine untergeordnete Rolle spielt und während des Betriebs relativ zum Arbeitspunkt des Werkzeug definiert wird.

Die Verknüpfung der Laser Tracker Messpunkte mit den aus der bildbasierten Positionsbestimmung bestimmten Punkten erfolgt über eine im gemessenen Bild angezeigte Markierung, die den Mittelpunkt des erfassten Objektbildes anzeigt. Dieser Markierungspunkt wird am realen Objekt mit dem SMR signalisiert und mit dem Laser Tracker angemessen.

Die Evaluation erfolgt nach dem folgenden allgemeinen Schema (Gruber 2001):

$$\begin{aligned}\varepsilon_i^{y,j} &= y_i^j - \mu^{y,j}, \\ \varepsilon_i^{x,j} &= x_i^j - \mu^{x,j},\end{aligned}\tag{6-1}$$

mit

$\varepsilon_i^{y,j}$:	Zufällige Abweichung der y -Koordinatenkomponente der i -ten Messung des j -ten Ziels,
$\varepsilon_i^{x,j}$:	Zufällige Abweichung der x -Koordinatenkomponente der i -ten Messung des j -ten Ziels,
y_i^j :	Beobachtungswert der y -Koordinatenkomponente der i -ten Messung des j -ten Ziels (aus Positionierungsmodul),
x_i^j :	Beobachtungswert der x -Koordinatenkomponente der i -ten Messung des j -ten Ziels (aus Positionierungsmodul),
$\mu^{y,j}$:	Erwartungswert der y -Koordinatenkomponente des j -ten Ziels (aus Laser Tracker Messung),
$\mu^{x,j}$:	Erwartungswert der x -Koordinatenkomponente des j -ten Ziels (aus Laser Tracker Messung).

Der Parameter j steht für den Zielindex, hier wahlweise für die Laderaupen, das Ladegut oder die Entladestation und ist somit zu $j = 1:l$, mit $l = 3$ definiert. Der Index i repräsentiert die Anzahl der Messungen auf ein Ziel und es gilt: $i = 1:m$, mit $m = 3$.

Anschließend werden die empirischen Standardabweichungen für die Koordinatenkomponenten nach (Gruber 2001) berechnet.

$$\begin{aligned} s_y^j &= \sqrt{\frac{\sum (\varepsilon_i^{y,j})^2}{m}}, \\ s_x^j &= \sqrt{\frac{\sum (\varepsilon_i^{x,j})^2}{m}}, \end{aligned} \quad (6-2)$$

mit

s_y^j : Standardabweichung der y -Koordinatenkomponente des j -ten Ziels ,

s_x^j : Standardabweichung der x -Koordinatenkomponente des j -ten Ziels,

m : Anzahl der Messwerte.

Die Gesamtstandardabweichung für die Lage der Ziele wird nach Gleichung (6-3) berechnet:

$$s_{Lage}^j = \sqrt{s_y^{j^2} + s_x^{j^2}}. \quad (6-3)$$

Nach der vollständigen Durchführung der Auswertung, wird die räumliche Verteilung der Ziele verändert und die Evaluation in einer neuen Konfiguration erneut durchgeführt.

Der Messaufbau ist in Abbildung 6-2 dargestellt.

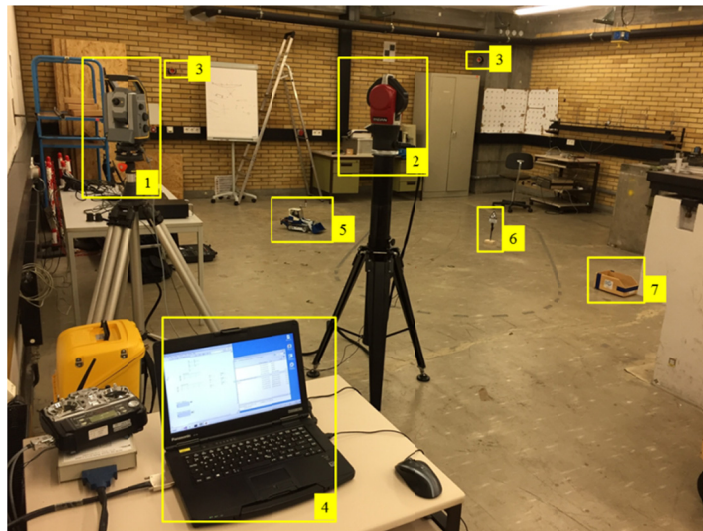


Abbildung 6-2: Messaufbau zur Evaluation des Positionierungsmoduls; 1: Trimble S7 Total Station; 2: Laser Tracker API RadianTM; 3: Leica GPH1P Rundprismen; 4: Messrechner; 5: Modellraupe; 6: Signalisierung des Ladegutes; 7: Entladestation

Ergebnisse

Die erfassten Koordinaten aus der bildbasierten Positionsbestimmung sowie den Laser Tracker Messungen sind im Anhang B1 angegeben. Entsprechend Gleichung (6-1) werden die zufälligen Abweichungen für jede Koordinatenkomponente berechnet. Diese sind im Anhang B2, Tabellen B2.1 und B2.2 angegeben.

Die empirischen Standardabweichungen der Koordinatenkomponenten, nach Gleichung (6-2), sind in den Tabellen 6-3 und 6-4 zusammengestellt.

Tabelle 6-3: Empirische Standardabweichungen der Koordinatenkomponenten, räumliche Konfiguration 1

Laderaupе		Ladegut		Entladestation	
s_y^{Raupe} = 0.0047 m	s_x^{Raupe} = 0.0049 m	$s_y^{Ladegut}$ = 0.0033 m	$s_x^{Ladegut}$ = 0.0030 m	$s_y^{Entladest.}$ = 0.0043 m	$s_x^{Entladest.}$ = 0.0037 m

Tabelle 6-4: Empirische Standardabweichungen der Koordinatenkomponenten, räumliche Konfiguration 2

Laderaupе		Ladegut		Entladestation	
s_y^{Raupe} = 0.0010 m	s_x^{Raupe} = 0.0076 m	$s_y^{Ladegut}$ = 0.0035 m	$s_x^{Ladegut}$ = 0.0061 m	$s_y^{Entladest.}$ = 0.0086 m	$s_x^{Entladest.}$ = 0.0039 m

Die empirischen Standardabweichungen der Lage der Stationen nach Gleichung (6-3) sind für unterschiedliche Konfigurationen in Tabelle 6-5 zusammengestellt.

Tabelle 6-5: Empirische Standardabweichungen der Lage

	Laderaupе	Ladegut	Entladestation
Koffiguration 1	$s_{Lage}^1 = 0.0068 \text{ m}$	$s_{Lage}^2 = 0.0044 \text{ m}$	$s_{Lage}^3 = 0.0057 \text{ m}$
Koffiguration 2	$s_{Lage}^1 = 0.0077 \text{ m}$	$s_{Lage}^2 = 0.0070 \text{ m}$	$s_{Lage}^3 = 0.0095 \text{ m}$

Die Mittel der Varianzen, sowie das Gesamtmittel sind in Tabelle 6-6 dargestellt.

Tabelle 6-6: Mittel der Varianzen, Gesamtmittel

$\bar{s}_y^{Raupe} = 0.0029 \text{ m}$	$\bar{s}_x^{Raupe} = 0.0063 \text{ m}$	$\bar{s}_{yx}^{Raupe} = 0.0070 \text{ m}$	$\bar{s}_{yx}^{Gesamt} = 0.0068 \text{ m}$
$\bar{s}_y^{Ladegut} = 0.0034 \text{ m}$	$\bar{s}_x^{Ladegut} = 0.0046 \text{ m}$	$\bar{s}_{yx}^{Ladegut} = 0.0057 \text{ m}$	
$\bar{s}_y^{Entladest.} = 0.0065 \text{ m}$	$\bar{s}_x^{Entladest.} = 0.0038 \text{ m}$	$\bar{s}_{yx}^{Entladest.} = 0.0076 \text{ m}$	

Zusammenfassend lässt sich anhand der erreichten Ergebnisse die Aussage treffen, dass die bildbasierte Positionsbestimmung in der Lage ist, Objektpositionen mit einer Genauigkeit von unter 1 Zentimeter zu bestimmen.

Weitere Beobachtungen und Erkenntnisse

Es wurde außerdem festgestellt, dass die Auflösung der im Tachymeter verbauten Kamera mit 2048 x 1536 Pixel niedrig ist. Da der Fokus der in der S7 verbauten Kamera außerdem fest eingestellt ist, entstehen bei Zielungen über große Distanzen unscharfe Bilder. Dies führt bei der Merkmalerkennung und Zuordnung zu Problemen. Entweder werden nicht genügend Merkmale erkannt oder die Zuordnung ist fehlerhaft. Die Fehlzuordnungen treten hierbei nach der Anwendung des MSAC Algorithmus auf. Im Folgenden sind Beispiele von Fehlzuordnungen dargestellt.

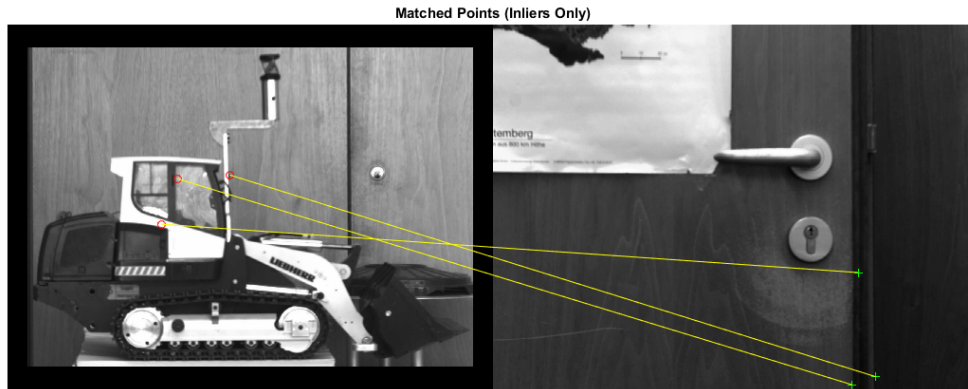


Abbildung 6-3: Fehlerhafte Zuordnung; Objekt Laderaube

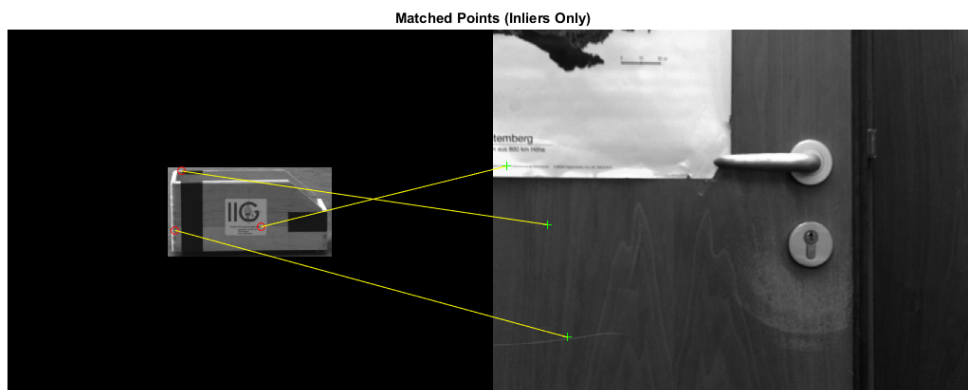


Abbildung 6-4: Fehlerhafte Zuordnung; Objekt Entladestation

Um die Objektbestimmung trotz fehlerhafter Zuordnungen verlässlich zu machen, ist eine Schwelle eingeführt, wonach mindestens 5 Merkmalsübereinstimmungen zwischen dem gemessenen Bild und dem Referenzbild vorliegen müssen, damit das Objekt entsprechend als richtig erkannt und klassifiziert wird. Nach der Einführung dieser Schwelle wurden keine Fehlzuordnungen mehr beobachtet.

Bei den vorgestellten Untersuchungsergebnissen muss berücksichtigt werden, dass diese unter Laborbedingungen erreicht wurden. Negativ wirkende Einflüsse aufgrund atmosphärischer Bedingungen oder wechselnder Lichtverhältnisse konnten somit minimal gehalten werden. Des Weiteren betrugen die Abstände zwischen dem bildverarbeitenden Tachymeter und den zu bestimmenden Objekten weniger als 7 Meter. Bei größeren Entfernungen ist zu erwarten, dass sich die Ergebnisse verschlechtern. Zum einen ist die Optik der Kamera, wie bereits erwähnt, auf einen festen Fokus eingestellt. Zum anderen nimmt mit der Entfernung die Genauigkeit der reflektorlosen Streckenmessung ab (vgl. Tabelle 4.1). Testreihen mit größeren Abständen konnten aufgrund der räumlichen Abmaße des Messlabors nicht durchgeführt werden. Auf Testreihen unter Außenbedingungen wurde verzichtet, da der Einsatz des Laser Trackers, der hauptsächlich für Innenanwendungen konzipiert ist, unter solchen Bedingungen aufgrund meteorologischer Einflüsse, wie z.B. Temperaturfehler, kritisch zu beurteilen wäre.

Im Rahmen dieses Abschnitts wurde die Funktionalität der bildbasierten Positionsbestimmung untersucht und evaluiert. Diese ist nach Abbildung 5-5 dem statischen Positionsbestimmungsmodus zugeordnet. Die zweite Funktionalität des Positionierungsmoduls ist die kinematische Positionsbestimmung. Die Untersuchung dieser Funktionalität erfolgt im folgenden Kapitel 6.2 im Zusammenhang mit der Untersuchung des Fahrmoduls.

6.2 Funktionsnachweis des Fahrmoduls und Evaluation der adaptiven Regelung

Für den Funktionsnachweis und die Evaluation des Fahrmoduls werden Fahrexperimente durchgeführt. Im Fokus der Evaluation steht die adaptive Regelung zur Lenkung (Querregelung) des Fahrzeugs.

Für die Fahrexperimente wird jedoch nicht die generierte Trajektorie aus dem Trajektorienmodul verwendet, da sich diese ausschließlich aus Geradenstücken zusammensetzt und somit eine zu einfache Geometrie beinhaltet. Für einen vollumfänglichen Funktionsnachweis wird diese Trajektorie somit nicht als geeignet eingestuft. Stattdessen wird auf die Trajektorien aus Beetz (2012a) zurückgegriffen. Es handelt sich dabei um exakt definierte Labortrajektorien (Abbildung 6-9), bestehend aus standardisierten Trassierungselementen Klothoide, Kreisbogen und Gerade. Um auch alternierende Einsatzbedingungen zu simulieren, für die die adaptive Regelung im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, werden zusätzlich Outdoor-Trajektorien angelegt und befahren. Diese bestehen aus willkürlich geformten Geometrien und einem sich ändernden Fahruntergrund, bestehend aus Schotter unterschiedlicher Größe und Form sowie Pflastersteinen (Abbildung 6-7).

Bei den Laborexperimenten wird das Fahr- und Lenkverhalten der Laderaupen zusätzlich mit einem Laser Tracker überprüft. Dabei kommt das nachsteuernde Prisma, das Active Target, zum Einsatz. Die Messkonfiguration wird entsprechend Lerke und Schwieger (2015) eingerichtet (Abbildung 6-6). Dafür werden das Active Target und das Tachymeterprisma entlang einer vertikalen Linie durch die Z'-Achse des Fahrzeugkoordinatensystems mittels eines Adapters montiert (Abbildung 6-5). Der Laser Tracker fungiert dabei als externes Messsystem und ermöglicht so unabhängige Kontrollmessungen.

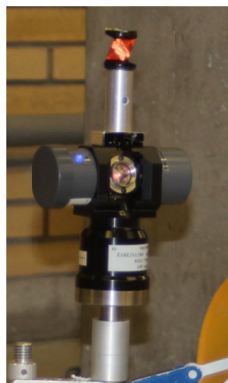


Abbildung 6-5: Montagekombination Tachymeterprisma und Active Target

Des Weiteren erlaubt diese Messkonfiguration die aus der Regelung hervorgegangenen Querabweichungen zur Trajektorie in die Größen „kinematische Messgenauigkeit des Tachymeters“ und „Regelgüte der adaptiven Regelung“ aufzuspalten (vgl. Lerke und Schwieger 2015). Bei diesen Experimenten erfolgt die Stationierung des Laser Trackers analog zu Kapitel 6.1. Die schematische Messanordnung ist in Abbildung 6-6 dargestellt.

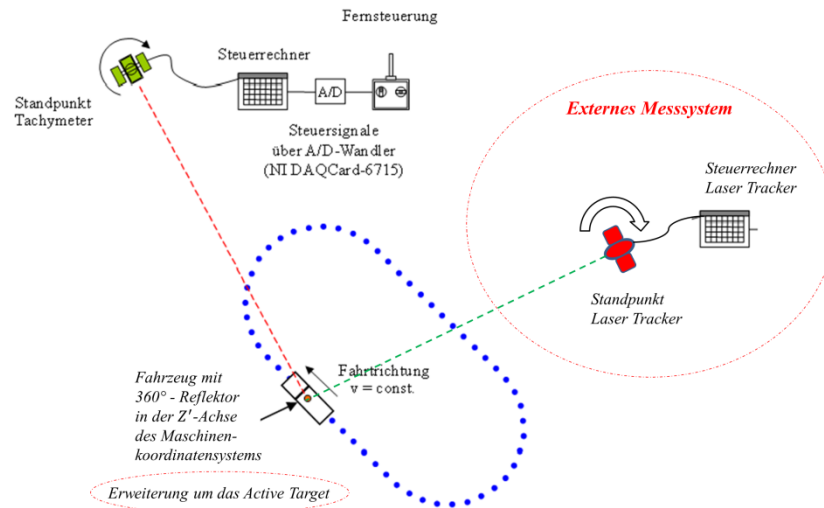


Abbildung 6-6: Messanordnung für Laborexperimente (Lerke und Schwieger 2015)

Aus den Messwerten des Laser Trackers und des Tachymeters sowie der Referenztrajektorie können nun durch unterschiedliche Kombinationen nach Beetz (2012b) unterschiedliche Qualitätskriterien aufgestellt werden. Demnach beinhaltet der RMS zwischen der mit dem Tachymeter erfassten Trajektorie und der Referenztrajektorie die quadratische Summe aus kinematischer Messgenauigkeit des Tachymeters und der Regelgüte der adaptiven Regelung. Der RMS zwischen der Referenztrajektorie und der Laser Tracker Trajektorie repräsentiert die Regelgüte der adaptiven Regelung. Der RMS zwischen der mit dem Tachymeter erfassten Trajektorie und der mit dem Laser Tracker erfassten Trajektorie repräsentiert die kinematische Messgenauigkeit des Tachymeters.

