

Modulares System zur Automatisierung hochgenauer geometrischer Positionierung und Bahnführung im Bauwesen

Von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Andreas Gläser

aus Detmold

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Möhlenbrink

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Februar 2007

Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen
der Universität Stuttgart

2007

Zusammenfassung

Die Planung größerer Bauvorhaben ist ohne eine Unterstützung durch CAD (Computer Aided Design) nicht mehr vorstellbar. Gleiches gilt auch für die industrielle Fertigung. Dort aber haben sich in den letzten Jahren die Produktionsprozesse dahingehend weiterentwickelt, dass der CAD gestützten Planung eine CAM (Computer Aided Manufacturing) gestützte Produktion folgt. Dies bedeutet, dass der Produktionsprozess auf Basis der digitalen Planungsdaten computergestützt und somit weitestgehend automatisiert abläuft. So kann eine hohe Qualität bei sinkenden Kosten erzielt werden.

In der Bauindustrie kommt die Einführung von CAM gestützten Produktionsprozessen hingegen nur langsam voran. Dies liegt sicherlich u.a. besonders an der Individualität jeder einzelnen Baustelle. Abgesehen von einigen Beispielen im Tunnelbau und im japanischen Hochbau beschränkt sich der Einsatz von CAM-Techniken auf die Fertigung langgestreckter Geometrien im Verkehrswegebau oder flächenhafter Bodenbearbeitungen.

In dieser Arbeit wird ein modulares System vorgestellt, das neben der geometrischen Führung von Baumaschinen auch automatisierte Verfahren für Absteck-, Ausricht- und Positionierungsaufgaben von Bauteilen und Maschinen ermöglicht. Da die Anwendungen sehr individuell sind, besteht das System in erster Linie aus einem Basis-System und einer Toolbox mit Soft- und Hardwarekomponenten. Aufgrund definierter Schnittstellen lassen sich mit Hilfe der Toolbox sehr schnell und komfortabel verschiedene Automatisierungssysteme realisieren, um für die jeweilige Anwendung einsetzbar zu sein.

Im Folgenden werden Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen (Standardabweichung $< 1\text{cm}$) betrachtet, die einer Integration von Robot-Tachymetern als Positionssensoren in das Automatisierungssystem bedürfen. Dies hat aufgrund der relativ geringen Abtastrate und der vorhandenen Totzeit von Robot-Tachymetern Auswirkungen auf den Entwurf der Regelkreise eines automatischen Führungs-Systems. Dieser Aspekt wird in dieser Arbeit besonders betrachtet, da er eine Kernfunktionalität des Automatisierungssystems darstellt. Die erarbeiteten genauigkeitsbegrenzenden Faktoren beim Einsatz von Robot-Tachymetern im Bauprozess sind dabei genauso von entscheidender Bedeutung wie die Entwicklung einer vollautomatischen Stationierung des Tachymeters. So kann dieser komplexe Sensor optimal in den Baubetrieb integriert werden. Dies trägt zusammen mit dem breiten Anwendungsspektrum des modularen Positionierungs- und Führungssystems entscheidend dazu bei, dass die Akzeptanz dieser Automatisierungslösung auf der Baustelle erhöht wird.

Zur Steigerung der Maschinenführungsqualität werden in dieser Arbeit Verfahren und Methoden erarbeitet, die der Zusammenführung von Fachwissen aus den Disziplinen der Systemtheorie, der Regelungstechnik und der geodätischen Messtechnik bedürfen. Das modulare Führungssystem wird prototypisch mit LabView® realisiert und im Experiment mit einem Modell-Lkw (Maßstab 1:14) erfolgreich getestet.

Abstract

Planning of larger building projects is not conceivable today without assistance of CAD (Computer Aided Design), which is also valid for industrial manufacturing. Production processes, however, have continuously developed during the last years so that CAD assisted planning is followed by CAM (Computer Aided Manufacturing) assisted production. This means that the production process is based on digital planning data and runs computer-aided and mostly automatically, thus resulting in high quality at low costs.

In construction industry introduction of CAM assisted production processes are getting on slowly, surely and mainly due to the individuality of different construction sites. Besides some examples in tunneling and in Japanese building construction use of CAM-techniques is limited to manufacturing of extensive geometries in road construction and areal soil working.

This thesis presents a modular system for guidance and control applications allowing besides geometric guidance of construction machines also automatic procedures for staking out, aligning, and positioning tasks of structural elements or machines. Due to the very individual applications the system mainly consists of a basic system and a toolbox with soft- and hardware components. Due to defined interfaces various automation systems can be realised quickly and comfortably from the toolbox, usable to any other application.

In the following applications with high accuracy requirements (standard deviation $< 1\text{cm}$) are considered which need an integration of robot-tachymeters as positioning sensors into the automation system. Due to the relatively low sampling rate and the existing time delay of robot-tachymeters influences arise onto the design of control loops in automatic guidance systems. This aspect shall be especially considered as it represents an important functionality of the automation system. The elaborated accuracy limiting factors in using robot-tachymeters in construction processes are of decisive importance as well as the development of fully-automatic tachymeter stationing. So this complex sensor can be optimally integrated into the construction process. This fact, together with the wide application spectrum of the modular positioning and guiding system, considerably contributes to the acceptance of this automation solution on construction sides.

For improving machine guiding quality in this thesis procedures and methods are elaborated urgently needing a conflation of special knowledge of the disciplines system theory, control technology and geodetic measuring techniques. The modular guiding system is prototypically realised by LabView® and most successfully tested in an experiment with a model truck (scale 1:14).

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG.....	9
1.1	VORGEHENSWEISE	10
1.2	STAND DER WISSENSCHAFT	12
2	GRUNDLAGEN DER AUTOMATISCHEN GEOMETRISCHEN FÜHRUNG VON TECHNISCHEN SYSTEMEN.....	22
2.1	BEGRIFFE UND DEFINITIONEN	22
2.1.1	<i>Allgemeine Begrifflichkeiten</i>	22
2.1.2	<i>Einordnungen aus Sicht der technischen Mechanik</i>	24
2.1.3	<i>Systemtheoretische Modellbildung</i>	25
2.1.4	<i>Regelungstechnik zur zielgerichteten Beeinflussung von Systemen</i>	28
2.2	METHODIK ZUR ZIELGERICHTETEN BEEINFLUSSUNG EINES SYSTEMS AM BEISPIEL EINER KRANREGELUNG	31
2.2.1	<i>Mathematische Beschreibung des Kransystems</i>	31
2.2.2	<i>Beschreibung des dynamischen LTI-Systems im Zustandsraum</i>	33
2.2.3	<i>Eigenbewegung des Kransystems</i>	35
2.2.4	<i>Überführung des Systems in den Frequenzbereich</i>	36
2.2.5	<i>Reglerentwurf im Frequenzbereich</i>	39
2.2.6	<i>Regelung im Zustandsraum</i>	43
2.2.7	<i>KALMAN-Filter als Beobachter im Regelkreis</i>	44
2.2.8	<i>Schlussfolgerungen</i>	45
2.3	MESSTECHNIK	45
2.3.1	<i>Überblick gebräuchlicher Sensoren</i>	46
2.3.2	<i>Tachymeter als Messeinrichtung für hochgenaue Führungsaufgaben</i>	48
2.3.3	<i>Koordinatensysteme und Soll-Trajektorien</i>	50
3	ANALYSE DER ANFORDERUNGEN AN EIN FÜHRUNGS- UND POSITIONIERUNGSSYSTEM IM BAUSTELLENUMFELD	53
3.1	DEFINITION VON ANWENDUNGSGATTUNGEN	53
3.1.1	<i>Abstecken</i>	55
3.1.2	<i>Positionierung von Bauteilen</i>	56
3.1.3	<i>Positionierung von Arbeitsmitteln</i>	57
3.1.4	<i>Bahnführung von Bauteilen</i>	58
3.1.5	<i>Bahnführung von Arbeitsmitteln</i>	59
3.2	ABLEITUNG NOTWENDIGER FUNKTIONSGRUPPEN UND DEREN EINZELFUNKTIONEN.	60
3.3	AUFSTELLUNG UND AUSWERTUNG DER FUNKTIONALMATRIZEN	74
3.3.1	<i>Häufigkeit der Funktionen</i>	74
3.3.2	<i>Priorität der Funktionen</i>	76
3.4	SYSTEMARCHITEKTUR.....	79
4	ENTWURF EINES MODULAREN FÜHRUNGSSYSTEMS.....	81
4.1	SYSTEMKONZEPT.....	81
4.1.1	<i>Varianten der räumlichen Anordnung der Systemkomponenten</i>	81
4.1.2	<i>Modulare Ebenen</i>	82
4.2	SYSTEMDESIGN	84
4.2.1	<i>Das Sensor-Control-Modul</i>	84
4.2.2	<i>Das Führungsmodul</i>	85
4.2.3	<i>Spezifikation der Kommunikation zwischen den Softwarekomponenten</i>	85

4.2.4	<i>Datenhaltung</i>	87
4.3	VORTEILE VON LABVIEW® ALS ENTWICKLUNGSUMGEBUNG.....	88
5	TACHYMETER ALS PROZESSINTEGRIERTER 3-D-POSITIONSSENSOR...	90
5.1	AUTOMATISIERUNG DER STATIONIERUNGSAUFGABE	90
5.1.1	<i>Automatisches Messen aller möglichen Ziele</i>	91
5.1.2	<i>Zuordnung der Tachymetermessungen zu den Festpunkten</i>	91
5.1.3	<i>Berechnung der Stationierung</i>	94
5.2	ÜBERLEGUNGEN ZUR POSITIONSGENAUIGKEIT IM BAUPROZESS	94
5.2.1	<i>Auswirkung einer exponierten Reflektorposition auf die Qualität einer Positionsbestimmung.</i>	95
5.2.2	<i>Auswirkungen thermischer Last bei exponierter Reflektorposition</i>	96
5.2.3	<i>Auswirkung der Totzeit auf die Regelabweichung</i>	97
5.3	ZUSAMMENFASSENDE BEURTEILUNG.....	99
6	EINSATZ DES MODULAREN FÜHRUNGSSYSTEMS IM EXPERIMENT MIT EINEM MODELLFAHRZEUG	100
6.1	VERSUCHSAUFBAU	101
6.1.1	<i>Hardwarekomponenten und deren Interaktion im Experiment</i>	101
6.1.2	<i>Vorgabe der Soll-Trajektorie</i>	102
6.1.3	<i>Testszenario</i>	102
6.2	MODELL-LKW ALS ZU FÜHRENDES DYNAMISCHES SYSTEM	103
6.2.1	<i>Mathematisches Modell</i>	103
6.2.2	<i>Systemidentifikation - Kalibrierung der Lenkung</i>	104
6.3	REALISIERUNG DES AUTOMATISCHEN FÜHRUNGSSYSTEMS	106
6.3.1	<i>Realisierung des Führungsmoduls mit LabView®</i>	107
6.3.2	<i>Entwurf eines PI-Zustandsreglers mit Beobachter</i>	109
6.3.3	<i>Mathematische Umsetzung des Führungsmoduls</i>	109
6.3.4	<i>Ergebnis Fahrversuch</i>	118
6.4	VERBESSERUNG DER REGELGÜTE DURCH ANTIZIPATORISCHE STEUERUNG.....	119
6.4.1	<i>Analyse des menschlichen Reglers bei Führaufgaben</i>	119
6.4.2	<i>Vorsteuerung zur Erhöhung der Phasenreserve</i>	120
6.4.3	<i>Erweiterung des PI-Zustandsreglers um Vorsteuerung</i>	120
6.5	ANALYSE DER ERREICHTEN GENAUIGKEITEN.....	121
6.5.1	<i>Abweichungen zur Soll-Trajektorie als Indikator für Führungsqualität</i>	122
6.5.2	<i>Genauigkeit der Positionsbestimmung mittels Tachymeter</i>	125
6.5.3	<i>Auswirkungen der Positionsgenauigkeit auf die automatische Führung</i>	126
6.6	ERGEBNISSE DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNG	127
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	129
	LITERATUR	132
	VERZEICHNIS DER VARIABLEN.....	132
	LEBENS LAUF	144

1 Einführung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der automatischen Positionierung und Führung von Fahrzeugen und Objekten im Baustellumfeld. Im Fokus stehen dabei Bauprozesse mit hohen Genauigkeitsanforderungen (Standardabweichung $\sigma < 1\text{cm}$), bei denen geodätische Messsysteme, insbesondere Tachymeter, als 3-D-Positionssensoren integriert werden sollen. Da sich das Umfeld auf einer Baustelle dynamisch verändert, können bestehende Automatisierungssysteme nur begrenzt und in klar umrissenen Prozessbereichen eingesetzt werden. Ziel der Arbeit ist es deshalb, ein modulares System für die flexible und effiziente Automatisierung von Bauprozessen zu entwerfen und prototypisch zu realisieren. Um die, wie oben erwähnt, hohen Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen bedarf es der Untersuchung zielverfolgender Tachymeter als prozessintegrierte 3-D-Positionssensoren. Trotz der hohen Messgenauigkeit moderner Tachymeter von wenigen Millimetern ist es bis heute nicht möglich, Führungsaufgaben im Genauigkeitsbereich $\sigma < 1\text{cm}$ bei Geschwindigkeiten des geführten Objekts von mehreren Dezimetern pro Sekunde zu realisieren. Zur Steigerung der Maschinenführungsqualität werden in dieser Arbeit Verfahren und Methoden erarbeitet, die der Zusammenführung von Fachwissen aus den Disziplinen der Systemtheorie, der Regelungstechnik und der geodätischen Messtechnik bedürfen.

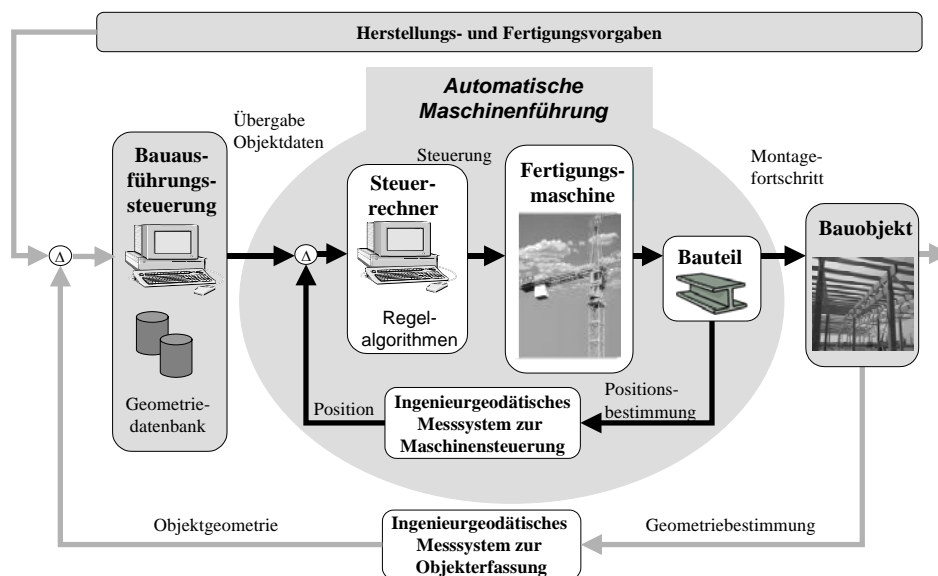


Abbildung 1.1: *Struktur eines automatisierten Bauprozesses am Beispiel der Errichtung einer Industriehalle.*

Das Bestreben, Bauprozesse zu automatisieren und damit die Qualität des Bauobjekts zu steigern und gleichzeitig die Kosten zu senken ist nicht neu. Bereits in den 90er Jahren wurde die Automatisierung von Bauprozessen in den Fokus der Wissenschaft gerückt. Getrieben vom hohen Kosten- und Qualitätsdruck entstand die Notwendigkeit einer Effizienzsteigerung auf Baustellen. Seitdem wird weltweit in vielen Forschungs- und Entwicklungsabteilungen an einer Novellierung des Bauwesens gearbeitet. Nach einer Phase der Automatisierung einzelner Bauabschnitte wird mehr und mehr eine Integration aller am Bau beteiligten Prozesse in ein Gesamtsystem angestrebt. Die Einführung von CIC (Computer Integrated Construction) kommt aber nur langsam voran. Dies liegt sicherlich u.a. besonders an der Individualität jeder einzelnen Baustelle und den dynamischen Veränderungen bei

Baufortschritten. Der in Abbildung 1.1 dargestellte Regelkreis des automatisierten Bauprozesses gibt einen Einblick in die einzelnen Arbeitsfelder.

Basierend auf einer stetigen Erfassung des Baufortschritts kann die Bauausführungssteuerung als Regelkreis dargestellt werden. Jeder von der Bauausführungssteuerung kontrollierte Bauprozess stellt dabei eine weitere Ebene im Regelkreis dar, die dem Ziel dient, einzelne Objekte oder Maschinen automatisch so zu führen, dass der jeweilige Bauabschnitt gemäß den Herstellungs- und Fertigungsvorhaben erzeugt wird. Es entsteht, wie auch in Abbildung 1.1 zu sehen, eine kaskadenförmige Regelstruktur mit zwei ineinander verschachtelten Regelkreisen.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich in ihren Ausführungen auf den inneren Regelkreis - die automatische Positionierung bzw. Führung, von Objekten oder Maschinen zur Erzeugung einer vorgegebenen Soll-Geometrie. Dabei werden im Folgenden unterschiedlichste Anwendungen betrachtet, die der Integration einer 3-D-Messeinrichtung in das Positionierungs- und Führungssystem bedürfen.

Als echtzeitfähige Messeinrichtung für sogenannte 3-D-Steuerungen ist sowohl der Einsatz von zielverfolgenden Tachymetern als auch von PDGPS (Precise Differential Global Positioning System) möglich. Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen scheidet allerdings PDGPS, mit Positionsgenauigkeiten von $\sigma = 1\text{-}3\text{cm}$ für bewegte Fahrzeuge oder Objekte, als Messeinrichtung für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Anwendungen aus. Deshalb bedarf es im Folgenden einer Integration von zielverfolgenden Tachymetern als Messeinrichtung in die automatisierten Bauprozesse. Dies hat aufgrund der relativ geringen Abtastrate und der vorhandenen Totzeit von Tachymetern Auswirkungen auf den Entwurf der Regelkreise eines automatischen Positionierungs- und Führungssystems. Außerdem müssen Tachymeter vor Beginn der eigentlichen Positionierungs- und Führungsaufgabe im Festpunktfeld der jeweiligen Baustelle stationiert werden. Diese sehr genau und fachmännisch durchzuführenden Arbeiten sind zeitraubend und fehleranfällig. Es besteht folglich der Wunsch diese „Stationierungsaufgabe“ ebenfalls zu automatisieren und so, beim Einsatz von zielverfolgenden Tachymetern, einen ähnlich hohen Bedienkomfort wie beim Einsatz von PDGPS zu erzielen.

Die hohen Genauigkeiten moderner zielverfolgender Tachymeter von wenigen Millimetern werden im Bauprozess unter realen Bedingungen nur selten und mit großem Aufwand erreicht. Die Einflüsse von erhöht angebrachten Reflektoren auf bewegten Fahrzeugen oder Objekten, zusammen mit den Auswirkungen der thermischen Verformung durch Sonneneinstrahlung sind nicht zu unterschätzen. Im Rahmen dieser Arbeit sollen deshalb diese Effekte näher betrachtet werden, um so eine fundierte Grundlage für die hochgenaue Positionierung und Führung von Fahrzeugen und Objekten im Baustellenumfeld zu legen.

Die am Markt erhältlichen 3-D-Maschinensteuersysteme sind für spezielle, meist aus dem Bereich des automatisierungsfreundlichen Straßenbaus stammenden, Anwendungsfälle ausgelegt. Der Einsatz derartiger Führungssysteme für die Automatisierung anderer Anwendungsfälle ist kaum möglich. Im Rahmen dieser Arbeit soll deshalb der Entwurf eines modularen, flexibel für unterschiedlichste Anwendungsfälle einsetzbaren Systems erarbeitet und prototypisch realisiert werden. Der Systementwurf basiert auf einer Anforderungsanalyse zur Zielsetzung dieser Arbeit, um die Entwurfskriterien systematisch aufzuarbeiten.

1.1 Vorgehensweise

Im folgenden Unterkapitel wird zunächst der Stand der Wissenschaft in den Bereichen der Automatisierung von Bauprozessen, der geodätischen Auswertemethoden und der 3-D-

Positionsbestimmung bewegter Objekte mit zielverfolgenden Tachymetern dargestellt. Dabei werden zusätzlich auch Automatisierungslösungen aus dem Bereich der Landtechnik und der Fahrzeugtechnik betrachtet, da sich starke Verknüpfungen und Gemeinsamkeiten zwischen den Wissenschaftsbereichen ergeben.

Die wissenschaftlichen Grundlagen zur Führung von technischen Systemen werden im zweiten Kapitel am Beispiel einer Kranregelung als ein Vertreter der in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfälle zusammengestellt. Aufbauend auf der physikalischen Sichtweise der Bewegungen mechanisch-technischer Systeme werden die Methoden der Systemtheorie erläutert. Dabei steht die Darstellung linearer dynamischer Systeme im Zeit- und Frequenzbereich im Vordergrund. Die mathematische Modellierung dieser Systeme bildet eine wesentliche Grundlage der Regelungstechnik und ist auch Grundlage der hier verwendeten geodätischen Auswertemethodik. Diese gemeinsame Schnittstelle zwischen Geodäsie und Regelungstechnik bietet die Möglichkeit, die Methoden der Regelungstechnik auf geodätisches Fachwissen aufzusetzen. Die Regelungstechnik wird dabei in ihren Grundzügen, soweit dies für das Verständnis der vorliegenden Arbeit erforderlich ist, dargestellt. Die Grundlagen zur zielgerichteten Beeinflussung dynamischer Systeme mit Methoden der Systemtheorie und der Regelungstechnik werden am Beispiel einer Kranregelung dargestellt. Außerdem beinhaltet das zweite Kapitel die Grundlagen aus dem Bereich der geodätischen Messtechnik und Positionsbestimmung bewegter Objekte mit zielverfolgenden Tachymetern.

Im dritten Kapitel werden die Anforderungen an ein modulares Führungssystem erarbeitet. Dazu werden gemäß der Methodik der „Quality Function Deployment“-Analyse (QFD-Analyse) mögliche Anwendungsfälle analysiert und daraus notwendige Funktionen des Führungssystem abgeleitet. Für die Analyse wird auf Grund des weiten Anwendungsspektrums ein generischer Ansatz gewählt, bei dem die möglichen Anwendungsfälle in fünf Anwendungsgattungen (Abstecken, Positionierung von Bauteilen, Positionierung von Arbeitsmitteln, Bahnführung von Bauteilen, Bahnführung von Arbeitsmitteln) untergliedert werden.

Der Entwurf des modularen Systems basierend auf einer Toolbox mit austauschbaren Funktionsblöcken wird im vierten Kapitel dargestellt. Das Zusammenspiel der einzelnen Module offenbart die notwendigen Schnittstellendefinitionen und die erforderlichen Daten und Parameter. Wichtig ist die Möglichkeit einer flexiblen Auslegung des Führungssystems zur effizienten Bearbeitung verschiedenster Anwendungsfälle. Die automatische Führung von Maschinen und Objekten auf Soll-Trajektorien steht dabei im Vordergrund.

Die hohen Genauigkeitsanforderungen machen den Einsatz von zielverfolgenden Tachymetern als 3-D-Positionssensoren im Führungssystem unumgänglich. Deshalb wird im fünften Kapitel deren Verhalten im modularen Führungssystem analysiert. Es wird ein Verfahren zur vollständig automatischen Stationierung eines Tachymeters („Powerstation“) entwickelt, um die Qualität der Prozessintegration zu steigern. Außerdem wird der notwendigerweise exponiert angebrachte Reflektor zur Positionsbestimmung in seinen Auswirkungen auf die Führungsqualität untersucht. Weiterhin werden die Auswirkungen der schlechten dynamischen Eigenschaften von Tachymetern, wie geringe Abtastrate und große Totzeit, auf das Verhalten von Regelkreisen dargestellt. Diese Erkenntnisse werden dann im nächsten Kapitel zur besseren Integration von Tachymetern in Führungssysteme durch einen entsprechend modifizierten Regelentwurf genutzt.

Im sechsten Kapitel erfolgt die prototypische Realisierung des modularen Positionierungs- und Führungssystems im Rahmen eines Experiments zur automatischen Führung eines Modell-Lkws auf einer vorgegebenen Soll-Trajektorie. Dabei dient ein zielverfolgendes

Tachymeter als einzige Messeinrichtung zur Bestimmung der aktuellen Position des Modell-Lkws. Ziel dieser prototypischen Realisierung ist, neben dem Funktionsnachweis des Systems, die optimale Integration von Tachymetern in die Regelkreise des automatischen Positionierungs- und Führungssystems.

Im siebten Kapitel werden die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick mit weiteren Forschungsansätzen geben.

1.2 Stand der Wissenschaft

Um den Stand der Wissenschaft in angemessener Art und Weise darzustellen, wird im Folgenden auf wesentliche Projekte und Forschungsaktivitäten aus dem Bereich des Bauwesens eingegangen. Im Kontext der Automatisierung von Bauprozessen müssen aber auch die aktuellen Entwicklungen aus den Bereichen der Regelungstechnik und der Geodäsie betrachtet werden. Weitere relevante Forschungsaktivitäten stammen aus dem Bereich der Agrartechnik und der Fahrzeugtechnik, in denen ebenfalls die automatische Führung von Maschinen und Fahrzeugen thematisiert wird.

Den Deckmantel aller Forschungsaktivitäten zur Automatisierung von Bauprozessen bildet seit einigen Jahren das computerintegrierte Bauen (CIC). Dabei werden die jeweiligen Planungsdaten aus einem CAD-System zusammen mit der aktuellen Position des jeweiligen Arbeitsmittels in Echtzeit auf der Baustelle zur Verfügung gestellt. Ziel ist es, eine Bauausführung ohne vorangehende Absteckung der Planungsdaten in die Örtlichkeit zu ermöglichen und gleichzeitig das resultierende Bauergebnis in das CAD-System zurückzuführen. So wird ein effektives Baustellen-Controlling möglich. (PEYRET 1999) und (PEYRET, MIYATAKE 2001)

Automatisierungen im Straßen- und Erdbau

Im Bereich des Straßen- und Erdbaues gilt es, bestehende Maschinen wie z.B. Grader, Dozer, Bagger und Deckenfertiger zu automatisieren. Dabei existieren in der Praxis einfache Systeme, die lediglich den aktuellen Zustand des Arbeitsgerätes im Vergleich zur geplanten, digital gespeicherten Soll-Geometrie darstellen und so dem Maschinenführer die Möglichkeit zur Steuerung geben. Komplexere Systeme ermöglichen im Straßenbau eine Teilautomatisierung der Maschine, indem sie, je nach Position der Maschine, das Arbeitsgerät (Schar oder Bohle) in die richtige Höhe bringt. Dieses sogenannte Nivellieren wird z.B. bei (MEYER 2003b) dargestellt. Dabei wird die aktuelle Position in modernen Systemen mit 3-D Positionssensoren wie zielverfolgende Tachymeter oder differentielles GPS bestimmt. Diese Arten der halbautomatischen Steuerung werden deshalb oft als 3-D Steuerung bezeichnet (z.B. BAYER 2004, HEIKKILÄ, JAAKKOLA 2003b, MEYER 2003b und KAHMEN, RETSCHER 1999).

Das Ziel der aktuellen wissenschaftlichen Untersuchungen ist meistens eine vollautomatische Steuerung der Baumaschine. Das jeweilige Automatisierungspotential wurde von (HEIKKILÄ, JAAKKOLA 2003A) untersucht. Danach weisen die Maschinen das größte Potential auf, deren Betrieb einer sorgfältigen Vorarbeit bedarf und an deren Produkt hohe Genauigkeitsanforderungen gestellt werden. Dies sind vor allem Gleitschalungsfertiger, Deckenfertiger und Grader. Es wurden vollautomatische Steuerungen für Gleitschalungsfertiger entwickelt, die unter dem Stichwort „Steuern ohne Draht“ bekannt sind (z.B. MEYER 2003a). Die zur Zeit erreichbaren Genauigkeiten einer automatischen Baumaschinensteuerung liegen relativ zur geplanten Soll-Geometrie im Bereich von ein- bis zwei Zentimeter Standardabweichung bei Tachymetersteuerungen (ZIMMERMANN 2004) und

zwei bis fünf Zentimeter bei präzisen differentiellen GPS-Steuerungen (ROBERTS, et al. 2002). Dabei ist die Genauigkeit stark von der Geschwindigkeit der Baumaschine, dem zu verarbeitenden Material und den Wetterbedingungen abhängig. Die höchste Genauigkeit einer automatischen Steuerung wird bei Gleitschalungsfertigern mit zielverfolgenden Tachymetern als Positionssensoren erreicht (BAYER 2004). Die Arbeitsgeschwindigkeit beträgt bei dieser Anwendung nach WIRTGEN (2002) aber nur 1-2cm/sec.

Das EU-Projekt CIRC (Computer Integrated Road Construction) hat die Umsetzung der Ideen des CIC (siehe oben) im Straßenbau zum Ziel. Dabei sollen nach PEYRET (2000) und PEYRET et al. (2000) vor allem die Möglichkeiten eines geschlossenen Datenflusses von der Planung über den Einbau bis hin zur Abschlusskontrolle des Produkts untersucht werden. Im Rahmen von CIRC wurden zwei prototypische Systeme zur Führung von Kompaktoren (CIRCOM) und Deckenfertigern (CIRPAV) entwickelt. CIRCOM nutzt präzises differentielles GPS (PDGPS) zur Positionsbestimmung und ermöglicht eine zweidimensionale Steuerung des Kompaktors mit einer Standardabweichung von 5-10cm. CIRPAV beinhaltet neben dem PDGPS noch das System „Laserguide“ der Universität von East London und ermöglicht die Steuerung des Deckenfertigers mit einer Höhengenaugigkeit von 1cm (BOUVET et al. 2000, PEYRET 2000).

Als Nachfolgeprojekt von CIRC startete im Jahr 2000 das OSYRIS-Projekt (Open System for Road Information Support) mit dem Ziel, einen europäischen Standard für CIC-Systeme im Bereich des Straßenbaues zu entwickeln (LIGIER, et al. 2001). Dazu wurden prototypische Systemkomponenten für die Planung, Dokumentation und Ausführung von Asphaltstraßen realisiert. Die in den Datenfluss zu integrierenden Maschinen waren demnach analog zum CIRC-Projekt Kompaktoren und Deckenfertiger. Die Steuerung der Maschinen wurde durch zwei Steuersysteme (Paver Measurement and Control System (PMCS) für Deckenfertiger und Compactor Measurement and Control System (CMCS) für Kompaktoren) realisiert. Zur Positionsbestimmung wurde sowohl präzises differentielles GPS als auch Tachymetrie integriert. Das OSYRIS-Projekt konzentriert sich weniger auf die eigentliche Steuerung der Maschinen als vielmehr auf die Datenstrukturen und die Verarbeitung zusätzlich gesammelter Informationen über das Bauobjekt. Die nachhaltige Bewirtschaftung der so computerintegriert gebauten Straßen ist wesentlicher Gegenstand der Forschung. (PEYRET, MIYATAKE 2001)

Im Bereich des Erdbaues ist vor allem die Automatisierung von Baggern und Bulldozern Gegenstand der Forschung. Die Universität Sydney realisierte den Prototyp eines automatischen Baggers, um besonders das sich ändernde dynamische Verhalten der Maschine bei Kontakt mit dem Erdreich und deren Auswirkung auf den Automatikbetrieb zu erforschen (HA, et al. 2000). Ebenfalls in Australien wurde von CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) ein automatisches Steuersystem für einen Schwerlast-Seilbagger entwickelt, um die zeitraubenden Ausgleichsbewegungen der 120 t-Schaufel am Seil zu minimieren und so die Effektivität zu erhöhen (CORKE, et al. 2003). Diese Forschungen haben gezeigt, dass die Automatisierungskomplexität der jeweiligen Baumaschine mit der Anzahl an Freiheitsgraden der beweglichen Teile zunimmt. Die Modellierung der Maschine, als Grundlage einer Automatisierung, wird somit immer wichtiger und zugleich aufwendiger. In Polen wird deshalb an der Universität Krakau an der Ableitung von mathematischen Bewegungsmodellen aus CAD-Modellen der jeweiligen Maschine gearbeitet (MICHALOWSKI, et al. 2001). In ähnlicher Art und Weise versuchen JAAKKALO, HEIKKILÄ 2004 an der Universität Oulu, Finnland, aus den CAD-Daten der Planung möglichst automatisch ein MC-Modell (Machine Control Model), als Grundlage einer automatischen Steuerung abzuleiten.

Neben einer möglichen Genauigkeitssteigerung werden viele Forschungsaktivitäten im Bereich der Automatisierung von Baumaschinen vom Kostensenkungsdruck initiiert. Die Investitionskosten für automatische Steuersysteme sind sehr hoch, teilweise bis zu 50% der Gesamtmaschinenkosten (JURASZ, KLEY 2002). Die so entstehenden Kostenrisiken beim Einsatz von Automatisierungssystemen wurden von TAYLOR, et al. (2000) untersucht. Eine automatisierte Maschine muss entweder wesentlich genauer als eine manuelle Steuerung oder produktiver und damit preiswerter sein, um am Markt erfolgreich zu sein. Das im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde modulare Führungssystem berücksichtigt diese Erkenntnisse, in dem auf einen modularen Ansatz gesetzt wird. So kann das System durch seinen modularen Aufbau flexibel eingesetzt werden, was die Investitionskosten schneller zu amortisieren hilft. Dadurch wird den Kostenrisiken entgegengewirkt und die Akzeptanz erhöht. Diese Überlegungen sind nur in die Praxis übertragbar, wenn der Zugewinn an Qualität durch automatisierte Baumaschinen messbar und damit kalkulierbar ist. Um dies zu erreichen beschäftigen sich SONG, LEE (2004) mit der Analyse von Qualitätskosten in Bauprojekten und nehmen Bezug auf das von LOVE (2003) entwickelte PROMQACS-System (Projekt Management Quality Cost System) zur Bewertung der Qualitätskosten im Baustellenmanagement-Prozess.

Automatisierungssysteme, die an vorhandene Straßen- und Erdbaumaschinen adaptiert werden, sind prinzipiell zwischen verschiedenen Maschinen austauschbar. Die flexible Einsetzbarkeit solcher oft modularen Systeme kann dazu beitragen, die Automatisierungskosten zu senken. Damit die verschiedenen Komponenten eines modularen Steuersystems miteinander kommunizieren können, bedarf es standardisierter Schnittstellen und Datenübertragungsprotokolle. Neben den bereits oben erwähnten Forschungsaktivitäten im Rahmen des OSYRIS-Projekts beschreiben POGGY, UNGER (2000) die Möglichkeiten einer Vernetzung der Maschinenkomponenten mittels des CANOpen-Standards. Diese Forschungsaktivitäten der Universität Magdeburg untersuchen besonders die Effektivität und die Sicherheit dieser Art der Datenkommunikation aus Sicht der Baumaschine und ihre Eignung für die Vernetzung mit einem automatischen Maschinensteuersystem. Das finnische Projekt MODU (KILPELÄINEN, et al. 2004) und (HEIKKILÄ, JAAKKOLA 2003b) untersucht die Systemschnittstellen und schlägt ein XML-basierendes Datenformat vor, um die Inkompatibilitäten zu überwinden. Generell ist die Modularität der bisher vorgeschlagenen Systeme auf ein zentrales Steuermodul mit Software und Schnittstellen für die gängigsten Maschinensteuerungen und geodätischen 3-D Positionssensoren begrenzt. Diese Art von modularen Systemen, zu denen auch das GeoRog-System der schwedischen Firma SBG (SBG 2006) gehört, vergleichen die 3-D Positionsbestimmung der Maschine und weitere Sensordaten mit der geplanten Soll-Geometrie und geben eine resultierende Abweichung an das Steuersystem der Maschine weiter. Über eigene Regelalgorithmen verfügen diese Systeme nicht.

Automatisierungen im Stahl- und Hochbau

Im Hochbau werden Effizienzsteigerungen seit vielen Jahren durch vermehrten Einsatz von Fertigteilen erzielt. Die industriell vorgefertigten Bauteile werden zur Baustelle transportiert und müssen anschließend positioniert und montiert werden. Die Automatisierung dieser zeitintensiven und mit meist hoher Genauigkeit auszuführenden Arbeitsschritte ist Gegenstand aktueller Forschungen (FELDMANN, KOCH 2000).

In Japan wurden in den letzten Jahren in verschiedenen Projekten sogenannte „Service-Roboter“ entwickelt, die bei Montageaufgaben unterstützen (BALAGUER 2004). Ebenfalls mit mobilen Robotern im Hochbau beschäftigt sich die Universität München, die den Prototyp eines mobilen Bohr- und Montageroboters entwickelte (BOCK, KREUPL 2004). In den USA

wurde vom National Institute of Standards and Technology (NIST) das Projekt „RoboCrane“ ins Leben gerufen, um die Möglichkeiten einer automatischen Montage von Stahlbauteilen zu untersuchen (LYTLE, et al. 2002). Der automatisierte Kabel-Kran verfügt über ein mit sechs Seilen im Raum positionierbares Greifsystem, welches mittels eines Lasersystems mit vier stationären Beams positioniert wird. In diesem Projekt wird deutlich, dass eine Automatisierung der Montage von Fertigteilen auch deren automatische Befestigung (FLEISCHMANN, et al. 1992) und das sichere und automatische Greifen der beliebig platzierten Bauteile (GILSINN, et al. 2004) mit einschließt.

Für den Einsatz von automatischen Positionierungs- und Montagesystemen, wie z.B. „RoboCrane“ ist eine Identifizierung und Verfolgung der auf der Baustelle gelagerten und verbauten Fertigteile unerlässlich. Dazu wurde ebenfalls vom NIST in den USA das System „Comp-Track“ entwickelt (FURLANI, PFEFFER 2001). Das System ermöglicht eine Bauteilidentifikation über RFID (Radio Frequency Identification) und Barcode. Zusammen mit einer 3-D-Positionsbestimmung z.B. mittels Tachymetern, wie sie von NISHIMURA, et al. (2000) untersucht wurde, kann so rechnergestützt sichergestellt werden, dass jedes einzelne Bauteil an seiner geplanten Einbauposition platziert wurde.

Weiteres Automatisierungspotential im Hochbau stellt die Positionierung und Führung von Bohrgeräten in Echtzeit dar. So wurde in Korea ein automatisches Bohrsystem für hochfeste Spannbetonpfähle entwickelt, das gleichzeitig einen möglichst exakt vertikalen Einbau der vorgefertigten Pfähle ermöglicht (CHO, et al. 2004). Das Bohren der Löcher und Setzen der Anker für Deckenabhängungen bietet nach FELDMANN, KOCH (2000) großes Automatisierungspotential. In BOCK, KREUPL (2004) wird ein entsprechender Prototyp vorgestellt. Am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart wurde ein Positionierungssystem für Handwerkzeuge entwickelt, das es ermöglicht z.B. Handbohrgeräte mit Genauigkeiten von 1-2 mm an die geplanten Bohrlochpositionen zu führen (GLÄSER, et al. 2002). Durch die Automatisierung von Bohrsystemen kann so der Arbeitsschritt des Absteckens und Markierens von Bohrlochpositionen entfallen. Außerdem führt die Qualitätssteigerung von Bohrsystemen dazu, dass die Ausgleichselemente bei Folgegewerken oder Befestigungssystemen verringert oder ganz weggelassen werden können, was die Kosten weiter reduziert.

Ein weiterer wichtiger Trend der Automatisierung des Hochbaus besteht darin, industrielle Fertigungsmethoden auf der Baustelle umzusetzen. Das japanische Projekt SMART (Shimizu Manufacturing System by Advanced Robotics Technology) erforscht die Möglichkeiten des automatischen, robotergestützten Bauens. Das entwickelte System ermöglicht die Fertigstellung einer kompletten Etage, bestehend aus Stahlträgern und Betonbauteilen, eines Hochhauses. Anschließend klettert die „Fertigungsanlage“ am Bauwerk hoch, und es beginnt die Fertigung der nächsten Etage (YAMAZAKI, MAEDA 1998). Ebenfalls eine fabrikähnliche Fertigung sieht das Projekt CCC (Construction by Contour Crafting) der Universität von Südkalifornien vor (KHOSHNEVIS 2003). Die Montage wird durch eine Anzahl von mobilen Fertigungsrobotern durchgeführt, die neben den strukturellen Bauteilen auch die Sanitär- und Elektroinstallationen vornehmen. Nachteil dieser Art von industriellen Fertigungssystemen sind die mangelnde Flexibilität und damit die mangelnde Individualität des entstehenden Bauobjektes.

Das EU-Projekt ROCCO (GAMBAO, et al. 1997) ist das bekannteste Projekt im Bereich der Automation des klassischen Mauerwerks. Der an einem Ort platzierte Mauerroboter mit einer Reichweite von 10m ist in der Lage, automatisch Ziegelsteine mit einem Gewicht von bis zu 500kg zu einem Mauerwerk zusammenzusetzen. Dabei kann eine Toleranz des Mauerwerks von 5cm eingehalten werden, obwohl die hohe Nutzlast bei der großen Reichweite und die

damit verbundenen Verformungen des Roboterarms erhebliche Anforderungen an die Regelung stellen. An der Universität Stuttgart wurde außerdem ein mobiler Mauerroboter entwickelt (PRITSCHOW et al. 1995). Dieser auch zum automatischen Verputzen geeignete Roboter stellt aufgrund seiner Mobilität erhöhte Anforderungen an die Navigation und die Sensorik, wie in PRITSCHOW et al. (1996) und (1997) dargestellt worden ist.

Neben der Erforschung des Regelsystems bieten beide Mauerroboter vor allem die Möglichkeit, die Integration von Robotern in die individuelle Baustellenumgebung zu untersuchen. In diesem Bereich sehen aktuelle Veröffentlichungen von IKEDA et al. (2000) und BOCK, KREUPL (2004) besonderen Forschungsbedarf. Nach FELDMANN, KOCH (2000) scheitern bisweilen weitere Automationen jedoch an dem Miteinander von Mensch und Roboter auf der Baustelle, da besonders teilautomatisierte Baustellen erhebliches Gefährdungspotential für die menschlichen Arbeiter besitzen. Die Forschungen kommen bis jetzt zu dem Schluss, dass der menschliche Arbeiter besser in den teilautomatisierten Bauablauf eingebunden werden muss. Dies bedeutet: Der Mensch wird eine Komponente der automatisierten Baustelle. In diesem Zusammenhang wurde von der Universität Madrid ein Baustellen-Sicherheitssystem entwickelt, das den menschlichen Arbeiter mit einer Sicherheitsausstattung, bestehend aus GPS-basiertem Positionierungssystem, Kommunikations- und Videoübertragungsmedien, versieht (ABDERRAHIM, et al. 2003).

Die Zukunft der automatisierten Baustelle sieht YAMAZAKI (2004) in einer Fusion aus Construction Technology, Fertigteilbau, Automatisierungstechnologie und Informationstechnologie. Dies bedeutet eine konsequente Umsetzung des CIC (Computer Integrated Construction) in allen Bereichen der Baustelle. Dazu bedarf es eines ganzheitlichen Baustellen-Managementsystems, das vor allem den Datenaustausch zwischen den verschiedenen Subsystemen über standardisierte Schnittstellen ermöglicht (YOSHIDA, HIRASHITA 2003) und (PEYRET, MIYATAKE 2001). Eine Reihe aktueller Forschungen, wie z.B. das EU-Projekt „FutureHome“ (BALAGUER, et al. 2002) beschäftigen sich in diesem Zusammenhang mit der Einführung von modernen IT-Technologien auf Baustellen. BALAGUER (2004) prägt in diesem Zusammenhang den Begriff der „Soft-Robotik“ im Gegensatz zu der Automatisierung von Maschinen, der „Hard-Robotik“. Weitere Forschungsergebnisse präsentieren Lösungen für ein automatisches Material-Managementsystem basierend auf RFID-Technologie (SONG, et al. 2004) und der Erfassung des dynamisch sich wandelnden Ist-Zustands der Baustelle, basierend auf Laserscanner-Daten (GILSINN, et al. 2004) als wichtige Eingangsgrößen in ein ganzheitliches Baustellen-Managementsystems.

Zielverfolgende Tachymeter und geodätische Auswertemethoden

Die hochgenaue Positionsbestimmung bewegter Ziele ist heute eines der Hauptforschungsgebiete in der Ingenieurgeodäsie. Dabei liegen die Anfänge der polaren Zielverfolgungssysteme bereits in den 80er Jahren und basierten in der Regel auf einem motorisierten Theodoliten mit bildverarbeitenden Systemen zur Zielerfassung. Die aktiven Zielzeichen bestanden meist aus Laserdioden (KAHMEN, et al. 1984). Wesentliche Impulse der Forschung gingen dabei vom Sonderforschungsbereich 228 (1984-1995) „Hochgenaue Navigation – Integration navigatorischer und geodätischer Methoden“ der Universität Stuttgart aus (LINKWITZ, HANGLEITER 1995). Das System MOPS (Modular Optical Positioning System) der Universität Stuttgart (MÖHLENBRINK 1989a), das Messsystem GEOROBOT der Universität Hannover (KAHMEN, STEUDEL 1988) und der Vermessungsroboter TOPOMAT (SCHNEUWLY 1988) sind wichtige Vertreter der ersten optischen Messsysteme mit automatischer Zielerfassung auf Theodolitbasis im Nahbereich.

In BAYER (1992) wird das erste polare Zielverfolgungssystem ZVS-228 vorgestellt. Der Systemaufbau basiert auf dem motorisierten Theodolit (Wild TM2000). Für die Streckenmessung wurde ein Impuls-Entfernungsmesser (IBEO-PS100) und eine elektronische Kamera, basierend auf dem Lateraleffekt (MÖHLENBRINK 1989B), zur Zielführung in das System integriert. So gelang es erstmals, die Qualität der kinematischen Positionsbestimmung langsam bewegter Objekte so weit zu steigern, dass sie für dynamische Anwendungen wie z.B. der Baumaschinensteuerung geeignet erschien (BAYER et al. 1989).

Heute werden zielverfolgende Tachymeter erfolgreich für die dreidimensionale Positionsbestimmung bewegter Objekte, z.B. im Rahmen von Maschinensteuerungen im Bereich des Straßen- und Tunnelbaus eingesetzt. Die Leistungsmerkmale von zielverfolgenden Tachymetern für den Einsatz bei diesen dynamischen Applikationen werden bei HENNES (2000), STEMPFHUBER, MAURER (2001) und KRICKEL (2004) definiert. Neben der Erkenntnis, dass sich die Genauigkeiten der Richtungs- und Streckenmessung bei bewegten Zielen bis zum Faktor 10 gegenüber ruhenden Zielen verschlechtert, wird auf die mangelnde Synchronisation der Sub-Systeme für Richtungs- und Streckenmessung hingewiesen. Basierend auf den unterschiedlich langen Integrationszeiten der Sub-Systeme verursacht die mangelnde Synchronisation, in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit des bewegten Objekts, Fehler in der Positionsbestimmung von mehreren Dezimetern. In STEMPFHUBER et al. (2000) wird ein Verfahren zur Kalibrierung und rechnerischer Synchronisation der Sub-Systeme im Tachymeter gemacht. Generell kann die Genauigkeit der Einzelsensoren (Richtungs- und Streckenmessung) nicht allein zur Beschreibung der Genauigkeit einer kinematischen Positionsbestimmung herangezogen werden, da sie die Dynamik des zielverfolgenden Tachymeters außer acht lässt. Hier bedarf es nach KRICKEL (2004) und STEMPFHUBER (2004) neuer Kalibrier- und Prüfverfahren.

Vor dem Hintergrund dieser Arbeit ist die Integration von zielverfolgenden Tachymetern in bestehende Bauprozesse von zentraler Bedeutung. Die ersten Randbedingungen werden bei MÖHLENBRINK (1999) vorgestellt. Dabei zeichnet sich die erforderliche Prozesskoppelbarkeit als wichtiges Leistungskriterium moderner Tachymeter ab. Durch den Anschluss des Tachymeters an einen Rechner, kombiniert mit individuellen Messprogrammen, werden integrierte Arbeitsweisen möglich (DÜNISCH 1999). Am weitesten fortgeschritten sind diese Entwicklungen im Bereich der Absteckung und Einrichtung der Gleisgeometrie von Hochgeschwindigkeitstrassen (u.a. GLAUS 2004, KAHMEN/RETSCHER 1997, KAHMEN et al. 1998, KUHLMANN 2001, MÖHLENBRINK et al. 2002, MÖHLENBRINK 2004) und bei speziellen Baumaschinen, wie Grader und Gleitschalungsfertiger (u.a. ZIMMERMANN 2004, BAYER 2004, RETSCHER 2002). Ein Hindernis für die Integration von zielverfolgenden Tachymetern in andere Bauprozesse liegt oft in der bisher notwendigen Ausstattung des jeweiligen Objekts mit einem Reflektor. Für viele Führungsaufgaben gerade im Bereich einer Automatisierung des Stahl- und Hochbaus wäre eine reflektorlose Zielverfolgung wünschenswert. Mit diesem Thema beschäftigt sich die TU Wien im Rahmen des Forschungsprojekts „Theodolit- und wissensbasierendes Multi-Sensor-System“ (REITERER et al. 2003). Weitere Forschungen zum Thema Reflektorlose Zielerfassung werden bei JURETZKO 2005, WASMEIER 2004 und WUNDERLICH 2004 vorgestellt.

Die Prozesskopplung von geodätischen Sensoren, wie in diesem Fall zielverfolgende Tachymeter, bedingt ebenfalls ein Umdenken bei den Auswertemethoden. Die Messwerthäufung, wie sie bei statischen Anwendungen immer wieder zur Genauigkeitssteigerung und Qualitätsbeurteilung herangezogen wird, entfällt bei kinematischen Messmethoden. So wird bei HEIKKILÄ, JAAKKOLA (2004) ein Verfahren vorgeschlagen, um die Genauigkeit von kinematischen Tachymetermessungen „on the fly“, also während des Messvorgangs, zu beurteilen. Auch ist es für die Integration in Steuer- und

Führungsprozesse notwendig, dass das Vermessungsergebnis in Echtzeit vorliegt. Leistungskriterien wie Abtastezeit und Totzeit bekommen eine große Bedeutung (BAYER 2004). Das tachymetrische Messergebnis, verknüpft mit anderen Sensoren und Aktoren in einem Regelkreis, wird bereits in KAHMEN (1995) und MÖHLENBRINK (1989a) als eine neue Sichtweise der Ingenieurgeodäsie eingeführt. Heute ist die Modellbildung hinsichtlich echtzeitfähiger Messergebnisse Gegenstand aktueller Forschungen und Betrachtungsweisen innerhalb der geodätischen Auswertetechniken (z.B. HEUNECKE, KUHLMANN 2002, FOPPE et al. 2004 und HEUNECKE, NIEMEIER 2004).

Die Modellbildungen innerhalb der Ingenieurgeodäsie zur Analyse von Deformationsprozessen basieren auf den Erkenntnissen der Systemtheorie. Die u.a. von WELSCH et al. (2000) propagierte Vierteilung der Modellbildung (Kongruenzmodell, statisches Modell, kinematisches Modell, dynamisches Modell) wird bei Deformationsprozessen in ihrem gesamten Spektrum angewandt. Eine Unterteilung findet nach WELSCH et al. (2000) in Anlehnung an die Systemtheorie in deskriptive Modelle (Kongruenzmodell und Kinematisches Modell) und in kausale Modelle (statisches Modell und dynamisches Modell) statt. Diese Unterteilung trägt der Anwendung im Bereich der Deformationsanalyse Rechnung, da die Frage der Modellierung von Einflussgrößen und damit die physikalische Interpretierbarkeit der Analyseergebnisse (nur bei kausalen Modellen gegeben) ein vorrangiges Unterscheidungsmerkmal ist. Wesentliche Veröffentlichungen zu diesem Themenbereich sind neben WELSCH et al. (2000) auch HEUNECKE (1995), WELSCH, HEUNECKE (2001) und EICHHORN (2005).

Automatisierte Landmaschinen

Aus dem breiten Fachgebiet der Agrartechnik ist im Kontext dieser Arbeit der Stand der Wissenschaft in den Bereichen der Ortung und der automatischen Führung von Landmaschinen von Interesse.

In den 90er Jahren wurden die Möglichkeiten einer Verknüpfung von kinematischer Fahrzeugortung mittels GPS und digital gespeicherten Daten über den Bodenzustand erkannt. Es entwickelte sich das Forschungsgebiet des „Precision Farming“, das eine ertragreichere und nachhaltigere Bodennutzung zum Ziel hat. Dabei wird der Ertrag durch die Erntemaschinen teilschlagspezifisch erfasst und mittels zeitgleicher GPS-Positionen georeferenziert. Die Daten werden in einem GIS mit Bodenproben und Fernerkundungsdaten zu einer Bodenzustandskarte zusammengeführt. Diese wird dann im nächsten Zyklus von der Aussaat über die Düngung bis hin zum Pflanzenschutz als Grundlage für eine teilschlagspezifische Steuerung der jeweiligen Maschinen genutzt (SCHMIDT 2003). Grundlage dieses Kreislaufs ist eine möglichst genaue Ortung der jeweiligen Maschine mit differentiellm GPS. Die erreichten Ortungsgenauigkeiten liegen im Dezimeterbereich, was für diese Art der Anwendung ausreichend ist (MUHR 2004).

Aktuelle Forschungen haben die Erweiterung des „Precision Farmings“ auf pflanzenspezifische Bewirtschaftung zum Ziel. Dabei sollen die Positionen der Pflanzen bestimmt werden, und als Grundlage für automatisierte Pflege- und Erntemaschinen dienen (GRIEPENTROG, NORREMARK 2001). Dies erfordert eine Genauigkeitssteigerung der Positionsbestimmung auf 1-2cm, was neben möglichst genauen GPS-Empfängern vor allem eine exakte räumliche und zeitliche Kalibrierung des jeweiligen Systems bedingt. Bei Fahrgeschwindigkeiten der Maschinen von bis zu 30km/h wirken sich Totzeiten, resultierend aus Übertragungszeiten und Berechnungszeiten in den Subsystemen, extrem auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung aus. In STEMPFHUBER (2004) wird ein Kalibrierungsverfahren, basierend auf Referenzmessungen mit Tachymetern, vorgeschlagen.

Eine weitere Forschungsrichtung in der Agrartechnik mit Bedeutung für diese Arbeit ist die automatische Führung von Landmaschinen. Ziele sind eine Entlastung des Maschinenführers und eine höhere Genauigkeit bei Anschlussfahrten gerade bei Dunkelheit und breiten Arbeitsgeräten (KUTZBACH, STOLL 2004). Nach DIEKHANS (2000) sind drei Arten der automatischen Maschinenführung anhand der Charakteristika der Leitlinien zu unterscheiden. Die Pflanzenreihen als bestehende Leitlinien und Arbeitskanten als selbsterzeugte Leitlinien sind sichtbar und können so mit optischen Sensoren abgetastet werden. Die virtuelle Leitlinie hingegen stellt eine im Rechner gespeicherte Trajektorie dar. Hier bedarf es der Ortung der Maschine mittels differentiellem, präzisiertem GPS, um eine automatische Führung zu ermöglichen. Das Grundprinzip wird in ACHTEN, et al. (2001) erläutert. Die automatische Führung eines Feldhäckslers auf verschiedenen gearteten Trajektorien mit Genauigkeiten der Spurführung im Bereich von 3cm (Gerade) bis hin zu mehreren Dezimetern bei Wendemanövern wird in STOLL, KUTZBACH (2000) vorgestellt. Als Referenz zur Beurteilung der erreichten Führungsgenauigkeit dient ein im Boden verlegter Leitdraht, der induktiv abgetastet wird (STOLL, BREUNIGER 2004). Die erreichten Genauigkeiten reichen zwar für viele Anwendungen aus und die Entwicklung von praxisreifen Systemen ist abgeschlossen, jedoch findet die automatische Führung aufgrund des schlechten Kosten-Nutzen-Verhältnisses bis heute keine weite Verbreitung (NOACK 2004).

Aktuelle Forschungen konzentrieren sich auf vollständig autonome, kleinere Feldroboter. Diese sollen sich effizient auf dem Feld bewegen und ihre vorbestimmte Aufgabe erledigen. Dabei müssen sie auf unerwartete zeitliche und räumliche Änderungen mit eigenen Regeln und Entscheidungen handeln. Am Institut für Agrartechnik Bornim (ATB) wird gerade an dem interdisziplinären Projekt MASAS (Mobile Autonomous Sensing and Acting System) gearbeitet. Ziel dieses Projekts ist es, in einem ersten Schritt die Subsysteme für Datenerfassung und Datenübertragung zu erforschen. Später sollen die Subsysteme in einem modularen Konzept zusammengeführt werden. (KRAMER, SCHWARZ 2004 mit weiteren Literaturquellen)

Automatisierung der Fahraufgabe beim Kfz

Die wesentlichen Fahraufgaben bei der Führung eines Straßenfahrzeugs sind die Kontrolle der Längs- und Querbewegungen und die Navigation des Fahrzeugs. Diese obliegen traditionell dem menschlichen Fahrer, der bei seiner Arbeit heutzutage von verschiedenen Assistenzsystemen unterstützt wird. Für die Fahrerunterstützung auf der sensomotorischen Ebene stehen automatische Systeme wie z.B. ABS (Anti-Blockier-System), ASR (Automatische Schlupfregelung) und ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm) zur Verfügung. Bei der Navigationsaufgabe wird der Fahrzeugführer von einem Navigationssystem unterstützt. Weitere Hilfe erfährt der Fahrer durch warnende Systeme, wie z.B. Abstandswarner, Einparkhilfe, und Systeme für die Anzeige von Brems- und Überholweg unterstützt. Bei KOPF (1994) werden weitere Systeme mit zugehörigen Literaturquellen genannt.

Für die vorliegende Arbeit ist der Stand der Forschung in dem Bereich der automatischen Längs- und Querrführung von Fahrzeugen von Interesse. Durch die Automatisierung dieser Fahraufgaben wird dem Fahrer die Verantwortung über wichtige Aktionsausführungen entzogen und mit allen sicherheitsrelevanten und rechtlichen Folgen an das automatische Steuersystem übergeben. Deshalb sind in diesem Bereich die Anforderungen an die Qualität der Regel- und Messsysteme ungleich höher als bei warnenden Systemen (REINELT, et al. 2005).

In den vergangenen Jahren wurden in verschiedenen Projekten die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für das autonome Fahren, vor allem auf Autobahnen, gelegt. In den

USA beschäftigten sich Ende der 80er, Anfang der 90er Jahre sowohl das IVHS-Projekt (Intelligent Vehicle Highway System), als auch das Projekt PATH (Partners for Advanced Transit and Highways) mit der Einrichtung einer speziellen Fahrspur auf dem Highway, in der speziell ausgerüstete Fahrzeuge in Kolonnen mit sehr geringem Fahrzeugabstand autonom fahren sollten. Der Fahrzeugdurchsatz ließe sich, den Ergebnissen entnehmend, durch dieses Verfahren von 2000 auf 6000 Fahrzeuge pro Stunde erhöhen (SHLADOVER 1993). Die Positionsbestimmung als Grundlage der Querregelung der Fahrzeuge geschieht durch einen Leitdraht, der in der Fahrbahn verlegt ist. Für die Längsregelung, also vor allem die Abstandsregelung innerhalb der Kolonnen, werden Ultraschallsensoren und eine Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation eingesetzt. In MAYR (2001) werden die Projekte in ihren Einzelheiten vorgestellt.

In Europa wurden im gleichen Zeitraum ebenfalls umfangreiche Großprojekte zur Automatisierung des Straßenverkehrs bearbeitet. Beim Projekt DRIVE (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe) liegt die Zielsetzung wie bei (KARAMITSOS 1991) beschrieben, vor allem auf einer Regelung des Gesamtverkehrsflusses, um die Sicherheit und den Fahrzeugdurchsatz zu erhöhen. Dagegen konzentrierte sich das Projekt PROMETHEUS (Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety) mehr auf das einzelne Fahrzeug (VOY, et al. 1986). So werden in dem Unterprojekt PRO-ART vor allem Forschungen im Bereich der automatischen Fahrzeugführung unternommen. An der beteiligten Universität der Bundeswehr, München, wurde z.B. das Versuchsfahrzeug VaMoRs-P aufgebaut (DICKMANN 1991), welches bei einer Demonstration mit einer Geschwindigkeit von bis zu 130km/h auf der Autobahn fuhr und selbständig Überholmanöver durchführte. Die Ortung des Fahrzeugs stützt sich im Wesentlichen auf eine Videokamera mit angeschlossenem Bildverarbeitungssystem, um den Fahrbahnverlauf zu erkennen. Die so erkannten Abstände des Fahrzeugs zur Ideallinie dienen den Regelsystemen als Grundlage zur automatischen Steuerung des Fahrzeugs. Diese Art der Positionsbestimmung, als „Computer-Vision“ bezeichnet, ist bis heute vielfach Gegenstand der Forschung (MASAKI 1992, RIEDER 2000 und NAAB 2000). Der Entwurf eines Regelsystems zur automatischen Längs- und Querführung auf Basis von Computer-Vision wird in MAYR (1991) vorgestellt. Eine weitere Nutzung von Computer-Vision zur Automatisierung von Fahraufgaben bezieht sich auf unterstützende Funktionen und extrahiert aus den Videobildern des Straßenraums Verkehrszeichen oder Lichtsignalanlagen (Franke 1999). Diese Informationen können für die Fahrzeuglängsregelung eingesetzt werden und den Fahrer bei Brems- und Geschwindigkeitsüberwachungsfunktionen unterstützen. Probleme bietet dieser Art der Automatisierung vor allem die geringe Erkennungsrate der videobasierten Systeme von ca. 90% durch Sichtverdeckungen durch andere Verkehrsteilnehmer oder schwierige Lichtverhältnisse, weshalb sich derartige Systeme bis heute nicht etablieren konnten (Franke, et al. 1999).

Die Realisierung einer vollständigen Automatisierung der Fahraufgabe ist selbst in übersichtlichen Arealen wie den Autobahnen nur mit massiven technischen und finanziellen Aufwand realisierbar (HIERSCHE 1990). Außerdem ist es bis heute von rechtlichem und emotionalem Interesse, die Verantwortung über die Fahraufgabe in letzter Konsequenz beim Fahrer zu belassen und nicht an ein komplett automatisiertes System zu übergeben (KRAISS 1998). Aus diesen Gründen haben sich die Forschungsaktivitäten in den letzten Jahren von einer kompletten Automatisierung der Fahraufgabe entfernt. Aktuelle Zielsetzung ist vielmehr, den Fahrer durch intelligente Fahrerassistenzsysteme – im englischen Sprachgebrauch als „Advanced Driver Assistance Systems“ (ADAS) bezeichnet – zu unterstützen und zu entlasten. In NAAB (2000) und ISERMANN (2005) werden die wichtigsten modernen Assistenzsysteme vorgestellt. Aus Sicht der Regelungstechnik ist es dabei von

besonderem Interesse, dass der menschliche Fahrer zusammen mit dem Assistenzsystem die gleichen Aktoren im Fahrzeug steuert. Es muss also eine gewichtete Überlagerung von manueller und automatischer Steuerung erfolgen (HUANG 2004 und TRÄCHTLER 2005). Besonders hervorzuheben sind dabei das System ACC (Adaptive Cruise Control), ein Abstands- und Geschwindigkeitsregelsystem mit einer von MAYR (1995) vorgestellten Fahrzeuglängsregelung und das HC-System (Heading Control) zur Unterstützung bei der Spurhaltung. Diese beiden Systeme werden bei (WEILKES, et al. 2005) in einem kombinierten Längs- und Querregelungssystem zusammengeführt.

Von weiterem Interesse für die vorliegende Arbeit sind aktuelle Forschungen der TU Darmstadt, im Zuge derer ein Simulator zur Analyse von Regelkreisen auf Basis komplexer Fahrzeugmodelle entwickelt wurde (SCHMITT, et al. 2005). Die zur Beobachtung komplexer Modelle im Rahmen von Regelalgorithmen benötigten Sensoren müssen zur eigentlichen Information fusioniert werden. Dabei stellen sicherheitskritische Anwendungen besondere Qualitätsanforderungen an Informationen und damit an die Fusion von Sensordaten. In (WILTSCHKO 2004) und (SKUTEK, LINZMEIER 2005) werden verschiedene Berechnungsansätze zur Beurteilung der Qualität einer sicherheitsrelevanten Information dargestellt.

2 Grundlagen der automatischen geometrischen Führung von technischen Systemen

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einer interdisziplinären Fragestellung im Spannungsfeld von Messtechnik, Bauwesen und Regelungstechnik. Die alle Bereiche umfassende Basiswissenschaft stellt dabei die Systemtheorie dar. Die Methoden der einzelnen Fachdisziplinen und deren Definitionen sollen dem Leser in diesem Kapitel zusammenfassend und grundlegend vorgestellt und in ihren Wechselwirkungen verständlich gemacht werden. Dieses Kapitel dient gleichzeitig dazu, die in dieser Arbeit verwendeten Begrifflichkeiten zu definieren.