Die Laser Tracker Messungen sind auf Laborexperimente beschränkt, da sich das Active Target, wie bereits erwähnt, in kinematischen Messmodi aufgrund der Bau- und Funktionsweise für Außenanwendungen nur bedingt eignet. Somit entfällt die Auftrennung der Outdoor-Messungen in Regelgüte und Messgenauigkeit. Es werden nur die kombinierten Querabweichungen, bestehend aus kinematischer Messgenauigkeit und Regelgüte, berechnet und evaluiert.

Sowohl die Labortrajektorien wie auch die Outdoor-Trajektorien werden zusätzlich mit einem für Laboranwendungen perfekt eingestellten PID-Regler abgefahren. Dies soll die Leistungsfähigkeit der adaptiven Regelung zur konventionellen Regelung ins Verhältnis setzen. Die Parameter des PID-Reglers wurden dazu wie folgt eingestellt: $P = 200$, $T_n = 0.4 \text{ min}$, $T_v = 0.003 \text{ min}$ (Lerke und Schwieger 2018).

Bei allen Fahrexperimenten wird die Geschwindigkeit auf 0.035 m/s gesetzt und mittels Längsregelung gehalten.

Ergebnisse

Zunächst sind die Ergebnisse der Outdoor-Testfahrten vorgestellt. Insgesamt wurden dafür zwei unterschiedliche Trajektorien befahren. Abbildung 6-7 stellt diese dar.

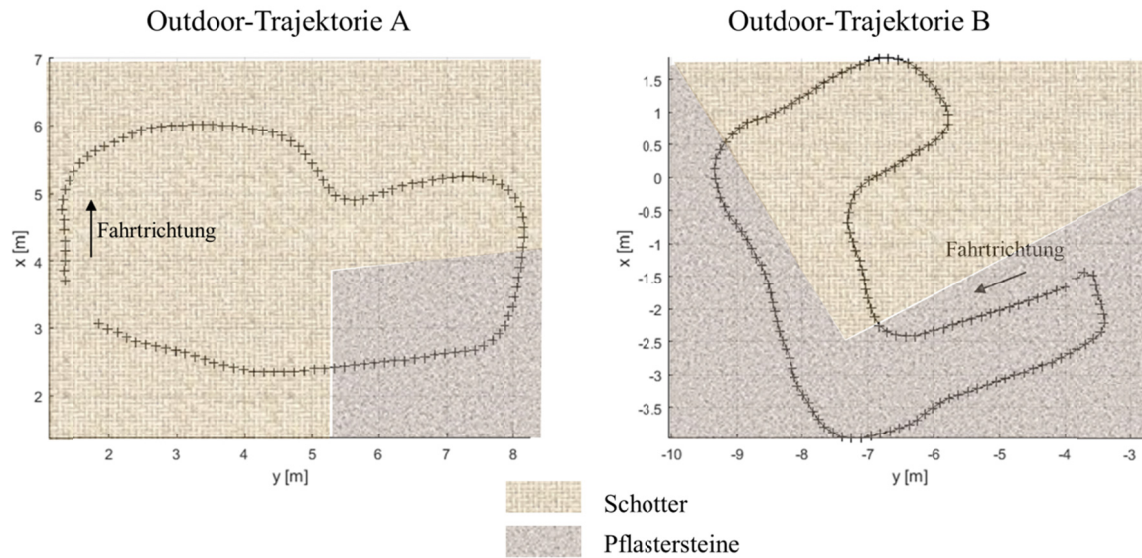


Abbildung 6-7: Outdoor-Trajektorien

Abbildung 6-8 zeigt den Verlauf der Querabweichungen zur Soll-Trajektorie. Die Querabweichungen beinhalten, entsprechend der Definition, die Messgenauigkeit des eingesetzten Tachymeters und die Regelgüte der adaptiven Regelung.

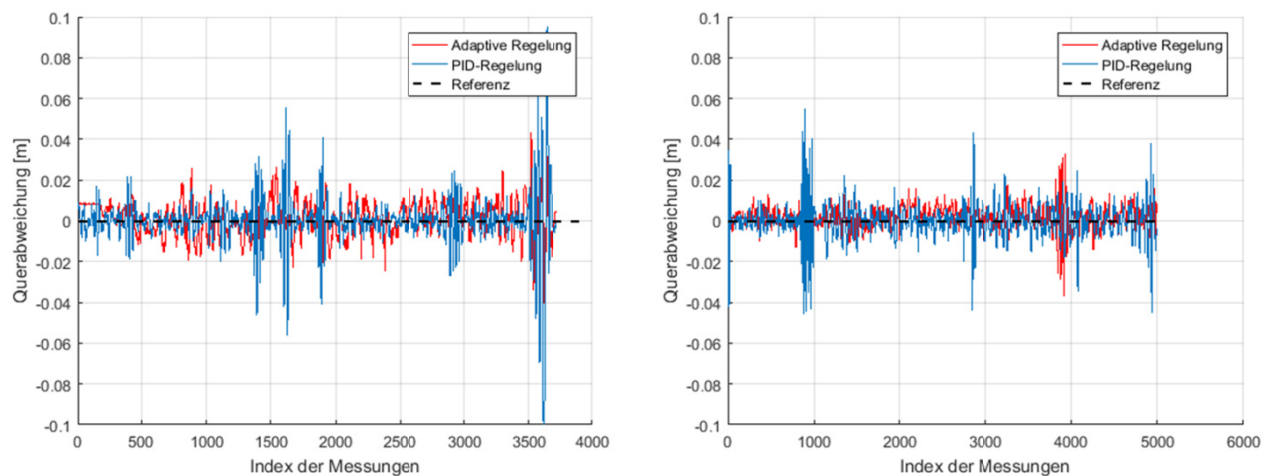


Abbildung 6-8: Verlauf der Querabweichungen der Outdoor-Tests; links: Outdoor-Trajektorie A; rechts: Outdoor-Trajektorie B

Die numerischen Ergebnisse sind in Tabelle 6-7 zusammengestellt.

Tabelle 6-7: RMS-Werte der Outdoor-Experimente

Trajektorie	Adaptiver Regler	PID-Regler
A	0.009 m	0.013 m
B	0.007 m	0.009 m

Die RMS-Werte beider Regler liegen in etwa auf gleichem Niveau. Jedoch zeigen die Tests eine leicht bessere Performance des adaptiven Reglers im Vergleich zum PID-Regler. Die Differenz beträgt 4 mm für die Trajektorie A und 2 mm für die Trajektorie B. Allerdings liegt die Differenz der beiden Regler für die Trajektorie B im Bereich der Messgenauigkeit des Tachymeters (vgl. Tabelle 4-1). Die Verläufe der Quer-

abweichungen in Abbildung 6-8 zeigen nach eingetretenen Störungen, verursacht durch plötzliche Fahrtrugründänderungen, größere Nachschwingungen beim PID-Regler als beim adaptiven Regler.

Die für die Laborexperimente verwendeten Trajektorien sind in Abbildung 6-9 dargestellt.

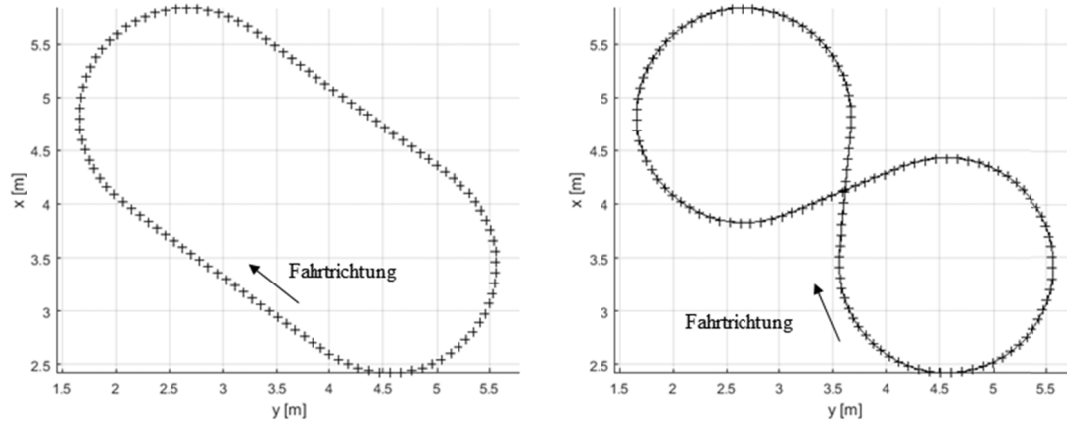


Abbildung 6-9: Labor-Trajektorien

Abbildung 6-10 zeigt den Verlauf der Querabweichungen zur Soll-Trajektorie für die beiden Labortrajektorien.

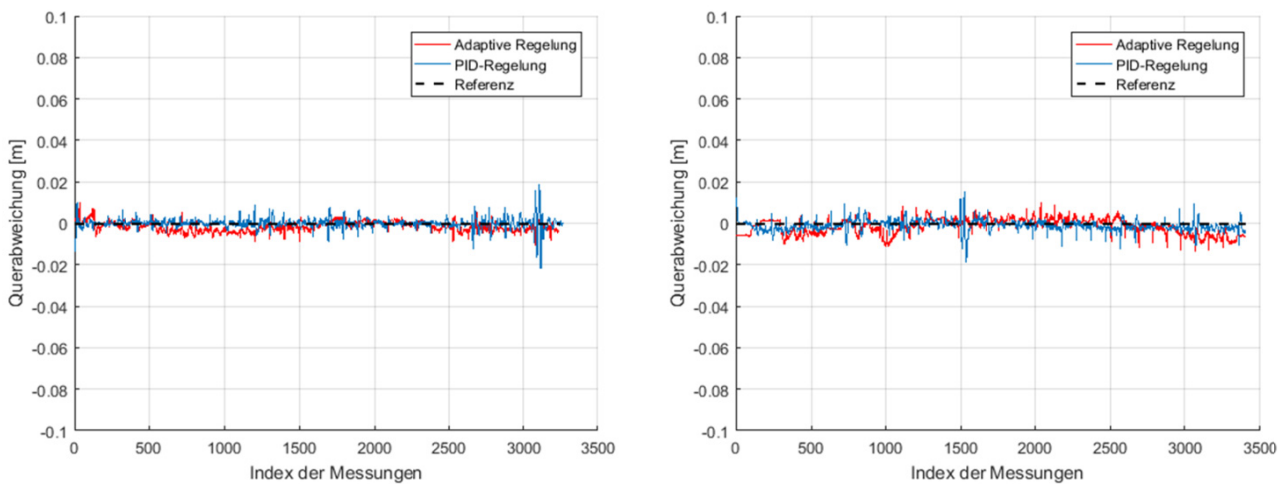


Abbildung 6-10: Verlauf der Querabweichungen der Labor-Tests; links: Oval; rechts: Acht

Die numerischen Ergebnisse sind in Tabelle 6-8 zusammengestellt.

Tabelle 6-8: RMS-Werte der Laborexperimente

Trajektorie	Adaptiver Regler	PID-Regler
Oval	0.004 m	0.003 m
Acht	0.004 m	0.003 m

Auch bei den Laborexperimenten liegen die RMS-Werte beider Regler in etwa auf gleichem Niveau. Hier zeigen die Tests allerdings eine leicht bessere Performance des PID-Reglers. Die Differenz beträgt für das Oval und die Acht 1 mm. Die Differenzen liegen ebenfalls unterhalb der Messgenauigkeit des eingesetzten Tachymeters (vgl. Tabelle 4-1). Das bessere Abschneiden des PID-Reglers kann darauf zurückgeführt werden, dass die Regelparameter über mehrere Jahre für das Labor genutzt und immer wieder iterativ nachge-

stellt (verbessert) wurden, sodass diese als optimal gewählt angesehen werden können. Dagegen muss sich der adaptive Regler bei jeder Geometrieänderung neu einstellen. Ferner spielt auch die Homogenität des PVC-Bodens eine Rolle, bei der eine Adaptivität des Reglers nicht erforderlich ist.

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Laser Tracker Evaluierung präsentiert. Die beiden Trajektorien, Oval und Acht, wurden jeweils dreimal durchfahren. Die unterschiedlichen „Schwärzungen“ in den Abbildungen 6-11, 6-12 und 6-13 sind auf die unterschiedliche Anzahl der zum Vergleich herangezogenen Punkte zurückzuführen. So entspricht beim Verlauf der Querabweichungen die Anzahl der Vergleiche der Anzahl der Tachymetermessungen. Diese liegt bei der eingestellten Abtastrate von 20 Hz und einer Geschwindigkeit von 0.035 m/s, je nach Trajektorie, zwischen 8000 und 9000 Punkten. Diese Anzahl ist ebenfalls für den Verlauf der Messgenauigkeiten gültig. Für den Verlauf der Regelgüte entspricht die Anzahl der Vergleiche der Anzahl der Punkte der Referenztrajektorie. Die Punktzahl ist für das Oval 110 und für die Acht 129.

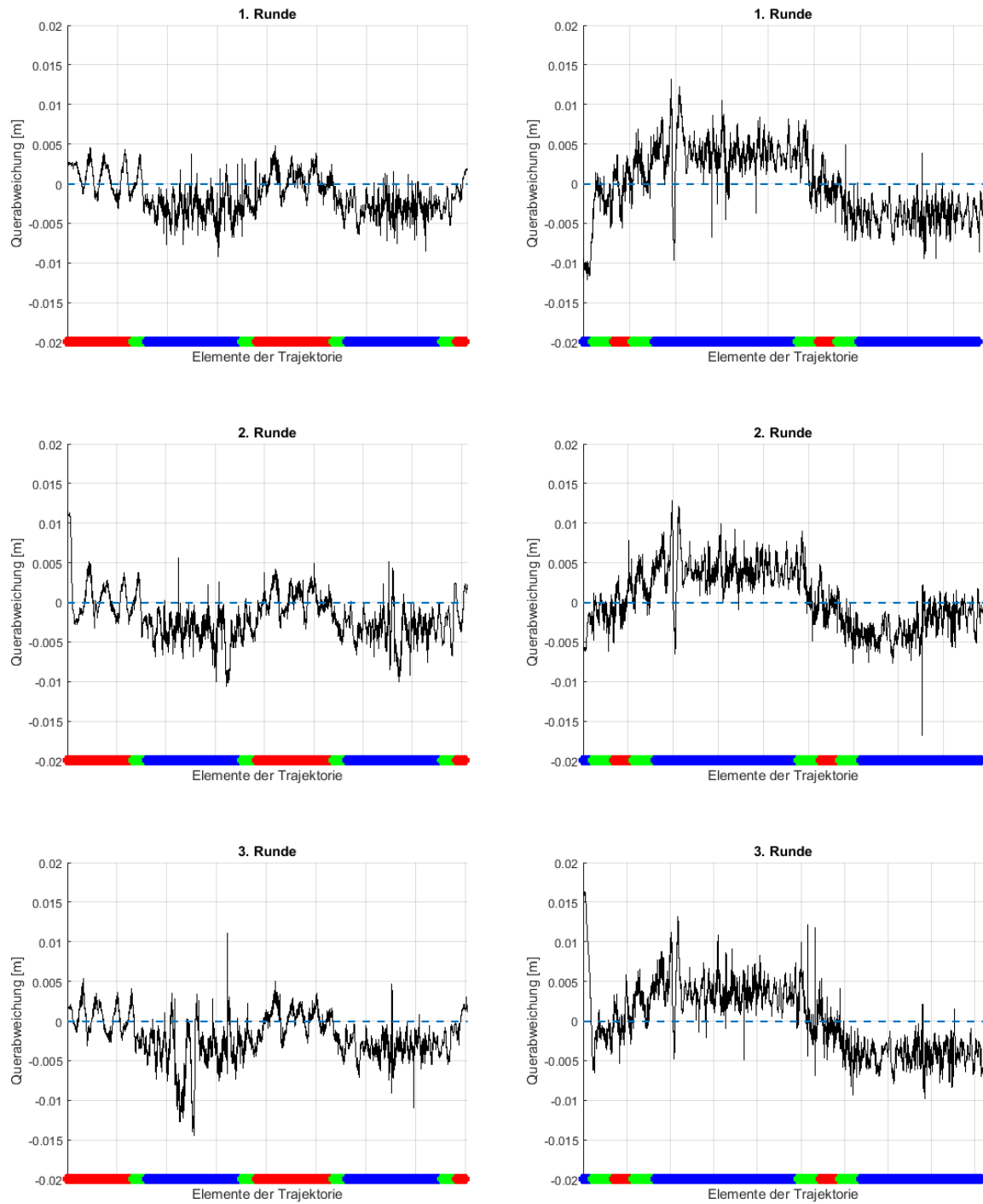


Abbildung 6-11: Ergebnisse der Laser-Tracker-Evaluierung; Verlauf der Querabweichungen; links: Oval; rechts: Acht; Trajektorienelemente: rot–Gerade, grün–Klothoide, blau–Kreisbogen