2.1 Begriffe und Definitionen

2.1.1 Allgemeine Begrifflichkeiten

Absteckung: Die Absteckung stellt eine der Hauptaufgaben der Geodäsie dar. Dabei wird unter dem Begriff der Absteckung im klassischen Sinne ein Vorgang verstanden, bei dem eine durch Punkte repräsentierte, digital oder analog gespeicherte Geometrie in die Örtlichkeit übertragen und dort markiert wird (MÖSER 2000). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff der Absteckung erweitert. Demnach werden Vorgänge, bei denen Geometrien ohne vorausgehende Markierung, direkt in der Örtlichkeit verbaut oder platziert werden, ebenfalls als Absteckung bezeichnet.

Äußere Geometrie: Allgemein beschreibt die äußere Geometrie die Lage eines Körpers im Raum (MÖHLENBRINK et al. 2002). Im Sinne dieser Arbeit wird durch die äußere Geometrie die Lage eines Objektes oder einer Maschine im Baustellenkoordinatensystem beschrieben.

Automatische Systeme: Unter automatischen Systemen werden dynamische Systeme verstanden, die in einer offenen Wirkungskette (Steuerung) oder einer geschlossenen Wirkungskette (Regelung) gemäß einer Sollwertvorgabe ohne menschliche Interaktion agieren. (FÖLLINGER 1980)

Autonome Systeme: Unter autonomen Systemen werden in der Systemtheorie allgemein Systeme verstanden, die ohne eine Stellgrößenmodellierung mathematisch beschrieben sind. Auch bekannt unter der Bezeichnung „freie Systeme“. Vertreter der autonomen Systeme sind kinematische Systeme und der „random walk“-Prozess. (ISERMANN 1974)

Bezugspunkt einer Messeinrichtung: Als Bezugspunkt einer Messeinrichtung wird der geometrische Ort bezeichnet, auf den sich die Messwerte der jeweiligen Messeinrichtung beziehen. Dies ist z.B. bei einer Baumaschine der Reflektor zur Positionsbestimmung mittels Tachymeter.

Dynamik: Die Dynamik wird in der technische Mechanik oft analog zu dem Begriff der Kinetik verwendet, wobei sie eigentlich der Oberbegriff der Statik und der Kinetik ist (MAGNUS, MÜLLER 1990). In der Systemtheorie wird der Begriff der Dynamik auf beliebige Systeme erweitert und eigenständig definiert. Demnach untersucht die Dynamik die Bewegung von Objekten oder Systemen in Abhängigkeit der einwirkenden Kräfte (UNBEHAUEN 1980).

Führungssystem: Unter Führungssystem wird in dieser Arbeit ein aus Hard- und Softwarekomponenten bestehende Funktionseinheit verstanden, die dem Zweck dient

Fahrzeuge oder Objekte so zu beeinflussen, dass diese in Echtzeit auf vorgegebenen Trajektorien bewegt werden können.

Geometrische Führung: Wird eine Baumaschine auf Basis rechnerisch abgeleiteter Geometrielemente wie z.B. Abstand oder Richtung zum geplanten Weg geführt, ohne die geplante Trajektorie zuvor in die Örtlichkeit abzustecken spricht man von geometrischer Führung. Die Ableitung der Geometrielemente basiert dabei auf einer Positionsbestimmung der Maschine in Echtzeit. (MÖNICKE et al. 1996 und BAYER 2004)

Innere Geometrie: Allgemein beschreibt die innere Geometrie die Form eines Objektes vollständig. Dabei wird die Form durch geeignete Kenngrößen, wie Koordinaten von markanten Punkten, Krümmung oder Bogenlängen beschrieben und gleichzeitig abstrahiert. (MÖHLENBRINK et al. 2002)

Kinematik: Teilgebiet der technischen Mechanik. Die Kinematik beschreibt die Lage von Körpern im Raum, sowie die Lageänderungen als Funktion der Zeit t . Die die Bewegung verursachenden Kräfte werden dabei nicht berücksichtigt. Die Kinematik eines beliebigen Punktes P eines Körpers wird üblicherweise durch die Kenngrößen Ort $r(t)$, Geschwindigkeit $v(t)$ und Beschleunigung $a(t)$ beschrieben. (MÜLLER, FERBER 2003)

Kinetik: Teilgebiet der technischen Mechanik. In der Kinetik wird die Bewegung eines Körpers in Abhängigkeit zur Zeit als Ursache angreifender Kräfte untersucht. Neben den Axiomen der Statik basiert die Kinetik im wesentlichen auf dem 2. Newtonschen Gesetz, wonach die zeitliche Änderung der Bewegungsgröße der einwirkenden Kraft proportional ist und in Richtung dieser geschieht. (BÖGE 2003)

Latenzzeit: Im Rahmen von Multisensorsystemen wird in der vorliegenden Arbeit unter Latenzzeit der Zeitraum zwischen den Informationsbereitstellungen der verschiedenen Subsysteme in einem Gesamtsystem verstanden. Die Latenzzeiten führen zu einer Verfälschung der resultierenden Information durch unterschiedliche zeitliche Bezugspunkte der Subsysteme. In dieser Arbeit muss die Latenzzeit begrifflich von der Totzeit unterschieden werden.

MC-Model: Machine-Control-Model. Unter einem MC-Model wird die für eine Führungsaufgabe notwendige und im systemverständlichen Format gespeicherte Soll-Geometrie verstanden. Für 3-D-Führungsaufgaben besteht das MC-Model aus einer durch ein Polygon repräsentierten Soll-Trajektorie, die durch Höhenangaben und Neigungswinkel ergänzt wird. Für automatische Nivellierungsaufgaben (1-D) basieren MC-Models in der Regel auf digitalen Geländemodellen. (JAAKKOLA, HEIKKILÄ 2004)

Messeinrichtung: Vollständiger, zur Durchführung vorgegebener Messungen, zusammengestellter Satz von Messgeräten und anderer Einrichtungen (DIN 1994).

Navigation: Führung eines beweglichen Objekts von seinem Ausgangspunkt zu einem Zielort auf vorgegebenem Weg und eventuell vorgegebener Zeit (MANSFELD 1998).

Positionierung: Unter Positionierung versteht man das Einnehmen einer konkreten räumlichen, vor allem auch nach Koordinaten festgelegten Position (WIKIPEDIA 2006a).

Objektkoordinatensystem: Das Objektkoordinatensystem ist der Bezugsrahmen für die Innere Geometrie eines Objektes. Die Lagerung des Koordinatensystems innerhalb des Objektes ist zunächst beliebig, muss aber bekannt sein, damit eine eindeutige Beziehung zwischen Objekt und Planungsdaten ermöglicht wird. Unter einem Objekt wird im Rahmen dieser Arbeit z.B. ein Bauteil verstanden.

Ortung: Unter Ortung versteht man die Bestimmung der Position eines Objekts in einem Bezugssystem. (WIKIPEDIA 2006b)

QFD-Analyse: Quality Function Deployment-Analyse. Industrielles Werkzeug zur Produktentwicklung. Wichtigstes Hilfsmittel der QFD-Analyse ist die Funktionalmatrix, in der den Anforderungen an ein zukünftiges Produkt die benötigten Funktionen gegenüber gestellt und bewertet werden. (nach MAI 1998)

Sensorkoordinatensystem: Die rohen Messwerte eines Sensors werden zunächst im Bezug auf die Orientierung und den Nullpunkt des Sensors bestimmt – sie liegen im Sensorkoordinatensystem vor. Erst durch die Stationierung des Sensors, wird eine Beziehung zwischen dem Sensorkoordinatensystem und dem Zielkoordinatensystem geschaffen, die es ermöglicht, die rohen Messwerte des Sensors in das Zielkoordinatensystem zu transformieren.

Statik: Teilgebiet der technischen Mechanik. Die Statik ist die Lehre vom Gleichgewicht der Kräfte an ruhenden Körpern. Das Gleichgewichtsaxiom besagt, dass sich ein Körper im Gleichgewicht befindet, wenn er in Ruhe ist und das an ihm angreifende Kräftesystem einer Nullkraft äquivalent ist. Das angreifende Kräftesystem wiederum ist einer Nullkraft äquivalent, wenn seine Momente M_P in jedem beliebigen Punkt P_i verschwinden. (MAGNUS, MÜLLER 1990)

System: Eine abgegrenzte Anordnung von aufeinander einwirkenden Gebilden (Prozessen) (DIN 66201).

Totzeit: Unter Totzeit wird im Rahmen dieser Arbeit die Zeitspanne von dem Entstehen einer Information bis zu ihrer Verarbeitung im Prozess verstanden. Verwendung findet dieser Begriff vor allem im Zusammenhang mit Regelkreisen, in denen die auftretenden Totzeiten durch entsprechende Totzeit-Glieder berücksichtigt werden müssen. Begrifflich unterschieden wird in dieser Arbeit die Totzeit von der Latenzzeit.

Zielkoordinatensystem: Koordinatensystem, in dem die Soll-Positionen von Punkten, Objekten oder Geometrien geplant sind (z.B. Baustellenkoordinatensystem).

Zustand eines dynamischen Systems: Der Zustand eines dynamischen Systems beschreibt das Verhalten des Systems zum Zeitpunkt t_i . Der Zustand eines dynamischen Systems wird vollständig durch den Zustandsvektor \mathbf{x} beschrieben, wenn die Werte $x_i(0)$ der Elemente von \mathbf{x} zum Zeitpunkt 0 zusammen mit dem Verlauf der Eingangsgröße $u(\tau)$ für $0 \leq \tau \leq t$ die Ausgangsgröße $y(t)$ zur Zeit $t \geq 0$ eindeutig bestimmen. Die Komponenten $x_i(t)$ von \mathbf{x} heißen Zustandsvariablen oder Zustandsgrößen. (LUNZE 2001)

2.1.2 Einordnungen aus Sicht der technischen Mechanik

Die technische Mechanik gehört zu den Grundlagen der Ingenieurwissenschaften und basiert auf dem von der Physik bereitgestellten Fundament der klassischen Mechanik. Dieses älteste Teilgebiet der Physik beschäftigt sich mit der Lehre von den Bewegungen von Körpern und den wirkenden Kräften. Die technische Mechanik lässt sich in die Bereiche Statik, Kinematik und Kinetik unterteilen, deren Definition Kapitel 2.1 zu entnehmen sind.

Während die Gesetzmäßigkeiten der physikalischen Mechanik aus dem Beobachten der Natur oder aus Experimenten abgeleitet wurden, nutzt die technische Mechanik die bestehenden Gesetzmäßigkeiten, um daraus mit Hilfe theoretischer Überlegungen Folgerungen abzuleiten. Diese dienen dann den vielfältigen Ingenieurwissenschaften als Grundlage zur Modellierung realer technischer Systeme (MAGNUS, MÜLLER 1990).

Um den Übergang von theoretischen Grundlagen zu realen Systemen zu beschreiten, ist es immer notwendig, für die realen Systeme geeignete, möglichst zutreffende mathematisch beschreibbare, Ersatzmodelle zu formulieren. Dazu bietet es sich an, eine durch sich abgrenzende Eigenschaften, logische Klassifizierung vorzunehmen.

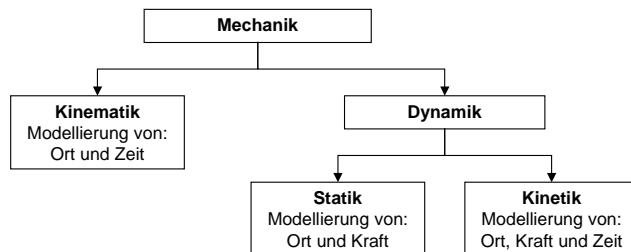


Abbildung 2.1: *Klassifizierungen der technischen Mechanik.*

Die in Abbildung 2.1 dargestellte und u.a. von MAGNUS, MÜLLER (1990) und GROSS et al. (2004) vertretende Klassifizierung der technischen Mechanik basiert auf drei Hierarchiestufen. Auf der zweiten Hierarchiestufe wird zwischen Modellen mit und ohne Berücksichtigung der Einwirkung von Kräften auf den betrachteten Körper unterschieden. Demnach befinden sich auf zweiter Hierarchiestufe die Kinematik und die Dynamik. Auf einer dritten Stufe wird dann die Dynamik in Statik und Kinetik unterteilt.

Eine alternative Klassifizierungsvariante betrachtet zunächst den Bewegungszustand eines Körpers, wonach auf der zweiten Hierarchieebene zwischen Statik und Dynamik unterschieden wird. Eine nachträgliche Berücksichtigung der auf den Körper einwirkenden Kräfte führt zu einer Unterteilung der Dynamik in Kinematik und Kinetik auf der dritten Hierarchieebene. Ein Vertreter dieser Klassifizierung ist z.B. (ZIEGLER 1970). Diese Einteilung der technischen Mechanik tritt allerdings mehr und mehr in den Hintergrund, da unter dem Einfluss der Systemtheorie die Einwirkung von Kräften auf Körper vorrangiges Einordnungskriterium ist.

2.1.3 Systemtheoretische Modellbildung

Die Systemtheorie ist ein wesentliches Grundlagenfach der Ingenieurwissenschaften und stellt Werkzeuge und Methoden zur einheitlichen, mathematischen Beschreibung von Systemen und Prozessen bereit. Die Methodik beruht in der Regel darauf, mathematische Modelle bereitzustellen, um bei verschiedenartigen Anwendungen Einsichten in technische Zusammenhänge zu gewinnen und quantitative Ergebnisse zu erzielen (UNBEHAUEN 1997).

Nach DIN 66201 wird unter einem System eine abgegrenzte Anordnung von aufeinander einwirkenden Gebilden verstanden. Mit Prozess bezeichnet man die Umformung und/oder den Transport von Materie, Energie und/oder Informationen. Hierbei ist es zweckmäßig, zwischen Teilprozessen und Gesamtprozessen zu unterscheiden. Jeder Gesamtprozess kann zumeist in mehrere Teilprozesse unterteilt werden. Versteht man nun unter Gesamtprozess ein Gebilde, dann ergeben mehrere Gesamtprozesse ein System. Das Verhalten eines Systems ergibt sich somit aus dem Verhalten seiner Prozesse. Je nach Komplexität eines Systems ermöglicht erst die strukturierte Unterteilung eines Systems in seine Teilprozesse eine mathematische Beschreibung des Systems. Je feiner das System in seine einzelnen Prozesse unterteilt wird, desto besser stimmt das jeweilige mathematische Modell mit der Realität überein. ISERMANN (1988a)

Ursache-Wirkungs-Prinzip

Grundlage jeder systemtheoretischen Betrachtung ist das Ursache-Wirkungs-Prinzip. Demnach stellt nach Isermann (1974) und Eichhorn (2005) jede Eingangsgröße $u(t)$ eine Ursache und jede Ausgangsgröße $y(t)$ eine Wirkung dar. Je nach System können mehrere Eingangs- und Ausgangsgrößen auftreten. Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, muss dabei zusätzlich zwischen interessierenden Eingangsgrößen $u(t)$ und Störgrößen $z(t)$ unterschieden werden. Die Ausgangsgrößen $y(t)$ setzen sich folglich aus den interessierenden Größen $y_u(t)$ infolge $u(t)$ und den unerwünschten von $z(t)$ verursachten Störungen $y_z(t)$ zusammen. Das Übertragungsverhalten eines Prozesses bzw. eines Systems beschreibt den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen.

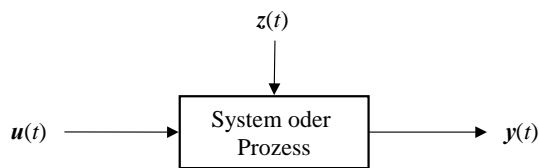


Abbildung 2.2: *Ein-/Ausgangs-
Beziehung eines Systems
(nach ISERMANN 1974)*

In der Ingenieurgeodäsie werden die Eingangsgrößen $u(t)$ auch Einflussgrößen genannt (WELSCH, et al. 2000), während in der Regelungs- und Steuerungstechnik die Eingangsgrößen als Stellgrößen bezeichnet werden (u.a. FÖLLINGER 1980).

Systeme mit Gedächtnis und gedächtnislose Systeme

Besitzt ein System ein Gedächtnis, so kann es im Gegensatz zu einem gedächtnislosen System Energie speichern und ggf. zeitversetzt abgeben. Dies bedeutet aber auch, dass ein System mit Gedächtnis nicht beliebig schnell auf eine sich ändernde Eingangsgröße $u(t)$ reagieren kann, da die Ausgangsgröße $y(t)$ zum Zeitpunkt t_i auch von vorangegangenen Eingangsgrößen im Intervall $t_i - \tau$ abhängt. τ repräsentiert dabei den relevanten Zeitraum, bzw. in diesem Fall die Gedächtnislänge. Systeme mit Gedächtnis werden nach systemtheoretischen Gesichtspunkten als dynamische Systeme bezeichnet. Ist das dynamische System stabil, so geht es in endlicher Zeit $\tau (\neq \infty)$ nach einem zeitlichen Prozess von Anpassungsvorgängen in einen neuen Gleichgewichtszustand über. (u.a. UNBEHAUEN 1980)

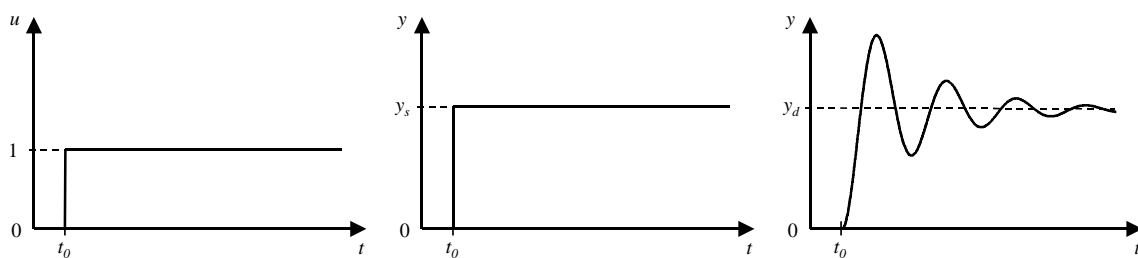


Abbildung 2.3: *Beispielhafte Darstellung der Sprungantwort eines statischen Systems (Mitte) und eines dynamischen LTI-Systems 2. Ordnung (rechts) auf eine Änderung der Eingangsgröße (links).*

Für den Fall $\tau = 0$ geht das Gedächtnis verloren, und aus dynamischen Systemen werden statische Systeme. Sie können als Reaktion auf eine veränderte Eingangsgröße $u(t)$ direkt von einem Gleichgewichtszustand in einen anderen Gleichgewichtszustand übergehen. Folglich stellt ein statisches System einen Sonderfall des dynamischen Systems dar (ISERMANN 1972).

In Abbildung 2.3 ist zur Veranschaulichung die Sprungantwort eines statischen und eines dynamischen LTI-Systems (L=linear, TI=zeitinvariant) 2. Ordnung dargestellt.

Die Modellierung eines realen Systems durch eine mathematische Beschreibung setzt immer einen gewissen Abstraktionsgrad voraus. Je nach Abstraktionsgrad werden in der Systemtheorie vier Modelltypen unterschieden. Wird die, das System beeinflussende, Kraft mit modelliert, so spricht man von Systemen mit Stellgrößenmodellierung. Die Modelltypen dieser Gruppe sind das dynamische System (mit Gedächtnis) und das statische System (ohne Gedächtnis) als Sonderfall des Ersteren. Eine Modellierung der Stellgrößen für ein System mit Gedächtnis (dynamisches System) setzt implizit voraus, dass auch die Bewegungen des Systems mit modelliert werden. Sieht der Abstraktionsgrad der Modellbildung keine Stellgrößenmodellierung vor, so erhält man ein kinematisches Modell, das nur die Bewegungen des Systems mathematisch beschreibt. Es ist darüber hinaus nicht möglich, ein entsprechendes Bewegungsgesetz aufzustellen, so bleibt nur noch die Modellierung des entsprechenden Systems als „random walk“-Prozess. Systeme ohne Stellgrößenmodellierung werden in der Systemtheorie allgemein auch als „autonome Systeme“ bezeichnet. (UNBEHAUEN 1998)

Unter dem Gesichtspunkt der aktiven Beeinflussung eines Systems im Sinne der Regelungstechnik stehen dynamische Modelle mit Berücksichtigung der Bewegung des Systems und der verursachenden Kräfte (Stellgrößen) im Vordergrund. Der Sonderfall der Statik wird bei sprunghfähigen Systemen zur Modellierung herangezogen. Auf einer niedrigeren Abstraktionsebene werden zur Vereinfachung einzelne Prozesse des jeweils betrachteten System auch ohne Berücksichtigung der auf sie einwirkenden Kräfte modelliert. Diese kinematische Modellbildung findet Anwendung, wenn man z.B. keinen Einfluss auf diese Kräfte hat oder ihr Einfluss auf der gewählten Abstraktionsebene ohne Bedeutung ist.

Erfolgt weiterhin eine Einschränkung im Sinne der vorliegenden Arbeit auf technische Systeme, die den Gesetzen der Mechanik folgen, so entstammen die Teilprozesse der zu modellierenden Systeme der technischen Mechanik. Resultierend finden in dieser Arbeit kinematische, statische und dynamische (kinetische) Modellbildungen Anwendung.

Signale und deren Abtastung

Die Ein- und Ausgangsgrößen $x(t)$, $y(t)$ und $z(t)$ eines realen Systems stellen zunächst zeit- und wertkontinuierliche Signale dar, die durch eine kontinuierlich verlaufende Variable t gekennzeichnet sind. Um die Ein- und Ausgangsgrößen der Verarbeitung mittels eines Prozessrechners zugänglich zu machen, müssen diese messtechnisch erfasst und digitalisiert werden. Bei dieser Umformung, auch Abtastung genannt, werden die kontinuierlichen Signale, wie aus Abbildung 2.4 ersichtlich, in zeit- und wertdiskrete Signale umgeformt. Die Variable t_k beschreibt die Zeit zu diskreten Epochen k .

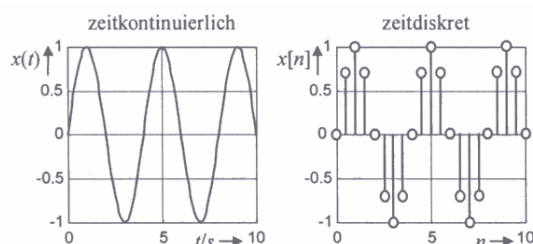


Abbildung 2.4: Ein deterministisches zeitkontinuierliches Signal (links) und seine zeitdiskrete Abtastung (rechts). (aus WERNER 2000)

Aus der Sicht der Systemtheorie stellt jede Abtastung eines Signals einen Informationsverlust dar. Auf der Werteachse wird der Informationsverlust durch die Auflösung und Unsicherheit

des Erfassungsmediums definiert, während die Abtastrate über einen Informationsverlust infolge der zeitlichen Diskretisierung entscheidet. Bei harmonischen Signalen kann Letzterer durch die Einhaltung des Abtasttheorems, wonach mindestens zwei von null verschiedene Abtastwerte pro Periode entnommen werden müssen, verhindert werden (WERNER 2000).

Auf weitere Eigenschaften von Signalen, wie deterministische und stochastische Signale oder gerade und ungerade Signale, soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Es sei auf die Literatur, wie z.B. ISERMANN (1974), UNBEHAUEN (1980) und WERNER (2000), verwiesen.

Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit

Für die im späteren Verlauf dieser Arbeit notwendigen zielgerichteten Beeinflussungen eines Systems mit Werkzeugen der Regelungstechnik sind die Steuerbarkeit und die Beobachtbarkeit als Kenngrößen eines Systems von entscheidender Bedeutung. Bei BERGER (2001) werden diese beiden Kenngrößen wie folgt definiert:

„Ein lineares System ist vollständig steuerbar, wenn mit Hilfe des Steuervektors $\mathbf{u}(t)$ der Systemzustand $\mathbf{x}(t_0)$ innerhalb eines endlichen Zeitintervalls $[t_0, t_1]$ in einen beliebigen Zustand $\mathbf{x}(t_1)$ überführt werden kann.“

„Ein lineares System ist vollständig beobachtbar, wenn auf Grund der Kenntnis des Steuervektors $\mathbf{u}(t)$ und des gemessenen Ausgangsvektors $\mathbf{y}(t)$ der Zustandsvektor $\mathbf{x}(t)$ in einem endlichen Zeitintervall $[t_0, t_1]$ bestimmt werden kann.“

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die auf ein System einwirkenden Störeinflüsse $\mathbf{z}(t)$ die Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit negativ beeinflussen.

2.1.4 Regelungstechnik zur zielgerichteten Beeinflussung von Systemen

Die Regelungstechnik befasst sich mit der Aufgabe, einen sich zeitlich verändernden Prozess von außen so zu beeinflussen, dass dieser Prozess in einer vorgegebenen Weise abläuft (LUNZE 2001). Wesentliches Werkzeug der Regelungstechnik ist der Regelkreis.

Nach DIN 19226 „Regelungstechnik und Steuerungstechnik“ werden die Begriffe Regelung und Steuerung wie folgt definiert:

„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. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungskreis des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“

„Das Steuern, die Steuerung, ist der Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über die selben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken.“

Anders ausgedrückt, stellt die Regelungstechnik eine Wissenschaft dar, die sich mit der gezielten Beeinflussung dynamischer Systeme dahingehend beschäftigt, dass der Ausgang des jeweiligen Systems bestmöglich dem vorgegebenen Sollwert entspricht. Dabei wird die Beeinflussung eines Systems in einer offenen Wirkungskette (ohne Rückführung des Ausgangs auf den Eingang) Steuerung genannt und die Beeinflussung eines Systems in einer

geschlossenen Wirkungskette (mit Rückführung des Ausgangs auf den Eingang) als Regelung bezeichnet. (FÖLLINGER 1994)

Die Begriffe der Regelungs- und Steuerungstechnik, wie sie im Folgenden eingeführt und benutzt werden, beschreibt die DIN 19226. Die in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen und Bezeichnungen orientieren sich allerdings an den in neuerer Literatur üblichen und international anerkannten Schreibweisen und weichen damit von der DIN 19226 ab. So wird beispielsweise die Regelgröße üblicherweise mit y anstatt x bezeichnet, da x das international gebräuchliche Formelzeichen für eine Zustandsvariable ist.

Der allgemeine Regelkreis

Das Blockschaltbild des allgemeinen Regelkreises ist in Abbildung 2.5 dargestellt und zeigt das Zusammenspiel und die Bezeichnungen der einzelnen Komponenten in einem Regelkreis, wie sie in der DIN 19226 und der einschlägigen Fachliteratur, wie z.B. FÖLLINGER (1994), LUNZE (2001) und SCHMIDT (1991), dargestellt sind.

Aus der Systemtheorie (Kapitel 2.1.3) ist bekannt, dass ein System oder ein Prozess, in der Regelungstechnik auch als „Strecke“ oder Regelstrecke bezeichnet, auf eine bestimmte Eingangsgröße oder „Stellgröße“ $u_R(t)$ mit einer entsprechenden systemtypischen Ausgangsgröße $y(t)$ reagiert. Dabei ist die Ausgangsgröße sowohl vom systemeigenen Übertragungsverhalten, als auch von der eventuell vorhandenen „Störgröße“ $z(t)$ abhängig. In der Regelungstechnik wird die Ausgangsgröße als „Regelgröße“ $y(t)$ bezeichnet.

In dem geschlossenen Wirkungskreis einer Regelung wird die „Regelgröße“ $y(t)$ durch eine geeignete „Messeinrichtung“ erfasst. Diese Messeinrichtung setzt sich aus einem „Messglied“ und einem Additionsglied für das bei realen Messungen nicht zu vermeidende, „Messrauschen“ $r(t)$ zusammen. Das „Messglied“ besitzt, wie auch die „Strecke“ ein dynamisches Übertragungsverhalten. Somit ist zwischen der „Regelgröße“ $y(t)$ und der „gemessenen Regelgröße“ $y_m(t)$ zu unterscheiden. Bei einfachen Regelungen kann die Dynamik der Messeinrichtung und das Messrauschen teilweise vernachlässigt werden, so dass dann gilt: $y_m(t) = y(t)$.

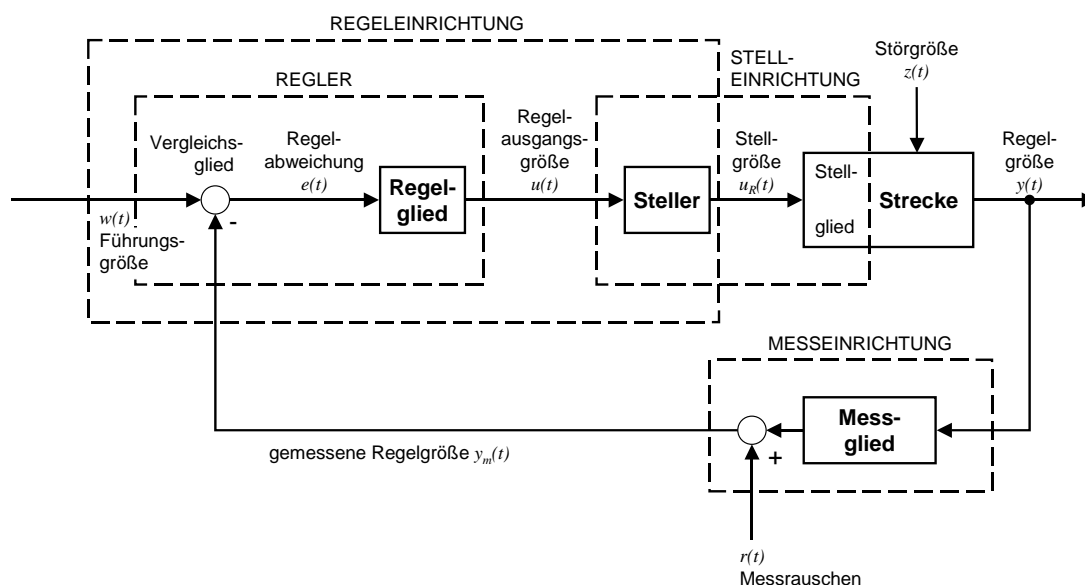


Abbildung 2.5: Allgemeiner Regelkreis in Anlehnung an DIN 19226 und FÖLLINGER (1994).

Die „gemessene Regelgröße“ $y_m(t)$ wird dem sogenannten „Regler“ zugeführt. Dieser vergleicht zunächst die „gemessene Regelgröße“ mit der „Führungsgröße“ $w(t)$, die als Zielvorgabe dem Regelkreis von außen zugeführt wird. Das „Vergleichsglied“ berechnet die „Regelabweichung“ $e(t)$. Es gilt der funktionale Zusammenhang: $e(t) = w(t) - y_m(t)$. Der „Regler“ hat die Aufgabe gemäß der „Regelabweichung“ eine „Stellgröße“ $u(t)$ zu generieren, die das dynamische System, die „Strecke“ in der Art und Weise beeinflusst, dass sich die „Regelgröße“ in endlicher Zeit der „Führungsgröße“ angleicht. Um ein gewünschtes, der zu regelnden Strecke angepasstes, Verhalten des „Reglers“ zu ermöglichen, verfügt dieser über ein „Regelglied“. Das „Regelglied“ wird individuell im Rahmen des Reglerentwurfs in seinem dynamischen Verhalten entworfen und liefert die „Regelausgangsgröße“. Im allgemeinen Regelkreis wird diese mit $u(t)$ bezeichnet.

Der vom Regler vorgegebene Wert $u(t)$ für die Stellgröße wird durch das „Stellglied“ in den am Prozess wirksamen Wert $u_R(t)$ umgesetzt. Da Stellglieder im allgemeinen ebenfalls dynamisches Verhalten aufweisen, werden sie im allgemeinen Regelkreis als eigene Komponente, dem „Steller“ modelliert. Dieser wandelt die Regelausgangsgröße $u(t)$ in die eigentliche Stellgröße $u_R(t)$ um. In vielen Fällen kann aber die Dynamik der „Stelleinrichtung“ vernachlässigt werden, und als Teil der „Strecke“ aufgefasst werden. Dann wird die „Regelausgangsgröße“ $u(t)$ mit „Stellgröße“ bezeichnet. Wie aus Abbildung 2.5 ersichtlich, sieht eine andere Variante der Modellierung vor, den „Steller“ zusammen mit dem „Regler“ in einer „Regeleinrichtung“ zusammenzufassen. In diesem Fall wird die „Stellgröße“ ohne Unterscheidungszwang als $u(t)$ bezeichnet.

Arten von Regelsystemen

Ausgehend vom allgemeinen Regelkreis lassen sich, je nach Anwendung, verschiedenste Regelkreise entwerfen. Allen gemein ist aber das Ziel jeder Regelung, die Regelgröße $y(t)$ trotz Störeinflüsse auf die Regelstrecke bestmöglich und zeitnah an die Führungsgröße $w(t)$ anzugleichen. Es gilt idealerweise: $y(t) = w(t)$.

Folgende Arten von Regelsystemen mit ihren Aufgaben werden nach ISERMANN (2002) und LUNZE (2001) unterschieden:

- Festwertregelung: Die Führungsgröße $w(t)$ ist konstant. Störungen $z(t)$ müssen ausgeregelt und damit kompensiert werden.
- Führung- oder Folgeregelung: Die Führungsgröße ist eine Funktion der Zeit t . Die Regelabweichung $e(t)$ auf Grund einer geänderten Führungsgröße soll möglichst schnell reduziert werden, bei gleichzeitiger Kompensation möglicher Störeinflüsse.
- Endwertregelung: Ein bestimmter Endwert soll (z.B. möglichst schnell) erreicht und ggf. gehalten werden.
- Extremwertregelung: Ein unbekannter Extremwert soll erreicht und geregelt werden → Optimierung.
- Adaptive Regelung: Die Parameter und damit das Verhalten des Reglers passen sich selbständig an eine sich ändernde Regelstrecke an.

Unabhängig von der Art lässt sich die Qualität einer Regelung nach BERGER 2001 anhand des Führungsverhaltens und des Störverhaltens beurteilen. Zur Erläuterung dieser

Begrifflichkeiten ist in Abbildung 2.6 die zeitliche Änderung der Regelgröße $y(t)$ einer Festwertregelung dargestellt.

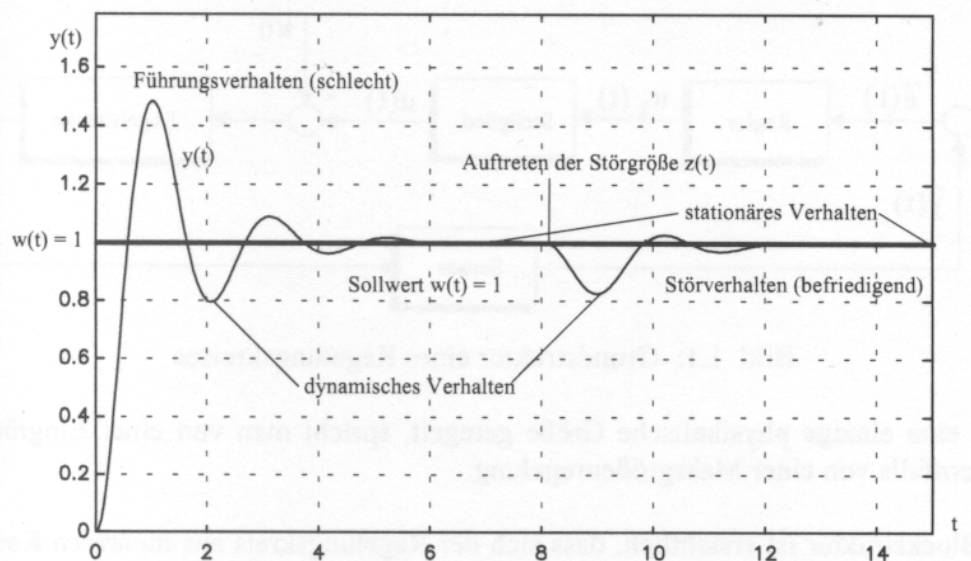


Abbildung 2.6: Führungsverhalten einer Festwertregelung aus BERGER 2001.

Das Überschwingen der Regelgröße während der Anpassphase an die Führungsgröße und während der Kompensation nach dem Auftreten einer Störung ist ein Ausdruck des dynamischen Verhaltens des Regelkreises. Große Amplituden repräsentieren eine geringe Dämpfung und damit ungünstiges Führungs- bzw. Störverhalten.

2.2 Methodik zur zielgerichteten Beeinflussung eines Systems am Beispiel einer Kranregelung

Die in der vorliegenden Arbeit benötigten Hilfsmittel und Methoden der Systemtheorie und der Regelungstechnik werden in diesem Kapitel am Beispiel einer Kranregelung eingeführt. Die Vorgehensweise beim Entwurf eines Regelsystems sowie die benötigten Algorithmen dienen als Grundlage für die später folgende Entwicklung des modularen Positionierungs- und Führungssystems.

Die Regelaufgabe besteht in diesem Beispiel darin, die Last an eine gewünschte Position w_{Li} zu bringen und dabei die Bewegung der Laufkatze so vorzugeben, dass die Last das Ziel ohne Nachschwingen möglichst schnell erreicht. Weiterhin wird von einer horizontalen Betrachtung der Lastposition (Seillänge $l = \text{konstant}$) ausgegangen. Die Regelaufgabe gestaltet sich folglich gemäß der in Kapitel 2.1.4 auf Seite 30 gegebenen Definitionen als Endwertregelung.

2.2.1 Mathematische Beschreibung des Kransystems

In Abbildung 2.7 ist das geometrische Modell eines Turmdrehkrans dargestellt. Zur Vereinfachung des Beispiels soll die Bewegung der Last und der Laufkatze nur in Richtung des Auslegers betrachtet werden.

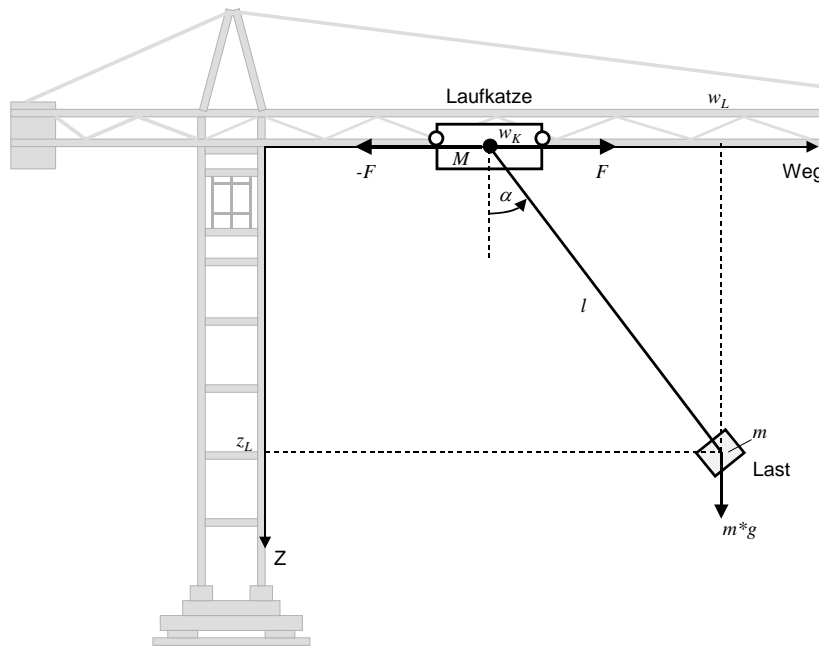


Abbildung 2.7: Geometrisches Modell eines Turmdrehkrans.

Allgemein lässt sich das dynamische Verhalten eines linearen Systems im Zeitbereich durch eine lineare gewöhnliche Differentialgleichung n -ter Ordnung darstellen:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \dot{y} + a_0 y(t) = b_q \frac{d^q u}{dt^q} + \dots + b_1 \dot{u} + b_0 u(t) \quad (2.1)$$

Wird die auf die Laufkatze des Krans wirkende Kraft F als Eingangsgröße $u(t)$ und die Position der Laufkatze w_K zusammen mit der Auslenkung des Seils α als Ausgangsgrößen betrachtet, so kann das dynamische Verhalten des Systems nach FÖLLINGER (1994) durch die folgenden zwei linearen Differenzialgleichungen 2. Ordnung beschrieben werden:

$$\begin{aligned} \ddot{w}_K &= \frac{mg}{M} \alpha + \frac{1}{M} F \\ \ddot{\alpha} &= -\frac{(M+m)g}{Ml} \alpha - \frac{1}{Ml} F \end{aligned} \quad (2.2)$$

Dabei werden die Massen von Laufkatze (M) und Last (m) zusammen mit der Seillänge l und der Erdbeschleunigung g als Parameter eingeführt.

Für die Analyse des Kransystems und als Grundlage für den Entwurf einer Regelung ist es von entscheidender Bedeutung das durch die Gleichungen (2.2) beschriebene Kransystem näher zu spezifizieren.

Linearität

Nach LUNZE (2001) und UNBEHAUEN (1997) ist ein System linear, wenn sich die Wirkungen linear überlagerter Eingangssignale in gleicher Weise am Ausgang des Systems überlagern und somit das Superpositionsprinzip gilt:

$$\mathbf{u}(t) = ku_1(t) + lu_2(t) \quad \mapsto \quad \mathbf{y}(t) = ky_1(t) + ly_2(t) \quad (2.3)$$

Der Pfeil \mapsto kennzeichnet dabei das System.

Es gilt allgemein: Ist die das System darstellende Differentialgleichung linear, so besitzt das System ein lineares Übertragungsverhalten.

Zeitinvarianz

Nach UNBEHAUEN (1997) ist ein System zeitinvariant, wenn die Form der Ausgangsgröße $y(t)$ nur abhängig von der Form der Eingangsgröße $u(t)$ ist. Der Zeitpunkt t_0 des Einsetzens der Eingangsgröße ist bei Zeitinvarianz auf der Seite der Ausgangsgröße nicht von formbestimmender Bedeutung.

$$u_1(t) = u_2(t - t_0) \quad \mapsto \quad y_1(t) = y_2(t - t_0) \quad (2.4)$$

Dies bedeutet, dass die Koeffizienten der das System beschreibenden Differentialgleichungen von der Zeit unabhängig sind (LUNZE 2001).

Kausalität

Ein lineares System ist kausal, wenn der Verlauf der Ausgangsgrößen $y(t)$ bis zu jedem beliebigen Zeitpunkt t_1 stets nur vom Verlauf der entsprechenden Eingangsgrößen $u(t)$ bis zu diesem Zeitpunkt t_1 abhängen (UNBEHAUEN 1997).

Wenn also zwei Eingangsgrößen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ bis zu einem beliebigen Zeitpunkt t_1 gleich sind, so sind auch die entsprechenden Ausgangsgrößen $y_1(t)$ und $y_2(t)$ bis zum Zeitpunkt t_1 gleich.

$$u_1(t) = u_2(t) \quad \mapsto \quad y_1(t) = y_2(t) \quad \text{für} \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (2.5)$$

LUNZE (2001) und FÖLLINGER (1994) ergänzen dazu, dass die Kausalität besagt, dass die Werte der Eingangsgrößen das Verhalten des Systems nur für zukünftige Zeitpunkte beeinflussen können. Dies ist selbstverständlich, solange man reale physikalische Systeme betrachtet. Aber bei der mathematischen Beschreibung eines realen Systems mittels eines Ersatzmodells kann es zu nicht kausalem Systemverhalten kommen.

Bei Betrachtung der Differentialgleichungen (2.1) und (2.2) muss zur Erfüllung der Kausalität gelten: $q \leq n$. Dies bedeutet, dass die Eingangsgröße u nicht mit höherer Ableitung als die Ausgangsgröße y erscheint (LUNZE 2001).

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass es sich bei dem durch die Gleichung (2.2) beschriebenen Kransystem um ein lineares, zeitinvariantes System (LTI-System) handelt, welches außerdem kausal ist. So können im Weiteren die Methoden der linearen Systemtheorie und Regelungstechnik Anwendung finden.

2.2.2 Beschreibung des dynamischen LTI-Systems im Zustandsraum

Als Grundlage der Beschreibung des Kransystems im Zustandsraum dienen die linearen Differentialgleichungen zweiter Ordnung (2.2). Nach GIROD, et al. (1997) ist durch diese Differentialgleichungen das System zwar vollständig beschrieben, aber der innere Aufbau und damit die Abhängigkeiten zwischen den beteiligten Größen ist nicht ohne weiteres ersichtlich. Die Zustandsraumdarstellung schafft Abhilfe und eignet sich dabei sehr gut für die rechnergestützte Bearbeitung, indem das System in standardisierter Form durch n Differenzialgleichungen erster Ordnung beschrieben wird.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{G}z(t) \quad (2.6)$$

Jede Differentialgleichung gilt dabei für eine der n sogenannten Zustandsgrößen. Die Ausgangsgrößen ergeben sich dann als Linearkombination der Zustände.

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (2.7)$$

Dabei gelten folgende Bezeichnungen und Formate:

\mathbf{A} : (n,n)	Systemmatrix	\mathbf{x} : $(n,1)$	Zustandsvektor
\mathbf{B} : (n,m)	Eingangs- oder Steuermatrix	\mathbf{u} : $(m,1)$	Eingangs- oder Steuervektor
\mathbf{C} : (r,n)	Ausgangsmatrix	\mathbf{y} : $(r,1)$	Ausgangsvektor
\mathbf{G} : (n,q)	Störmatrix	\mathbf{z} : $(q,1)$	Störvektor

Die Gleichungen 2.6 und 2.7 beschreiben allgemein ein mechanisches System, bei dem eine direkte Verbindung des Eingangs mit dem Ausgang mittels einer Durchschaltmatrix \mathbf{D} nicht realistisch ist und somit bei der Modellierung weggelassen wurde.

Mit den durch

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (2.8)$$

gegebenen Anfangsbedingungen besitzt das Differentialgleichungssystem (Gleichungen 2.6 und 2.7) eine eindeutige Lösung. Das heißt nach LUNZE (2001), dass die in \mathbf{x}_0 enthaltenen Informationen ausreichen, um für beliebig gegebene Eingangsgrößen $\mathbf{u}(t)$ und Störgrößen $\mathbf{z}(t)$, die Ausgangsgrößen $\mathbf{y}(t)$ für $t \geq 0$ eindeutig zu berechnen. $\mathbf{x}(t_0)$ beschreibt folglich den Zustand, in dem sich das System zum Zeitpunkt $t = 0$ befindet. Diese Eigenschaft gilt für jeden beliebigen Zeitpunkt t_i . Das heißt, wenn $\mathbf{x}(t_i)$ bekannt und die Eingangsgrößen $\mathbf{u}(t)$ und Störgrößen $\mathbf{z}(t)$ für $t \geq t_i$ gegeben sind, so können mit dem Modell die Ausgangsgrößen $\mathbf{y}(t)$ für den Zeitraum $t \geq t_i$ eindeutig berechnet werden. $\mathbf{x}(t)$ wird deshalb als Zustand des Systems zum Zeitpunkt t bezeichnet.

Das in den Gleichungen 2.6 und 2.7 allgemein dargestellte Mehrgrößensystem umfasst m Eingangsgrößen $u_i(t)$, q Störgrößen $z_i(t)$ und r Ausgangsgrößen $y_i(t)$, die in den Vektoren $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{z}(t)$ bzw. $\mathbf{y}(t)$ zusammengefasst sind. Für den Fall eines Eingrößensystems (SISO), würden die Matrizen \mathbf{B} und \mathbf{C} zu den Vektoren \mathbf{b} und \mathbf{c}' entarten.

Die Zustandsgleichungen eines Systems (Gleichungen 2.6 und 2.7) lassen sich allgemeingültig übersichtlich in einem Blockschaltbild darstellen:

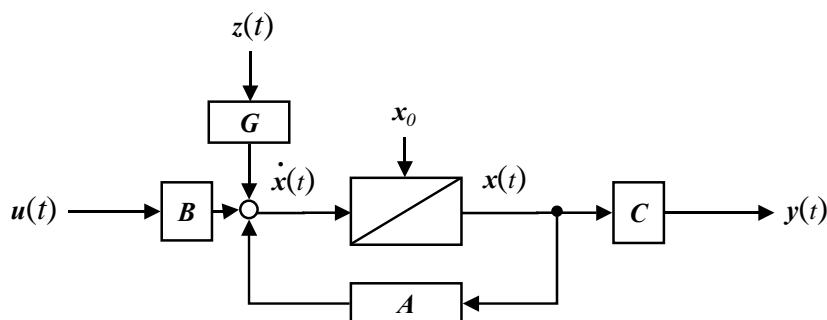
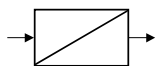


Abbildung 2.8: *Blockschaltbild der Zustandsgleichungen eines mechanischen Mehrgrößensystems (MIMO) nach Berger (2001).*

Zur Erläuterung von Abbildung 2.8 sei angemerkt, dass in Blockschaltbildern das Symbol



einen Integralblock darstellt.

Auf Basis dieser allgemeingültigen Darstellung kann das Zustandsraummodell des Kransystems aufgestellt werden. Dies gelingt nach Einführung der Ausgangsgrößen und ihrer Ableitungen als Zustandsvariablen x_i und der daraufhin möglichen Überführung der Gleichungen (2.2) in vier Zustandsdifferentialgleichungen 1. Ordnung, wie folgt:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & mg/M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -(1+m/M)g/l & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_K(t) \\ \dot{w}_K(t) \\ \alpha(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \\ 0 \\ -1/(Ml) \end{bmatrix} F(t) \quad (2.9)$$

Durch den Ausgangsvektor \mathbf{c}' wird die eigentliche Zielgröße, die Position der Last w_L , aus dem Zustandsvektor $\mathbf{x}(t)$ berechnet:

$$y(t) = w_L(t) = \mathbf{c}'\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & l & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_K(t) \\ \dot{w}_K(t) \\ \alpha(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Bei der Darstellung des Kransystems im Zustandsraum werden an dieser Stelle die Störgrößen $\mathbf{z}(t)$, wie sie z.B. Wind darstellen würde, nicht berücksichtigt da sie nicht bekannt sind. Das System wird folglich ohne Einwirkung von Störungen modelliert.

2.2.3 Eigenbewegung des Kransystems

Auf Basis des Zustandsraummodells kann das Kransystem in seinem freien Übertragungsverhalten ohne Stellgröße ($u(t) = 0$) analysiert werden. Dazu wird die Eigenbewegung des Systems mit Hilfe des Zustandsraummodells (Gleichung 2.24 und 2.25) für den Anfangszustand

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} w_{K0} \\ \dot{w}_{K0} \\ \alpha_0 \\ \dot{\alpha}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,6 \text{ m} \\ 0 \text{ m/s} \\ -0,1047 \text{ rad} \\ 0 \text{ rad/s} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

berechnet. Als konstante Parameter werden des Weiteren eine Last mit einer Masse von $m = 1500\text{kg}$, eine Masse der Laufkatze von $M = 1000\text{kg}$, eine Seillänge von $l = 8\text{m}$ und die Gravitationskonstante mit $g = 9,81\text{m/s}^2$ angenommen.

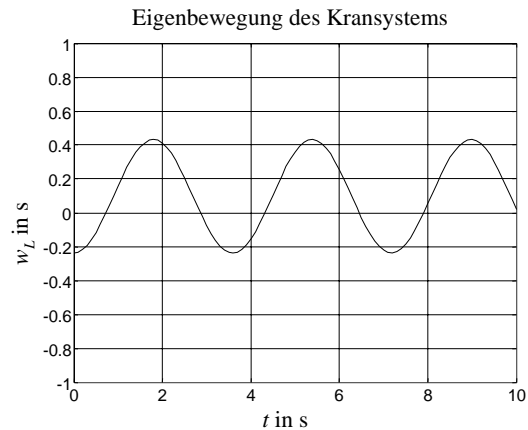


Abbildung 2.9: *Eigenbewegung des unregulierten Kransystems.*

Die in Abbildung 2.9 dargestellte Eigenbewegung des Systems repräsentiert die Ausgangsgröße w_L (Lastposition) nach Erregung des Systems durch den Anfangszustand x_0 . Da die Laufkatze ohne Stellgröße $u(t)$ frei beweglich ist, repräsentiert das Kransystem ein Doppelpendel, bestehend aus Last und Laufkatze.

Weiterhin ist in Abbildung 2.9 zu erkennen, dass die pendelnde Eigenbewegung des Systems nach einer Erregung durch x_0 nicht abklingt. Zur weiteren Analyse des Systemverhaltens wird das Kransystem im Folgenden in den Frequenzbereich überführt.

2.2.4 Überführung des Systems in den Frequenzbereich

Wie bereits in Kap. 2.2.1 erwähnt kann ein dynamisches LTI-System (L=linear, TI=zeitinvariant) im Zeitbereich vollständig durch eine lineare gewöhnliche Differentialgleichung n -ter Ordnung dargestellt werden (siehe Gleichung 2.1).

In der Regel wird für die Transformation einer linearen Funktion $f(t)$ in den Frequenzbereich die Fouriertransformation benutzt (z.B. WELSCH et al. 2000). Dabei wird die gegebene Funktion $f(t)$ in ihre Elementarfunktionen (Sinusfunktionen) zerlegt. Damit die Fouriertransformation in Abhängigkeit der komplexen Kreisfrequenz $j\omega$ nach der Gleichung

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.12)$$

durchgeführt werden kann, muss die Funktion $f(t)$ für große Zeit t gegen null gehen. Demzufolge kann für instabile oder ungedämpfte Systeme, die Fouriertransformation nicht benutzt werden. Dies gilt auch im speziellen Fall für das Kransystem, das aufgrund seiner Eigenbewegung (siehe Abbildung 2.9) ein ungedämpftes System darstellt.

Diesen Mangel beseitigt die Laplace-Transformation

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2.13)$$

durch eine Substitution mit

$$s = \delta + j\omega, \quad (2.14)$$

wobei δ als Dämpfungskonstante eingeführt wird (z.B. UNBEHAUEN 1997 und LUNZE 2001).

Zur Beschreibung eines Systems im Frequenzbereich kann jetzt die Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2.15)$$

berechnet werden. Dabei stellt $U(s)$ die Laplacetransformierte der Eingangsgröße und $Y(s)$ die der Ausgangsgröße dar. Die komplexe Übertragungsfunktion $G(s)$ beschreibt die Reaktion eines Systems auf eine sinusförmige Erregung durch Angabe der Amplitudenverstärkung

$$|G(s)| = \sqrt{(\operatorname{Re}\{G(s)\})^2 + (\operatorname{Im}\{G(s)\})^2} \quad (2.16)$$

und der Phasenverschiebung

$$\phi(s) = \arctan \frac{\operatorname{Im}\{G(s)\}}{\operatorname{Re}\{G(s)\}}. \quad (2.17)$$

Zur Berechnung der Übertragungsfunktion aus der das System beschreibenden DGL (2.1) werden zunächst beide Seiten der Gleichung einer Laplacetransformation unterzogen. Unter Verwendung des Überlagerungssatzes und des Differenziationssatzes entsteht dann nach LUNZE (2001)

$$Y(s) (a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0) = U(s) (b_q s^q + \dots + b_1 s + b_0). \quad (2.18)$$

Aus dieser Gleichung lässt sich dann unter Berücksichtigung von Gleichung 2.15 die Polynomform der Übertragungsfunktion ableiten:

$$G(s) = \frac{b_q s^q + b_{q-1} s^{q-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2.19)$$

Diese Darstellung des Übertragungsverhaltens eines dynamischen Systems ist von großem Nutzen bei der Bewertung von Regelungssystemen im weiteren Verlauf dieser Arbeit, da die Nullstellen des Zähler- und Nennerpolynoms der Gleichung 2.19 entscheidende Rückschlüsse auf das Systemverhalten zulassen.

Die Nullstellen des Zählerpolynoms in Gleichung 2.19 werden als Nullstellen der Übertragungsfunktion bezeichnet, während die Nullstellen des Nennerpolynoms (auch charakteristisches Polynom) als Pole der Übertragungsfunktion bezeichnet werden. Die Pole und Nullstellen lassen sich, wie in Abbildung 2.10 exemplarisch gezeigt, in einem Pol-Nullstellen-Bild der Übertragungsfunktion darstellen.

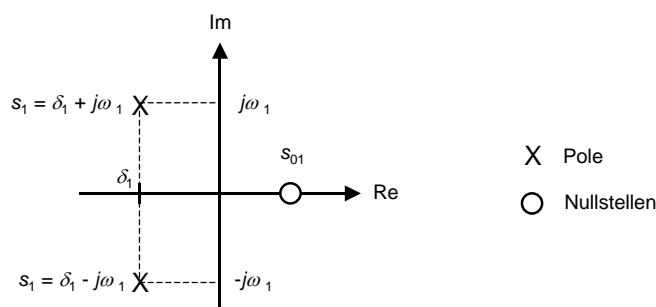


Abbildung 2.10: Pol-Nullstellen-Bild einer Übertragungsfunktion (nach LUNZE 2001).

Die Nullstellen kennzeichnen Frequenzen s_{oi} , die im Ausgangssignal eines Systems nicht mehr enthalten sind und folglich vom System nicht übertragen werden. Die Pole hingegen erlauben Rückschlüsse auf die Stabilität eines Systems. So ist ein System stabil, wenn alle Pole s_i einen negativen Realteil besitzen. Je weiter links die Pole in der komplexen

Zahlenebene liegen, um so schneller klingt die Eigenbewegung des Systems in Folge einer Erregung ab. Im Vorgriff auf die nächsten Kapitel dieser Arbeit sei erwähnt, dass der Entwurf von Regelsystemen stets zu stabilen Gesamtsystemen führen sollte, die auf eine Steuerung (Erregung) mit stabilem Verhalten reagieren.

Auf Basis der Gleichungen (2.15), (2.18) und (2.19) ergibt sich für das in Kapitel 2.2.1 modellierte Kransystem die Übertragungsfunktion in den Frequenzbereich zu

$$G(s) = \mathbf{c}'(s \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{b} = \frac{g}{s^2 [M l s^2 + (m + M) g]} \quad (2.20)$$

Aus Gleichung (2.20) ist außerdem ersichtlich, wie die Übertragungsfunktion direkt aus dem Zustandsraummodell berechnet werden kann.

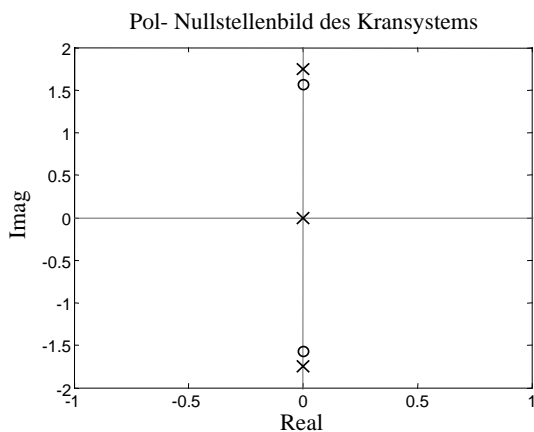


Abbildung 2.11: *Pol- und Nullstellenbild des unregulierten Kransystems.*

Eine Aufspaltung des Zähler- und Nennerpolynoms der Gleichung (2.20) in den Real- und Imaginärteil liefert das Pol- und Nullstellenbild des unregulierten Kransystems, welches in Abbildung 2.11 dargestellt ist. Das PN-Bild unterstreicht die ungedämpfte Schwingung der Eigenbewegung des Kransystems aus Abbildung 2.9. Da alle Pole (x) des Systems auf der imaginären Achse liegen ist das System zwar noch stabil, besitzt aber keine Dämpfung. Ursächlich für dieses Systemverhalten ist die fehlende Modellierung von Reibung und Luftwiderstand in den Systemgleichungen. Diese Modellschwäche ist aber nicht weiter von Bedeutung, da der zu entwerfende Regler die Dämpfung des Gesamtsystems ohnehin erhöhen muss, um das Regelziel zu erreichen.

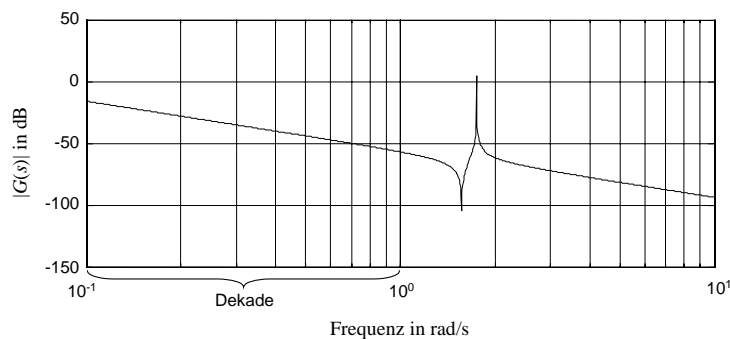


Abbildung 2.12: *Amplitudengang des unregulierten Kransystems.*

Einen weiteren Einblick in das Übertragungsverhalten des unregulierten Kransystems bietet der Frequenzgang des Systems, dargestellt in Abbildung 2.12. Der Frequenzgang trägt die

Amplitudenverstärkung über den verschiedenen Frequenzen auf und berechnet sich nach Gleichung (2.16) aus der Übertragungsfunktion des Kransystems (Gleichung 2.20).

Die Resonanzhöhung in der Mitte der Graphik ist deutlich zu erkennen und muss beim späteren Reglerentwurf besonders beachtet werden.

Der bis hier betrachtete Übertragungsblock des Kransystems stellt die Regelstrecke dar und muss im Folgenden mit einem weiteren Übertragungsblock, dem Regel-Glied, in Reihe geschaltet werden. So wird es möglich, dem Kransystem ein gewünschtes Verhalten aufzuprägen.

2.2.5 Reglerentwurf im Frequenzbereich

Auf Basis der Analyse des unregulierten Kransystems in den Kapiteln 2.2.3 und 2.2.4 kann jetzt im Frequenzbereich ein Regler entworfen werden, der das oben beschriebene Systemverhalten des Kransystems in der Art beeinflusst, dass eine gewünschte Position der Last möglichst schnell und ohne Nachschwingen erreicht wird. Dazu müssen zunächst wichtige Regelgesetze und Übertragungsglieder in allgemeingültiger Form eingeführt werden.

Reglergesetz und Übertragungsglieder

Die wichtigsten drei Schritte einer Regelung zur zielgerichteten Beeinflussung eines dynamischen Systems sind im allgemeinen das Messen, das Vergleichen und das Stellen. Die gemessene Regelgröße $y(t)$ wird mit der Führungsgröße $w(t)$ verglichen. Die Differenz stellt die Regelabweichung $e(t)$ dar, in deren Abhängigkeit dann die Stellgröße $u(t)$ bestimmt wird.

Nach welcher Gesetzmäßigkeit der Regler die Stellgröße $u(t)$ bei einer Regelabweichung $e(t)$ für die Regelstrecke vorgeben soll, wird durch das Reglergesetz beschrieben, das die allgemeine Form

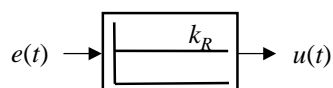
$$u(t) = k(y(t), w(t)) \quad (2.21)$$

hat und nach LUNZE 2001 in vielen Fällen als direkte Beziehung zwischen e und u geschrieben wird:

$$u(t) = k_R(e(t)) \quad (2.22)$$

Das Reglergesetz in Form der Funktion k_R kann unterschiedlich komplex sein und im einfachsten Fall nur aus einer Konstanten bestehen (z.B. $k_R = 0,6$).

In Kapitel 2.2.2 wurde ein dynamisches System im Zustandsraum durch Blöcke dargestellt. Jeder Block stellt dabei eine funktionale Beziehung zwischen der Eingangsgröße und der Ausgangsgröße dar. Das Regelgesetz in Form der Funktion k_R lässt sich folglich ebenfalls als Block darstellen:



Jeder Block stellt nach FÖLLINGER (1994) ein Übertragungsglied dar. Dabei beschreibt die Übergangsfunktion $h(t)$, in welcher Art und Weise das Übertragungsglied den Eingang auf den Ausgang umformt. Allgemein betrachtet besteht ein Regelsystem aus beliebig vielen Blöcken, die zum einen das dynamische System modellieren und zum anderen die Stellgröße in Abhängigkeit der Regelabweichung berechnen. Das dynamische Verhalten des Gesamtsystems lässt sich dabei durch eine überschaubare Anzahl an Basis-Übertragungsgliedern, die beliebig kombiniert werden können, beschreiben. Die wichtigsten

Übertragungsglieder sind in Abbildung 2.13 zusammen mit ihrer funktionalen Beschreibung und ihrer Übergangsfunktion $h(t)$ dargestellt.

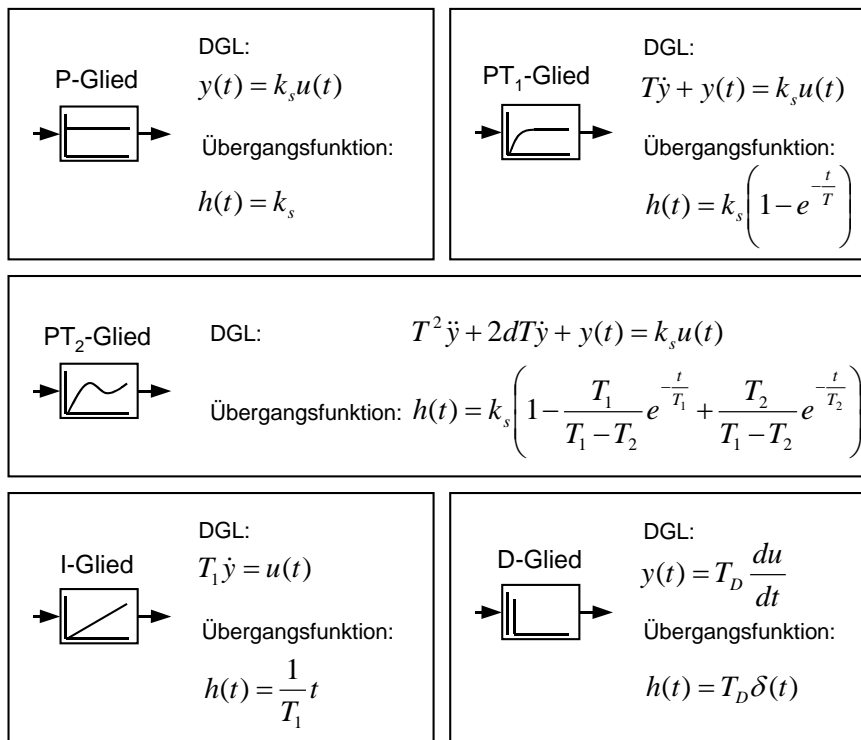


Abbildung 2.13: Die wichtigsten Übertragungsglieder und ihre funktionale Beschreibung.