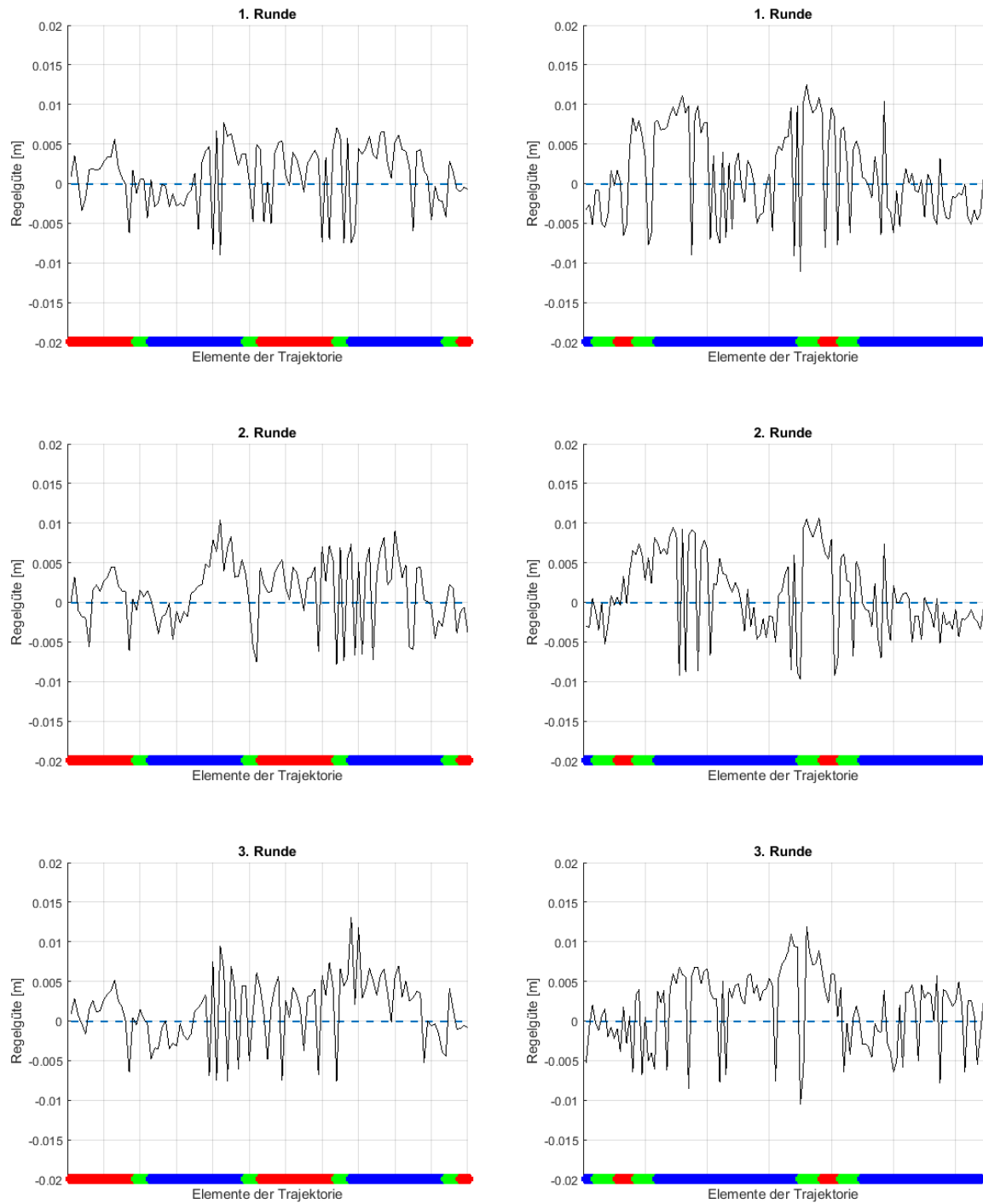


Abbildung 6-12: Ergebnisse der Laser-Tracker-Evaluierung; Verlauf der Regelgüte; links: Oval; rechts: Acht; Trajektorienelemente: rot–Gerade, grün–Klothoide, blau–Kreisbogen

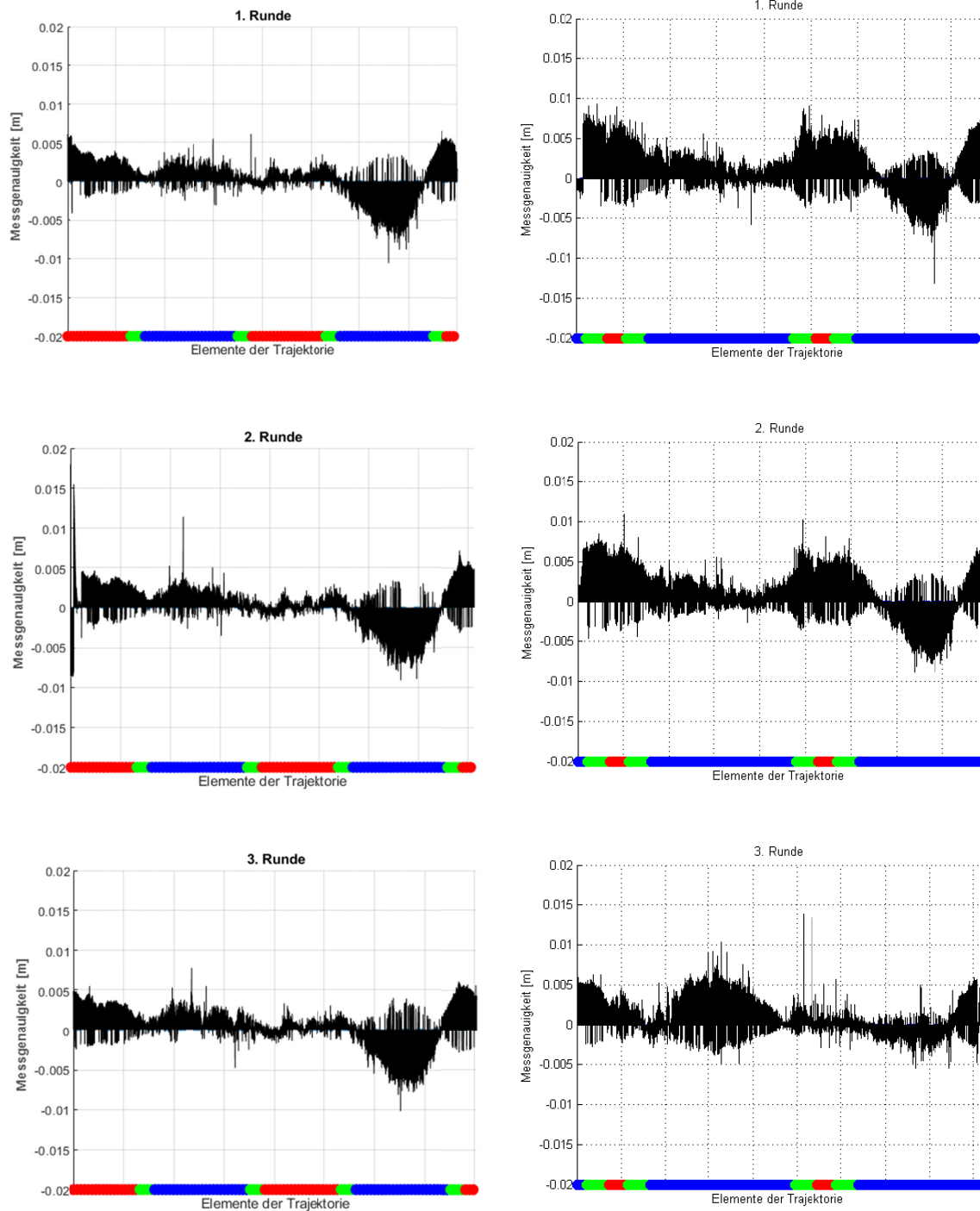


Abbildung 6-13: Ergebnisse der Laser-Tracker-Evaluierung; Verlauf der Messgenauigkeit; links: Oval; rechts: Acht; Trajektorienelemente: rot–Gerade, grün–Klothoide, blau–Kreisbogen

Tabelle 6-9: RMS-Werte der Qualitätsparameter

Qualitätsparameter	Runde	Oval [m]	Acht [m]
Querabweichung	1	0.003	0.004
	2	0.003	0.004
	3	0.003	0.004
Regelgüte	1	0.003	0.004
	2	0.004	0.004
	3	0.004	0.003
Messgenauigkeit	1	0.002	0.003
	2	0.002	0.003
	3	0.002	0.002

Beim Verlauf der Querabweichungen (Abbildungen 6-11) sind deutlich die Durchfahrten der Kreisbogen zu erkennen. An diesen Streckenabschnitten liegen die Graphen sowohl für das Oval wie auch für die Acht bei Rechtskurven jeweils unterhalb und bei Linkskurven jeweils oberhalb der Referenzlinie (hellblau gestrichelt). Dieses Verhalten kann auf die Funktionsweise des eingesetzten selbsteinstellenden Reglers zurückgeführt werden. Die sich während der Durchfahrt des Kreisbogens permanent ändernde Führungsgröße w hat einen Einfluss auf die Konvergenz der Systemidentifikationsparameter r_i und s_i . Es ist anzunehmen, dass die Konvergenzzeit für die Parameterschätzung etwas länger ist als die Zeit, in der sich die Führungsgröße ändert. Somit wird der Systemzustand nicht optimal identifiziert. Das hat folglich einen negativen Effekt auf die auf der Systemidentifikation basierenden Berechnungen der Regelparameter, bzw. auf die Berechnungen der Stellgröße u . Entsprechend fallen die RMS-Werte in Tabelle 6-9 für die Acht etwas größer aus, da dort die Kreisbögen einen größeren Anteil an der Gesamttrajektorie aufweisen. Wie in Lerke und Schwieriger (2018) gezeigt werden konnte, ist der PID-Regler nicht von dieser Eigenschaft betroffen. Für beide Trajektorien liegen die RMS-Werte zwischen 3 und 4 mm.

In den Verläufen der Graphen für die Regelgüte können für beide Trajektorien leichte Systematiken im Bereich der Übergänge von Gerade zur Kloothoide festgestellt werden (Abbildung 6-12). Des Weiteren ist bei der Acht im Bereich des Linksbogens eine Systematik erkennbar. Für beide Trajektorien liegen die RMS Werte bei 3 bis 4 mm.

Bei der Messgenauigkeit (Abbildung 6-13) liegen für beide Trajektorien Systematiken vor. So ist beim Oval im Bereich des zweiten Bogens ein Ausschlag zu erkennen. Ebenso liegt ein Ausschlag im Bereich des zweiten Bogens bei der Acht vor. Dies lässt sich damit erklären, dass sich der Tachymeterstandpunkt nah (ca. 3 Meter) an diesem Bereich befunden hat und somit erhöhte Winkelgeschwindigkeiten des Tachymeters bei den Messungen in diesen Bereichen vorlagen. Da bei Tachymetern Winkelmessungen deutlich schneller ausgeführt werden als Streckenmessungen, werden die Messwerte geräteintern auf einen bestimmten, gemeinsamen Zeitpunkt interpoliert (Kleemaier 2018). Daraus lässt sich folgern, dass mit erhöhter Winkelgeschwindigkeit der Interpolationsfehler anwächst. Im Ergebnis liegt die kinematische Messgenauigkeit des Tachymeters zwischen 2 und 3 mm. Dieser Wert ist besser als die Herstellerangabe von 4 mm + 2 ppm (Tabelle 4-1). Eventuell spielen hier die Laborbedingungen eine Rolle, die gleichbleibende und optimale atmosphärische Eigenschaften gewährleisten. Des Weiteren wurden im Labor, auf Grund der räumlichen Ausdehnung, nur relativ kurze Distanzen zum Objekt (bis maximal 7 Meter) gemessen, was ebenfalls zur Reduktion der Fehler beiträgt. Ein weiterer Aspekt können die relativ niedrigen Geschwindigkeiten der Laderaupen sein, sodass insgesamt gesehen niedrige Winkelgeschwindigkeiten am Tachymeter auftreten.

Nach der aufgestellten Definition sollte die Querabweichung die quadratische Summe aus Regelgüte und Messgenauigkeit enthalten. Bei der Betrachtung der Werte aus Tabelle 6-9 ist jedoch festzustellen, dass dies nicht zutrifft. Es ist somit anzunehmen, dass weitere systematische Einflüsse vorliegen. Auf die Untersuchung dieser Einflüsse wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

6.3 Funktionsnachweis des Werkzeugmoduls

Der Funktionsnachweis des Werkzeugmoduls erfolgt auf zwei Arten. Zum einen lässt sich einfach beobachten, ob die automatisierten Werkzeugoperationen ihrem Zweck dienen und das Werkzeug in der Lage ist, das Ladegut aufzunehmen und dieses an der Entladestation abzuladen. Zum anderen kann die durch Regelung realisierte Nachführung des Werkzeugs entlang des Referenzhöhenprofils überprüft werden. Dies kann in der y-z-Ebene des Koordinatensystems erfolgen.

Im Fokus der Untersuchung steht der in Kapitel 2.1.1 definierte Arbeitspunkt der Ladeschaufel (Abbildung 2-3). Deren Position ist abhängig von der Position der Raupe, der Stellung des Auslegers sowie der Stellung der Ladeschaufel (vgl. Kap. 2.1.1, Abbildung 2-4).

Die Vorgabe ist, dass das Referenzhöhenprofil der 3D-Trajektorie, generiert durch das Trajektorienmodul, vom Arbeitspunkt eingenommen werden soll. Jedoch soll dabei, aus besagten Gründen, die Lage der Schaufel berücksichtigt werden. Dies erschwert den Aufbau eines einfachen Test- und Evaluationskonzepts. Aus diesem Grund wird eine reduzierte Testkonfiguration umgesetzt, bei der nur die Höhe des Auslegers, realisiert als Höhe des Drehpunktes der Schaufel (Abbildung 2-4, Punkt B), betrachtet wird. Dies erfordert jedoch eine horizontale Stabilisierung der Ladeschaufel. Um die Kipplage der Schaufel im horizontalen Zustand zu halten, wird ein mit einem Neigungsmesser gestützter geschlossener Regelkreis, entsprechend Tabelle 5-12, genutzt. Dieser soll einen Lagezustand gewährleisten, bei dem die Unterkante der Ladeschaufel parallel zum Fahruntergrund gehalten wird (Abbildung 6-14).

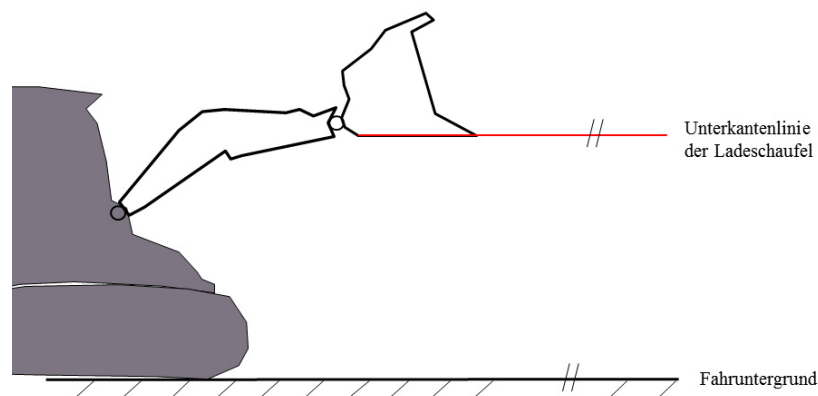


Abbildung 6-14: Skizze des Lagezustands der Schaufel relativ zum Fahruntergrund

Ein zweiter Neigungsmesser wird am Ausleger angebracht. Dieser kontrolliert den Neigungswinkel des Auslegers. Das System errechnet daraus die Höhe des Punktes B (vordere Spitze des Auslegers). Diese Höhe wird im geschlossenen Regelkreis für den Ausleger, entsprechend Tabelle 5-11, verarbeitet. Dabei wird die gemessene Höhe mit dem Referenzhöhenprofil verglichen und daraus die Regelabweichung errechnet. Aus der Regelabweichung wird die entsprechende Stellgröße für die Hydraulik des Auslegers abgeleitet, die die Regelabweichung durch Hebe- und Senkbewegungen minimiert. Die Sensorikausstattung entspricht dabei dem Konfigurationstyp 3, Tabelle 2-3, Kapitel 2.3.

Für die Evaluation wird eine Referenztrajektorie aus dem Trajektorienmodul genutzt. Für die Kontrollmessung wird erneut der Laser Tracker eingesetzt, der seitlich der Referenztrajektorie aufgestellt wird. Die Tracker Messung erfolgt auf ein SMR, da das Ziel nur aus einer Richtung angemessen wird.

Das Werkzeug stellt die Referenzhöhe ein. Der Laser Tracker erfasst diese in einer unabhängigen Messung. Anschließend kann ein Vergleich zwischen der Referenzhöhe und der eingestellten, mit dem Tracker erfassten, Höhe durchgeführt werden. Für den Vergleich werden die Differenzen zwischen den eingestellten Höhen und den Referenzhöhen berechnet. Diese Differenzen stellen Regelabweichungen dar. Für die Regelab-

weichungen wird der RMS-Wert berechnet, der die Regelgüte des Auslegers (und die Messgenauigkeit des Neigungssensors) repräsentiert. Da es sich beim Werkzeug um einen hydraulischen Kreislauf handelt, enthalten die RMS-Werte zusätzlich noch die Stellgenauigkeit der Hydraulik.