Ein Beispiel für das Zusammenschalten von Übertragungsgliedern stellt der sog. PID-Regler dar. Dieser ergibt sich durch eine Parallelschaltung der Übertragungsglieder P, I und D. In Abbildung 2.14 ist das Blockschaltbild eines idealen PID-Reglers zusammen mit seiner allgemeinen Übergangsfunktion dargestellt.

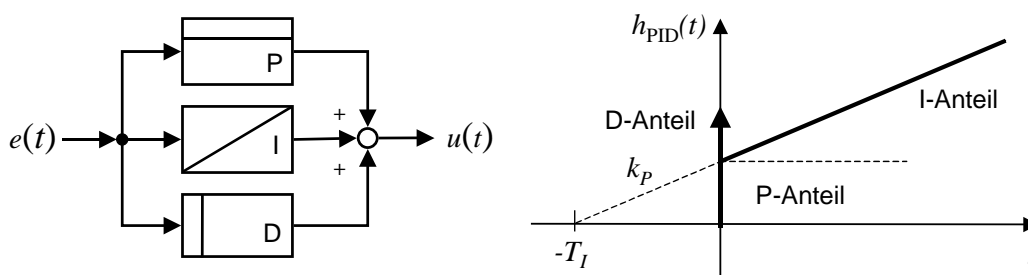


Abbildung 2.14: Blockschaltbild und graphische Darstellung der Übergangsfunktion eines idealen PID-Reglers (nach BERGER 2001 und LUNZE 2001).

Da das D-Glied aber nicht kausal ist, kann es in technischen Systemen nicht realisiert werden (BERGER 2001). Deshalb wird das D-Glied in der Regel mit einem Verzögerungsglied erster Ordnung (T_1 -Glied) verknüpft, was zum realen PIDT₁-Regler (kurz: PID-Regler) führt.

Der Entwurf und die Auslegung eines Reglers bedeuten, die oben eingeführten Übertragungsglieder zusammenschalten und ihre Parameter so festzulegen, dass das gewünschte dynamische Verhalten des Gesamtsystems erzielt wird.

Für den Entwurf eines Reglers für das Kransystem bietet der Amplitudengang des Systems, dargestellt in Abbildung 2.12 zusammen mit dem PN-Bild in Abbildung 2.11 nach LUNZE (2001) und FÖLLINGER (1994) wichtige Entscheidungskriterien:

- Für niedrige Frequenzen besitzt der Amplitudengang des Kransystems einen Abfall von -40dB/Dekade . Folglich muss nach LUNZE (2001) der Regler keinen I-Anteil besitzen, weil dieser bereits in der Regelstrecke vorhanden ist.
- Der Amplitudengang im Bereich der Resonanzüberhöhung muss ausreichend gedämpft werden, um starke Schwingungen zu vermeiden. Folglich muss dieser Bereich unterhalb der 0dB -Linie liegen.
- Um die Last möglichst schnell zu positionieren, muss die Schnittfrequenz der offenen Kette (Frequenz ω_s , bei der der Amplitudengang die 0dB -Linie schneidet) möglichst hoch sein.
- Für Frequenzen im Bereich der Schnittfrequenz sollte der Amplitudengang einen Abfall von -20dB/Dekade aufweisen, um ein gutes Führungsverhalten des geregelten Systems zu gewährleisten.
- Das PN-Bild der offenen Kette muss Pole (x) mit negativen Realteilen enthalten, um dem Kransystem eine stärkere Dämpfung aufzuprägen.

Anhand dieser Entscheidungskriterien kommt für die Regelung des vorliegenden Kransystems ein D-Regler zur Anwendung, der aufgrund seiner fehlenden Kausalität durch ein Verzögerungsglied 1. Ordnung (T_1 -Glied) ergänzt wird. Die zusammenschalteten Blöcke sind in Abbildung 2.15 dargestellt und werden als ‚offene Kette‘ oder ‚Vorwärtszweig‘ bezeichnet, da noch keine Rückführung der Regelgröße (Lastposition) integriert ist. Nach LUNZE (2001) gilt es, beim Reglerentwurf immer zuerst die ‚offene Kette‘ in ihrem Verhalten dem Regelziel entsprechend einzustellen. Eine Rückführung der Regelgröße dient dann im geschlossenen Regelkreis dazu, eventuelle Störungen auszugleichen.

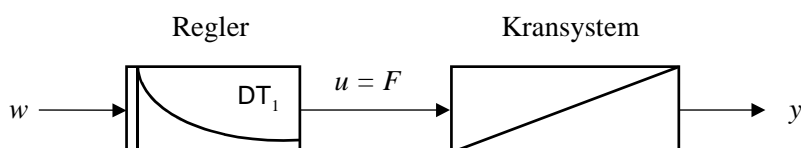


Abbildung 2.15: Offene Kette der Kranregelung.

Der DT_1 -Regler ist so einzustellen, dass der Amplitudengang der offenen Kette gegenüber dem des Kransystems im Bereich der niedrigeren Frequenzen abgeflacht wird. Außerdem sollte der Frequenzgang insgesamt angehoben werden, damit die Schnittfrequenz erhöht wird, und das geregelte System eine schnelle Positionierung der Last ermöglicht. Da das DT_1 -Glied differenzierend wirkt, reagiert es besonders auf die erste Ableitung der Lastposition. Wenn deren Geschwindigkeit hoch ist, reagiert der Regler folglich mit einer großen Stellgröße.

Die Übertragungsfunktion des DT_1 -Gliedes lautet nach LUTZ, WENDT (2003):

$$G_{DT_1}(s) = \frac{K_D \cdot s}{1 + s \cdot T_1} \quad (2.23)$$

Dabei repräsentiert K_D die Verstärkung und T_1 die exponentielle Verzögerung des Regelglieds. Wird dieser Regler zusammen mit dem dynamischen System des Krans, wie in

Abbildung 2.15 dargestellt, zusammengesaltet, so ergibt sich der in Abbildung 2.16 dargestellte Amplitudengang der Übertragungsfunktion der offenen Kette.

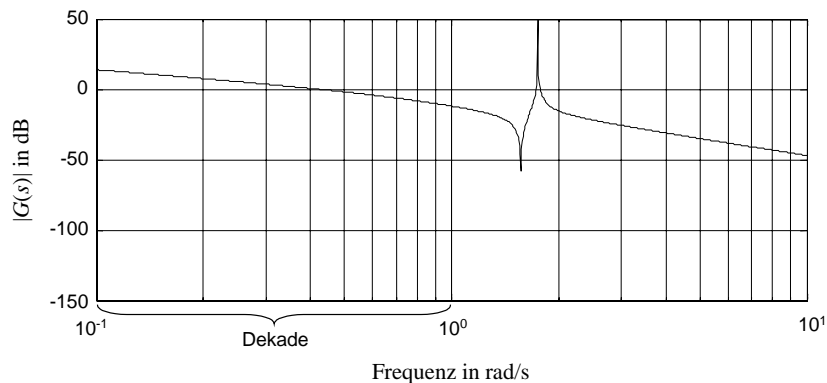


Abbildung 2.16: Amplitudengang der offenen Kette der Kranregelung.

Die Verstärkung wurde in diesem Fall mit $k_D = 158$ und die Verzögerung mit $T_1 = 1/0.7$ gewählt. Diese Größen ergeben sich durch Simulationsrechnungen. Es ist zu erkennen, dass die oben aufgestellten Kriterien eingehalten werden. Die Schnittfrequenz des Amplitudengangs liegt bei $\omega_s = 0,4 \text{ rad/s}$ und der Bereich der Resonanzüberhöhung liegt noch unter der 0dB-Linie. Außerdem wurde dem Amplitudengang ein Abfall von -20 dB/Dekade im Bereich der Schnittfrequenz aufgeprägt. Das PN-Bild der offenen Kette (siehe Abbildung 2.17 links) weist gegenüber Abbildung 2.11 einen zusätzlichen Pol im negativen Bereich der realen Achse auf. Damit prägt der Regler dem Kransystem eine Dämpfung auf.

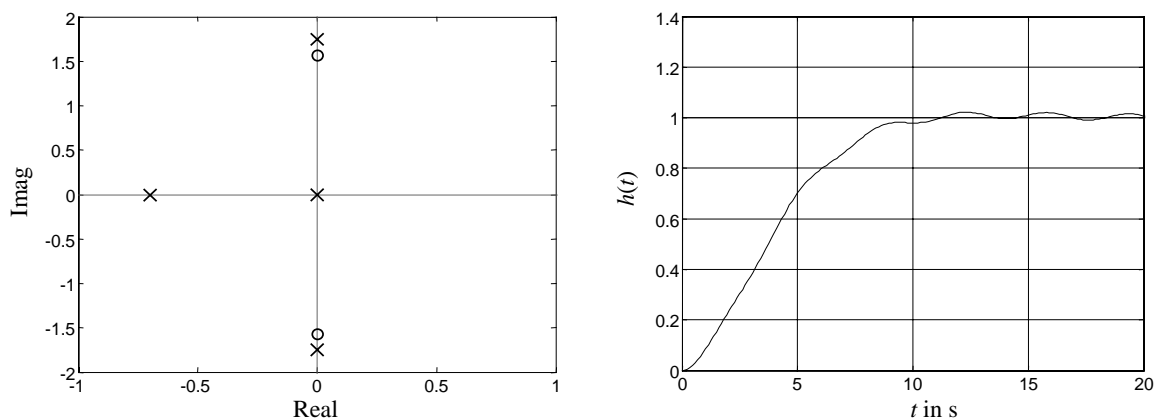


Abbildung 2.17: PN-Bild (links) und Führungsübergangsfunktion (rechts) der offenen Kette.

Die Führungsübergangsfunktion in Abbildung 2.17 (rechts) bestätigt die Dämpfung der offenen Kette gegenüber der ungedämpften Eigenbewegung des Systems (Abbildung 2.9). Ausgehend von einem Anfangszustand x_0 mit einer Anfangsposition der Laufkatze von $w_K = 0,6 \text{ m}$ und einer Auslenkung des Seils von $\alpha = -6^\circ$ wird das oben parametrisierte Kransystem innerhalb von 10 Sekunden nahezu in Ruhe gebracht ($\dot{w}_L \approx 0$). Nur ein kleiner Anteil der Eigenbewegung verbleibt aufgrund der fehlenden Modellierung der Reibung.

Da die Störgrößen $z(t)$ in der Regel nicht vollständig bestimmbar oder im Vorfeld nicht modellierbar sind, lässt sich der Zustand des jeweiligen Systems zum Zeitpunkt t nicht exakt berechnen. Das System weicht folglich von einem geplanten Verlauf der Ausgangsgrößen $y(t)$ ab, obwohl die Eingangsgrößen $u(t)$ exakt vorgegeben werden. Um diese Abweichungen

auszugleichen, muss das System in einen Regelkreis integriert werden, in dem durch Messung und Rückführung der Ausgangsgrößen die Eingangsgrößen $u(t)$ bedarfsgerecht vorgegeben werden können.

2.2.6 Regelung im Zustandsraum

Liegt das zu regelnde dynamische LTI-System im Zustandsraum vor (siehe Kapitel 2.2.2), so kann unter Berücksichtigung der Modellunschärfe davon ausgegangen werden, dass alle internen Variablen und deren Verknüpfungen bekannt sind. Dieses detaillierte Wissen über das System wird in der Regelungstechnik dazu genutzt, um Zustandsregelungen zu entwerfen und zu betreiben. Da heute sehr viele Regelkreise auf digitalen Prozessrechnern realisiert werden, eignen sich Zustandsregler auf Grund ihrer effizienten numerischen Zugänglichkeit mit Werkzeugen der linearen Algebra besonders. Diese von GLATTFELDER, SCHAUFELBERGER (1997) gemachten Aussagen besitzen bis heute Gültigkeit.

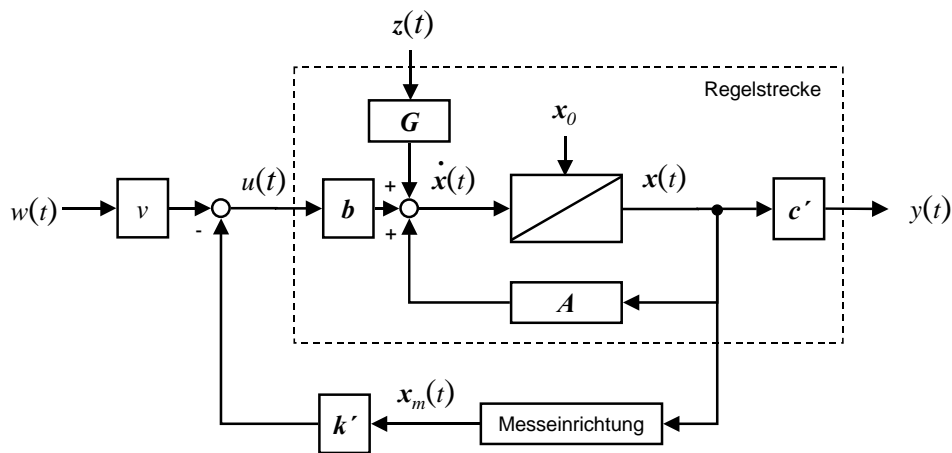


Abbildung 2.18: Regelkreis mit Zustandsrückführung und Vorfilter.

Die einfachste Möglichkeit, einen Regler im Zustandsraum umzusetzen, besteht darin, den Systemzustand $x(t)$ auf den Eingang des Systems zurückzuführen.

$$u(t) = -\mathbf{k}' \mathbf{x}(t) \quad (2.24)$$

Bei dieser sogenannten Zustandsrückführung agiert der Vektor \mathbf{k} als Rückführvektor in einem Eingrößensystem. Für ein Mehrgrößensystem vergrößert sich der Vektor entsprechend der Anzahl an Eingangsgrößen zur Rückführmatrix \mathbf{K} .

Der Rückführvektor \mathbf{k} lässt sich nur berechnen, wenn das dynamische System steuerbar ist. Diese Bedingung ist gegeben, wenn die Steuerbarkeitsmatrix \mathbf{Q}_s den vollen Rang besitzt. Dabei setzt sich \mathbf{Q}_s für ein Eingrößensystem mit n Zustandsvariablen wie folgt zusammen:

$$\mathbf{Q}_s = [\mathbf{b}, \mathbf{A}\mathbf{b}, \mathbf{A}^2\mathbf{b}, \dots, \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{b}] \quad (2.25)$$

Der Rückführvektor \mathbf{k}' ergibt sich nach LUNZE (2005) mit der Formel von Ackermann zu

$$\mathbf{k}' = \mathbf{q}' (\bar{a}_0 \mathbf{I} + \bar{a}_1 \mathbf{A} + \dots + \bar{a}_{n-1} \mathbf{A}^{n-1} + \mathbf{A}^n). \quad (2.26)$$

Dabei stellt \mathbf{q}' die letzte Zeile der invertierten Steuerbarkeitsmatrix \mathbf{Q}_s

$$\mathbf{q}' = (0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1) \mathbf{Q}_s^{-1} \quad (2.27)$$

dar. Die Lage der Pole des geregelten Systems können weitestgehend beliebig verschoben werden. Dazu werden die Koeffizienten $a_0, a_1 \dots a_{n-1}$ des charakteristischen Polynoms (Nenner von Gleichung 2.19) der Regelstrecke

$$p(\lambda) = \det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}) = \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0 \quad (2.28)$$

entsprechend verändert und als $\bar{a}_0, \bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_{n-1}$ in die Gleichung 2.26 eingeführt. Durch die Veränderung der Koeffizienten ändern sich auch die Nullstellen des charakteristischen Polynoms und damit die Pole der Regelstrecke. Anders ausgedrückt stellen nach FREUND (1987) die Eigenwerte λ_i der Systemmatrix \mathbf{A} die Nullstellen des charakteristischen Polynoms dar und repräsentieren damit die Pole der Übertragungsfunktion. Folglich ist ein System stabil, wenn alle Eigenwerte der Systemmatrix \mathbf{A} einen negativen Realteil besitzen (UNBEHAUEN 1997).

Die Zustandsrückführung ermöglicht es somit, dem System ein bestimmtes dynamisches Verhalten aufzuprägen, was eine Verbesserung der Regelgüte bedeutet. Dies gelingt nach FÖLLINGER (1994) aber nur um den jeweiligen Betriebspunkt des Systems. Eine Folgeregelung mit beliebiger Führungsgröße $w(t)$ ist mit einer Zustandsrückführung nicht zu erreichen. Deshalb wird, wie bereits in Abbildung 2.18 dargestellt, ein Vorfilter v vorgeschaltet, um die Steuergröße $u(t)$ in Abhängigkeit zur Führungsgröße $w(t)$ vorzugeben.

Die bisher beschriebene Zustandsrückführung setzt die messtechnische Erfassung aller Zustandsgrößen voraus. Dies ist in realen Regelsystemen aus den verschiedensten Gründen nicht immer durchführbar, weshalb die Zustandsrückführung zwar grundlegend, aber eher theoretischer Natur ist (LUNZE 2005).

2.2.7 KALMAN-Filter als Beobachter im Regelkreis

Kann eine Zustandsrückführung nicht direkt erfolgen, da nicht alle Zustandsgrößen direkt gemessen werden können, wird eine Ausgangsrückführung eingesetzt. In diesem Fall wird die Regelgröße gemessen und einem Beobachter zugeführt. Dieser Beobachter ist in der Regel ein KALMAN-Filter, und er hat die Aufgabe, aus der gemessenen Regelgröße $y(t)$ einen bestmöglichen Zustand $\hat{x}(t)$ zu rekonstruieren (Berger 2001).

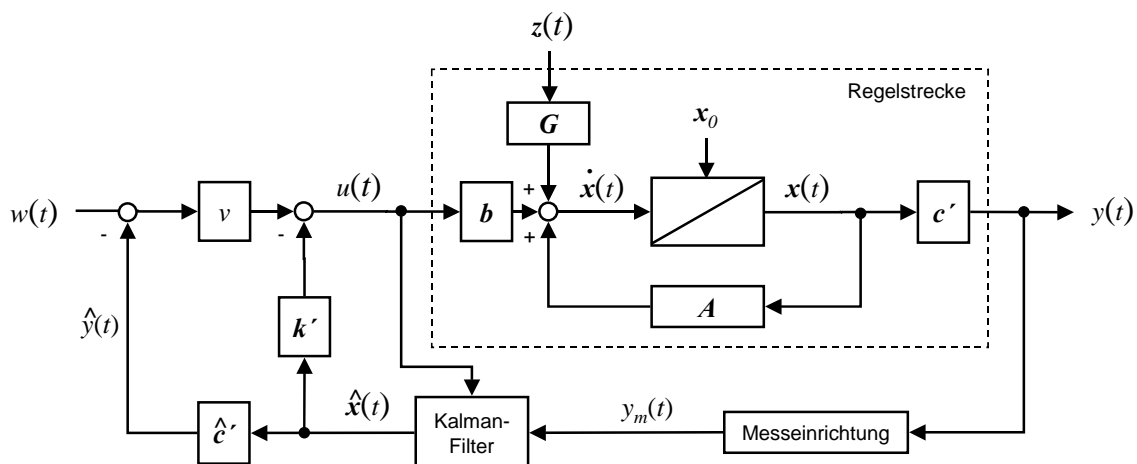


Abbildung 2.19: Regelkreis mit Ausgangsrückführung und KALMAN-Filter.

Das Kalman-Filter wird, wie in Abbildung 2.19 dargestellt, in den Zustandsregelkreis integriert. Der Vorteil des KALMAN-Filters im Gegensatz zu anderen Beobachtern liegt in

seiner Eigenschaft begründet, bei stochastisch gestörten Mess- und Systemgleichungen die optimalste Schätzung des Systemzustands zu ermöglichen (BRAMMER, SIFFLING 1994).

Die Systemgleichung des diskreten Kalman-Filters, wie es in digitalen Abtastregelungen eingesetzt wird, lässt sich unter Einbeziehung der Transitionsmatrix T , der Störmatrix S des Filters und dem Rauschanteil w_R wie folgt formulieren:

$$\hat{x}_{k+1} = T x_k + B_{k+1,k} u_k + S_{k+1,k} w_{Rk} \quad (2.29)$$

Durch Einführung der kausalen Erweiterung des KALMAN-Filters mit der Stellgröße u wird das Führungsverhalten des Kalman-Filters bei sich rasch verändernder Führungsgröße w verbessert (EICHHORN 2004 und HEUNECKE, KUHLMANN 2002). Dieser Aspekt ist für Anwendungen im Bereich der Führung technischer Systeme im weiteren Verlauf dieser Arbeit relevant.

Auf die weiteren Gleichungen des diskreten KALMAN-Filters, wie es in digitalen Abtastregelungen eingesetzt wird, soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Sie sind in vielen Veröffentlichungen beschrieben. Stellvertretend seien hier erwähnt: BRAMMER, SIFFLING (1994), HEUNECKE (1995), HUEP (1986) und WELSCH et al. (2000).

2.2.8 Schlussfolgerungen

Die in diesem Kapitel dargestellten Methoden der Analyse dynamischer Systeme und deren zielgerichtete Beeinflussung am Beispiel einer Kranregelung stellen die Grundlage für den späteren Entwurf des Regelsystems für das modulare Positionierungs- und Führungssystem dar. Es wurde deutlich, dass ein Reglerentwurf eine eindringliche Analyse des Systems, sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich, voraussetzt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird zum Reglerentwurf verstärkt auf eine Darstellung des Systems im Zustandsraum gesetzt, wobei das KALMAN-Filter zur Rückführung nicht messbarer Zustandsgrößen benutzt wird. Da ein Führungssystem nach der Definition in Kapitel 2.1.4 einer Folgeregelung bedarf, muss in der Zustandsregelung nach Kapitel 2.2.6 aber ein Vorfilter eingesetzt werden, das sich am besten im Frequenzbereich mittels Analyse der „offenen Kette“ des Regelsystems entwerfen lässt. In den späteren Kapiteln dieser Arbeit wird auf die am Beispiel der Kranregelung erarbeiteten Grundlagen zurückgegriffen und auf entsprechende Algorithmen verwiesen.

2.3 Messtechnik

Da Regelkreise immer ein Messglied enthalten müssen, um die Rückführung der Regelgröße zu ermöglichen, bedarf es einiger Ausführungen hinsichtlich der Messtechnik. Dabei steht die geometrische Führung von technischen Systemen, wie sie bereits im Verlauf dieser Arbeit als Zielsetzung formuliert worden ist, im Vordergrund.

Allgemein fasst die Messtechnik als Wissenschaft die Sensoren und die Auswertetechniken zusammen, um aus physikalischen Größen (Messgrößen) interessierende Messwerte abzuleiten. Durch den rudimentären Vorgang des „Messens“ wird einer Messgröße X die Maßzahl x als Vielfaches der Einheitsgröße N zugeordnet. N wird dabei durch das Messnormal verkörpert. (PROFOS, PFEIFER 1997)

$$X = x \cdot N \quad (2.30)$$

Damit der Vorgangs des „Messens“ durchgeführt werden kann, müssen nach PROFOS, PFEIFER (1997) zwei fundamentale Voraussetzungen erfüllt sein:

- 1. Fundamentalvoraussetzung:** Die zu messende Größe muss qualitativ eindeutig definiert und quantitativ bestimmbar sein.
- 2. Fundamentalvoraussetzung:** Das Messnormal muss durch eine Konvention festgelegt, und damit in allgemein anerkannter Weise definiert sein.

Die Messgrößen sind meist nichtelektrische Größen wie z.B. Position, Drehzahl, Temperatur oder Geschwindigkeit und müssen zunächst im Sensor in elektrische Größen umgewandelt werden. Diese Sensorsignale werden dann einer Erfassung zugeleitet und können nach einer Analog-Digital-Wandlung von einem Prozessrechner weiterverarbeitet werden. (GLÄSER, SCHOLLMAYER 2004) und (WEICHERT, WÜLKER 2000)

Auf die allgemeinen Auswertetechniken und Sensoren der Messtechnik soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Es sei auf die zahlreiche Literatur zu diesem Thema, wie z.B. CASPARY (2002), HOFFMANN (2002), PROFOS, PFEIFER (1997), SCHLEMMER (1996), und SCHWARZ (1996), verwiesen.

Zur Führung von technischen Systemen bedarf es einer Messeinrichtung, die die Freiheitsgrade bezüglich der Bewegung des Systems erfasst, um diese dann im Rahmen einer Regelung mit den entsprechenden Sollwerten zu vergleichen. Das zu beobachtende System befindet sich während der Messung in Bewegung, was besondere Anforderungen an die Dynamik der Messeinrichtung stellt und die Einführung der Zeit t als vierte Dimension notwendig macht, da die Messwerte nur für einen bestimmten Zeitpunkt Gültigkeit besitzen (CASPARY 2002). Zur Auswertung der Sensordaten bis hin zu den jeweils interessierenden Größen, wie z.B. Position, Orientierung oder Geschwindigkeit kommen kinematische Modelle oder dynamische Modelle zur Anwendung. Die stetige Steigerung der Leistungsfähigkeit der Sensoren und der Auswerteeinheiten bedarf einer ständigen Anpassung der Auswertetechniken. Wichtige Veröffentlichungen zu diesem Thema sind u. a. FOPPE et al. (2004) und HEUNECKE, KUHLMANN 2002.

Bei der Integration von Messeinrichtungen in einen Regelkreis zur Führung eines Systems sind die Eigenschaften der Messeinrichtung hinsichtlich ihrer Dynamik und Stochastik wesentlich für die Auslegung des Reglers und bedürfen einer genaueren Betrachtung.

2.3.1 Überblick gebräuchlicher Sensoren

Um einen Sensor als Messglied in einen Regelkreis integrieren zu können, muss dieser prozesskoppelbar sein. Das heißt, er muss über eine automatische Ableseeinrichtung und Datenfluss verfügen. Außerdem müssen die zeitliche Auflösung (Abtastrate) und Totzeit des Sensors an die zeitlichen Bedingungen des Prozesses angepasst sein. Wird das Anwendungsspektrum von der Führung technischer Systeme allgemein auf die Automatisierung von Bauprozessen eingeschränkt, findet sich bei BAYER (2004) und Tabelle 2.1 eine Übersicht über die gebräuchlichen Sensoren und ihre für die Führungsaufgabe relevanten Eigenschaften.

Tabelle 2.1: *Eigenschaften gebräuchlicher Sensoren zur Führung von Baumaschinen in Anlehnung an Bayer (2004).*

Sensor	Messgröße	Genauigkeit	Reichweite	Messfrequenz	Totzeit
PDGPS	3D-Koordinaten	Lage: 20mm Höhe: 30mm	unbegrenzt (vorausgesetzt: Mobilfunk- und Referenzstations- netz)	20Hz	20-30ms
Zielverfolgende-Tachymeter	Strecke, Richtungen	2-5mm (für resultierende Position)	400-600m	10-20Hz	100-300ms
Rotationslaser	relative Höhe	2mm / 100m	1000m	10Hz	< 10ms
Neigungssensor	Neigung	0,1°	-	> 100Hz	< 10ms
Kreisel	Winkelgeschwindigkeit	0,001°/s	-	> 100Hz	< 10ms
Ultraschall-Sensor	Strecke	1mm	100-3000mm	> 100Hz	< 10ms
Laser-Triangulations-Sensor	Strecke	0,1mm	10-3000mm	> 100Hz	< 10ms
Seilzugsensor	Strecke	0,1%	1-10m	> 100Hz	< 10ms

Da die Produktvielfalt bei den Sensoren teilweise sehr groß ist, können die in Tabelle 2.1 angegebenen Werte nur als Richtwerte verstanden werden. Je nach Applikation werden die benötigten Sensoren ausgewählt. Für die automatische Führung technischer Systeme im dreidimensionalen Raum werden präzises differentielles GPS (PDGPS) und Tachymeter eingesetzt. Beide Sensoren liefern die dreidimensionale Position eines Punktes. Da damit die Lage eines Objektes im Raum noch nicht festliegt, müssten die Sensoren mehrfach eingesetzt werden. Aus Kostengründen werden aber oft andere, meist inertielle Sensoren in einem Multisensorsystem integriert, um die räumliche Ausrichtung des Führungsobjekts zu gewährleisten (GLÄSER, SCHOLLMAYER 2004).

Bei genauerer Betrachtung der beiden dreidimensionalen Sensoren fällt auf, dass gerade diese Sensoren die geringste Abtastrate und die größte Totzeit aufweisen. Dadurch wird die prinzipielle Leistungsfähigkeit des Führungssystems, besonders hinsichtlich der möglichen Objektgeschwindigkeiten, eingeschränkt (BAYER 2004). Differentielles GPS ist von den kinematischen Anforderungen wie Abtastrate und Totzeit zwar besser für Führungsaufgaben geeignet, allerdings sind die Genauigkeiten des Messsystems in der Lage auf 1-2cm und in der Höhe auf 2-3cm begrenzt. Tachymeter sind somit für hochgenaue Führungsaufgaben im Bereich unter 1cm Standardabweichung die einzigen effizient einsetzbaren dreidimensionalen Positionssensoren.

2.3.2 Tachymeter als Messeinrichtung für hochgenaue Führungsaufgaben

Wird ein Tachymeter für Führungsaufgaben eingesetzt, so bedingt dies die Positionsbestimmung eines bewegten Objekts. Das Tachymeter wird dabei im kinematischen Modus, auch Lock-Modus genannt, betrieben. Dies bedeutet zum einen, dass das Tachymeter einen Reflektor auf dem Objekt als Ziel verfolgen muss. Zum anderen müssen die polaren Messelemente des Tachymeters, Horizontalrichtung H_z , Vertikalwinkel V und Schrägstrecke S , für jede Messepoche bestimmt werden. Beträgt die Abtastrate des Tachymeters z.B. 10Hz, so sind dies zehn Einzelmessungen pro Sekunde. Dieser Umstand führt dazu, dass sich die Qualität einer Positionsbestimmung bezüglich Korrektheit und Präzision auf Basis kinematischer Tachymetermessungen von statischen Messungen auf ruhende Reflektoren, je nach Tachymeter, stark unterscheiden kann.

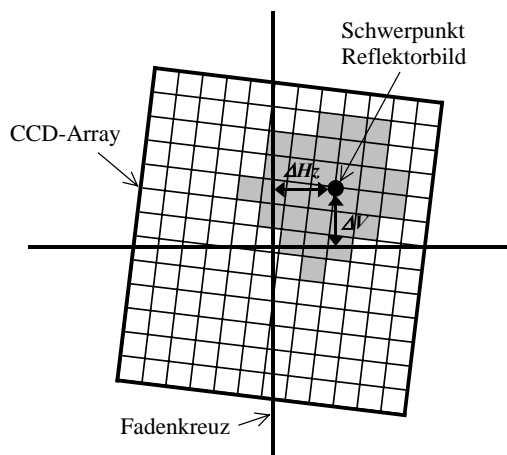


Abbildung 2.20: Automatische Feinzielung mit CCD-Array.

Die für kinematische Messungen notwendige Zielverfolgung wird in der Regel über Bildverarbeitungsalgorithmen gelöst. Dabei wirft der Reflektor, der sich im Gesichtsfeld des Tachymeters befinden muss, das ausgesandte Infrarotlicht der Zielverfolgungseinheit auf ein CCD-Array zurück (siehe Abbildung 2.20). Da die Lage des CCD-Arrays im Verhältnis zum Fadenkreuz nach einer Kalibrierung bekannt ist, kann die Lage des reflektierten Bildschwerpunkts, unter Zuhilfenahme der Entfernung zum Reflektor, in Richtungsabweichungen des Fernrohrs zum Reflektormittelpunkt umgerechnet werden. Die Richtungsabweichungen werden in einem Regelkreis zur Nachführung des Fernrohrs benutzt. Dieser Regelkreis arbeitet z.B. bei Tachymetern der Serie Leica TPS1200 mit 50Hz, was zusammen mit einer Drehgeschwindigkeit um die Achsen von bis zu $45^\circ/\text{sec}$ die Verfolgung von Objekten mit Geschwindigkeiten bis zu 25m/s im Abstand von 100m ermöglicht. Damit ist die Zielverfolgung mit den meisten modernen Tachymetern, die ähnliche Parameter aufweisen, für Führungsaufgaben im Baustellenumfeld geeignet, zumal intelligente Prädiktionsalgorithmen in der Regel die kurzzeitige Unterbrechung der direkten Sichtverbindung zwischen Tachymeter und Reflektor überbrücken können.

Die Bestimmung der polaren Messelemente (H_z , V und S) muss im kinematischen Modus parallel zur Zielverfolgung durchgeführt werden. Hier liegen die größten Schwachstellen der dreidimensionalen Punktbestimmung bewegter Objekte mittels Tachymeter. Die Streckenmessung im Phasenvergleichs- oder Pulsmessverfahren stellt an sich ein stark integrierendes Messverfahren dar. Dies bedeutet, dass viele Einzelmessungen im Zeitraum von etwa 1,5s (Leica TPS1200 – Standardmessung) durchgeführt werden und so eine erhebliche Genauigkeitssteigerung durch Messhäufung erfolgen kann. Im kinematischen Modus hingegen muss die elektrooptische Entfernungsmessung im Trecking-Modus erfolgen. Hierbei werden zu jeder Messepoche nur noch die Änderungen zur Vorepoche gemessen. Die

Dauer einer Streckenmessung sinkt dann auf Werte bis zu 0,1s. Bei jeder Signalunterbrechung, sei es durch Hindernisse oder kurzzeitigen Verlust des Reflektors auf Grund ruckartiger Bewegungen muss allerdings die Streckenmessung wieder neu initialisiert werden, was 0,5-1s dauern kann. Im Trecking-Modus sinkt die Genauigkeit der Streckenmessung bei den hier betrachteten Leica TPS1200-Tachymetern auf 5mm+2ppm (LEICA 2004).

Die Abgriffe der Horizontalrichtung und des Vertikalwinkels erfolgt im Gegensatz zur Streckenmessung sehr viel schneller. Die für die Zielverfolgung berechneten Abweichungen des Fadenkreuzes vom Reflektormittelpunkt werden außerdem zur Genauigkeitssteigerung rechnerisch berücksichtigt. Die Genauigkeit des Richtungsabgriffs (H_z und V) kann so für die oben genannte Tachymeterserie im Bereich von 0,3mgon (Geräteklasse 1201) angegeben werden. (LEICA 2004)

Auf Grund der unterschiedlichen Integrationszeiten der Subsysteme in einem Tachymeter ist die zeitliche Synchronisation der polaren Messelemente bei vielen Tachymetern nicht gegeben. Bei Einsatz im kinematischen Modus werden deshalb die berechneten Positionen des bewegten Objekts zur jeweiligen Epoche k , in Abhängigkeit von der Objektgeschwindigkeit v_k und der geometrischen Konfiguration, teilweise bis zu mehreren Dezimetern verfälscht (BEETZ 2003, KRICKEL 2004, STEMPFHUBER, et al. 2000).

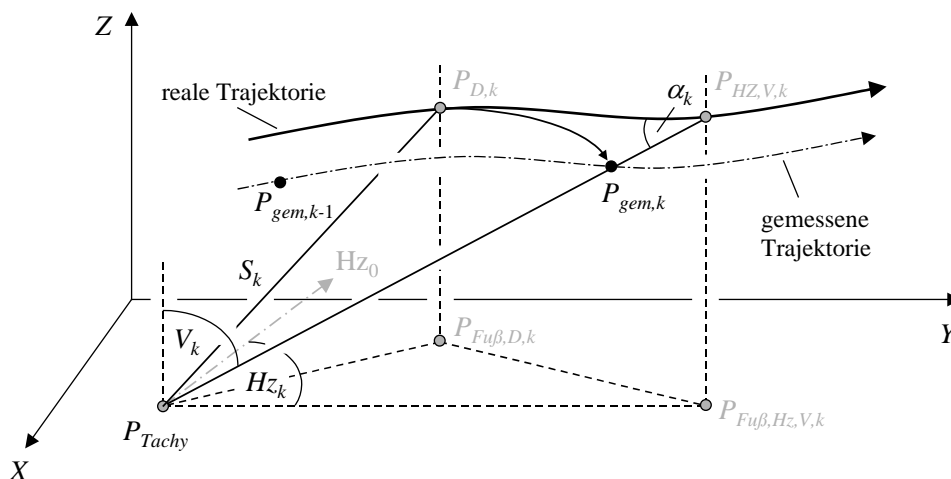


Abbildung 2.21: Auswirkung der Synchronisationsfehler zwischen den Subsystemen eines Tachymeters (nach STEMPFHUBER, MAURER 2001).

In Abbildung 2.21 ist die Verfälschung der gemessenen Position des bewegten Objekts $P_{gem,k}$ auf Grund mangelnder Synchronisation der Subsysteme dargestellt. In diesem Fall eilt die Streckenmessung S_k den Richtungsmessungen ($H_{z,k}$ und V_k) um Δt voraus. In STEMPFHUBER et al (2000) wird ein Kalibrierverfahren zur Ermittlung von Δt_n zwischen den Subsystemen eines Tachymeters vorgestellt. Sind die Synchronisationsfehler Δt_n eines Tachymeters bekannt, kann nach STEMPFHUBER, MAURER (2001) die Korrektur einer Position zur Epoche k mit folgendem Gleichungssystem berechnet werden:

$$\begin{aligned}
Y_{kor} &= \left(Y_{gem} + S_k \sin V_k \sin Hz_k \right) \cdot v_k \Delta t_n \cdot \left(\cos \alpha_k - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_k \Delta t_n}{S_k} (1 - \cos^2 \alpha_k) \right) \cdot \sin V_k \sin Hz_k \\
X_{kor} &= \left(X_{gem} + S_k \sin V_k \cos Hz_k \right) \cdot v_k \Delta t_n \cdot \left(\cos \alpha_k - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_k \Delta t_n}{S_k} (1 - \cos^2 \alpha_k) \right) \cdot \sin V_k \cos Hz_k \quad (2.31) \\
Z_{kor} &= \left(Z_{gem} + S_k \cos V_k \right) \cdot v_k \Delta t_n \cdot \left(\cos \alpha_k - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_k \Delta t_n}{S_k} (1 - \cos^2 \alpha_k) \right) \cdot \cos V_k
\end{aligned}$$

Diese Korrekturformeln ermöglichen, so auch in den Geräten der Serie Leica TPS1200, die Positionsbestimmung eines bewegten Reflektors im Bereich $< 1\text{cm}$ unter guten Sichtbedingungen und langsam bewegten Objekten (STEMPFHUBER, MAURER 2001). Diese Geschwindigkeitsangabe ist relativ; Erfahrungen haben gezeigt, dass diese Genauigkeit nur bei ca. einem Zehntel der maximalen Drehgeschwindigkeit des Tachymeters erreicht werden kann.

Neben diesen angeführten Fehlereinflüssen bei der Positionsbestimmung eines bewegten Objektes mittels Tachymeter muss außerdem beachtet werden, dass die Totzeit T von der Messung der Polarelemente bis zur Ausgabe auf der Schnittstelle auch bei modernen Geräten mehrere hundert Millisekunden betragen kann. Da sich jede Totzeit im Messsystem negativ auf die Qualität eines automatischen Führungssystem auswirkt, muss diese möglichst klein gehalten werden. Aus diesem Grund werden bei Tachymetern im Rahmen von Führungsaufgaben gerne die Stehachskompensatoren ausgeschaltet. Dies kann je nach Tachymeter die Totzeit um bis zu 100ms verringern. Dieses Vorgehen birgt aber erhebliche Risiken bezüglich der resultierenden Position, da eine rechnerische Korrektur der Polarelemente zwecks Kompensation einer möglichen Stehachsschiefe ausbleibt. Deshalb ist es in diesem Fall besonders wichtig für eine korrekte Aufstellung des Tachymeters zu sorgen. Neben den klassischen Fehlereinflüssen wie z.B. Sonneneinstrahlung und Einsinken im Boden müssen bei motorisierten Tachymetern nach DEPENTHAL (2004) auch die Verdrehungen des Stativs in Folge der wirkenden Drehmomente der Motoren berücksichtigt werden. Es wurden Auswirkungen auf die Richtungsmessung von bis zu 1,6 mgon beim Einsatz eines Leica TCA2003 nachgewiesen, was bei einer Entfernung zum bewegten Objekt von 100m bereits einen Fehler von 2,5 mm in der Positionsbestimmung ausmacht. Modernere Tachymeter weisen durch höhere Geschwindigkeiten und Beschleunigungen noch größere Drehmomente auf, was diesen Fehlereinfluss noch bedeutsamer macht. Die Aufstellung eines Tachymeters sollte folglich möglichst auf festen Pfeilern erfolgen und ist des öfteren zu überprüfen. Um die Führungsaufgaben dabei nicht zu lange zu unterbrechen, sollte auf eine automatisierte Insitu-Überprüfung, also eine in den Messablauf integrierte Überprüfung, zurückgegriffen werden. Lösungsansätze liefert (POLTINGER 1998) aus dem Bereich des Tunnelbaus, wo dieses Problem aufgrund zusätzlicher Störeinflüsse durch Ausbrucherschütterungen verstärkt zu beachten ist.

2.3.3 Koordinatensysteme und Soll-Trajektorien

Das Baustellenkoordinatensystem (X, Y, Z) stellt die für den Baubetrieb höchste Hierarchieebene unter den Bezugssystemen dar. So soll im Rahmen dieser Arbeit der Zusammenhang zwischen dem Baustellenkoordinatensystem und einem übergeordneten System der Landesvermessung nicht näher betrachtet werden. Bei den üblichen Baustellenkoordinatensystemen handelt es sich in der Regel um dreidimensionale, lokale und kartesische Rechtssysteme, die in einer mittleren Geländehöhe parallel zu wichtigen Bauwerksachsen gelagert werden. Die Trennung in Lage und Höhe ist aber ebenfalls denkbar,

wie auch ein eindimensionales Baustellenkoordinatensystem in Form von Verkehrswegeachsen. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Baustellenkoordinatensystem auch Zielkoordinatensystem genannt und die Koordinaten mit X , Y und Z bezeichnet. Im Baustellenkoordinatensystem werden die Bauobjekte geplant und liegen dann digital als Soll-Geometrie oder Soll-Trajektorie vor.

Das als Messeinrichtung für die Führungsaufgaben eingesetzte Tachymeter arbeitet zunächst im tachymetereigenen Polarkoordinatensystem. Die Polarelemente stellen die Horizontalrichtung H_z , der Vertikalwinkel V und die Schrägstrecke S zum Reflektor am Bauobjekt oder an der Maschine dar. Die Transformation der Polarkoordinaten des Reflektors vom polaren Tachymetersystem in das kartesische Baustellkoordinatensystem wird nach bekannten Rechenvorschriften durchgeführt. Voraussetzung dieser Transformation ist die Stationierung des Tachymeters, also die Bestimmung der Standpunktkoordinaten und der Orientierungsunbekannten relativ zum Baustellenkoordinatensystem.

Das Bauobjekt (z.B. Fertigteil oder Maschine) verfügt über ein eigenes Bezugssystem, wie in Abbildung 2.22 dargestellt. Gegenüber dem Baustellenkoordinatensystem verfügt dieses Objektkoordinatensystem im dreidimensionalen Fall über sieben Freiheitsgrade; drei Translationen, drei Rotationen und einen Maßstab.

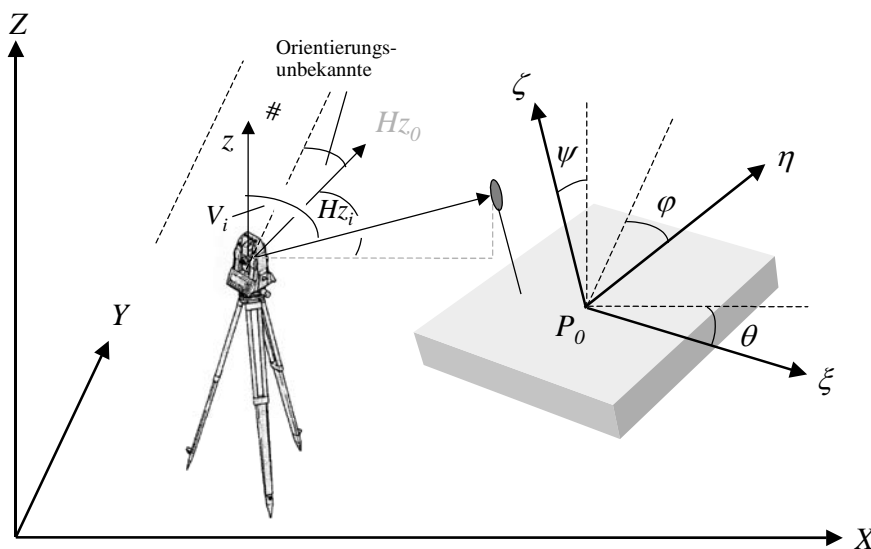


Abbildung 2.22: Baustellen-, Tachymeter- und Objektkoordinatensystem.

In der Regel kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Reflektor als Bezugspunkt für das Tachymeter im Nullpunkt des Objektkoordinatensystems P_0 angebracht werden kann. Aus diesem Grund sind der Reflektor und sonstige Sensoren im Rahmen einer Kalibrierung relativ zum Objektkoordinatensystem einzumessen. Das Ergebnis der Kalibrierung liefert die Innere Geometrie des Bauobjekts. Für eine im dreidimensionalen Fall notwendige Sieben-Parameter-Transformation zwischen Bauobjekt und Baustellenkoordinatensystem ist der Nullpunkt (X_0 , Y_0 und Z_0) und die Rotationen (φ , ψ und θ) des Objektkoordinatensystems relativ zum Baustellenkoordinatensystem zu bestimmen. In RETSCHER, EGBONU (2000), RETSCHER (2001) und CASPARY (2002) werden die mathematischen Zusammenhänge zwischen den Koordinatensystemen näher beschrieben.

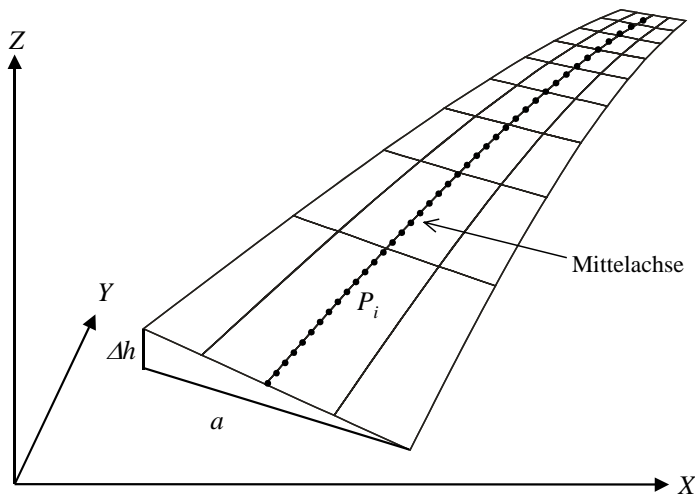


Abbildung 2.23: *Machine-Control-Model als Führungsgröße im Verkehrswegebau.*

Für die automatische Führung von Maschinen im Verkehrswegebau wird aus der geplanten Soll-Geometrie ein sogenanntes ‚Machine-Control-Model‘ (MC-Model) abgeleitet (JAAKKOLA, HEIKKILÄ 2004). In Abbildung 2.23 ist ein MC-Model dargestellt. Es besteht in diesem Fall aus einer Achse mit Querprofilen, die die jeweilige Querneigung q als Verhältnis der Überhöhung Δh und der Fahrwegbreite a repräsentieren. Die Mittelachse (Soll-Trajektorie) dient als Führungsgröße w für die Querregelung der Maschine. Eine funktionale Beschreibung der Soll-Trajektorie, wie sie z.B. von KUHLMANN (2004) vorgeschlagen wird ermöglicht eine beliebig feine Diskretisierung der Soll-Trajektorie und ermöglicht so eine optimale Berechnung der Regelabweichung e als Differenz aus Ist-Position und Soll-Trajektorie.

3 Analyse der Anforderungen an ein Führungs- und Positionierungssystem im Baustellenumfeld

Wie in der Einleitung motiviert beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Automatisierung von Bauprozessen. Dabei soll ein modulares, vielfältig einsetzbares System für hochgenaue Führungs- und Positionierungsaufgaben entworfen werden.

Die Anforderungsanalyse, die Gegenstand dieses Kapitels ist, erarbeitet und bewertet die für einen Systementwurf notwendigen Funktionen. Dabei werden Fragen der technischen und mathematischen Realisierbarkeit zunächst bewusst ausgeblendet, um keine vorzeitigen Beschränkungen einzuführen und dadurch Entwicklungspotentiale zu unterdrücken. Die hier angewandte Methodik setzt wesentliche Prinzipien der in der industriellen Produktentwicklung weit verbreiteten QFD-Analyse (Quality Function Deployment-Analyse) um. Die QFD-Analyse, näher erläutert und angewandt z.B. in NEUMANN (1996) und MAI (1998), arbeitet nach dem in Abbildung 3.1 dargestellten Ablaufplan und hat die Entwicklung marktgerechter und qualitativ hochwertiger Produkte zum Ziel. Der wissenschaftliche Ansatz dieser Arbeit bedingt, dass die QFD-Analyse nicht komplett durchlaufen wird, sondern der Ablaufplan (siehe Abbildung 3.1) nach der prototypischen Umsetzung der Anforderungen abgebrochen wird.

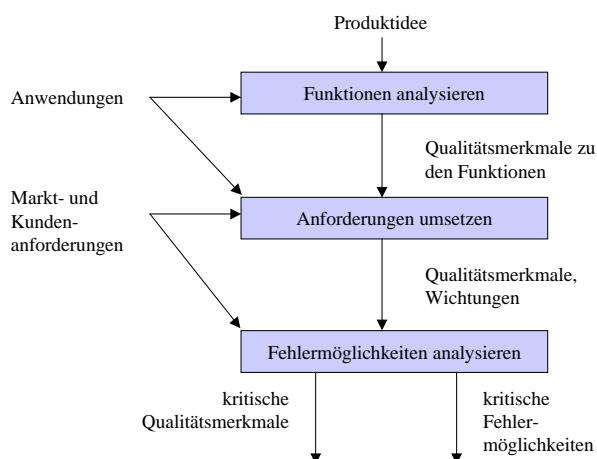


Abbildung 3.1: Ablaufmodell einer QFD-Analyse zur Umsetzung von Produktanforderungen und Fehleranalyse nach (MAI 1998).

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden in einem ersten Schritt gemäß der Methodik der QFD-Analyse mögliche Anwendungsfälle eines modularen Systems zur hochgenauen Führung von technischen Systemen definiert. Anschließend wird in einem zweiten Schritt ein Katalog mit benötigten Funktionen zur Realisierung der Anwendungsfälle aufgestellt. Es schließt sich eine tabellarische Bewertung der Funktionen hinsichtlich der Bedeutung für jeden definierten Anwendungsfall an. Das Ergebnis der Auswertung dieser sogenannten Funktionalmatrix gibt Aufschluss über die Wichtigkeit einzelner Funktionen für die einzelnen Anwendungsfälle, deren Komplexität und gegenseitigen Abhängigkeiten. Auf dieser Basis kann dann eine Systemarchitektur und später ein Systemkonzept entworfen werden.

3.1 Definition von Anwendungsgattungen

Da die Anzahl möglicher Anwendungsfälle mit Automatisierungspotential auf Baustellen sehr groß ist, wird an dieser Stelle ein generischer Ansatz gewählt, wie er in GLÄSER (2005) vorgeschlagen worden ist. Statt eine große Anzahl individueller Anwendungsfälle zu definieren, wird sich auf wenige allgemeingültige Anwendungsgattungen beschränkt. Die

dabei gewonnen Erkenntnisse von den allgemein gültigen Anforderungen an ein modulares System können dann später auf jeden Einzelfall adaptiert werden.

Weiterhin beschränken sich die weiteren Überlegungen, wie bereits in der Einleitung erwähnt, auf Anwendungen im hochgenauen Bereich mit geforderten Standardabweichungen $\sigma \leq 1\text{cm}$. Dies ermöglicht den Einsatz des zu entwickelnden Führungssystems in Anwendungsbereichen, die bisher nicht oder nur unzureichend automatisiert werden konnten. Der Großteil möglicher Anwendungsfälle des automatisierten Bauprozesses lässt sich in fünf große Anwendungsgattungen einteilen:

- 1) Abstecken: Punktweiser Vergleich einer Ist-Position mit einer digital gespeicherten Soll-Position (z.B. Bestimmung von Bohrlochpositionen oder das Abstecken von Gleisgeometrien).
- 2) Positionierung von Bauteilen: Automatisierte Fertigteilmontage. Das Bauteil wird direkt an eine vorgegebene Position geführt (z.B. Stahlträgermontage oder Stahlbetonfertigteilbau).
- 3) Positionierung von Arbeitsmitteln: Eine Maschine wird in eine Position gebracht und erzeugt dann eine vorgegebene Geometrie (z.B. Bohrmaschine oder Mauerroboter).
- 4) Bahnführung von Bauteilen: Führung von Bauteilen auf vorgegebenen Trajektorien (z.B. Brückenbau im Taktschiebeverfahren).
- 5) Bahnführung von Arbeitsmitteln: Führung von Maschinen, die dabei eine Geometrie erzeugen (z.B. Gleitschalungsfertiger).



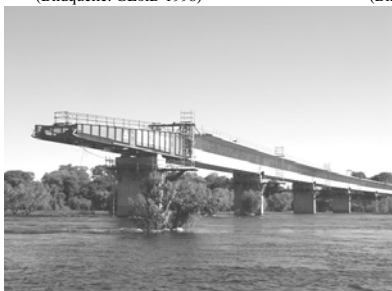
1) Absteckung der Gleisgeometrie
(Bildquelle: GEoid 1998)



2) Fertigteilbau
(Bildquelle: Oberdorfer 2005)



3) Bohrmaschine
(Bildquelle: Hache 2004)



4) Brückenbau im Taktschiebeverfahren
(Bildquelle: Dierks 2003)



5) Gleitschalungsfertiger
(Bildquelle: Wirtgen 2002)

Abbildung 3.2: Beispiele der Anwendungsgattungen: 1) Abstecken, 2) Positionierung von Bauteilen, 3) Positionierung von Arbeitsmitteln, 4) Bahnführung von Bauteilen, 5) Bahnführung von Arbeitsmitteln.

In Abbildung 3.2 ist für jede der fünf Anwendungsgattungen ein beispielhafter Vertreter dargestellt. Die folgende Beschreibung der fünf Anwendungsgattungen soll die generellen Unterschiede und Gemeinsamkeiten herausarbeiten und die Grundlage für die in Kapitel 3.2 durchzuführende Extraktion notwendiger Funktionsgruppen und deren Einzelfunktionen darstellen.

3.1.1 Abstecken

Die Anwendungsgattung „Abstecken“ umfasst alle Anwendungen, bei denen punktweise Geometrieparameter gemäß einer digital gespeicherten Vorgabe in die Örtlichkeit übertragen werden sollen. Als Bezugssysteme für die Geometrieparameter dienen je nach Anwendung zwei- oder dreidimensionale Koordinatensysteme oder eindimensionale Kilometrierungen entlang einer Achse. Der Anwendungsfall der Absteckung bezieht sich direkt auf die zweite geodätische Hauptaufgabe. Eine Beschreibung kann sich direkt am Begriff der in Kapitel 2.1.1 definierten „Absteckung“ orientieren. Die Eigenschaften dieses Anwendungsfalls lassen sich wie folgt beschreiben:

- Die abzusteckenden Punkte sind digital meist in Form von zwei- oder dreidimensionalen Koordinaten relativ zu den Achsen eines definierten Zielkoordinatensystems gespeichert. Somit liegt die äußere Geometrie vor.
- Der Bezugspunkt der Messeinrichtung (z.B. Reflektor) befindet sich auf einem Zielträger mit einem definierten Nullpunkt, der die Ist-Position beschreibt. Die innere Geometrie des Trägers ist im Vorfeld der Absteckung zu bestimmen und dem System bekannt zu machen, damit aus den aktuellen Werten der Messeinrichtung die jeweilige Ist-Position berechnet werden kann.
- Während des Absteckvorgangs ist der Zielträger relativ zum Zielkoordinatensystem in der Form auszurichten, dass bekannte und gleichbleibende Transformationsparameter zwischen Zielträger-Koordinatensystem und Zielkoordinatensystem Gültigkeit besitzen. Dies geschieht z.B. bei einem eindimensionalen Lotstab durch das Lotrechthalten des Stabes.
- In der Zielposition sind die Abweichungen zwischen der gespeicherten Soll-Position und der Ist-Position im Rahmen der Genauigkeitsanforderungen zu Null zu bringen.

Die Anwendungsgattung „Abstecken“ enthält ebenfalls Anwendungsfälle, bei denen Bauteile bereits näherungsweise an ihre geplante Position verbracht worden sind (siehe 3.1.2 „Positionierung von Bauteilen“). Eine Bewegung des jeweiligen Bauteils hin zu seiner Soll-Position ist noch möglich und notwendig. In diesem Fall sind folgende allgemeingültige Arbeitsschritte notwendig:

- Der Nullpunkt des Zielträgers ist an eine definierte Stelle des Bauteils zu bewegen und dort zu adaptieren.
- Es gelten die gleichen Bedingungen bezüglich der Inneren Geometrie und der Ausrichtung des Zielträgers wie oben.
- Für die jeweilige definierte Stelle des Bauteils ist die geplante äußere Geometrie aus einer digitalen Datenquelle zu wählen.
- Die Differenz der jeweiligen Position zur geplanten äußeren Geometrie muss durch eine geeignete Manipulation des Bauteils zu Null gebracht werden.

- Es ist zu berücksichtigen, dass Manipulationen an einer bestimmte Stelle des Bauteils eine Änderung der jeweiligen Parameter an anderen Stellen mit sich bringen können. Dies kann durch eine Fixierung des Bauteils verhindert werden. Ist eine Fixierung nicht möglich, so ist der Absteckvorgang an verschiedenen Punkten iterativ durchzuführen.

Allgemein gilt für diese Anwendungsgattung ein hoher Grad an manueller Tätigkeit. Die punktweise Vorgehensweise bedarf einer Bewegung des Zielträgers mit dem Bezugspunkt der Messeinrichtung von Punkt zu Punkt. Dabei soll in der Regel von einer manuellen Arbeit ausgegangen werden. Ansonsten käme ein weiterer Anwendungsfall (3.1.3 „Positionierung von Arbeitsmitteln“) zum Tragen.

Soll eine Absteckung relativ zu bereits bestehenden Objekten erfolgen und sind somit nur relative Objektinformationen vorhanden beinhaltet dieser Anwendungsfall eine vorausgehende Aufnahme der bestehenden Geometrie und eine Berechnung der aktuellen Absteckmaße.

3.1.2 Positionierung von Bauteilen

Die Anwendungsgattung der „Positionierung von Bauteilen“ beinhaltet alle Anwendungsfälle, bei denen vorgefertigte Bauteile, wie z.B. Stahlträger oder Fassadenteile, bestehend aus einer bekannten Geometrie, in eine geplante Soll-Position verbracht und dort fixiert werden müssen. Die geplanten Positionen der einzelnen Bauteile sind digital gespeichert. Es findet keine Absteckung und keine Signalisierung in der Örtlichkeit statt. Die Soll-Position eines Bauteils beinhaltet dabei neben den translatorischen Komponenten auch die rotatorischen Komponenten. Die einzelnen Objekteigenschaften lassen sich wie folgt beschreiben:

- Die Bauteile besitzen eine bekannte Geometrie. Die Bezugspunkte der Messeinrichtung sind im Objektkoordinatensystem bekannt.
- Der Bezugspunkt der Messeinrichtung (z.B. Reflektor) muss am Bauteil adaptiert werden können und dessen Abweichungen bezüglich des Bezugspunktes des Bauteils müssen bekannt sein.
- Eine Orientierung des Bauteils kann nur über mehrere Messeinrichtungen erfolgen. So werden bei zweidimensionalen Positionierungsaufgaben zwei Messeinrichtungen und bei dreidimensionalen Aufgaben drei Messeinrichtungen benötigt.
- Eine Berücksichtigung bestehender Bauteile kann derart erfolgen, dass jedes Bauteil innerhalb einer sehr geringen Toleranz positioniert wird oder dass Ist-Positionen bestehender Bauteile als Grundlage der jeweiligen Soll-Position berücksichtigt werden. Dies führt zu dynamischen Planungsdaten.

Damit das jeweilige Bauteil in seine Soll-Position gebracht werden kann, bedarf es geeigneter Manipulatoren, wie z.B. Kräne. Diese können das Bauteil in jeder Achse bewegen. Da die Messeinrichtung direkt am Bauteil angreift, ist die Position des Manipulators im Zielkoordinatensystem von untergeordneter Bedeutung und trägt nicht zur Qualität der Positionierungsaufgabe bei. Die einzelnen Arbeitsschritte zur Verbringung eines Bauteils von seiner jeweiligen Ist-Position in die geplante Soll-Position soll im Folgenden aufgeführt werden:

- Die Endposition des Bauteils muss dem Soll entsprechen. Der Weg zwischen aktueller Ist-Position und Soll-Position ist zunächst beliebig. Er unterliegt aber gewissen Zwangspunkten, z.B. durch bestehende Bauteile oder Infrastruktureinrichtungen. So ist auf jeden Fall eine individuelle, grobe Bahnplanung erforderlich.

- Die Bewegung des Bauteils entlang der individuell geplanten Bahn erfolgt mit einer maximalen Geschwindigkeit (v_{max}). In der Nähe der Soll-Position wird die Geschwindigkeit verringert, bis sie schließlich in der Zielposition zu null wird.
- Der Manipulator erhält seine Steuerbefehle ausschließlich aufgrund einer Abweichung des Bezugspunktes des Bauteils von der geplanten Bahn, ermittelt durch die Messeinrichtung. Der Manipulator besitzt somit keine eigene Intelligenz.
- Eine Schätzung der Orientierung des Bauteils aus seiner Bewegung ist problematisch, da in der Nähe der Zielposition die Bewegung gegen null geht.
- Störeinflüsse, wie z.B. durch Wind verursacht, müssen ausgeglichen werden. Aus diesem Grund stellt diese Anwendungsgattung eine Regelungsaufgabe dar und kann nicht durch eine Steuerungsaufgabe ersetzt werden.

Als Ergebnis dieser Endwertregelung erreicht das Bauteil eine Endposition, die im Rahmen der Genauigkeit des automatisierten Positionierungsvorgangs der Soll-Position entspricht. Reicht diese Genauigkeit nicht aus, so ist das Bauteil in einem weiteren Arbeitsschritt auszurichten (siehe 3.1.1 „Abstecken“).

3.1.3 Positionierung von Arbeitsmitteln

Bei den Arbeitsmitteln dieser Anwendungsgattung handelt es sich um Maschinen, die mit eigener Intelligenz und Steuerung eine geplante, örtlich begrenzte Geometrie erzeugen. Dabei kann es sich z.B. um eine Bohrmaschine handeln, die an einer bestimmten Position ein Bohrloch erzeugt, oder einen Mauerroboter der an einer bestimmten Stelle einen Teil einer Mauer errichtet. Die Form und Gestalt der jeweiligen Geometrie wird dabei von dem Arbeitsmittel selbst in einem lokalen Bezugssystem erzeugt. Damit die Geometrie zu anderen Gebinden passt muss sie aber auch im Zielkoordinatensystem an der geplanten Position mit einer geplanten Orientierung erzeugt werden. Dazu ist das Arbeitsmittel zunächst im Zielkoordinatensystem zu positionieren. Folgende Aspekte beschreiben diese Anwendungsgattung:

- Je nach Anzahl an Freiheitsgraden der jeweils zu erzeugenden Geometrie ist das Arbeitsmittel translatorisch und rotatorisch, zwei- oder dreidimensional im Zielkoordinatensystem zu positionieren.
- Die jeweilige Arbeitsposition des Arbeitsmittels ist nur digital bekannt und wird nicht in der Örtlichkeit angezeigt. Dies bedeutet z.B., dass Bohrlochpositionen nicht markiert werden.
- Die Innere Geometrie des Arbeitsmittels, also die Beziehung zwischen Bezugspunkt der Maschine und Bezugspunkt der Messeinrichtung, muss bekannt sein.
- Zusätzliche Sensoren, wie z.B. Neigungssensoren, können durch Bestimmung des Rollwinkels θ und des Nickwinkels ψ eine Orientierung des Objektkoordinatensystems (Maschinenkoordinatensystems) im Zielkoordinatensystem übernehmen, wenn sie Bestandteil des Arbeitsmittels sind.
- Für die Orientierung um die Z-Achse sind, außer bei Bohraufgaben, zwei Messeinrichtungen erforderlich. Alternativ kann die Orientierung mit herabgesetzter Genauigkeit auch aus der Bewegung des Arbeitsmittels im Zuge der Positionierung geschätzt werden.