Entsprechend Tabelle 5-11, Kapitel 5.5, werden der Ausleger mit einem P-Regler und die Ladeschaufel entsprechend Tabelle 5-12 mit einem 3-Punkt-Regler angesteuert. Der proportionale Parameter für den Regelkreis des Auslegers wurde mit $P = 5$ gewählt. Der 3-Punkt-Regler des Regelkreises der Ladeschaufel besitzt die folgenden Parameter:

Fall 1: $-1^\circ \leq e(t) \leq 1^\circ \Rightarrow u(t) = 2.06 \text{ Volt},$

Fall 2: $e(t) < -1^\circ \Rightarrow u(t) = 0.5 \text{ Volt},$

Fall 3: $e(t) > 1^\circ \Rightarrow u(t) = 2.7 \text{ Volt}.$

Abbildung 6-15 zeigt den Messaufbau.

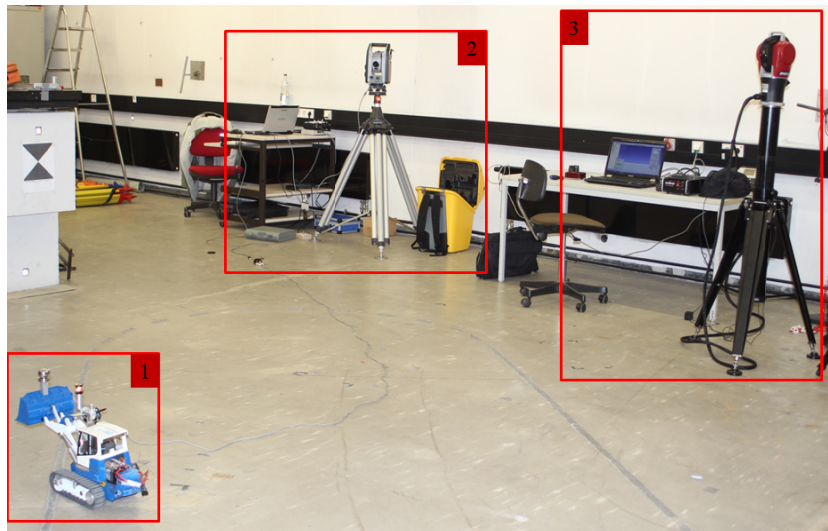


Abbildung 6-15: Messaufbau zur Evaluation des Werkzeugmoduls; 1: Laderaupenmodell, 2: Trimble S7 Tachymeter mit Steuerrechner; 3: Laser Tracker API RadianTM mit Steuerrechner;

Die Anordnung der Reflektoren für den Laser Tracker und das Tachymeter am Fahrzeug sowie die Anordnung der Sensorik ist in Abbildung 6-16 dargestellt.

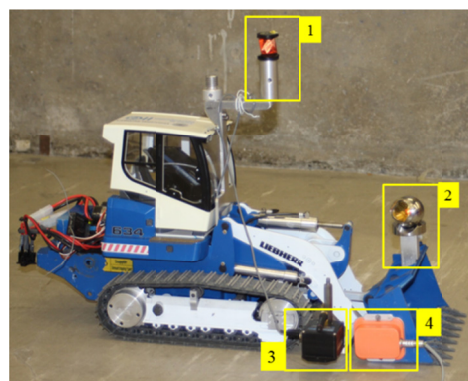


Abbildung 6-16: Anordnung der Reflektoren und der Sensorik am Laderaupenmodell; 1: Leica GRZ101 Tachymeterprisma; 2: Laser Tracker SMR 1.5“; 3: IMU Microstrain 3DM-GX2; 4: IMU MTi X-Sens

Über die Messung auf das GRZ101 Prisma wird, unter Verwendung des in Kapitel 2.2.1 vorgestellten geometrischen Modells (vgl. Abbildung 2-4, Kapitel 2.2.1) die Höhe des Arbeitspunktes an der Ladeschaufel berechnet. Die Microstrain 3DM-GX2 IMU dient dazu, den Anstellwinkel des Auslegers zu ermitteln, der wiederum zur Höhenberechnung entsprechend Gleichung (2-15), verwendet wird. Die MTi X-Sens IMU gewährleistet den geforderten Lagezustand der Ladeschaufel, entsprechend Abbildung 6-14. Die unabhängigen Laser Tracker Messungen erfolgen auf das SMR.

Ergebnisse

Insgesamt wurden zwei Messfahrten durchgeführt. Der Verlauf der eingeregelter Höhenprofile ist den Abbildungen 6-17 und 6-18 zu entnehmen.

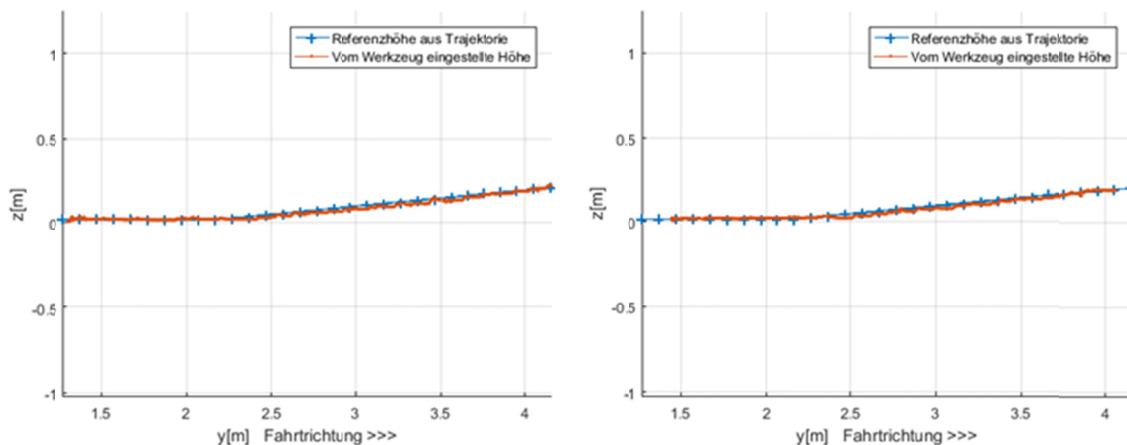


Abbildung 6-17: Darstellung der gefahrenen Werkzeughöhenprofile; links: Fahrt 1; rechts Fahrt 2

Die Profile zeigen, dass die Werkzeugsteuerung das vorgegebene Höhenprofil einstellen und halten kann. Zur genaueren Analyse werden die Profile in Abbildung 6-18 überhöht dargestellt.

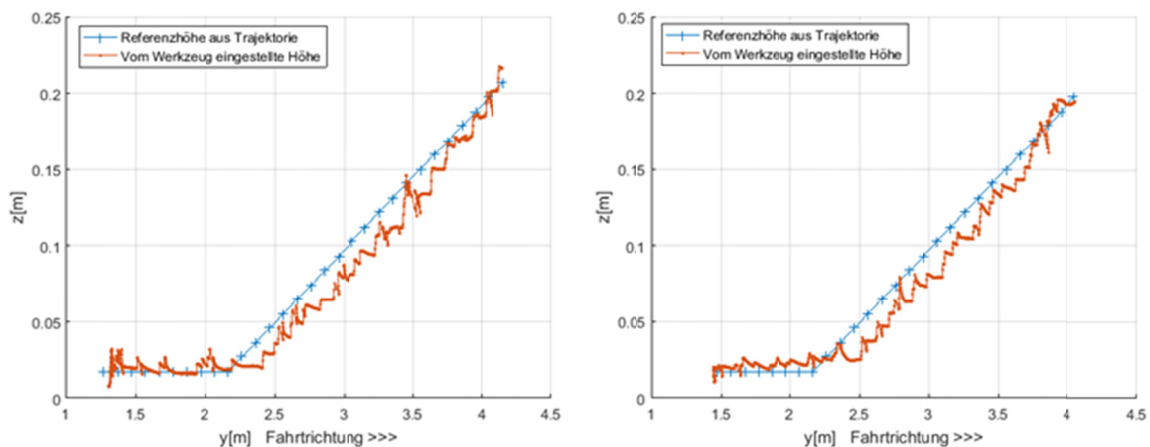


Abbildung 6-18: Überhöhte Darstellung der Werkzeughöhenprofile; links: Fahrt 1; rechts Fahrt 2

Aus der überhöhten Darstellung geht hervor, dass deutliche Abweichungen zwischen dem Referenzhöhenprofil und den eingestellten Höhen vorliegen. Der verzögerte und „zackenhafte“ Verlauf ist auf die Regel- und Einstelldynamik der Hydraulik zurückzuführen. Diese reagiert, entsprechend den dargestellten Profilen und den gemachten Beobachtungen, während der Tests träge auf die Regelabweichungen. Eine mögliche Erklärung liegt darin, dass der Hydraulikkreislauf des Werkzeugs eine Latenzzeit aufweist, bis der benötigte Druck in den Leitungen vollständig aufgebaut ist. Das führt zu Reaktionsverzögerungen.

Ein weiterer Aspekt ist die Regelung mittels eines P-Reglers. Wie aus Kapitel 3.1 hervorgeht, kann der P-Regler eine Störung niemals vollständig ausregeln. Somit ergeben sich typische Über- und Unterregelungen, was den „zackenhaften“ Verlauf erklärt. Hier wäre eventuell über den Einsatz eines PI-Reglers nachzudenken. Eine andere Möglichkeit wäre es, den P Parameter kleiner zu wählen, was jedoch zu einer weiteren Verzögerung bei der Reaktionszeit führt, da der Parameter als Verstärkungsfaktor die Wirkung der Stellgröße entsprechend reduzieren und folglich auch die Leistung der Aktuatoren verringern würde. Der Effekt der Lageeinstellung der Schaufel ist in den Profilen nicht explizit sichtbar.

Für quantitative Aussagen des Einstellverhaltens werden die Abweichungen der beiden Höhenprofile zum Sollprofil untersucht. Die Höhenabweichungen sind hier als Regelabweichungen definiert. Zur Berechnung der Abweichungen werden die minimalen Abstände der aus der hochfrequenten Laser Tracker Messung generierten Punkte und den Punkten des Referenzprofils berechnet. Diese sind in Abbildung 6-19 dargestellt.

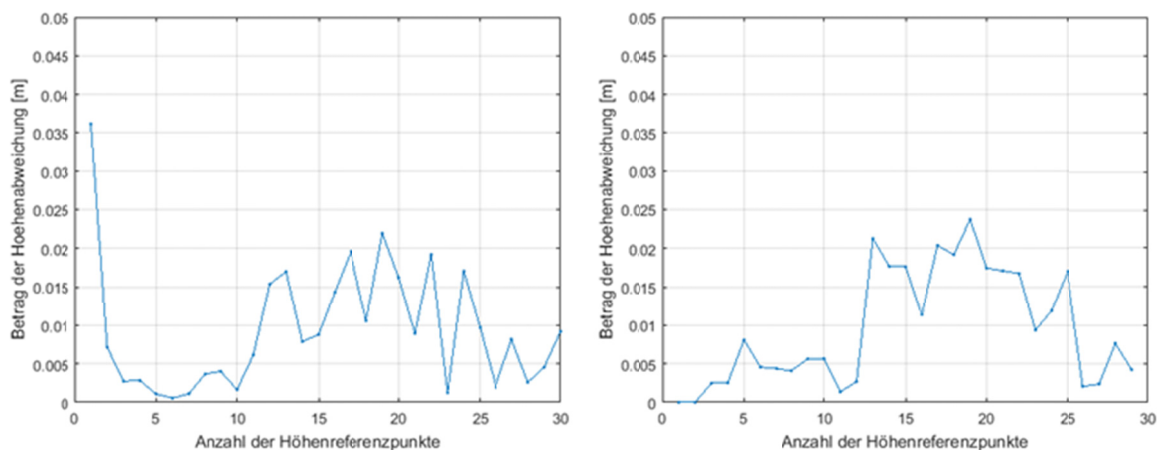


Abbildung 6-19: Beträge der Höhenabweichungen/Regelabweichungen; links: Fahrt 1; rechts Fahrt 2

Für die Regelabweichungen werden nun entsprechend Gleichung (3-8) die RMS-Werte berechnet. Diese sind wie folgt:

Fahrt 1: $RMS = 0.012 \text{ m}$,

Fahrt 2: $RMS = 0.013 \text{ m}$.

Um der Trägheit der Hydraulik entgegenzuwirken und die verzögerte Reaktionszeit zu verkürzen, wird die Idee des vorgezogenen Berechnungspunktes (VBP), vorgestellt in Beetz und Schwieger (2008), aufgegriffen. Die Methode wird für den Einsatz am Werkzeug so angepasst, dass die einzustellenden Profilhöhen auf einen zukünftigen Zeitpunkt ($t + 1$) berechnet werden. Die Einführung des VBP ermöglicht es, eine schnellere Reduzierung der Regelabweichung zu erreichen (Beetz und Schwieger 2008). Zur Überprüfung der Wirkungsweise erfolgte eine weitere Testfahrt, deren Ergebnis in Abbildung 6-20 dargestellt ist.

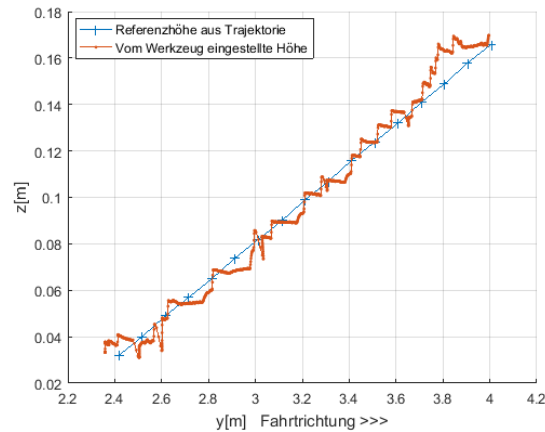


Abbildung 6-20: Überhöhte Darstellung des Werkzeughöhenprofils mit eingeführtem VBP

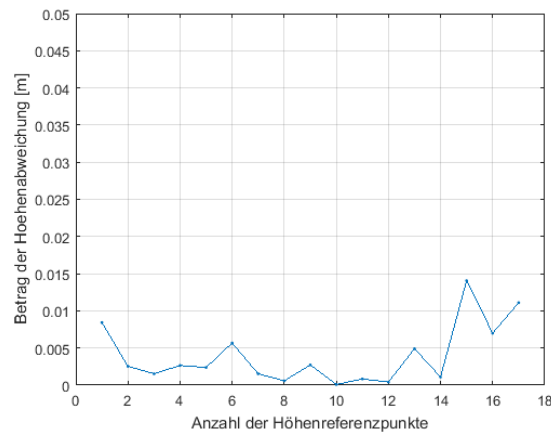


Abbildung 6-21: Beträge der Höhenabweichungen/Regelabweichungen mit eingeführtem VBP

Aus den Abbildungen 6-20 und 6-21 geht hervor, dass nach der Einführung des VBP eine deutliche Verbesserung der Werkzeugperformance erreicht wird. Das vom Werkzeug eingestellte Höhenprofil liegt sehr viel näher am Referenzhöhenprofil. Folglich sind die dargestellten Regelabweichungen ebenfalls deutlich kleiner. Für den RMS der Regelabweichung mit VBP ergibt sich dann der folgende Wert:

Fahrt 3: $RMS = 0.006 \text{ m}$.

Im Vergleich zu den zwei Fahrten ohne den Einsatz des VBP ist somit eine Steigerung der Regelgüte um Faktor zwei erreicht worden.

Die RMS-Werte enthalten die Messgenauigkeit der IMU Microstrain 3DM-GX2, die kinematische Messgenauigkeit des Trimble S7 Tachymeters, die dynamische Stellgenauigkeit der Hydraulik sowie die Regelgüte des mit einem P-Reglers ausgestatteten Regelkreises. Wobei hier anzunehmen ist, dass der größte Anteil am RMS auf die Hydraulik entfällt.

6.4 Beurteilung des Gesamtsystems

Die Beurteilung des Gesamtsystems kann in zwei Teilaspekte unterteilt werden. Diese Einteilung kann nach sensorspezifischen und fahrzeugspezifischen Systemfehlern vorgenommen werden. Die sensorspezifischen Fehler werden im Wesentlichen durch das Positionierungsmodul und die dort integrierte bildbasierte Positionsbestimmung der Laderaupen, des Ladeguts und der Entladestation verursacht. Des Weiteren spielen die für

die Werkzeugsteuerung eingesetzten Neigungsmesser eine Rolle. Die fahrzeugspezifischen Fehler betreffen die für die Steuerung wichtigen Fahr- und Werkzeugantriebe. Tabelle 6-10 nimmt eine allgemeine Einteilung der in dieser Arbeit auftretenden Systemfehler. Die erste Gruppe enthält alle Fehler, die durch Sensoren bedingt werden. Die zweite Gruppe beinhaltet die fahrzeugspezifischen Fehler.