- An der Arbeitsposition gilt es die Abweichung d eines Bezugspunktes der Maschine zur Soll-Arbeitsposition zu minimieren. Es gilt: $d(t_i) \rightarrow 0 \forall t_i$.
- Analog zu der Anwendungsgattung 2 („Positionierung von Bauteilen“) bedarf es einer individuellen Bahnplanung, um eventuell existierende Zwangspunkte durch bestehende Bauteile oder Infrastruktureinrichtungen zu umgehen. Die Bewegung des Arbeitsmittels entlang der geplanten Bahn erfolgt mit einer maximalen Geschwindigkeit (v_{max}). In der Nähe der Soll-Arbeitsposition wird die Geschwindigkeit verringert, bis sie schließlich in der Zielposition zu null wird.

Während der Geometrieerzeugung ist die Arbeitsposition der Maschine weiterhin zu überwachen, da der eigentliche Arbeitsprozess Auswirkungen auf die Position des Arbeitsmittels haben kann. In diesem Fall bedarf es einer Sollwertregelung, um die Störungen auszuregulieren und eine gleichbleibende Qualität der erzeugten Geometrien zu gewährleisten.

3.1.4 Bahnführung von Bauteilen

Bei verschiedenen Anwendungsfällen bedarf es der Bewegung von Bauteilen meist größerer Ausdehnung auf genau geplanten Bahnen. Die hochgenaue Führung wird dabei größtenteils durch statische Aspekte des Bauteils oder durch speziell vorbereitete Untergründe impliziert. Vertreter dieser Anwendungsgattung ist z.B. das Taktschiebverfahren im Brückenbau oder das Verschieben von Gebäuden. Auch wenn, wie z.B. beim Brückenbau im Taktschiebverfahren, die Bahnführung durch spezielle Lager bereits realisiert ist, kann eine Überwachung der Bahn durch ein automatisches Führungssystem dieser Anwendungsgattung hinzugezählt werden. Eine direkte Ansteuerung der Aktorik des Verschiebesystems ist dann nicht unbedingt notwendig. Im Folgenden werden die Eigenschaften dieser Anwendungsgattung allgemeingültig beschrieben:

- Das Bauteil wird durch geeignete Manipulatoren (z.B. hydraulische Verschiebeeinrichtungen) bewegt. Dabei ist eine Bewegung oft unabhängig in Längs- und Querrichtung des Bauteils möglich. Die Position der Manipulatoren im Zielkoordinatensystem ist nicht von Bedeutung, da die äußere Geometrie des Bauteils direkt bestimmt wird.
- Das Bauteil befindet sich in un stetiger Bewegung, da es betriebsbedingt auch zu Stillständen kommen kann. Dies ist besonders dann zu berücksichtigen, wenn die Orientierung des Bauteils von Interesse ist und diese z.B. mittels eines KALMAN-Filters aus der Bewegung bestimmt werden soll.
- Die Geschwindigkeit bewegt sich in einem Intervall $[0, v_{max}]$.
- Die Führung des Bauteils erfolgt meist dreidimensional, und hat die Minimierung des Abstandes eines definierten Bezugspunktes am Bauteil zur Soll-Trajektorie zum Ziel.
- Der Bezugspunkt am Bauteil ist meist nicht gleich dem Bezugspunkt für die Messeinrichtung. Deshalb muss die innere Geometrie des Bauteils mit den verschiedenen Bezugspunkten bekannt sein.
- Ist die Erfassung von Orientierungen oder Neigungen von Interesse, so sind meist mehrere Messeinrichtungen erforderlich. Andere Sensoren, wie z.B. Neigungssensoren, müssten jeweils am Bauteil montiert werden.
- Die geplante Soll-Trajektorie liegt diskretisiert als eine Folge von Koordinaten (Polygon) vor.

Bei dieser Anwendungsgattung kommt eine Folgeregelung entlang einer geplanten Bahn zum Einsatz, wobei sich in der Nähe der Endposition des Bauteils auch Aspekte aus Kapitel 3.1.2 „Positionierung von Bauteilen“ wiederfinden.

3.1.5 Bahnführung von Arbeitsmitteln

Bauprozesse, bei denen eine gestreckte Geometrie vor Ort gefertigt wird, bedürfen der Bahnführung des Arbeitsmittels. Vertreter dieser Anwendungsgattung sind die maschinell eingebrachten Schichten eines Verkehrsweges oder sonstiger flächenhafter Objekte wie z.B. Rollfelder, Böden von Maschinenhallen oder Sportbahnen. Die zum Einsatz kommenden Arbeitsmittel bestehen aus der jeweiligen Trägermaschine und der die Geometrie erzeugenden Bohle. Das Zusammenspiel von Trägermaschine und Bohle sei für die folgenden Betrachtungen wie folgt definiert:

- Die Bohle in sich ist ein starrer Körper.
- In Längs- und Querrichtung ist die Bohle relativ zur Trägermaschine starr fixiert.
- In vertikaler Richtung verfügt die Trägermaschine über eine Stelleinrichtung, so dass die Bohle in der Höhe relativ zur Trägermaschine verändert werden kann.
- Die linke und rechte Seite der Bohle können getrennt voneinander in der Höhe eingestellt werden, damit in gewissen Grenzen beliebige Neigungen der Bohle realisiert werden können.

Die Bewegungscharakteristiken der in dieser Anwendungsgattung betrachteten Arbeitsmittel sind im wesentlichen von den Eigenschaften des einzubringenden Materials abhängig. Dabei spielt sowohl der formgebende- und formerhaltende Prozess als auch der Materialfluss zur Maschine eine Rolle. Folgende Charakteristiken bezüglich der Bewegung des Arbeitsmittels lassen sich allgemeingültig für diese Anwendungsgattung festhalten:

- Das Arbeitsmittel befindet sich während des Einbauvorgangs in gleichförmiger Vorwärtsbewegung, um eine gleichbleibende Qualität des Bauobjektes zu gewährleisten.
- Die Geschwindigkeit in Längsrichtung bewegt sich in folgendem Intervall: $]0\text{m/s}, 5\text{km/h}]$.
- Der Bauuntergrund ist so eben, dass die in vertikaler Richtung auftretenden Geschwindigkeiten möglichst gering sind, um von der Stelleinrichtung der Bohle ausgeglichen werden zu können. Die Trägermaschinen sind u.a. aus diesem Grund mit Kettenfahrwerken ausgestattet, die die Unebenheiten im Untergrund besser ausgleichen können.
- Das zu führende Arbeitsmittel besitzt einen eigenen Antrieb und Steuermöglichkeit der Fahrtrichtung (Lenkung).

Die Führung des Arbeitsmittels hat in der Form zu erfolgen, dass die Bohle das Bauobjekt entlang der geplanten Achse einbaut. Die Achse liegt als eine Folge von Punktkoordinaten (Soll-Trajektorie) vor. Zu jeder Lagekoordinate existiert eine geplante Höhe und Neigung des Bauobjektes. Je nach Position wird die Bohle mit Hilfe der Stelleinrichtung in der Höhe eingestellt. Die Führung stellt eine Minimierungsaufgabe in der Form dar, dass der Abstand d eines Bezugspunktes am Arbeitsmittel zur Soll-Trajektorie zu Null wird: $d(t_i) \rightarrow 0 \forall t_i$. Die Anwendungsgattung – Führung eines Arbeitsmittels – besitzt folgende Eigenschaften, die Führungsaufgabe betreffend:

- Die geplante Soll-Trajektorie liegt diskretisiert als Polygon und digital gespeichert vor.
- Eine Messeinrichtung bestimmt für jede Epoche den Abstand des Bezugspunktes am Arbeitsmittel zur Soll-Trajektorie. Zwischen den Punkten der Soll-Trajektorie wird dabei linear interpoliert.
- Der Ansatzpunkt der Messeinrichtung ist meist nicht gleich dem Bezugspunkt des Arbeitsmittels. Aus diesem Grund muss die innere Geometrie des Arbeitsmittels exakt bekannt sein (Kalibrierung).
- Ist der Ansatzpunkt der Messeinrichtung räumlich vom Bezugspunkt des Arbeitsmittels entfernt, so führt eine Neigung der Trägermaschine zu einer fehlerhaften Führung des Arbeitsmittels. Es wird deshalb versucht, den Ansatzpunkt der Messeinrichtung möglichst nahe an die die Geometrie erzeugende Bohle zu legen. Diesem Aspekt wird sich im weiteren dieser Arbeit noch gesondert gewidmet.
- Die Genauigkeit des Bauobjektes in der Lage wird durch die Qualität der Führung des Arbeitsmittels vorgegeben.
- Die Orientierung des Arbeitsmittels relativ zur Soll-Trajektorie kann über mindestens zwei Messeinrichtungen ermittelt werden. Weiterhin ist es aber auch möglich, die Orientierung des Arbeitsmittels aus seiner kontinuierlichen Bewegung im Rahmen einer Zustandsschätzung zu ermitteln.

3.2 Ableitung notwendiger Funktionsgruppen und deren Einzelfunktionen

Nach der Definition der Anwendungsgattungen werden nun die für einen Systementwurf notwendigen Funktionen abgeleitet. Dazu werden in einem ersten Schritt dem zu entwerfenden System Funktionsgruppen zugeordnet. Diese Funktionsgruppen stellen zunächst komplexe Abläufe vereinfacht dar und ermöglichen in ihrem Zusammenspiel einen Überblick über den Funktionsumfang des Gesamtsystems. In einem zweiten Schritt werden den einzelnen Funktionsgruppen unterschiedlich viele Einzelfunktionen zugeordnet, die die eigentliche Funktionalität des modularen Positionierungs- und Führungssystems ermöglichen.

Auf Basis der definierten Anwendungsgattungen (Kapitel 3.1) werden zehn Funktionsgruppen definiert, die im Folgenden genannt und kurz erläutert werden sollen:

1. Prozessintegration: Beinhaltet Funktionen, um das modulare Führungssystem in den bestehenden Bauprozess zu integrieren. Dies bedingt sowohl eine geometrische Integration, als auch eine Integration in Arbeitsabläufe.
2. Mensch-System-Schnittstelle: Die Auslegung der Interaktionsschnittstellen zwischen Mensch und System ist Gegenstand dieser Funktionsgruppe. Dabei geht es im Wesentlichen um Gestaltung der Eingabemedien und der Visualisierung der geometrischen Größen.
3. Hardwareanbindung: Die Hardwareanbindung beinhaltet Schnittstellen zu verschiedenen Messeinrichtungen und zur Aktorik integrierter Maschinen. Unter Schnittstellen werden hier mechanische Verbindungen verstanden.
4. Datenhaltung: Diese Funktionsgruppe beinhaltet alle Funktionen, die sich mit der Ein- und Ausgabe und Speicherung von digitalen Daten beschäftigen. Dabei spielt bei einem modularen System besonders die Spezifikation der Datenformate eine wichtige Rolle.

5. Qualitätssicherung: Zur Sicherung der Qualität muss ein automatisches System über geeignete Kontroll- und Warnfunktionen verfügen. Dazu ist eine stetige Überwachung der definierten Grenzwerte ausgewählter Größen erforderlich.
6. On-the-Job-Planung: Gilt es im Rahmen des automatisierten Prozesses Bauteile oder Arbeitsmittel an geplante Positionen zu führen, so werden im Vorfeld meist nur die Endpositionen geplant. Eine Planung der Bahnführung hin zu der Endposition kann nur vor Ort (On-the-Job) erfolgen. Es sind nämlich aktuelle Zwangspunkte wie andere Geometrien oder Fahrzeuge mit in die Planung einzubeziehen.
7. Soll-Ist-Abweichungsberechnung: Je nach Art der Anwendung und Art der Soll-Geometrien bedarf es unterschiedlicher Funktionen, um aus den gemessenen Ist-Größen und den vorgegebenen Soll-Größen Abweichungen zu berechnen. Die Soll-Ist-Abweichungen sind zum einen ein Maß für die Qualität, und zum anderen Eingangsgröße in das Regelmodul zur Führung des jeweiligen Objekts (z.B. Baumaschine).
8. Software-Schnittstellen: Da das modulare Führungssystem eine Sammlung austauschbarer Software-Module beinhaltet, bedarf es definierter Schnittstellen zwischen den Modulen, um die Austauschbarkeit von Daten über definierte Protokolle sicherzustellen.
9. Zustandsberechnung: Die Kenntnis über den aktuellen Zustand eines dynamischen Systems ist wesentliche Voraussetzung für eine zielgerichtete Beeinflussung des Systems. Der Systemzustand kann je nach Anwendung verschiedene Größen, wie z.B. Position, Richtung, Neigung oder Geschwindigkeit beinhalten. In dieser Gruppe werden dazu verschiedene Berechnungsmethoden, meist auf Basis von KALMAN-Filter-Ansätzen, zusammengefasst.
10. Regelung: In diese Gruppe fallen alle Funktionen, die der Regelungstechnik entstammen und sich mit der Berechnung der Stellgrößen zur automatischen Führung des jeweiligen Objekts beschäftigen. Dabei können die Funktionen dieser Gruppe auf die berechneten Abweichungen (7.) und Zustände (9.) zurückgreifen.

Jede dieser Funktionsgruppen beinhaltet unterschiedlich viele Einzelfunktionen, die auf Basis der in Kapitel 3.1 definierten Anwendungsgattungen abgeleitet werden können. Insgesamt können hier 60 Einzelfunktionen definiert und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten analysiert werden. Eine genaue Beschreibung der Einzelfunktion ist folgender Zusammenstellung zu entnehmen:

Funktion 1: Adaption der Messeinrichtung am Objekt <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Bei der Verwendung eines Tachymeters als Positionssensor dient ein Rundumreflektor als Bezugspunkt für die Position am Objekt. Der Reflektor muss an einem im Objektkoordinatensystem definierten Punkt adaptierbar sein. Dabei ist auf eine reproduzierbare Innere Geometrie des Objektes zu achten. Bei einer Adaption an einem Arbeitsmittel ist außerdem eine Dämpfung möglicher Vibrationen erforderlich. Sollte die Zielverfolgung des Tachymeters einen aktiven Reflektor erfordern ist eine Stromversorgung vorzusehen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 8: Sichtverbindung Tachymeter - Objekt

Funktion 2: Stationierung eines Tachymeters <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Die Stationierung des Tachymeters im Zielkoordinatensystem ist vor Beginn der Arbeiten erforderlich. Der Prozess der Stationierung sollte möglichst automatisiert erfolgen, so dass das Bedienpersonal keine vermessungstechnische Ausbildung benötigt. Das Ausschließen von Punktverwechslungen soll gewährleistet sein.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Mindestens drei, besser vier Festpunkte müssen im Zielkoordinatensystem koordiniert und mit Reflektoren ausgestattet sein.
Funktion 3: Baustellentaugliche Hardwarekomponenten <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Sämtliche Hardwarekomponenten des Systems müssen baustellentauglich sein. Dies bedeutet Unempfindlichkeit gegen Wiedereinflüsse und in gewissen Grenzen auch gegen mechanische Einflüsse.
Abhängigkeiten	
Funktion 4: Bedienbarkeit der Softwaremodule <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Die Softwaremodule müssen unter Baustellenbedingungen bedienbar sein. Dies bedeutet klare und große Bedienelemente. Software-Schalter sollten über einen Tough-Screen, der auch bei Sonnenlicht lesbar ist, oder Funktionstasten bedienbar sein.
Abhängigkeiten	
Funktion 5: Positionsbestimmung des bewegten Objekts [5mm-10mm] <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Aus den Rohdaten des Tachymeters (Richtungen und Strecken) muss die Position des Reflektors im Zielkoordinatensystem berechnet werden. Dabei muss eine Genauigkeit der Position von $5\text{mm} < \sigma \leq 10\text{mm}$ erreicht werden.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 2: Stationierung eines Tachymeters
Funktion 6: Positionsbestimmung des bewegten Objekts $\leq 5\text{mm}$ <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Aus den Rohdaten des Tachymeters (Richtungen und Strecken) muss die Position des Reflektors im Zielkoordinatensystem berechnet werden. Dabei muss eine Genauigkeit der Position von $\sigma \leq 5\text{mm}$ erreicht werden.
Abhängigkeiten	
Funktion 7: Ein-Mann-System <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Das gesamte System muss von einer Person bedienbar sein. Dazu gehört auch das tägliche Einrichten der Komponenten, wie z.B. des Tachymeters
Abhängigkeiten	

Funktion 8: Sichtverbindung Tachymeter - Objekt <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Während des Führ- oder Positionierungsprozesses muss eine Sichtverbindung zwischen dem Tachymeter und dem Reflektor am Objekt gewährleistet sein. Kurze Unterbrechungen führen zwar nicht zum Verlust der Zielverfolgung, jedoch können Datenlücken auftreten, die dann durch die Software ausgeglichen werden müssen
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 1: Adaption der Messeinrichtung am Objekt • Funktion 49: Glättung der Ist-Positionen
Funktion 9: Führungsmodul adaptierbar auf Arbeitsmittel <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Das Führungsmodul, bestehend aus einem Rechner nebst Kommunikationseinrichtungen, der Benutzerschnittstellen (Bedienung und Visualisierung) und ggf. der Aktorikansteuerung muss so auf dem Arbeitsmittel (bzw. Maschine) adaptiert werden, dass die Funktion des Arbeitsmittels nicht beeinträchtigt wird und das Bedienpersonal optimalen Zugang zu den Benutzerschnittstellen hat.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 3: Baustellentaugliche Hardwarekomponenten • Funktion 12: Tragbares Führungsmodul.
Funktion 10: Manuelle Steuerung <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Bei einer automatischen Führung oder Positionierung des Bauteils oder des Arbeitsmittels muss immer auch die Möglichkeit bestehen, auf eine manuelle Steuerung umzuschalten, um besondere oder extreme Arbeitssituationen zu begegnen. Dies ist für die Sicherheit und die Akzeptanz eines solchen Systems unerlässlich.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 14: System-Kontrollstand
Funktion 11: Räumliche Trennung der Module <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Das Führungsmodul auf dem Arbeitsmittel und das Steuermodul des Tachymeters sind räumlich zu trennen. Dabei wird die räumliche Entfernung vom maximalen Arbeitsradius des Tachymeters im Zielverfolgungsmodus von 300-500m begrenzt.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 7: Ein-Mann-System • Funktion 23: Modularer Aufbau • Funktion 44: Modularere Aufbau der Software
Funktion 12: Tragbares Führungsmodul <i>Funktionsgruppe 1: Prozessintegration</i>	
Beschreibung	Bei Anwendungen, die der Gattung Absteckung zuzuordnen sind, bedarf es eines tragbaren und von Gewicht und Gestalt angemessenem Führungsmoduls, da das Bedienpersonal die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Position permanent sehen muss.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 3: Baustellentaugliche Hardwarekomponenten • Funktion 9: Führungsmodul adaptierbar auf Arbeitsmittel

Funktion 13: Auswahl von Soll-Geometrien <i>Funktionsgruppe 2: Mensch-System-Schnittstelle</i>	
Beschreibung	Zur Bedienung des Systems ist eine manuelle Auswahl der jeweiligen Soll-Geometrie notwendig. Die Soll-Geometrie kann dabei eine Trajektorie, eine Position oder eine Stelle für einen Parametersatz darstellen. Eine Auswahl kann über Punktnummern oder sonstige Identifikationen erfolgen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 33: Aufmessung vorhandener Geometrien • Funktion 45: Übernahme von externen Bahnplanungen • Funktion 46: Übernahme von Geländemodellen
Funktion 14: System-Kontrollstand <i>Funktionsgruppe 2: Mensch-System-Schnittstelle</i>	
Beschreibung	An einem Kontrollstand ist das gesamte System zu überwachen, so dass kritische Systemzustände erkannt werden. Von diesem Kontrollstand aus ist der automatische Ablauf zu starten und zu stoppen, sowie eine manuellen Steuerung nach Bedarf zu veranlassen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 10: Manuelle Steuerung des Arbeitsmittels • Funktion 31: Warnung bei Überschreitung von max. Abweichung. • Funktion 32: Warnung bei Überschreitung von v_{max}.
Funktion 15: Visualisierung graphisch <i>Funktionsgruppe 2: Mensch-System-Schnittstelle</i>	
Beschreibung	Die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Zuständen werden graphisch visualisiert. Dies geschieht je nach Anwendung eindimensional als Abstand, zweidimensional als Abstand in zwei Komponenten. Die Höhenabweichungen werden gesondert visualisiert.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 4: Bedienbarkeit der Softwaremodule
Funktion 16: Visualisierung numerisch <i>Funktionsgruppe 2: Mensch-System-Schnittstelle</i>	
Beschreibung	Die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Zuständen werden numerisch mit ihren Zahlenwerten angezeigt. Dabei ist auch auf eine Angabe von Grenzwerten zu achten, damit das Bedienpersonal die Qualität der Abweichungen beurteilen kann.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 4: Bedienbarkeit der Softwaremodule
Funktion 17: Ansteuerung der Aktorik <i>Funktionsgruppe 3: Hardwareanbindung</i>	
Beschreibung	Die Aktorik des Arbeitsmittels bzw. der Manipulatoren für die Beeinflussung der Objektbewegung muss ansteuerbar sein. Eine Anbindung durch elektrische Signale, die von dem Führungsmodul erzeugt werden muss gewährleistet sein.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 58: Umrechnung der Stellgrößen in Stellsignale

Funktion 18: Ansteuerung eines Tachymeters <i>Funktionsgruppe 3: Hardwareanbindung</i>	
Beschreibung	Ein Tachymeter als Positionssensor ist ansteuerbar. Dazu kommuniziert das Sensor-Modul mit dem Tachymeter über eine serielle Kabel- oder Funkverbindung (RS232-Standard). Der jeweilige Befehlssatz des Tachymeters muss vom Sensor-Modul beherrscht werden, damit sowohl die Steuerung, als auch die Übernahme der Tachymeter-Rohdaten erfolgen kann. Um trotz der räumlichen Trennung des Tachymeters vom Objekt einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten, sind alle wichtigen Funktionen des Tachymeters über das Sensor-Modul zu steuern.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 2: Stationierung eines Tachymeters • Funktion 7: Ein-Mann-System • Funktion 11: Räumliche Trennung der Module
Funktion 19: Integration verschiedener Aktorik-Ansteuerungen <i>Funktionsgruppe 3: Hardwareanbindung</i>	
Beschreibung	Da das modulare System für unterschiedliche Anwendungsfälle auszulegen ist, ist die Art der Aktorikansteuerung im Vorfeld nicht bekannt. Deshalb muss das System hardwaremäßig über eine flexible Ausgabe der Stellgrößen oder Stellsignale verfügen. Dies kann durch eine modulare PC-Messtechnik erreicht werden.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 23: Modularer Aufbau • Funktion 29: Vorhaltung von Kalibrierungsdaten der Aktorik
Funktion 20: Integration weiterer Sensoren <i>Funktionsgruppe 3: Hardwareanbindung</i>	
Beschreibung	Die Orientierung und/oder Neigung eines Bauteils oder Arbeitsmittels lassen sich durch die Integration weiterer Sensoren bestimmen. Für die Neigung kommen Neigungssensoren zu Anwendung und für die Orientierung können Kreisel benutzt werden. Diese Sensoren müssen sowohl hardwaremäßig als auch softwaremäßig in das System integrierbar sein.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 21: Integration weiterer Tachymeter
Funktion 21: Integration weiterer Tachymeter <i>Funktionsgruppe 3: Hardwareanbindung</i>	
Beschreibung	Die Orientierung und/oder Neigung eines Bauteils oder Arbeitsmittels kann durch die Integration von weiteren Tachymetern (je nach Dimension) bestimmt werden. Die gesuchten Größen ergeben sich dann rechnerisch im Zielkoordinatensystem. Für jedes Tachymeter wird ein Steuermodul benötigt, das ggf. zusammen mit anderen Steuermodulen auf einem Rechner laufen kann. Die eindeutige Zuordnung von jedem Reflektor zum jeweiligen Tachymeter muss gewährleistet sein.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 20: Integration weiterer Sensoren
Funktion 22: Kontrolle der Objektgeschwindigkeit <i>Funktionsgruppe 3: Hardwareanbindung</i>	
Beschreibung	Die Objektgeschwindigkeit ist für die Qualität der Führung und damit für die Qualität des Produktes entscheidend. Bei einer automatischen Führung bedarf es einer Kontrolle der Geschwindigkeit durch das Führungsmodul, um eine möglichst konstante Geschwindigkeit zu gewährleisten. Außerdem ist bei Störungen das Objekt ggf. automatisch zu stoppen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 14: System-Kontrollstand • Funktion 17: Ansteuerung der Aktorik

Funktion 23: Modularer Aufbau <i>Funktionsgruppe 3: Hardwareanbindung</i>	
Beschreibung	Die Hardwarekomponenten sind modular aufzubauen, damit bei einem Wechsel der Anwendung durch Austausch einzelner Komponenten den neuen Anforderungen Rechnung getragen werden kann. Dazu sind die Hardware-Schnittstellen zu standardisieren. Außerdem lassen sich nur modular aufgebaute Hardware-Komponenten räumlich trennen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 11: Räumliche Trennung der Module • Funktion 44: Modularer Aufbau der Software
Funktion 24: Speicherung der Messwerte <i>Funktionsgruppe 4: Datenhaltung</i>	
Beschreibung	Die vom Positionssensor gemessenen Rohdaten werden im Sensor-Steuermodul in Positionen umgerechnet. Sowohl die Rohdaten als auch die Positionen sind zur Dokumentation zu speichern.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 25: Standardisiertes Speicher-Format
Funktion 25: Standardisiertes Speicher-Format <i>Funktionsgruppe 4: Datenhaltung</i>	
Beschreibung	Alle digital gespeicherten Daten des Gesamtsystems müssen einem definierten Standard entsprechen, damit von verschiedenen Software-Modulen auf die Daten zugegriffen werden kann. Dies gilt sowohl für die vom System gespeicherten Daten, als auch für die vom System einzulesenden Daten.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 24: Speicherung der Messwerte • Funktion 26: Speicherung des aktuellen Systemzustands • Funktion 27: Vorhaltung Innerer Geometrien • Funktion 28: Vorhaltung Objekt-Bewegungsmodelle • Funktion 29: Vorhaltung von Kalibrierungsdaten der Aktorik • Funktion 35: Erfassung von Zwangspunkten zur Bahnplanung • Funktion 45: Übernahme von externen Bahnplanungen • Funktion 46: Übernahme von Geländemodellen • Funktion 60: Variable Regelparameter
Funktion 26: Speicherung des aktuellen Systemzustands <i>Funktionsgruppe 4: Datenhaltung</i>	
Beschreibung	Der Systemzustand, bestehend aus der Position und ggf. der Orientierung und Neigung, ist für jede Epoche zur Dokumentation zu speichern. Dazu werden weitere Systemparameter, wie Geschwindigkeit, Art der Führung, usw. mit gespeichert.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 25: Standardisiertes Speicher-Format
Funktion 27: Vorhaltung Innerer Geometrien <i>Funktionsgruppe 4: Datenhaltung</i>	
Beschreibung	Da der Bezugspunkt der Messeinrichtung und der Bezugspunkt des Bauteils oder Arbeitsmittels in der Regel nicht in einem Punkt zusammenfällt, bedarf es der Bestimmung einer Inneren Geometrie im Koordinatensystem der Bauteils (Objektkoordinatensystem) oder des Arbeitsmittels (Maschinenkoordinatensystem) Diese durch eine vorab durchgeführte Kalibrierung bestimmte innere Geometrie ist digital zu speichern und bei Betrieb des Systems auszuwählen, damit die von der Messeinrichtung bestimmten Positionen auf den Bezugspunkt des Bauteils oder Arbeitsmittels umgerechnet werden können.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 25: Standardisiertes Speicher-Format

Funktion 28: Vorhaltung Objekt-Bewegungsmodelle <i>Funktionsgruppe 4: Datenhaltung</i>	
Beschreibung	Grundlage einer automatischen Positionierung oder Führung ist das Bewegungsmodell des jeweiligen Arbeitsmittels oder Manipulators. So können aus den durch einen Soll-Ist-Vergleich bestimmten Abweichungen (Regelabweichungen) die Stellgrößen berechnet werden. Je nach in das System integriertem Arbeitsmittel oder Manipulators ist ein angepasstes Bewegungsmodell auszuwählen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 25: Standardisiertes Speicher-Format • Funktion 50: Prädiktion des Systemzustands • Funktion 53: Zustandsschätzung zu jeder Epoche • Funktion 57: Berechnung der Stellgrößen $u(t)$
Funktion 29: Vorhaltung von Kalibrierungsdaten der Aktorik <i>Funktionsgruppe 4: Datenhaltung</i>	
Beschreibung	Zur Ansteuerung der Aktorik bedarf es der Kenntnis der jeweiligen Kennlinien der Aktoren, um aus den berechneten Stellgrößen elektrische Signale zu generieren. Eine Kennlinie stellt den durch eine Kalibrierung ermittelten Zusammenhang zwischen einer geometrischen und einer elektrischen Größe dar. Je nach eingesetzter Aktorik sind die entsprechenden Kennlinien auszuwählen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 25: Standardisiertes Speicher-Format
Funktion 30: Dokumentation <i>Funktionsgruppe 5: Qualitätssicherung</i>	
Beschreibung	Die Systemzustände und sonstige Parameter des Gesamtsystems sind zu dokumentieren.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 25: Standardisiertes Speicher-Format
Funktion 31: Warnung bei Überschreitung von max. Abweichung <i>Funktionsgruppe 5: Qualitätssicherung</i>	
Beschreibung	Die maximale Abweichung zwischen Soll und Ist stellt einen wichtigen Qualitätsparameter dar. Die Einhaltung einer je nach Anwendung definierten maximalen Abweichung ist erforderlich. Beim Überschreiten der maximalen Abweichung ist das Bedienpersonal zu warnen, damit Gegenmaßnahmen getroffen werden können.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 14: System-Kontrollstand
Funktion 32: Warnung bei Überschreitung von v_{max} <i>Funktionsgruppe 5: Qualitätssicherung</i>	
Beschreibung	Die maximale Geschwindigkeit eines Arbeitsmittels wird sowohl durch die Dynamik der Messeinrichtung, als auch vom zu verarbeitenden Material bestimmt. Deshalb ist zur Sicherung der Positionsgenauigkeit und damit zur Sicherung der Qualität bei Überschreitung dieser maximalen Geschwindigkeit das Bedienpersonal zu warnen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 14: System-Kontrollstand

Funktion 33: Aufmessung vorhandener Geometrien <i>Funktionsgruppe 6: On the Job Planung</i>	
Beschreibung	Liegt kein geschlossenes DAD-Modell mit allen Geometrien vor, oder sind vor Ort Abweichungen zu einem bestehenden CAD-Modell aufgetreten, ist die Aufmessung vorhandener Geometrien notwendig. Das Messsystem Tachymeter wird dazu in seiner klassischen Arbeitsweise als Ein-Mann-Station genutzt. Die Sensor-Steuerung und das Führungsmodul muss aber auf manuellen Betrieb umgeschaltet werden.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 12: Tragbares Führungsmodul • Funktion 18: Ansteuerung eines Tachymeters • Funktion 25: Standardisiertes Speicher-Format • Funktion 34: Berechnung relativer Soll-Maße
Funktion 34: Berechnung relativer Soll-Maße <i>Funktionsgruppe 6: On the Job Planung</i>	
Beschreibung	Sollen bestimmte Geometrien relativ zu bestehenden Objekten positioniert werden, so bedarf es der Berechnung relativer Soll-Maße. Damit diese berechnet werden können ist eine Messung der vorhandenen Geometrien notwendig. Diese Vorgehensweise ist immer dann notwendig, wenn kein geschlossenes CAD-Modell mit allen Geometrien vorhanden ist, oder vor Ort Abweichungen zu einem bestehenden CAD-Modell aufgetreten sind.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 33: Aufmessung vorhandener Geometrien
Funktion 35: Erfassung von Zwangspunkten zur Bahnplanung <i>Funktionsgruppe 6: On the Job Planung</i>	
Beschreibung	Bei Anwendungsfällen, bei denen eine Endposition erreicht werden soll, ist die Bahn des Bauteils oder Arbeitsmittels zunächst beliebig. Die vor Ort existierenden Zwangspunkte, wie bereits vorhandene Geometrien müssen bei der Bahnplanung berücksichtigt werden. Dazu sind die Zwangspunkte aufzumessen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 33: Aufmessung vorhandener Geometrien • Funktion 36: Möglichkeit für individuelle Bahnplanung
Funktion 36: Möglichkeit für individuelle Bahnplanung <i>Funktionsgruppe 6: On the Job Planung</i>	
Beschreibung	Für jeden Positionierungsvorgang ist eine Soll-Trajektorie zu berechnen. Diese Soll-Trajektorie dient der Führung des Arbeitsmittels oder Bauteils von der aktuellen Position zu seiner geplanten Endposition. Unter Berücksichtigung der Zwangspunkte wird direkt vor dem Positionieren eine individuelle Bahn geplant.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 35: Erfassung von Zwangspunkten zur Bahnplanung
Funktion 37: Homogenisierung der Soll-Trajektorie <i>Funktionsgruppe 7: Soll-Ist Abweichungsberechnung</i>	
Beschreibung	Werden Soll-Trajektorien durch Polygone repräsentiert, so ist der Punktabstand für die Qualität der Führung ausschlaggebend. Sind Punktabstände inhomogen, oder generell sehr groß, so kommt es gerade in Kurven zu einer herabgesetzten Qualität bei der automatischen Führung. Dem ist durch das Setzen zusätzlicher Zwischenpunkte entgegenzuwirken.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 40-42: Berechnung Abstand (Soll-Ist)