Tabelle 6-10: Einteilung der Fehlerquellen in sensorspezifische und fahrzeugspezifische Systemfehler

Sensorspezifische Systemfehler	Freie Stationierung
	Bildbasierte statische Positionsbestimmung
	Kinematische Positionsbestimmung
	Genauigkeit des Neigungsmessers Ausleger
	Genauigkeit des Neigungsmessers Schaufel
Fahrzeugspezifische Systemfehler	Regelgüte Adaptive Regelung
	Einstellgenauigkeit der Werkzeughydraulik

Die aufgeführten Fehlerquellen sollen im Folgenden erläutert werden. Zunächst ergeben sich Genauigkeits-einbußen aus der Stationierung. Die Qualität der bildbasierten Positionsbestimmung der Laderaupen und der Lade- und Entladestationen hat einen Einfluss auf das Trajektorienmodul, da aus den bestimmten Koordinatensätzen die Trajektorie generiert wird. Diese Fehler in der Trajektorie wirken sich unmittelbar auf das Fahrmodul aus, da dieses gewährleistet, dass das Fahrzeug die Trajektorie abfährt. Hier kommen zusätzliche Einflüsse aus den Regelkreisen mit der Regelgüte der adaptiven Regelung sowie der kinematischen Messgenauigkeit des Tachymeters hinzu. Das Werkzeug ist fest mit dem Fahrzeug verbunden und erbt somit die Positionsqualität. Hinzu kommen Einstellfehler der hydraulischen Antriebe für den Ausleger und die Ladeschaufel sowie die Messgenauigkeiten der verbauten Sensorik. Letztlich liegen jedoch für alle Fehlereinflüsse Werte in Form von Standardabweichungen vor. Diese können der in den Kapiteln 6.1 bis 6.3 durchgeführten Systemevaluierung entnommen werden. Dabei können zwar nicht alle genannten Einflussgrößen einzeln quantifiziert werden, jedoch liegen Werte für die Kombinationen der Einzelgrößen vor. Das statische Positionierungsmodul vereint die Freie Stationierung und bildbasierte Positionsbestimmung. Aus der Evaluierung nach Kapitel 6.1 ergibt sich die Standardabweichung zu $s_{PM} = 0.007 \text{ m}$. Das Fahrmodul vereint die Einflüsse aus der freien Stationierung, der Trajektorienberechnung, der Regelgüte und der kinematischen Messgenauigkeit des Tachymeters. Die Standardabweichung bzw. der RMS-Wert wurde in Kapitel 6.2 mit $s_{FM}^{Lab} = 0.004 \text{ m}$ für das Labor und mit $s_{FM}^{Out} = 0.008 \text{ m}$ für die Outdoor-Fahrten berechnet. Das Werkzeugmodul vereint die Einflüsse aus der Positionsgenauigkeit der Trägermaschine, der Genauigkeit der Neigungssensoren und der Einstellgenauigkeit der Hydraulik. In Kapitel 6.3 wurde dafür, unter Nutzung des vorgezogenen Berechnungspunktes, eine Standardabweichung bzw. der RMS-Wert mit $s_{WM} = 0.006 \text{ m}$ ermittelt.

Zur Beurteilung des Gesamtsystems beim Betrieb unter Laborbedingungen kann damit eine Gesamtstandardabweichung des Systems, repräsentiert durch Gleichung (6-4), aufgestellt werden.

$$s_{system}^{Lab} = \sqrt{s_{PM}^2 + s_{FM}^{Lab}^2 + s_{WM}^2}. \quad (6-4)$$

Für den Outdoor-Betrieb wird die Gesamtstandardabweichung entsprechend Gleichung (6-5) berechnet.

$$s_{system}^{Out} = \sqrt{s_{PM}^2 + s_{FM}^{Out}^2 + s_{WM}^2}. \quad (6-5)$$

Demnach ergeben sich für die Gesamtstandardabweichungen unter Laborbedingungen und Outdoor-Bedingungen folgenden Werte:

Laborbetrieb: $s_{system}^{Lab} = 0.010 \text{ m} = 10 \text{ mm}$,

Outdoor-Betrieb: $s_{system}^{Out} = 0.012 \text{ m} = 12 \text{ mm}$.

Diese Werte sind hinsichtlich des Vergleichs mit Tabelle 1-1 als akzeptabel anzusehen. Dort werden für Laderaupen und Radlader Lagegenauigkeiten von 20 bis 50 mm und Höhengenaugigkeiten von 20 bis 30 mm gefordert.

6.5 Vergleich zwischen Raupenmodell und realer Laderaupe mittels lokaler Sensitivitätsanalyse

In diesem Abschnitt wird die in Kapitel 2.2.2 vorgestellte Methode der lokalen Sensitivitätsanalyse angewendet, um einen Vergleich zwischen dem in dieser Arbeit eingesetzten Laderaupenmodell im Massstab 1:14 und einer realen Laderaupe durchzuführen. Es soll damit geklärt werden, inwieweit sich die am Modell gewonnenen Erkenntnisse auf die reale Welt übertragen lassen.



Abbildung 6-22: links: Modell LR 634, Massstab 1:14; rechts: reale Maschine LR 636 (Liebherr 2019)

Es werden vier typische Szenarien für die Stellung des Werkzeugs während des Beladevorgangs untersucht. Hierzu werden jeweils die Maximalstellungen, dargestellt in Abbildung 6-23, analysiert.

Für das weitere Vorgehen werden numerische Werte für die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen, geometrischen Parameter benötigt. Die Geometrie des Modells wurde mit dem Laser Tracker API Radian erfasst und daraus ein CAD-Modell generiert, sodass die Geometrie mit hoher Genauigkeit vorliegt. Die Geometrie der realen Laderaupe wurde dem technischen Datenblatt „Liebherr LR 624 LR634“ (Liebherr 2019) entnommen. Des Weiteren werden für die Parameter Genauigkeitsangaben benötigt. Zunächst werden die Größen dy und dz als fehlerfrei angenommen. Diese sind auch nicht Gegenstand der Sensitivitätsanalyse. Für die beweglichen Bauteile $L1$ und $L2$ sind die Genauigkeiten aus den Lasertrackermessungen angenommen. Die weiteren Genauigkeitsangaben basieren auf Annahmen bzw. auf Herstellerangaben. Zusätzlich wurden weitere Einschränkungen vorgenommen. So soll das Prisma bei beiden Untersuchungsobjekten im geometrischen Maschinenschwerpunkt montiert sein. Dies soll, analog zu Kapitel 2.1.2 (kinematisches Bewegungsmodell ohne Schlupf), die Nutzung des gleichen Bezugspunktes für die Untersuchung gewährleisten. Die Maschinen stehen auf einer horizontalen, ebenen Fläche, sodass die Winkel Φ und Ψ Null sind. Tabelle 6-11 gibt einen Überblick über die verwendeten numerischen Werte für die Geometrieparameter.

Es wird angenommen, dass das Modell und die reale Maschine mit gleicher Sensorik zur Steuerung des Werkzeugs ausgestattet sind. Aus diesem Grund ist die Spalte 3 der Tabelle 6-11 für beide Untersuchungsobjekte gültig.

Tabelle 6-11: Geometrieparameter und ihre Varianzen für Modell und reale Maschine

Parameter		Genauigkeit
Modellraupe Liebherr LR 634	Reale Maschine Liebherr LR 634	
$dy = 0.020 \text{ m}$	$dy = 0.160 \text{ m}$	$\sigma_{dy} = 0 \text{ m}$
$dz = -0.162 \text{ m}$	$dz = -1.460 \text{ m}$	$\sigma_{dz} = 0 \text{ m}$
$L1 = 0.213 \text{ m}$	$L1 = 2.980 \text{ m}$	$\sigma_{L1} = 0.001 \text{ m}$
$L2 = 0.081 \text{ m}$	$L2 = 1.134 \text{ m}$	$\sigma_{L2} = 0.001 \text{ m}$
θ_1 variabel	θ_1 variabel	$\sigma_{\theta_1} = 0.05^\circ$
θ_2 variabel	θ_2 variabel	$\sigma_{\theta_2} = 0.05^\circ$
h^S	h^S	$\sigma_{h^S} = 0.002 \text{ m}$
$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\sigma_\theta = 0.05^\circ$
$\phi = 0^\circ$	$\phi = 0^\circ$	$\sigma_\phi = 0.05^\circ$
$\psi = 0^\circ$	$\psi = 0^\circ$	$\sigma_\psi = 0.05^\circ$
$(Y_m, X_m, Z_m)^T$ beliebig	$(Y_m, X_m, Z_m)^T$ beliebig	$\sigma_{Y_m, X_m, Z_m} = 0.003 \text{ m}$

Im Folgenden müssen nun Werkzeugstellungen, die für entsprechende Szenarien repräsentativ sind, festgelegt werden. Die vier Stellungen sind in Abbildung 6-23 dargestellt. Die Einteilung erfolgt nach den Stellungen: Nullstellung, Ladestellung A, Ladestellung B und Entladestellung.

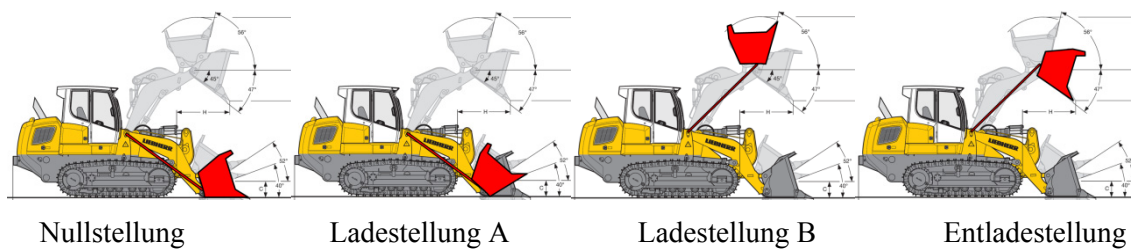


Abbildung 6-23: Werkzeugstellungen/Szenarien für die lokale Sensitivitätsanalyse; schematische Darstellung der relevanten Ausleger- und Ladeschaufelstellungen in Rot (Vorlage: Liebherr 2019)

Die numerischen Werte der hier gewählten Eingangsgrößen für die vier Szenarien können Tabelle 6-12 entnommen werden.

Tabelle 6-12: Eingangsgrößen für die Szenarien 1 bis 4 (variable Werte sind für das Modell in Blau, für die reale Maschine in Grün gekennzeichnet)

Szenario	Model	Reale Maschine
1. Nullstellung	$\theta_1 = -36^\circ$	$\theta_1 = -36^\circ$
	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$
	$h^S = 0 \text{ m}$	$h^S = 0 \text{ m}$
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$
	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 0^\circ$
	$\psi = 0^\circ$	$\psi = 0^\circ$
	$Y_m = 0 \text{ m}$	$Y_m = 0 \text{ m}$
	$X_m = 0 \text{ m}$	$X_m = 0 \text{ m}$
	$Z_m = 0.360 \text{ m}$	$Z_m = 3.335 \text{ m}$
2. Ladestellung A	$\theta_1 = -36^\circ$	$\theta_1 = -36^\circ$
	$\theta_2 = 40^\circ$	$\theta_2 = 40^\circ$
	$h^S = 0 \text{ m}$	$h^S = 0 \text{ m}$
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$
	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 0^\circ$
	$\psi = 0^\circ$	$\psi = 0^\circ$
	$Y_m = 0 \text{ m}$	$Y_m = 0 \text{ m}$
	$X_m = 0 \text{ m}$	$X_m = 0 \text{ m}$
	$Z_m = 0.360 \text{ m}$	$Z_m = 3.335 \text{ m}$
3. Ladestellung B	$\theta_1 = 36^\circ$	$\theta_1 = 36^\circ$
	$\theta_2 = 40^\circ$	$\theta_2 = 40^\circ$
	$h^S = 0.289 \text{ m}$	$h^S = 4.053 \text{ m}$
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$
	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 0^\circ$
	$\psi = 0^\circ$	$\psi = 0^\circ$
	$Y_m = 0 \text{ m}$	$Y_m = 0 \text{ m}$
	$X_m = 0 \text{ m}$	$X_m = 0 \text{ m}$
	$Z_m = 0.360 \text{ m}$	$Z_m = 3.335 \text{ m}$
4. Entladestellung	$\theta_1 = 36^\circ$	$\theta_1 = 36^\circ$
	$\theta_2 = -47^\circ$	$\theta_2 = -47^\circ$
	$h^S = 0.289 \text{ m}$	$h^S = 4.053 \text{ m}$
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$
	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 0^\circ$
	$\psi = 0^\circ$	$\psi = 0^\circ$
	$Y_m = 0 \text{ m}$	$Y_m = 0 \text{ m}$
	$X_m = 0 \text{ m}$	$X_m = 0 \text{ m}$
	$Z_m = 0.360 \text{ m}$	$Z_m = 3.335 \text{ m}$

Im Folgenden sind die Ergebnisse der durchgeführten lokalen Sensitivitätsanalyse zusammengestellt. Die Ergebnisse zeigen die erreichte Arbeitspunktgenauigkeit des Modells und der realen Maschine. Die prozentualen Anteile der Eingangsgrößen sind graphisch als Balkendiagramme dargestellt. Die vollständigen Ergebnisse für die vier untersuchten Szenarien sind im Anhang A1, Tabellen A1.1 bis A1.4 zu finden.

Tabelle 6-13: A-posteriori-Genauigkeit des Arbeitspunktes/Gesamtvarianz der Koordinatenkomponenten des Arbeitspunktes für das Szenario „Nullstellung“

Modell	Reale Maschine
$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.004 \text{ m}$
$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.004 \text{ m}$
$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.006 \text{ m}$

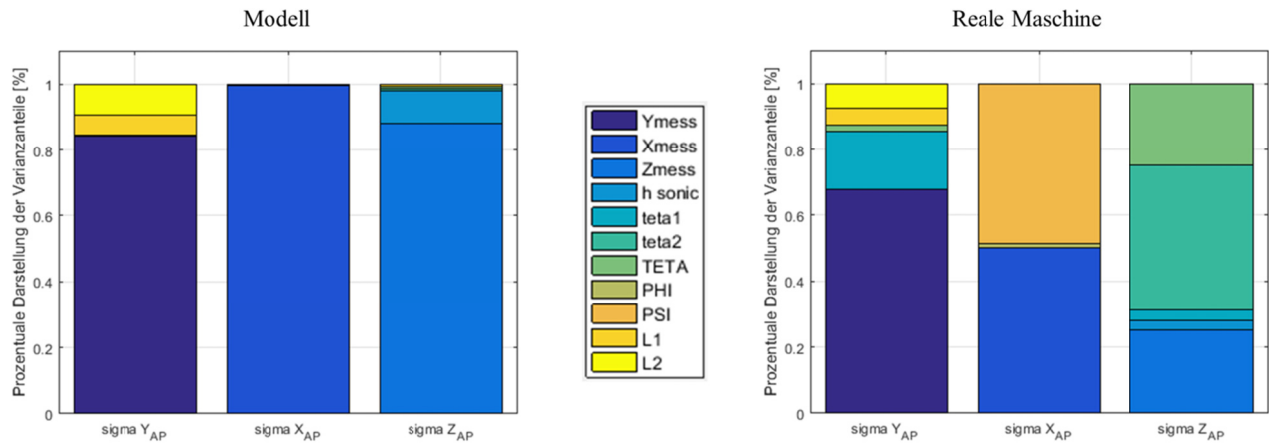


Abbildung 6-24: Ergebnis der lokalen Sensitivitätsanalyse für Szenario 1 „Nullstellung“

Tabelle 6-14: A-posteriori-Genauigkeit des Arbeitspunktes/Gesamtvarianz der Koordinatenkomponenten des Arbeitspunktes für das Szenario „Ladestellung A“

Modell	Reale Maschine
$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.005 \text{ m}$
$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.004 \text{ m}$
$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.005 \text{ m}$

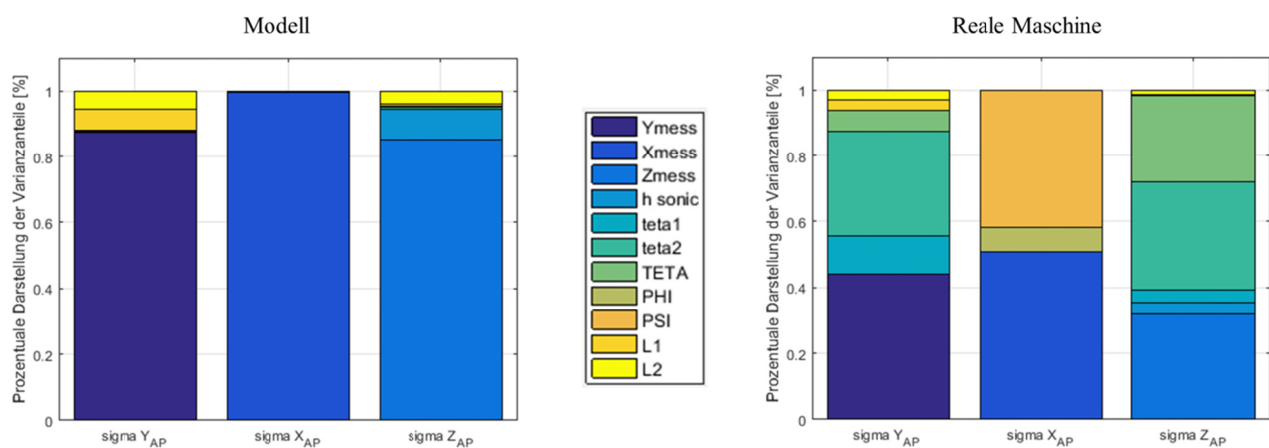


Abbildung 6-25: Ergebnis der lokalen Sensitivitätsanalyse für Szenario 2 „Ladestellung A“

Tabelle 6-15: A-posteriori-Genauigkeit des Arbeitspunktes/Gesamtvarianz der Koordinatenkomponenten des Arbeitspunktes für das Szenario „Ladestellung B“

Modell	Reale Maschine
$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$,	$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.006 \text{ m}$
$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.006 \text{ m}$
$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.005 \text{ m}$

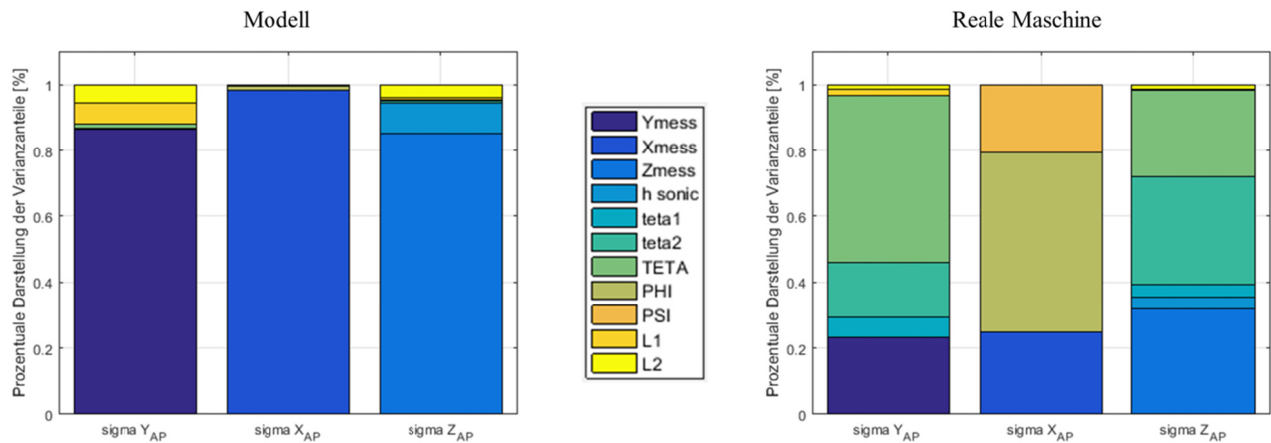


Abbildung 6-26: Ergebnis der lokalen Sensitivitätsanalyse für Szenario 3 „Ladestellung B“

Tabelle 6-16: A-posteriori-Genauigkeit des Arbeitspunktes/Gesamtvarianz der Koordinatenkomponenten des Arbeitspunktes für das Szenario „Entladestellung“

Modell	Reale Maschine
$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$,	$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.006 \text{ m}$
$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.005 \text{ m}$
$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.005 \text{ m}$

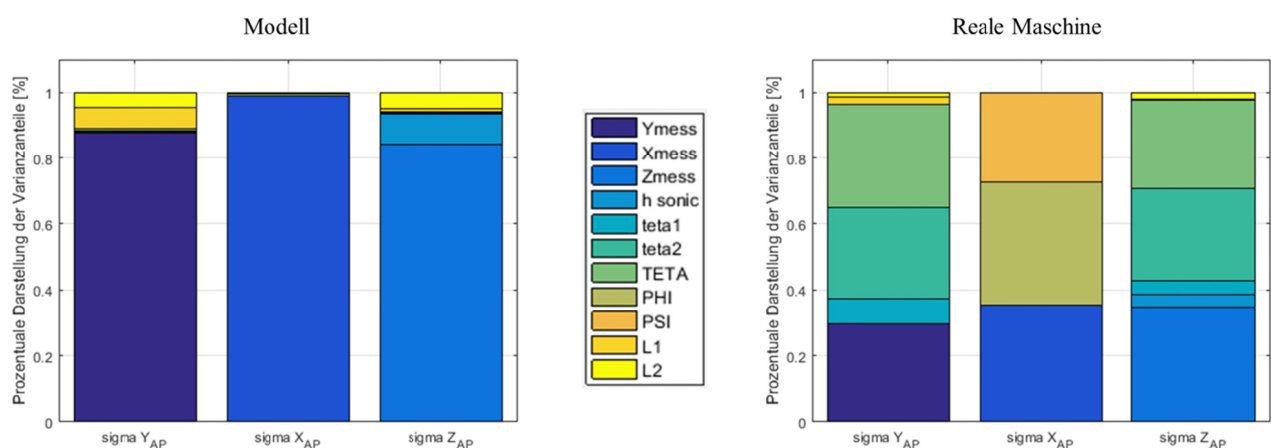


Abbildung 6-27: Ergebnis der lokalen Sensitivitätsanalyse für Szenario 4 „Entladestellung“

Analyse

Bei der Betrachtung der Ergebnisse in den Abbildungen 6-24 bis 6-27 und der Anhänge A1.1, A1.2, A1.3 und A1.4 lässt sich generell feststellen, dass beim Modell die Tachymetermessungen mit den Eingangsgrößen Y_m , X_m und Z_m die größten Anteile an den Gesamtvarianzen $\sigma_{Y_{AP}}^g$, $\sigma_{X_{AP}}^g$ und $\sigma_{Z_{AP}}^g$ haben. Die Drehwinkelmessungen spielen bei der Zusammensetzung in den Komponenten Y , X und Z eine untergeordnete Rolle. Ebenso verhält es sich mit den Lagewinkeln θ , ϕ und ψ . In der Höhenkomponente Z ist der Einfluss der Schallsensormessung deutlich erkennbar. Die Einflüsse der beweglichen Bauteile $L1$ und $L2$ wirken sich in geringem Maße auf die Y - und die Z -Komponente aus. Die Varianzen der X -Komponenten enthalten keine Anteile aus $L1$ und $L2$. Bei der realen Maschine ist der Einfluss der Tachymetermessungen auf alle Komponenten zwar deutlich, jedoch haben die Drehwinkel θ_1 und θ_2 ebenfalls große Anteile an den Gesamtvarianzen. Ähnlich verhält sich es mit den Lagewinkeln θ , ϕ und ψ . Die Einflüsse der Drehwinkel θ_1 und θ_2 wirken sich vor allem auf die Y - und Z -Komponente aus. In der Z -Komponente ist, neben Z_m aus der Tachymetermessung, θ_2 die dominierende Größe. Dieser starke Einfluss des Drehwinkels kann auf die langen Hebelarme $L1$ und $L2$ zurückgeführt werden. Auffallend bei der realen Maschine ist der große Einfluss des Gierwinkels ψ und des Rollwinkels ϕ auf die Lagekomponente X . Der Anteil von ψ erreicht vor allem bei abgesenkten Auslegerpositionen einen Anteil von über 40 %. Im angehobenen Zustand ist der Rollwinkel mit Werten zwischen 39 % und 55 % die dominierende Eingangsgröße. Die Y - und Z -Komponenten hingegen werden von ψ und ϕ nur gering oder gar nicht beeinflusst. Dieses Verhalten lässt sich mit der Wahl der Eingangswerte für diese beiden Größen erklären, die für die durchgeführte Analyse zu Null gesetzt worden sind (vgl. Tabelle 6-12). Weitere, hier nicht gezeigte Simulationen indizieren, dass bei Vergrößerung der Eingangswerte für ψ und ϕ ihre Anteile in den Y - und Z -Komponenten ebenfalls größer werden. Die Messung des Rollwinkels ϕ kann dabei z.B. mit einer zusätzlichen IMU durchgeführt oder aus einem vorliegenden digitalen Geländemodell des Fahruntergrunds ermittelt werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass beim Modell die Positionsmessungen aus dem Tachymeter die größten Varianzanteile haben. Bei der realen Maschine sind sowohl die Positionsmessungen, wie auch die Drehwinkel- und Lagemessungen mit den größten Anteilen an der Gesamtvarianz vertreten. Hier sind bei den Y - und Z -Komponenten vor allem die Drehwinkel θ_1 und θ_2 dominant, wobei auf θ_2 die größten Anteile entfallen. In die X -Komponente fließen die Lagewinkel ϕ und ψ mit den größten Anteilen ein. Die Höhenmessung des Schallsensors, sowie die Länge des Auslegers $L1$ und der Ladeschaufel $L2$ sind sowohl beim Modell als auch bei der realen Maschine mit nur geringen Anteilen an der Gesamtvarianz des Arbeitspunktes vertreten.

Hinsichtlich der Übertragung von gewonnenen Erkenntnissen vom Modell auf eine reale Maschine lässt sich sagen, dass die Varianzen der Arbeitspunktkomponenten für beide Untersuchungsobjekte auf gleichem Niveau liegen. Die Unterschiede liegen für alle untersuchten Werkzeugstellungen bei maximal 3 mm (Tabellen 6-13 bis 6-16). Dies entspricht einer Verdoppelung der Werte der realen Maschine gegenüber dem Modell. Die sich daraus ergebende Schlussfolgerung ist, dass die in Kapitel 6.4 ermittelten Gesamtstandardabweichungen s_{system}^{Lab} und s_{system}^{Out} für die reale Maschine sich ebenfalls verdoppeln müssen. Demnach würden $s_{system}^{Lab} = 20 \text{ mm}$ und $s_{system}^{Out} = 24 \text{ mm}$ betragen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass unter Berücksichtigung der genannten Unterschiede sich die gewonnenen Erkenntnisse, vom Modell auf eine reale Laderaupen übertragen lassen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, ein System zu entwickeln, das es ermöglicht Belade- und Entladeprozesse automatisch bzw. teilautonom durchzuführen. Dieses System soll dazu dienen die existierenden automatisierten Baumaschinen, die bisher überwiegend dem Straßenbau zugeordnet sind, um den Bereich der Erd- und Schüttgutbearbeitung sowie Transport- und Fördermaschinen zu erweitern.

Für die Untersuchungen stand ein Laderaupenmodell vom Typ Liebherr 634 im Massstab 1:14 zur Verfügung. Das Modell verfügt über die notwendige Ausstattung, um eine realitätsnahe Simulation realer Prozesse durchführen zu können.

Die Herausforderung bestand darin, für die oben genannte Maschinenklasse ein semi-automatisches bzw. vollautomatisches 3D-System zu entwickeln und anschließend zu implementieren. Dazu wurde der Prozess in vier Teilbereiche untergliedert. Diese bilden die notwendigen Funktionalitäten ab, die das System leisten muss, um den vollständigen Prozessablauf zu gewährleisten. Die vier Teilbereiche werden durch vier so genannte Hauptmodule repräsentiert. Diese sind das Positionierungsmodul, das Trajektorienmodul, das Fahrmodul sowie das Werkzeugmodul. Der Gesamtprozess erfordert eine zeitliche und räumliche Synchronisierung dieser vier Module, die durch das System vorgenommen wird. Die räumliche Synchronisierung gewährleistet die Wahl des korrekten Betriebsmodus der Maschine (Fahren, Stoppen, Beladen, Entladen, Spotturn) in Abhängigkeit von der aktuellen Position. Ebenfalls werden die Wechsel zwischen den Betriebsmodi positionsabhängig gesteuert.

Zur allgemeinen Einordnung des Themas wurden in Kapitel 1, neben der Motivation, ein kurzer Abriss über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik gegeben. Daneben wurden die Ziele der Arbeit formuliert sowie die methodischen Schwerpunkte, bestehend aus der Entwicklung einer bildbasierten Positionsbestimmung durch Nutzung eines bildverarbeitenden Robottachymeters und der adaptiver Regelung für die Fahrfunktionalität, beschrieben und begründet.

In Kapitel 2 wurden die Grundlagen für das Systemdesign aufgearbeitet. Diese enthalten neben der geometrischen und stochastischen Modellierung des Fahrzeugs und des Werkzeugs, die Beschreibung der angewandten Lenkmethode und der Werkzeugsteuerung. Des Weiteren wurde die eingesetzte Sensorik vorgestellt. In diesem Zusammenhang wurde die lokale Sensitivitätsanalyse eingeführt, die bei der Auswahl der Sensoren und der Analyse des Systems eine unterstützende Funktion einnimmt.

Kapitel 3 lieferte eine Einführung in die Regelkreise sowie Erklärungen über deren Auslegung und Design zur Automatisierung der Trägermaschine und des Werkzeugs. Es folgte eine detaillierte Abhandlung über die eingesetzte adaptive Regelung, die für die Führung der Trägermaschine eine wichtige Rolle spielt. Neben einem kurzen historischen Abriss wurden die Vor- und Nachteile der verschiedenen adaptiven Regelungsschemata dargelegt sowie eine Begründung für die Wahl der Regelung beim vorliegenden Steuerungs- und Regelungsproblem geliefert. Das Kapitel enthält im weiteren Verlauf die mathematischen Grundlagen und beschreibt die Integration der adaptiven Regelung in den entwickelten Steueralgorithmus sowie das Zusammenspiel mit dem Lenkmodell. Am Ende des Abschnitts erfolgte eine Analyse und eine kritische Auseinandersetzung mit der angewandten Methodik.

Die Entwicklung der bildbasierten Positionsbestimmung durch Nutzung eines bildverarbeitenden Robottachymeters war Inhalt des Kapitels 4. Nach der Vorstellung des verwendeten Tachymeters wurden die notwendigen Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung dargelegt sowie die darauf basierende Technik der Bilderkennung und Zuordnung von Bildmerkmalen. Außerdem wurde dargelegt, wie aus Pixelkoordinaten der Bildmerkmale die Position von Objekten bestimmt werden kann.

Kapitel 5 befasste sich mit dem Aufbau des Gesamtsystems und der Fusion der vier Hauptmodule. Die Beschreibung der notwendigen Schnittstellen zum Daten- und Informationsfluss zwischen den Modulen war ebenfalls Bestand dieses Kapitels. Ferner wurde der individuelle Aufbau jedes einzelnen Moduls vorgestellt,

ebenso die im Rahmen des Systembetriebs anfallenden Aufgabenbereiche und Funktionalitäten. Die Modularchitektur wurde jeweils anhand von Blockdiagrammen erklärt.

Im letzten Kapitel wurden Funktionstests und Validierungen aller Module sowie des Gesamtsystems vorgenommen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es im Rahmen dieser Arbeit gelungen ist ein automatisches System zur Durchführung von Belade- und Entladeprozessen zu entwickeln und erfolgreich zu testen. Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von bildverarbeitenden Robottachymetern in Kombination mit Bildverarbeitungsalgorithmen für statische Positionsbestimmungen geeignet ist. Das Verfahren ist in der Lage, im betrieblichen Ablauf die reflektorbasierten Verfahren zur statischen Positionsbestimmung zu ersetzen. Die kinematischen Messungen erfolgen weiterhin auf einen Reflektor. Die Genauigkeit des Positionierungsmoduls erreichte für die bildbasierte Positionsbestimmung 7 mm und bei der Zielverfolgung im kinematischen Modus zwischen 2 und 3 mm. Die entwickelte adaptive Regelung hat sich während der Messfahrten ebenfalls als effizient erwiesen. Die Regelqualität liegt zwar unter Laborbedingungen auf gleichem Niveau wie die der PID-Regelung, jedoch entfällt hierbei der zeitintensive Prozess der Parametereinstellung. Zusätzlich zeigt der adaptive Regler eine bessere Performance unter alternierenden Betriebsumgebungen. Das Fahrmodul, das mit der adaptiven Regelung ausgestattet wurde, weist für die Querabweichungen (kinematische Messgenauigkeit + Regelgüte) bei Fahrten unter Laborbedingungen RMS-Werte von 3 bis 4 mm auf. Unter Outdoor-Bedingungen wurden dafür RMS-Werte von 7 bis 9 mm festgestellt. Für die mittels Laser Tracker im Labor evaluierte Regelgüte wurden RMS-Werte von 3 bis 4 mm ermittelt. Bezüglich fahrdynamischer Aspekte soll erwähnt werden, dass das Fahrzeuggewicht der Modellladeraupen von 8 kg eine nicht zu unterschätzende kinetische Energie während der Fahrt entwickelt. Diese musste über Kettenglieder, die aus hartem Kunststoff gefertigt sind, auf einen PVC-Boden übertragen werden. Somit lag eine relativ geringe Traktion vor, da der Reibungskoeffizient zwischen harten Kunststoffen niedrig ist. Hinzu kam die Tatsache, dass ein Lenkmodell ohne Schlupf (Kapitel 2.1.2) verwendet wurde. In Anbetracht dieser Tatsachen können die erreichten Genauigkeitswerte sowie die Performance der adaptiven Regelung als sehr zufriedenstellend angesehen werden. Das Werkzeugmodul erreichte mithilfe des Einsatzes des vorgezogenen Berechnungspunktes eine Stellgenauigkeit von 6 mm.

Obwohl die Funktionsweise des hier entwickelten Systems anhand eines Laderaupenmodells im Massstab 1:14 unter Laborbedingungen nachgewiesen werden konnte, wäre eine Übertragung der eingesetzten Methoden auf reale Fahrzeuge von großer Bedeutung. Dabei wären Tests unter realen Einsatzbedingungen von großem Nutzen für das Sammeln weiterer Erkenntnisse auf dem Gebiet des automatisierten Betriebs von Baumaschinen. Für das Fahrmodul sind neue Fahrscenarien notwendig, um die Vorteile der adaptiven Regelung hinsichtlich variabler Betriebsumgebungen besser aufzeigen zu können. Ein adaptiver Regler für die Werkzeugsteuerung wäre für zukünftige Nutzungen elektrischer Stellmotoren für Ausleger und Schaufel interessant. Das Potenzial von bildverarbeitenden Tachymetern kann noch weiter ausgeschöpft werden, wenn es gelingt, die bereits im Ansatz existierende, bildbasierte kinematische Zielverfolgung für Messungen auf bewegte Objekte weiterzuentwickeln und zu verfeinern. Nicht zuletzt könnte die Integration von Multi-Tachymeter-Systemen (Tachymeternetzwerke) dazu beitragen, die Effizienz der hier vorgestellten Entwicklung hinsichtlich Einsätzen auf Baustellen mit auftretenden Sichtbehinderungen zu erhöhen.

Literatur

Asadi, K., Ramshankar, H., Pullagurla, H., Bhandare, A., Shanbhag, S., Mehta, P., Kundu, S., Han, K., Lobaton, E., Wu, T. (2018): Building an Integrated Mobile Robotic System for Real-Time Applications in Construction. 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2018), 22nd – 25th July, Berlin.

Automated Precision Inc. (2014a): Technische Spezifikationen, API Radian Laser Tracker. <http://www.apisensor.com>. Letzter Zugriff: 17.07.2018.

Automated Precision Inc. (2014b): Active Target Specifications, <http://www.apisensor.com>. Letzter Zugriff: 17.07.2018.

AUVA (2017): Allgemeine Unfallversicherungsanstalt Österreich, Jahresbericht 2017. <https://www.auva.at/cdscontent/load?contentid=10008.643204&version=1515511655>. Letzter Zugriff: 23.04.2019.

Åström, K. J. (1983): Theory and Applications of Adaptive Control – A Survey. Automatica, Volume 19, Issue 5, 1983. DOI: 10.1016/0005-1098(83)90002-X.

Åström, K. J., Wittenmark, B. (1989): Adaptive Control. Addison-Wesley Publishing Company, Reading Massachusetts.

Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., Van Gool, L. (2006): Speeded-Up Robust Features. 9th European Conference on Computer Vision, 7th-13th May 2006.

Beetz, A. (2003): Entwicklung ausgewählter Komponenten eines Regelkreises und deren Realisierung in einem Teilsystem. Diplomarbeit, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Universität Stuttgart.

Beetz, A., Schwieger V. (2008): Integration of Controllers for Filter Algorithms for Construction Machine Guidance. 1st International Conference on Machine Control & Guidance 2008. Proceedings.

Beetz, A. (2012a): Ein modulares Simulationskonzept zur Evaluierung von Positionssensoren sowie Filter- und Regelalgorithmen am Beispiel des automatisierten Straßenbaus. Dissertation, Universität Stuttgart, Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Heft Nr. 688.

Beetz, A. (2012b): Separation of Control Quality and Measurement Accuracy for Guiding Control Tasks of an Indoor Construction Machine Simulator. 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 13th-15th November 2012.

Black, W. S., Haghi, P., Ariyur, K. B. (2014): Adaptive Systems: History, Techniques, Problems and Perspectives. Systems, Issue 2, DOI: 10.3390/systems2040606.

BMVI (2018): Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Stufenplan Digitales Planen und Bauen. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile. Letzter Zugriff: 09.04.2018.

Busch, P. (2012): Elementare Regelungstechnik. 8. Überarbeitete Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg.

Cai, S., Ma, Z., Skibniewski, M., Guo, J., Yun, L. (2018): Application of Automation and Robotics Technology in High-Rise Building Construction: An Overview. 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2018), 22nd – 25th July, Berlin.

Cannon, H. (1999): Extended Earthmoving with an Autonomous Excavator. Masterarbeit, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA.

Codesys (2012): Produktbeschreibung Moba Gradersteuerung HBM MPC-210. <https://de.codesys.com/branchen/mobile-automation/article/moba-grader-steuerung-hbm-mpc-210.html>.
Letzter Zugriff: 23.04.2019.

Connette, C. (2013): Kinematische Modellierung und Regelung omnidirektionaler, nicht-holonomer Fahrwerke. Dissertation, Fraunhofer IPA. In „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“, Hrsg.: Thomas Bauernhansl, Alexander Verl, Engelbert Westkämper. Fraunhofer Verlag Stuttgart. ISBN: 978-3-8396-0564-6

DESTATIS (2018): Statistisches Bundesamt, Ausgewählte Zahlen für die Bauwirtschaft 12/2018. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Querschnitt/bauwirtschaft-1020210181124.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Letzter Zugriff: 09.04.2018.

Deumlich, F., Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Auflage, Wichmann Heidelberg.

DIN (1994), DIN 19226: Begriffe der DIN 19226-Regelung und Steuerung. Beuth Verlag, Berlin.

Elmenreich, W. (2001): An Introduction to Sensor Fusion. Research Report 47/2001 on www.researchgate.net. Letzter Zugriff: 19.04.2018.

European Patent Office (2018): European Publication Server: <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20180214/patents/EP3281817NWA1/document.pdf>. Letzter Zugriff: 23.04.2019.

Gebhard, N. (2010): Fluidtechnik in Kraftfahrzeugen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

Girod, B. (2013): Digital Image Processing: Edge Detection. https://web.stanford.edu/class/ee368/Handouts/Lectures/2016_Autumn/12-EdgeDetection_16x9.pdf. Letzter Zugriff: 12.10.2018.

Gläser, A. (2007): Modulares System zur Automatisierung hochgenauer geometrischer Positionierung und Bahnführung im Bauwesen. Dissertation, Universität Stuttgart. http://www.uni-stuttgart.de/ingeo/publikationen/dissertationen.html/Diss_Glaeser.pdf.

Gläser, A., Möhlenbrink, W., Schwieger, V. (2008): A Contribution to Construction Machine Automation. Journal of Applied Geodesy 2. DOI 10.1515/JAG.2008.011.

Gruber, F., J. (2001): Formelsammlung für das Vermessungswesen. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.

Guilboud, R. (2013): Entwurf und Implementierung eines Stereovision-Vorlesegerätes. Dissertation, Freie Universität Berlin. <https://pdfs.semanticscholar.org/fb58/8a5d0212c3b4d2fd3a9a0d9ff2a02851549c.pdf>. Letzter Zugriff: 24.02.2019.

Hartley, R., Zisserman, A. (2004): Multiple View Geometry in Computer Vision. Second Edition, Cambridge University Press. ISBN 978-0-511-18618-9.

Heikkilä, R., Jaakkola, M. (2003): Automatic Control of Road Construction Machinery-Feasibility and Requirements. 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Eindhoven, Netherlands.

Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., Neuner, H. (2013): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. In „Handbuch Ingenieurgeodäsie“, Hrsg.: Michael Möser, Gerhard Müller, Harald Schlemmer. 2. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin.

Joeckel, R., Stober, M., Hueb, W. (2008): Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. 5. Auflage, Wichmann-Verlag, Heidelberg.

Kahmen, H., Retscher, G. (1999): Precise 3-D Navigation of Construction Machine Platforms, Papers presented at the 2nd International Workshop on Mobile Mapping Technology, April 1999, Bangkok, Thailand, pp. 5A.2.1-5A.2.5.

Kalman, R. E. (1958): Design of a Self-Optimizing Control Systems. Transactions of ASME (The American Society of Mechanical Engineers), Vol. 80, 1958, pp. 468 - 478.

Kamen, E. W., Su, J. K. (1999): Introduction to Optimal Estimation. Springer Verlag, London. ISBN: 978-1-85233-133-7.

Kilpeläinen, P., Jaakkola, M., Alanaatu, P. (2011): Development of a Control System for a Multipurpose Road Repairing Machine. Automation in Construction Volume 20. ISSN: 0926-5805.

Kleemaier, G. (2018): Multisensorsystem Totalstation. 176. DVW-Seminar MST 2018-Multisensortechnologie: Low-Cost Sensoren im Verbund. September 2018, Hamburg.

Klickrent (2017): Onlineportal Maschinenvermietung. <https://portal.klickrent.de/blog/autonome-baumaschinen-definieren-den-bauprozess-von-morgen>. Letzter Zugriff: 31.01.2017.

Kuhlmann, H., Klingbeil, L. (2017): Mobile Multisensorsysteme. In „Ingenieurgedäsie“, Hrsg. Willfried Schwarz. Springer Reference Naturwissenschaften, Springer Verlag, Berlin, Deutschland. ISSN: 2522-8161.

Kunze, J., Göhring, H., Jacob, K. (2002): Baumaschinen - Erdbau- und Tagebaumaschinen. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden. ISBN: 3-528-06628-8.

Kunze, G. (2011): Fachskript Transport- und Baumaschinentechnik - Einleitung. <https://docplayer.org/18099242-Professur-baumaschinen-und-foerdertechnik-prof-dr-ing-habil-guenter-kunze-1-einleitung-blatt-1-1.html>. Letzter Zugriff: 20.12.2019.

Kühn, G. (1991): Handbuch Baubetrieb: Organisation-Betrieb-Maschinen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

Landau, I. D., Lozano, R., M'Saad, M., Karimi, A. (2011): Adaptive Control – Algorithms, Analysis and Application. Springer Communications and Control Engineering. <http://www.springer.com/978-0-85729-663-4>. Letzter Zugriff: 13.11.2017.

Le, A. T. (1991): Modelling and Control of Tracked Vehicles. Doctoral Thesis University of Sidney. Electronic Publication, www.cas.edu.au/download.php/Le1999-PhDThesis.pdf?id=1222.

Leica (2019): Produktbeschreibung Leica iCON iGG3–3D-System. <https://leica-geosystems.com/de/products/machine-control-systems/grader/leica-icon-igg3---3d-system>. Letzter Zugriff: 23.04.2019.

Lerke, O., Schwieger, V., (2015): Evaluierung der Regelgüte für tachymetrisch gesteuerte Fahrzeuge. zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2015 – 140. Jahrgang. DOI 10.12902/zfv-0078-2015.

Lerke, O., Schwieger, V. (2017): Steering Method for Automatically Guided Tracked Vehicles. V. FIG Working Week 2017, Helsinki, Finland.

Lerke, O., Schwieger, V. (2018): Adaptive Control for Guidance of Tracked Vehicles. 6th International Conference on Machine Control & Guidance 2018. Proceedings.

Liebherr (2018): News & Pressemitteilungen. <https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/liebherr-praesentiert-elektrische-variante-des-fahrtriebs-fat-325.html>. Letzter Zugriff: 11.07.2018.

Liebherr (2019): Produktbeschreibung Laderaupen 636 Litronic. <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/baumaschinen/erdbewegung/laderaupen/details/69842.html#lightbox>. Letzter Zugriff: 10.01.2019.

Lienhart, W., Ehrhart, M. (2019): Statische und dynamische Überwachung von Infrastrukturbauten mit kommerziellen Videotachymetern. Konferenzbeitrag 20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019, 10.02.19 bis 16.02.19. Hanke, K., Weinold, T. (Hrsg.). ISBN 978-3-87907-659-8.

Lowe, G. (1999): Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. International Conference on Computer Vision, Corfu 1999, Proceedings.

Luhman, T. (2010): Nahbereichsphotogrammetrie. 3. Auflage, Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach.

Lutzenberger, S. H. (2002): Ein differentiell-algebraisches Simulationsmodell zur Fahrzeug - Fahrweg Interaktion. Dissertation, Technische Universität München. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/601040/601040.pdf>. Letzter Zugriff: 23.05.2019.

Luz, P. (2018): Positionsbestimmung und Navigation mittels bildverarbeitender Tachymeter. Masterarbeit, Institut für Ingenieurgeodäsie, Universität Stuttgart (unveröffentlicht).

Mann, H., Schiffelgen, H., Frorier, P. (2005): Einführung in die Regelungstechnik. 10. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien.

Merziger, G., Wirth, T. (2010): Repetitorium Höhere Mathematik. 6. Auflage, Binomi Verlag, Barsinghausen.

Möser, M. (2000): Bezugssysteme und Koordinatensysteme. S. 105–130. In Möser, M., Müller, G., Schlemmer, H., Werner, H. (Hrsg., 2000) Handbuch Ingenieurgeodäsie–Grundlagen. Herbert Wichmann Verlag Heidelberg.

MTS (2018): MTS Maschinentechnik Schrode AG, Produktinformation MTS-NAVI für 3D-Maschinensteuerung. <https://www.mts-online.de/produkte/digitale-baustelle/mts-navi-fuer-3d-maschinensteuerung/>. Letzter Zugriff: 23.04.2018.

Muja, M., Lowe, D. (2012): Fast Matching of Binary Features. 2012 Ninth Conference on Computer and Robot Vision – CRV’12, IEEE Computer Society, Washington D.C., USA. Proceedings. ISBN 978-1-4673-1271-4.

National Instruments (2019): LabView – Software Description. <http://www.ni.com/de-de/shop/software-portfolio.html>. Letzter Zugriff: 10.01.2019.

Niemeier, W. (2008): Ausgleichsrechnung. Walter De Gruyter Verlag, Berlin, New York.

Pelzer, H. (1980): Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen in Matrizenschreibweise. In Pelzer, H. (Hrsg., 1980) Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung. Konrad Wittwer, Stuttgart.

Retscher, G. (2001): Trajectory Determination for Machine Guidance Systems. In: Papers presented at the KIS2001 Symposium, June 5-9, 2001, Banff, Canada.

Schwieger, V., Beetz, A. (2017): Baumaschinensteuerung – der ingenieurgeodätische Beitrag. In „Ingenieur-geodäsie“, Hrsg. Willfried Schwarz. Springer Reference Naturwissenschaften, Springer Verlag, Berlin, Deutschland. ISSN: 2522-8161.

Schwieger, V., Kerekes, G., Lerke, O. (2020): Image-Based Target Detection and Tracking Using Image-Assisted Robotic Total Station. In “Machine Vision and Navigation”, Hrsg. Oleg Sergiyenko, Wendy Flores-Fuentes, Paolo Mercorelli. Springer Nature Switzerland AG. ISBN: 978-3-030-22586-5.

Seborg, D. E., Edgar, T. F., Shah S. L. (1986): Adaptive Control Strategies for Process Control – A Survey. AIChE Journal, Volume 32, Issue 6, 1986. DOI: 10.1002/aic.690320602.

Siebertz, K., van Bebber, D., Hochkirchen, T. (2010): Statische Versuchsplanung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Sonka, M., Vaclav, H., Boyle, R. (1994): Image, Processing, Analysis and Machine Vision. Chapman & Hall Computing, London.

Stempfhuber, W. (2008): Navigation of Construction and Agriculture Machinery. Geodezija ir Kartografija - Geodesy and Cartography, Volume 34, Issue 8, Technika Verlag. DOI: 10.3846/1392-1541.2008.34.83-87.

Stempfhuber, W., Ingensand, H. (2008): Baumaschinenführung und -steuerung – Von der statischen zur kinematischen Absteckung. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV), Jahrgang 133, Heft 1.

Talukder, K. H., Harada, K. (2007): Haar Wavelet Based Approach for Image Compression and Quality Assessment of Compressed Image. IAENG International Journal of Applied Mathematics, Volume 36, Issue 1. ISSN 1992-9978.

Torr, P., Zisserman, A. (2000): MLESAC: A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry. Computer Vision and Image Understanding, Jahrgang 78. ISSN: 1077-3142.

Trimble Inc. (2018): Datasheet Trimble S7 Total Station. <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-s7#product-support>. Letzter Zugriff: 11.11.2018.

Trimble Inc. (2019): Produktinformation GCS900 3D Grade Control. <https://construction.trimble.com/de/Produkte-und-Loesungen/Maschinensteuerung-Motorgrader>. Letzter Zugriff: 23.04.2019.

Topcon (2019): Produktinformation Millimeter GPS mit 3D für Grader. <https://www.topconpositioning.com/de/rough-and-fine-grading/3d-motor-grader-systems/millimeter-gps-mit-3d-fuer-grader>. Letzter Zugriff: 23.04.2019.

Ullrich, R., Knobloch, S., Möser, M. (2012): Verwendung einer Okularkamera zur Realisierung eines automatisierten geometrischen Alignements. AVN-Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 3 7/2012, S. 95-103.

- Vogel, M. (2006): Vom Pixel zur Richtung – Die räumlichen Beziehungen zwischen Abbildungsstrahlen und Tachymeterrichtungen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Schriftenreihe 20, Fachrichtung Geodäsie, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie. ISBN: 393563109X.
- Wagner, A., Wasmeier, P. (2014): Flächen- und Feature-basiertes Monitoring mit Videotachymetern. Konferenzbeitrag Multisensorsysteme-Bewegte Zukunftsfelder, Hamburg 2014, Vol. 138.
- Wagner, A., Wiedemann, W., Wasmeier, P., Wunderlich, T. (2016): Monitoring Concepts Using Image Assisted Total Stations. Proceedings of the International Symposium on Engineering Geodesy, S. 137-148, Croatian Geodetic Society May 2016.
- Walser, B., H. (2004): Development and calibration of an image assisted total station. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Dissertation Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich No. 15773.
- Wang, C., Tang, T. (2014): Recursive Least Squares Estimation Algorithm Applied to a Class of Linear-in-Parameters Output Error Moving Average Systems. Applied Mathematics Letters, Volume 29, 2014. DOI: 10.1016/j.aml.2013.10.011.
- Wasmeier, P. (2009): Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter. Dissertation Technische Universität München, Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Heft Nr. 638.
- Whitaker, H. P. (1959): Contribution to Session II in “Proceedings of the Self Adaptive Flight Control Systems Symposium“, pp. 58 - 78 .Hrsg.: Lt P. C. Gregory, Flight control laboratory, Wright Air Development Center, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- Wiedemann, W., Wagner, A., Wunderlich T. (2017): Nivellieren mit bildunterstützten Totalstationen. AVN-Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 124 7/2017, S. 211-219.
- Wiest, U. (2001): Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH). <https://www.wiest-ag.de/de/assets/media/files/dissertation.pdf>. Letzter Zugriff: 20.11.2019.
- Wild-Pfeiffer, F., Schäfer B. (2011): MEMS-Sensoren, auch für die Geodäsie. zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 1/2011 – 136. Jahrgang. ISSN: 1618-8950.
- Wirtgen (2019): Wirtgen Group Holding GmbH; Pressebericht: Autonome Walzen: die (R)Evolution im Straßenbau. <https://www.wirtgen-group.com/de/news-media/presseberichte/autonome-walzen-die-revolution-im-strassenbau.153600.php>. Letzter Zugriff: 23.04.2019.
- Yang, Y, Chang, C.,Kang, S. (2018): Framework of Automated Beam Assembly and DisassemblySystem for Temporary Bridge Structures. 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2018), 22nd – 25th July, Berlin.
- Ydstie, B. E., Kershenbaum, L. S., Sargent R. W. H. (1985): Theory and Application of an Extended Horizon Self-Tuning Controller. AIChE Journal, Volume 31, Issue 11, pp. 1771 – 1780.
- Zhou, Y., Wagner, A., Wunderlich, T., Wasmeier, P. (2017): Calibration Method for IATS and Application in Multi-Target Monitoring Using Coded Targets. Journal of Applied Geodesy 11 (2), 2017, 8. DOI 10.1515/jag-2016-0021.

Anhang

Anhang A

A1 Ergebnisse der lokalen Sensitivitätsanalyse

Tabelle A1.1: Ergebnisse der lokalen Sensitivitätsanalyse für Szenario 1 „Nullstellung“

Modell			Reale Maschine		
Prozentuale Anteile der Eingangswerte an der Gesamtvarianz					
$\sigma_{Y_{AP}^g} = 0.003\text{ m}$	Y_m	84.3 %	$\sigma_{Y_{AP}^g} = 0.004\text{ m}$	Y_m	67.9 %
	X_m	0 %		X_m	0 %
	Z_m	0 %		Z_m	0 %
	h^S	0 %		h^S	0 %
	θ_1	0.2 %		θ_1	17.6 %
	θ_2	0 %		θ_2	0 %
	θ	0 %		θ	2.0 %
	Φ	0 %		Φ	0 %
	Ψ	0 %		Ψ	0 %
	$L1$	6.1 %		$L1$	4.9 %
	$L2$	9.4 %		$L2$	7.6 %
$\sigma_{X_{AP}^g} = 0.003\text{ m}$	Y_m	0 %	$\sigma_{X_{AP}^g} = 0.004\text{ m}$	Y_m	0 %
	X_m	99.5 %		X_m	50.0 %
	Z_m	0 %		Z_m	0 %
	h^S	0 %		h^S	0 %
	θ_1	0 %		θ_1	0 %
	θ_2	0 %		θ_2	0 %
	θ	0 %		θ	0 %
	Φ	0.1 %		Φ	1.5 %
	Ψ	0.4 %		Ψ	48.5 %
	$L1$	0 %		$L1$	0 %
	$L2$	0 %		$L2$	0 %
$\sigma_{Z_{AP}^g} = 0.003\text{ m}$	Y_m	0 %	$\sigma_{Z_{AP}^g} = 0.006\text{ m}$	Y_m	0 %
	X_m	0 %		X_m	0 %
	Z_m	88.1 %		Z_m	25.3 %
	h^S	9.8 %		h^S	2.8 %
	θ_1	0.1 %		θ_1	3.1 %
	θ_2	0.7 %		θ_2	44.0 %
	θ	0.4 %		θ	24.5 %
	Φ	0 %		Φ	0 %
	Ψ	0 %		Ψ	0 %
	$L1$	0.9 %		$L1$	0.2 %
	$L2$	0 %		$L2$	0 %

Tabelle A1.2: Ergebnisse der lokalen Sensitivitätsanalyse für Szenario 2 „Ladestellung A“

Modell			Reale Maschine		
Prozentuale Anteile der Eingangswerte an der Gesamtvarianz					
$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.003\text{ m}$	Y_m	87.4 %	$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.005\text{ m}$	Y_m	44.2 %
	X_m	0 %		X_m	0 %
	Z_m	0 %		Z_m	0 %
	h^S	0 %		h^S	0 %
	θ_1	0.1 %		θ_1	11.5 %
	θ_2	0.3 %		θ_2	31.8 %
	θ	0.2 %		θ	6.5 %
	Φ	0 %		Φ	0 %
	Ψ	0 %		Ψ	0 %
	$L1$	6.3 %		$L1$	3.1 %
	$L2$	5.7 %		$L2$	2.9 %
$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.003\text{ m}$	Y_m	0 %	$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.004\text{ m}$	Y_m	0 %
	X_m	99,4 %		X_m	50.8 %
	Z_m	0 %		Z_m	0 %
	h^S	0 %		h^S	0 %
	θ_1	0 %		θ_1	0 %
	θ_2	0 %		θ_2	0 %
	θ	0 %		θ	0 %
	Φ	0.2 %		Φ	7.4 %
	Ψ	0.4 %		Ψ	41.8 %
	$L1$	0 %		$L1$	0 %
	$L2$	0 %		$L2$	0 %
$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.003\text{ m}$	Y_m	0 %	$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.005\text{ m}$	Y_m	0 %
	X_m	0 %		X_m	0 %
	Z_m	85.0 %		Z_m	31.9 %
	h^S	9.5 %		h^S	3.5 %
	θ_1	0.1 %		θ_1	3.9 %
	θ_2	0.4 %		θ_2	32.6 %
	θ	0.3 %		θ	26.3 %
	Φ	0 %		Φ	0 %
	Ψ	0 %		Ψ	0 %
	$L1$	0.8 %		$L1$	0.3 %
	$L2$	3.9 %		$L2$	1.5 %

Tabelle A1.3: Ergebnisse der lokalen Sensitivitätsanalyse für Szenario 3 „Ladestellung B“

Modell			Reale Maschine		
Prozentuale Anteile der Eingangswerte an der Gesamtvarianz					
$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	Y_m	86.4 %	$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.006 \text{ m}$	Y_m	23.2 %
	X_m	0 %		X_m	0 %
	Z_m	0 %		Z_m	0 %
	h^S	0 %		h^S	0 %
	θ_1	0.1 %		θ_1	6.0 %
	θ_2	0.3 %		θ_2	16.7 %
	θ	1.3 %		θ	50.9 %
	Φ	0 %		Φ	0 %
	Ψ	0 %		Ψ	0 %
	$L1$	6.3 %		$L1$	1.7 %
	$L2$	5.6 %		$L2$	1.5 %
$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	Y_m	0 %	$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.006 \text{ m}$	Y_m	0 %
	X_m	98.2 %		X_m	24.9 %
	Z_m	0 %		Z_m	0 %
	h^S	0 %		h^S	0 %
	θ_1	0 %		θ_1	0 %
	θ_2	0 %		θ_2	0 %
	θ	0 %		θ	0 %
	Φ	1.4 %		Φ	54.6 %
	Ψ	0.4 %		Ψ	20.5 %
	$L1$	0 %		$L1$	0 %
	$L2$	0 %		$L2$	0 %
$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	Y_m	0 %	$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.005 \text{ m}$	Y_m	0 %
	X_m	0 %		X_m	0 %
	Z_m	85.0 %		Z_m	31.9 %
	h^S	9.5 %		h^S	3.5 %
	θ_1	0.1 %		θ_1	3.9 %
	θ_2	0.4 %		θ_2	32.6 %
	θ	0.3 %		θ	26.3 %
	Φ	0 %		Φ	0 %
	Ψ	0 %		Ψ	0 %
	$L1$	0.8 %		$L1$	0.3 %
	$L2$	3.9 %		$L2$	1.5 %

Tabelle A1.4: Ergebnisse der lokalen Sensitivitätsanalyse für Szenario 4 „Entladestellung“

Modell			Reale Maschine		
Prozentuale Anteile der Eingangswerte an der Gesamtvarianz					
$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	Y_m	87.8 %	$\sigma_{Y_{AP}}^g = 0.006 \text{ m}$	Y_m	29.7 %
	X_m	0 %		X_m	0 %
	Z_m	0 %		Z_m	0 %
	h^S	0 %		h^S	0 %
	θ_1	0.1 %		θ_1	7.7 %
	θ_2	0.4 %		θ_2	27.6 %
	θ	0.7 %		θ	31.3 %
	Φ	0 %		Φ	0 %
	Ψ	0 %		Ψ	0 %
	$L1$	6.5 %		$L1$	2.2 %
	$L2$	4.5 %		$L2$	1.5 %
$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	Y_m	0 %	$\sigma_{X_{AP}}^g = 0.005 \text{ m}$	Y_m	0 %
	X_m	98.8 %		X_m	35.3 %
	Z_m	0 %		Z_m	0 %
	h^S	0 %		h^S	0 %
	θ_1	0 %		θ_1	0 %
	θ_2	0 %		θ_2	0 %
	θ	0 %		θ	0 %
	Φ	0.8 %		Φ	37.3 %
	Ψ	0.4 %		Ψ	27.4 %
	$L1$	0 %		$L1$	0 %
	$L2$	0 %		$L2$	0 %
$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.003 \text{ m}$	Y_m	0 %	$\sigma_{Z_{AP}}^g = 0.005 \text{ m}$	Y_m	0 %
	X_m	0 %		X_m	0 %
	Z_m	84.1 %		Z_m	34.6 %
	h^S	9.3 %		h^S	3.9 %
	θ_1	0.1 %		θ_1	4.3 %
	θ_2	0.4 %		θ_2	28.1 %
	θ	0.3 %		θ	26.7 %
	Φ	0 %		Φ	0 %
	Ψ	0 %		Ψ	0 %
	$L1$	0.8 %		$L1$	0.3 %
	$L2$	5.0 %		$L2$	2.1 %

Anhang B

B1 Messwerte für die Evaluation des Positionierungsmoduls

Räumliche Konfiguration	n	Positionen aus Positionierungsmodul (bildbasiertes Verfahren)	Positionsbestimmung mittels Laser Tracker
1	1	$y_1^{Raupe} = 2.8331 \text{ m}$	$\mu^{y_{Raupe}} = 2.8355 \text{ m}$ $\mu^{x_{Raupe}} = 2.4779 \text{ m}$
		$x_1^{Raupe} = 2.4745 \text{ m}$	
	2	$y_2^{Raupe} = 2.8325 \text{ m}$	
		$x_2^{Raupe} = 2.4753 \text{ m}$	
	3	$y_3^{Raupe} = 2.8326 \text{ m}$	
		$x_3^{Raupe} = 2.4753 \text{ m}$	
	1	$y_1^{Ladegut} = 4.6824 \text{ m}$	$\mu^{y_{Ladegut}} = 4.6845 \text{ m}$ $\mu^{x_{Ladegut}} = 3.5950 \text{ m}$
		$x_1^{Ladegut} = 3.5968 \text{ m}$	
	2	$y_2^{Ladegut} = 4.6827 \text{ m}$	
		$x_2^{Ladegut} = 3.5967 \text{ m}$	
	3	$y_3^{Ladegut} = 4.6831 \text{ m}$	
		$x_3^{Ladegut} = 3.5965 \text{ m}$	
	1	$y_1^{Entladestat.} = 4.7800 \text{ m}$	$\mu^{y_{Entladestation}} = 4.7780 \text{ m}$ $\mu^{x_{Entladestation}} = 5.0753 \text{ m}$
		$x_1^{Entladestat.} = 5.0771 \text{ m}$	
	2	$y_2^{Entladestat.} = 4.7808 \text{ m}$	
		$x_2^{Entladestat.} = 5.0778 \text{ m}$	
	3	$y_3^{Entladestat.} = 4.7808 \text{ m}$	
		$x_3^{Entladestat.} = 5.0776 \text{ m}$	
2	1	$y_1^{Raupe} = 4.6618 \text{ m}$	$\mu^{y_{Raupe}} = 4.6621 \text{ m}$ $\mu^{x_{Raupe}} = 3.6742 \text{ m}$
		$x_1^{Raupe} = 3.6699 \text{ m}$	
	2	$y_2^{Raupe} = 4.6618 \text{ m}$	
		$x_2^{Raupe} = 3.6696 \text{ m}$	
	3	$y_3^{Raupe} = 4.6614 \text{ m}$	
		$x_3^{Raupe} = 3.6699 \text{ m}$	
	1	$y_1^{Ladegut} = 4.0133 \text{ m}$	$\mu^{y_{Ladegut}} = 4.0157 \text{ m}$ $\mu^{x_{Ladegut}} = 2.6055 \text{ m}$
		$x_1^{Ladegut} = 2.6090 \text{ m}$	
	2	$y_2^{Ladegut} = 4.0138 \text{ m}$	
		$x_2^{Ladegut} = 2.6085 \text{ m}$	
	3	$y_3^{Ladegut} = 4.0128 \text{ m}$	
		$x_3^{Ladegut} = 2.6094 \text{ m}$	
	1	$y_1^{Entladestat.} = 2.8385 \text{ m}$	$\mu^{y_{Entladestation}} = 2.8328 \text{ m}$ $\mu^{x_{Entladestation}} = 3.0171 \text{ m}$
		$x_1^{Entladestat.} = 3.0202 \text{ m}$	
	2	$y_2^{Entladestat.} = 2.8375 \text{ m}$	
		$x_2^{Entladestat.} = 3.0187 \text{ m}$	
	3	$y_3^{Entladestat.} = 2.8383 \text{ m}$	
		$x_3^{Entladestat.} = 3.0188 \text{ m}$	

B2 Zufällige Abweichungen der Koordinatenkomponenten

Tabelle B2.1: Zufällige Abweichungen der Koordinatenkomponenten, räumliche Konfiguration 1

Epoche	Laderaupе		Ladegut		Entladestation	
	$\varepsilon_1^{y_{Raupe}}$ [m]	$\varepsilon_1^{x_{Raupe}}$ [m]	$\varepsilon_1^{y_{Ladegut}}$ [m]	$\varepsilon_1^{x_{Ladegut}}$ [m]	$\varepsilon_1^{y_{Entladest.}}$ [m]	$\varepsilon_1^{x_{Entladest.}}$ [m]
1	-0.0024	-0.0034	-0.0020	0.0019	0.0019	0.0017
2	-0.0030	-0.0026	-0.0018	0.0018	0.0027	0.0025
3	-0.0029	-0.0026	-0.0013	0.0015	0.0028	0.0023

Tabelle B2.2: Zufällige Abweichungen der Koordinatenkomponenten, räumliche Konfiguration 2

Epoche	Laderaupе		Ladegut		Entladestation	
	$\varepsilon_1^{y_{Raupe}}$ [m]	$\varepsilon_1^{x_{Raupe}}$ [m]	$\varepsilon_1^{y_{Ladegut}}$ [m]	$\varepsilon_1^{x_{Ladegut}}$ [m]	$\varepsilon_1^{y_{Entladest.}}$ [m]	$\varepsilon_1^{x_{Entladest.}}$ [m]
1	-0.0004	-0.0043	-0.0024	0.0036	0.0057	0.0031
2	-0.0003	-0.0046	-0.0018	0.0030	0.0046	0.0019
3	-0.0007	-0.0043	-0.0028	0.0040	0.0055	0.0017

Danksagung

Ich danke allen, die mich bei der Erstellung dieser Dissertationsschrift unterstützt haben. Meinen ganz besonderen Dank möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger aussprechen, der mir über die Dauer des Entstehens dieser Arbeit mit seinem großen Fachwissen zur Seite stand.

Ich bedanke mich ebenfalls bei meinen beiden Gutachtern, den Herren Prof. Dr.-Ing. Hans Neuner von der TU Wien und Prof. Dr. Andreas Wieser von der ETH Zürich für ihre Bereitschaft die Arbeit zu lesen, fachlich zu bewerten und schließlich die Reise nach Stuttgart anzutreten, um an der mündlichen Prüfung mitzuwirken.

Für die Unterstützung am Institut danke ich allen Kollegen, die sich am fachlichen Austausch beteiligt haben. Besonders hervorheben möchte ich hierbei Dr.-Ing. Martin Metzner, Mechanikermeister Martin Knihs und meine Zimmerkollegen Dr.-Ing. Li Zhang. Herr Metzner stand mir immer beratend und beruhigend zu Seite. Herr Knihs gewährleistete mit seiner Arbeit über die Jahre die einwandfreie Funktion der Modellraupe. Mit Frau Zhang konnten die Sorgen und Nöte eines Doktoranden besprochen werden.

Ich danke Herrn Matthias Mach für das Lektorat und Frau Birgit King für die Bearbeitung des Videomaterials.

Ich danke ganz herzlich meiner Frau, die mir die Erstellung der Arbeit überhaupt ermöglicht hat, indem sie mich bei familiären Belangen entlastet und mir viel Verständnis bei meiner Vorhaben entgegengebracht hat. Weiter bedanke ich mich bei allen meinen Freunden, die auf informeller Ebene immer ein offenes Ohr für mich übrig hatten.

Lebenslauf

Zur Person

Name: Otto Lerke

Geburtsdatum: 26. Februar 1977

Geburtsort: Karaganda, Kasachstan

Nationalität: deutsch

Familienstand: verheiratet, zwei Kinder

Berufliche Laufbahn

seit 09/13 Universität Stuttgart, Institut für Ingenieurgeodäsie (IIGS)

01/09-09/13 Klinger und Partner Ingenieurbüro für Bauwesen und Umwelttechnik GmbH, Stuttgart

03/03-12/08 Ingenieurbüro für Vermessung, Dipl.-Ing. Eberhard Wezel, Metzingen

10/98-11/99 Zivildienst beim Körperbehinderten-Verein (KB.-V.), Stuttgart

Ausbildung

10/02-09/08 Universität Stuttgart: Studium Diplom Geodäsie und Geoinformatik

10/00-09/02 Universität Stuttgart: Studium Diplom Technische Kybernetik

09/88-06/98 Otto-Hahn-Gymnasium, Ostfildern: Allgemeine Hochschulreife