Funktion 38: Ausgleichung von Stochastiken der Soll-Trajektorie <i>Funktionsgruppe 7: Soll-Ist Abweichungsberechnung</i>	
Beschreibung	Werden Soll-Trajektorien durch Polygone repräsentiert, so ist die Genauigkeit der Polygonpunkte ausschlaggebend für die Qualität der Führung eines Bauteil oder Arbeitsmittels. Durch entsprechende Algorithmen, wie z.B. Regressionsansätze ist die Stochastik der Polygonpunkte auszugleichen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 40-42: Berechnung Abstand (Soll-Ist)
Funktion 39: Berechnung Abstand punktweise <i>Funktionsgruppe 7: Soll-Ist Abweichungsberechnung</i>	
Beschreibung	Die Berechnung des Abstandes zwischen Soll- und Ist-Position erfolgt punktweise. Dieses Vorgehen ist bei Absteck- und Positionierungsaufgaben erforderlich.
Abhängigkeiten	
Funktion 40: Berechnung Abstand mit Interpolation <i>Funktionsgruppe 7: Soll-Ist Abweichungsberechnung</i>	
Beschreibung	Möglichkeit zur Berechnung des Abstands einer Ist-Position zu einer Soll-Trajektorie, die als Polygon vorliegt. Dabei wird der Abstand normal auf eine Polygonseite berechnet, wobei der Fußpunkt durch Interpolation zwischen zwei Polygonpunkten ermittelt wird.
Abhängigkeiten	
Funktion 41: Berechnung Abstand zu Trassierungselementen <i>Funktionsgruppe 7: Soll-Ist Abweichungsberechnung</i>	
Beschreibung	Diese Funktion ermöglicht die Berechnung des Abstands einer Ist-Position zu einer Soll-Trajektorie, deren Trassierungselemente (z.B. Kreis, Gerade oder Klothoide) bekannt sind. Dabei wird der Abstand normal auf das jeweilige Trassierungselement berechnet.
Abhängigkeiten	
Funktion 42: Berechnung Abstand mit Approximation <i>Funktionsgruppe 7: Soll-Ist Abweichungsberechnung</i>	
Beschreibung	Diese Funktion ermöglicht die Berechnung des Abstands einer Ist-Position zu einer Soll-Trajektorie, die als Polygon vorliegt. Dabei wird die Soll-Trajektorie in Echtzeit durch eine Approximation funktional beschrieben. Als funktionale Beschreibung bietet sich ein Polynom an. Der Abstand wird dann normal auf das Polynom berechnet.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 37: Homogenisierung der Soll-Trajektorie • Funktion 38: Ausgleichung von Stochastiken der Soll-Trajektorie
Funktion 43: Definierte Software-Schnittstellen <i>Funktionsgruppe 8: Software-Schnittstellen</i>	
Beschreibung	Der modulare Aufbau des Gesamtsystems bedingt die Austauschbarkeit einzelner Softwaremodule. Dies gelingt nur, wenn die Schnittstellen zwischen den Modulen definiert sind und eingehalten werden. Es gilt der Grundsatz, dass die Schnittstellenspezifikation stetzt von den komplexesten Modulen ausgehen muss.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 44: Modularer Aufbau der Software

Funktion 44: Modularer Aufbau der Software <i>Funktionsgruppe 8: Software-Schnittstellen</i>	
Beschreibung	Der Aufbau des Gesamtsystems muss an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden können. Dazu bedarf es eines modularen Aufbaus der Software, so dass einzelne Module ausgetauscht werden können, ohne dass es umfangreicher Programmierarbeiten bedarf.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 43: Definierte Software-Schnittstellen
Funktion 45: Übernahme von externen Bahnplanungen <i>Funktionsgruppe 8: Software-Schnittstellen</i>	
Beschreibung	Je nach Anwendungsfall müssen dem Führungssystem unterschiedliche Soll-Geometrien bekannt sein. Dies sind vornehmlich die Planungsdaten der Soll-Trajektorien und Soll-Positionen. Diese müssen über eine standardisierte Schnittstelle einfach und schnell vom Planungsbüro übernommen werden können.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 25: Standardisiertes Speicher-Format
Funktion 46: Übernahme von Geländemodellen <i>Funktionsgruppe 8: Software-Schnittstellen</i>	
Beschreibung	Digitale Geländemodelle geben ein Soll-Höhenprofil wieder. Dies ist für einige Anwendungsfälle, die die Gestaltung einer Fläche zur Aufgabe haben, die Grundlage für die Kontrolle der Höhe des Arbeitsmittels. Digitale Geländemodelle liegen in der Regel als Punkt-Tripel (Lage-Koordinate mit Höhe) vor. Diese sind in das System zu übernehmen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 25: Standardisiertes Speicher-Format
Funktion 47: Bestimmung der Objektausrichtung <i>Funktionsgruppe 9: Zustandberechnung</i>	
Beschreibung	Die Position des Reflektors am Objekt ist meistens nicht der Positionsbezug des Objekts, wie er in den Planungsdaten definiert ist. Deshalb bedarf es einer Transformation der Reflektorposition auf den Bezugspunkt des Objekts unter Berücksichtigung der Inneren Geometrie. Die Transformation gelingt jedoch nur, wenn die Ausrichtung des Objekts im Raum und/oder die Neigung des Objekts bekannt ist. Die Ausrichtung des Objekts kann auf unterschiedliche Art und Weise bestimmt werden. Es kommen weitere Sensoren, wie z.B. Neigungssensoren oder weitere mehrere Tachymeter in Betracht. Auch eine Schätzung der Objektausrichtung im Rahmen der Zustandsschätzung ist denkbar.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 5: Positionsbestimmung des bewegten Objekts [5mm-10mm] • Funktion 6: Positionsbestimmung des bewegten Objekts ≤ 5mm • Funktion 20: Integration weiterer Sensoren • Funktion 21: Integration weiterer Tachymeter • Funktion 53: Zustandsschätzung zu jeder Epoche
Funktion 48: Zeitstempel für Objekt-Positionen <i>Funktionsgruppe 9: Zustandberechnung</i>	
Beschreibung	Für die Zustandberechnung des Objekts einer Epoche müssen die Ist-Positionen des Objekts, zusammen mit den Messwerten möglicher weiterer Sensoren in einem bekannten zeitlichen Bezug stehen. Gerade weil Tachymeter über eine relativ große und unregelmäßige Totzeit verfügen, müssen die Ist-Positionen mit einem Zeitstempel versehen werden, um eine Synchronisation zu ermöglichen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 51: Synchronisation verschiedener Sensoren • Funktion 53: Zustandsschätzung zu jeder Epoche

Funktion 49: Glättung der Ist-Positionen <i>Funktionsgruppe 9: Zustandsberechnung</i>	
Beschreibung	Die Ist-Positionen des Objekts sind auf Grund der Messunsicherheit des Tachymeters verrauscht und unter Umständen von Ausreißern und Datenlücken durchsetzt. Diese Funktion dient der Glättung und Bereinigung der Ist-Positionen bevor sie für eine Zustandsberechnung benutzt werden.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 5: Positionsbestimmung des bewegten Objekts]5mm-10mm] • Funktion 6: Positionsbestimmung des bewegten Objekts ≤ 5mm • Funktion 53: Zustandsschätzung zu jeder Epoche
Funktion 50: Prädiktion des Systemzustands <i>Funktionsgruppe 9: Zustandsberechnung</i>	
Beschreibung	Eine Berechnung des aktuellen Systemzustands unter Berücksichtigung der aktuellen Ist-Position ist im Zeittakt der Tachymetermessungen möglich. Bei zeitkritischen Anwendungen kann die Taktrate des Gesamtsystems (Regelkreis) erhöht werden, wenn der Systemzustand ohne aktuelle Ist-Position prädiziert wird. Da eine Prädiktion des Systemzustands immer mit Genauigkeitseinbußen verbunden ist, kann das System über zusätzliche, meist inertielle Sensoren mit hoher Abtastrate gestützt werden.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 20: Integration weiterer Sensoren • Funktion 53: Zustandsschätzung zu jeder Epoche
Funktion 51: Synchronisation verschiedener Sensoren <i>Funktionsgruppe 9: Zustandsberechnung</i>	
Beschreibung	Werden neben einem Tachymeter als Positionssensor weitere Sensoren eingesetzt, so bedarf es einer Synchronisation der jeweiligen Sensoren. Dies kann, basierend auf Zeitstempeln und Interpolationsmethoden, in Form von Epochenbildungen geschehen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 20: Integration weiterer Sensoren • Funktion 48: Zeitstempel für Objekt-Positionen
Funktion 52: Transformation der Reflektorposition in Objektbezugspunkt <i>Funktionsgruppe 9: Zustandsberechnung</i>	
Beschreibung	Die Position des Reflektors am Objekt ist meistens nicht der Positionsbezug des Objekts, wie er in den Planungsdaten definiert ist. Deshalb bedarf es einer Transformation der Reflektorposition auf den Bezugspunkt des Objekts unter Berücksichtigung der inneren Geometrie und der Ausrichtung des Objekts.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 27: Vorhaltung innerer Geometrien • Funktion 5 u. 6: Positionsbestimmung des bewegten Objekts • Funktion 47: Bestimmung der Objektausrichtung

Funktion 53: Zustandsschätzung zu jeder Epoche <i>Funktionsgruppe 9: Zustandsberechnung</i>	
Beschreibung	Der Zustand des Bauteils oder Arbeitsmittels kann je nach Anwendungsfall verschiedene Größen beinhalten. Abgesehen von der Position, als wichtigste Zustandsvariable können dies die Geschwindigkeit, und/oder die Richtung sein. Der Zustand ist die Grundlage für die Qualitätsbeurteilung, da dieser mit dem Soll verglichen wird. Gleichzeitig dient er als Grundlage für die Berechnung der Regelabweichung und damit zur Berechnung der Stellgröße. Aus diesem Grund ist es notwendig, den Zustand zu jeder Epoche zu berechnen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 5: Positionsbestimmung des bewegten Objekts [5mm-10mm] • Funktion 6: Positionsbestimmung des bewegten Objekts ≤ 5mm • Funktion 39-42: Berechnung Abstand (Soll-Ist) • Funktion 48: Zeitstempel für Objekt-Positionen • Funktion 49: Glättung der Ist-Positionen • Funktion 50: Prädiktion des Systemzustands • Funktion 51: Synchronisation verschiedener Sensoren
Funktion 54: Integration verschiedener Regel-Module <i>Funktionsgruppe 10: Regelung</i>	
Beschreibung	Je nach Art des Arbeitsmittels oder Manipulators existieren unterschiedliche Bewegungsmodelle. Damit die Abweichungen zwischen Soll und Ist (Regelabweichungen) minimiert werden können bedarf es eines geeigneten Regel-Moduls. Je nach Anforderung müssen verschiedene Regel-Module in das System integrierbar sein.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 28: Vorhaltung Objekt-Bewegungsmodelle • Funktion 44: Modularer Aufbau der Software
Funktion 55: Führung 2D <i>Funktionsgruppe 10: Regelung</i>	
Beschreibung	Die Führung eines Bauteils oder Arbeitsmittels erfolgt zweidimensional in einer Ebene.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 57: Berechnung der Stellgrößen $u(t)$ • Funktion 58: Umrechnung der Stellgrößen in Stellsignale
Funktion 56: Führung 3D <i>Funktionsgruppe 10: Regelung</i>	
Beschreibung	Die Führung eines Bauteils oder Arbeitsmittels erfolgt dreidimensional, wobei die Höhe von der Lage entkoppelt ist (Kaskadenregelung).
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 57: Berechnung der Stellgrößen $u(t)$ • Funktion 58: Umrechnung der Stellgrößen in Stellsignale
Funktion 57: Berechnung der Stellgrößen $u(t)$ <i>Funktionsgruppe 10: Regelung</i>	
Beschreibung	Die Regelabweichung $e(t)$ ist unter Berücksichtigung des mathematischen Modells des Objekts in geeignete Stellgrößen $u(t)$ umzurechnen. Dabei muss der Regler so ausgelegt werden, dass Störungen kompensiert und das Regelziel erreicht wird.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 53: Zustandsschätzung zu jeder Epoche • Funktion 54: Integration verschiedener Regel-Module • Funktion 55 u. 56: Führung 2D und 3D • Funktion 58: Umrechnung der Stellgrößen in Stellsignale • Funktion 59: Kompensation der ungünstigen Tachymeterdynamik

Funktion 58: Umrechnung der Stellgrößen in Stellsignale <i>Funktionsgruppe 10: Regelung</i>	
Beschreibung	Die berechneten geometrischen Stellgrößen sind unter Berücksichtigung der Kalibrierdaten der Aktorik in elektrische Stellsignale umzurechnen. Damit diese der Aktorik-Ansteuerung zugeführt werden können bedarf es einer digital-analog-Wandlung. Auf diese Funktionalität kann verzichtet werden, wenn der Hersteller des jeweiligen Arbeitsmittels die Steuerung auf die Eingabe digitaler Abweichungswerte vorbereitet hat. Die Ansteuerung der Aktorik übernimmt dann die Maschinensteuerung.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 17: Ansteuerung der Aktorik • Funktion 29: Vorhaltung von Kalibrierungsdaten der Aktorik
Funktion 59: Kompensation der ungünstigen Tachymeterdynamik <i>Funktionsgruppe 10: Regelung</i>	
Beschreibung	Ein Tachymeter besitzt auf Grund seiner Abtastrate von bis zu 10Hz und einer relativ großen Totzeit ein für eine Regelung ungünstiges dynamisches Verhalten. Dies gilt es, besonders bei größeren Geschwindigkeiten des bewegten Objekts ($v_{\max} > 5\text{cm/s}$) zu kompensieren, um hohe Genauigkeitsanforderungen ($\sigma \leq 1\text{cm}$) zu erreichen.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 50: Prädiktion des Systemzustands • Funktion 57: Berechnung der Stellgrößen $u(t)$
Funktion 60: Variable Regelparameter <i>Funktionsgruppe 10: Regelung</i>	
Beschreibung	Der Regler wird mit speziellen Parametern an die äußeren Bedingungen und besonders die jeweilige Anwendung angepasst. Damit der Regler auf sich ändernde Bedingungen eingestellt werden kann, müssen die Regelparameter im modularen System variable sein. Weiterhin sollten Parametersätze abspeicherbar sein.
Abhängigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Funktion 25: Standardisiertes Speicher-Format • Funktion 57: Berechnung der Stellgrößen $u(t)$

Die große Umfang an Einzelfunktionen trägt dem bewusst gewählten breiten Anwendungsspektrum des automatischen Positionierungs- und Führungssystem Rechnung. Es ist offensichtlich, dass die einzelnen Funktionen unterschiedliche Wichtigkeit und Komplexität besitzen. Eine weitere Analyse der Einzelfunktionen ist deshalb unumgänglich.

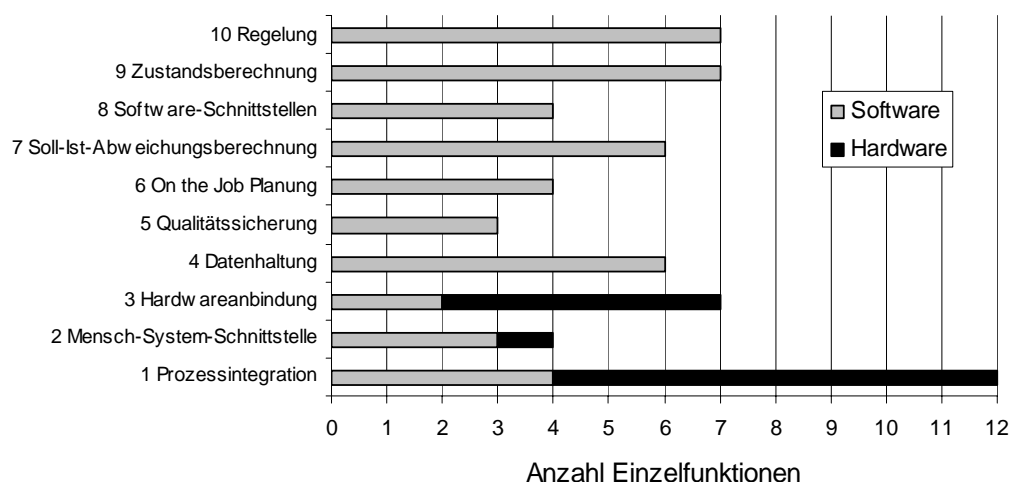


Abbildung 3.3: Anzahl der Einzelfunktionen in den zehn Funktionsgruppen.

Bei der Betrachtung obiger Zusammenstellung der Einzelfunktionen fällt auf, dass die einzelnen Funktionsgruppen unterschiedlich viele Einzelfunktionen enthalten. Außerdem umfasst das Funktionsspektrum sowohl Hardware- als auch Softwarefunktionen. Die Abbildung 3.3 stellt diese Fakten graphisch dar.

Es ist ersichtlich, dass der Anteil an Softwarefunktionen in den einzelnen Funktionsgruppen zahlenmäßig wesentlich stärker vertreten ist als der Anteil an Hardwarefunktionalitäten. Das Verhältnis liegt bei 46 zu 14. Damit wird schon an dieser Stelle deutlich, dass das zu entwerfende modulare System im wesentlichen aus austauschbaren Software-Modulen bestehen wird, was einer schnellen Adaption an verschiedene Anwendungsfälle entgegen kommt. Die Hardware-Komponenten werden hingegen hauptsächlich für die Prozessintegration benötigt.

3.3 Aufstellung und Auswertung der Funktionalmatrizen

In der Funktionalanalyse wird jede Einzelfunktion hinsichtlich ihrer Bedeutung für jede der fünf Anwendungsgattungen bewertet. Dabei wird zum einen die Frage geklärt, ob eine Funktion für eine Anwendungsgattung notwendig ist, und zum anderen wird bewertet, mit welcher Priorität die entsprechende Funktion erforderlich ist. Die Bewertung erfolgt jeweils in einer Tabelle, der sogenannten Funktionalmatrix. Die Auswertung der Funktionalmatrizen ermöglicht dann eine Komplexitätsbewertung der Anwendungsfälle und dient bei der weiteren Systementwicklung als Grundlage für Implementierung der einzelnen Funktionen.

3.3.1 Häufigkeit der Funktionen

In der Tabelle 3.1 auf der folgenden Seite sind die fünf Anwendungsgattungen in die Spaltenköpfe eingetragen. Die Zeilen sind den Funktionen zugeordnet. Es wird für jede Funktion geklärt, ob sie für die jeweilige Anwendungsgattung von Bedeutung ist, was durch eine 1 im entsprechenden Tabellenfeld gekennzeichnet ist. Anschließend sind die Spalten- und Zeilensummen zu bilden, was der absoluten Häufigkeit der Funktionen entspricht. Eine Umrechnung in Prozent ergibt die relative Häufigkeit. In einem nächsten Schritt werden die Spalten der Tabelle absteigend nach den relativen Häufigkeiten sortiert. Analog wird mit den Zeilen verfahren. Das Ergebnis stehen die Anwendungsgattungen für die die meisten Funktionen benötigt werden auf der linken Seite. Entsprechend stehen die Funktionen, die am häufigsten für die einzelnen Anwendungsfälle benötigt werden, oben in der Tabelle.

Tabelle 3.1: *Funktionalmatrix - sortiert nach Häufigkeiten. Für welche Anwendungsgattungen werden welche Funktionen benötigt (1) oder nicht benötigt (0).*

Nr.	Gr.	Funktionalitäten	Anwendungsgattungen					Häufigkeit [%]:
			Bahnführung von Arbeitsmitteln	Bahnführung von Bauteilen	Positionierung von Arbeitsmitteln	Positionierung von Bauteilen	Abstecken	
		Gruppen (Gr.): 1=Prozessintegration, 2=Mensch-System-Schnittstelle, 3=Hardwareanbindung, 4=Datenhaltung, 5=Qualitätssicherung, 6=On the Job Planung, 7=Soll-Ist- Abweichungsberechnung, 8=Software-Schnittstellen, 9=Zustandsberechnung, 10=Regelung						
60	10	Variable Regelparameter	1	1	1	1	1	100
58	10	Umrechnung der Stellgrößen in Stellsignale	1	1	1	1	1	100
57	10	Berechnung der Stellgrößen u(t)	1	1	1	1	1	100
56	10	Führung 3D	1	1	1	1	1	100
55	10	Führung 2D	1	1	1	1	1	100
54	10	Integration verschiedener Regel-Module	1	1	1	1	1	100
52	9	Transformation der Reflektorposition in Objektbezugspunkt	1	1	1	1	1	100
51	9	Synchronisation verschiedener Sensoren	1	1	1	1	1	100
48	9	Zeitstempel für Objekt-Positionen	1	1	1	1	1	100
47	9	Bestimmung der Objektausrichtung	1	1	1	1	1	100
44	8	Modularer Aufbau der Software	1	1	1	1	1	100
43	8	Definierte Software-Schnittstellen	1	1	1	1	1	100
33	6	Aufmessung vorhandener Geometrien	1	1	1	1	1	100
31	5	Warnung bei Überschreitung von max. Abweichung	1	1	1	1	1	100
30	5	Dokumentation	1	1	1	1	1	100
29	4	Vorhaltung von Kalibrierungsdaten der Aktorik	1	1	1	1	1	100
27	4	Vorhaltung Innerer Geometrien	1	1	1	1	1	100
25	4	Standardisiertes Speicher-Format	1	1	1	1	1	100
23	3	Modularer Aufbau	1	1	1	1	1	100
20	3	Integration weiterer Sensoren	1	1	1	1	1	100
19	3	Integration verschiedener Aktorik-Ansteuerungen	1	1	1	1	1	100
18	3	Ansteuerung eines Tachymeters	1	1	1	1	1	100
17	3	Ansteuerung der Aktorik	1	1	1	1	1	100
16	2	Visualisierung numerisch	1	1	1	1	1	100
15	2	Visualisierung graphisch	1	1	1	1	1	100
14	2	System-Kontrollstand	1	1	1	1	1	100
13	2	Auswahl von Soll-Geometrien	1	1	1	1	1	100
11	1	Räumliche Trennung der Module	1	1	1	1	1	100
10	1	Manuelle Steuerung	1	1	1	1	1	100
8	1	Sichtverbindung Tachymeter - Objekt	1	1	1	1	1	100
4	1	Bedienbarkeit der Softwaremodule	1	1	1	1	1	100
3	1	Baustellentaugliche Hardwarekomponenten	1	1	1	1	1	100
2	1	Stationierung eines Tachymeters	1	1	1	1	1	100
1	1	Adaption der Messeinrichtung am Objekt	1	1	1	1	1	100
59	10	Kompensation der ungünstigen Tachymeterdynamik	1	1	1	1	0	80
53	9	Zustandsschätzung zu jeder Epoche	1	1	1	1	0	80
50	9	Prädiktion des Systemzustands	1	1	1	1	0	80
49	9	Glättung der Ist-Positionen	1	1	1	1	0	80
45	8	Übernahme von externen Bahnplanungen	1	1	1	1	0	80
40	7	Berechnung Abstand mit Interpolation	1	1	1	1	0	80
36	6	Möglichkeit für individuelle Bahnplanung	1	1	1	1	0	80
35	6	Erfassung von Zwangspunkten zur Bahnplanung	1	1	1	1	0	80
32	5	Warnung bei Überschreitung von v _{max}	1	1	1	1	0	80
28	4	Vorhaltung Objekt-Bewegungsmodelle	1	1	1	1	0	80
26	4	Speicherung des aktuellen Systemzustands	1	1	1	1	0	80
24	4	Speicherung der Messwerte	1	1	1	1	0	80
22	3	Kontrolle der Objektgeschwindigkeit	1	1	1	1	0	80
21	3	Integration weiterer Tachymeter	1	1	1	1	0	80
6	1	Positionsbestimmung des bewegten Objekts <5mm	1	1	1	1	0	80
5	1	Positionsbestimmung des bewegten Objekts [5mm-10mm]	1	1	1	1	0	80
39	7	Berechnung Abstand punktweise	0	0	1	1	1	60
34	6	Berechnung relativer Soll-Maße	0	0	1	1	1	60
12	1	Tragbares Führungsmodul	0	1	0	1	1	60
7	1	Ein-Mann-System	1	0	1	0	1	60
42	7	Berechnung Abstand mit Approximation	1	1	0	0	0	40
38	7	Ausgleichung von Stochastiken der Soll-Trajektorie	1	1	0	0	0	40
37	7	Homogenisierung der Soll-Trajektorie	1	1	0	0	0	40
9	1	Führungsmodul adaptierbar auf Arbeitsmittel	1	0	1	0	0	40
46	8	Übernahme von Geländemodellen	1	0	0	0	0	20
41	7	Berechnung Abstand zu Trassierungselementen	1	0	0	0	0	20
		Häufigkeit [%]:	95,0	90,0	90,0	88,3	63,3	

Eine grafische Darstellung der relativen Häufigkeit ist aus Abbildung 3.4 ersichtlich. Die waagrechten Striche in jedem Balkenblock der Abbildung 3.4 kennzeichnen die relative Häufigkeit, betrachtet über alle Einzelfunktionen. Es ist zu erkennen, dass die Anwendungsgattung 1 (Bahnführung von Arbeitsmitteln) mit 95% die meisten Funktionen benötigt und die Anwendungsgattung 5 (Abstecken) mit 63% die wenigsten Funktionen benötigt. Die anderen drei Gattungen benötigen 88% bzw. 90% der definierten Funktionen.

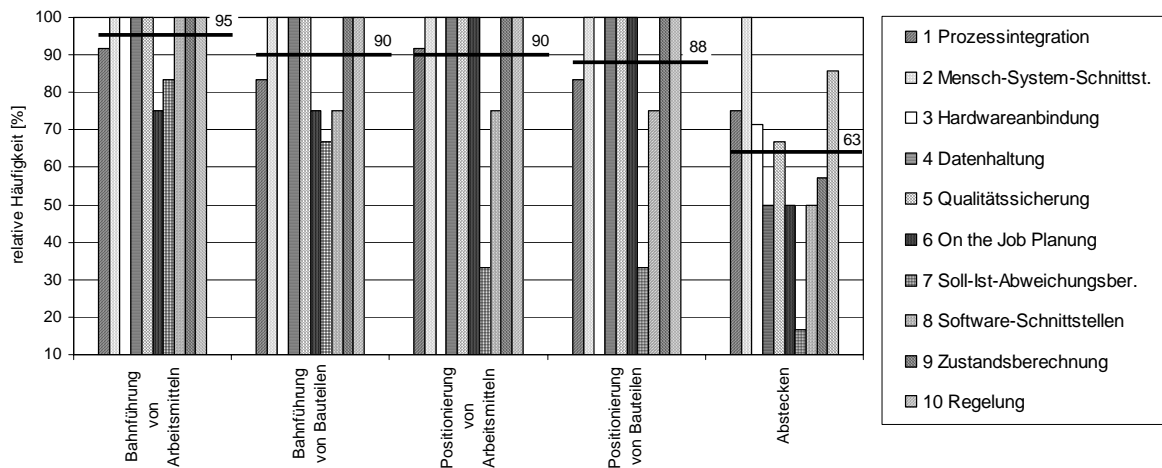


Abbildung 3.4: *Relative Häufigkeit der Funktionen in den Anwendungsgattungen, aufgeteilt nach Funktionsgruppen.*

Dass die relativen Häufigkeiten in den Anwendungsgattungen recht hoch sind und damit viele Einzelfunktionen für alle Gattungen benötigt werden, lässt sich durch den generischen Ansatz der gesamten Anforderungsanalyse erklären. Da in jeder Anwendungsgattung eine Vielzahl spezieller Anwendungen vertreten ist, ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine der Funktionen in der jeweiligen Anwendungsgattung benötigt wird, recht hoch.

Bei Betrachtung der relativen Häufigkeit der zehn Funktionsgruppen in den jeweiligen Anwendungsgattungen fällt auf, dass die Gruppe 2 (Mensch-System-Schnittstelle) in allen Gattungen zu 100% Prozent vertreten ist. Dies bedeutet, dass alle Funktionen der Funktionsgruppe 2 in allen Anwendungsgattungen benötigt werden. Die prozentuale Häufigkeit der Funktionsgruppe 7 (Soll-Ist-Abweichungsberechnung) hingegen nimmt innerhalb der Anwendungsgattungen von links nach rechts ab. Das heißt, dass von den Einzelfunktionen dieser Gruppe unterschiedlich viele in den Gattungen benötigt werden.

Die Hälfte der zehn Funktionsgruppen kommt bei allen Anwendungsgattungen, außer dem „Abstecken“, mit einer relativen Häufigkeit von 100% vor. Damit hebt sich diese Anwendungsgattung stark von den anderen vier ab, was sich auch schon in der niedrigen Prozentzahl von 63% an benötigten Einzelfunktionen gezeigt hat. Die vier Anwendungsgattungen mit Führungs- und Positionierungsaufgaben unterscheiden sich hinsichtlich der relativen Häufigkeit benötigter Funktionen nur in den vier Gruppen Prozessintegration, On-the-Job-Planung, Soll-Ist-Abweichungsberechnung und Software-Schnittstellen.

3.3.2 Priorität der Funktionen

Neben der Häufigkeit einer Funktion ist besonders die Priorität der einzelnen Funktionen für die verschiedenen Anwendungsgattungen von Bedeutung. In Tabelle 3.2 auf der nächsten Seite wird deshalb die Priorität jeder einzelnen Funktion bewertet.

Tabelle 3.2: *Funktionalmatrix - sortiert nach Prioritäten. Für welche Anwendungsgattung werden welche Funktionen mit welcher Priorität benötigt. (1) niedrige Priorität bis (3) hohe Priorität und (0) nicht benötigt.*

Nr.	Gr.	Funktionalitäten	Anwendungsgattungen					Durchschnitt
			Bahnführung von Arbeitsmitteln	Bahnführung von Bauteilen	Positionierung von Arbeitsmitteln	Positionierung von Bauteilen	Abstecken	
		Gruppen (Gr.): 1=Prozessintegration, 2=Mensch-System-Schnittstelle, 3=Hardwareanbindung, 4=Datenhaltung, 5=Qualitätssicherung, 6=On the Job Planung, 7=Soll-Ist- Abweichungsberechnung, 8=Software-Schnittstellen, 9=Zustandsberechnung, 10=Regelung						
1	1	Adaption der Messeinrichtung am Objekt	3	3	3	3	3	3,0
2	1	Stationierung eines Tachymeters	3	3	3	3	3	3,0
3	1	Baustellentaugliche Hardwarekomponenten	3	3	3	3	3	3,0
4	1	Bedienbarkeit der Softwaremodule	3	3	3	3	3	3,0
8	1	Sichtverbindung Tachymeter - Objekt	3	3	3	3	3	3,0
10	1	Manuelle Steuerung	3	3	3	3	3	3,0
13	2	Auswahl von Soll-Geometrien	3	3	3	3	3	3,0
14	2	System-Kontrollstand	3	3	3	3	3	3,0
16	2	Visualisierung numerisch	3	3	3	3	3	3,0
18	3	Ansteuerung eines Tachymeters	3	3	3	3	3	3,0
23	3	Modularer Aufbau	3	3	3	3	3	3,0
25	4	Standardisiertes Speicher-Format	3	3	3	3	3	3,0
31	5	Warnung bei Überschreitung von max. Abweichung	3	3	3	3	3	3,0
43	8	Definierte Software-Schnittstellen	3	3	3	3	3	3,0
52	9	Transformation der Reflektorposition in Objektbezugspunkt	3	3	3	3	3	3,0
27	4	Vorhaltung Innerer Geometrien	3	3	3	3	2	2,8
44	8	Modularer Aufbau der Software	3	3	3	3	2	2,8
17	3	Ansteuerung der Aktorik	3	3	3	3	1	2,6
19	3	Integration verschiedener Aktorik-Ansteuerungen	3	3	3	3	1	2,6
29	4	Vorhaltung von Kalibrierungsdaten der Aktorik	3	3	3	3	1	2,6
57	10	Berechnung der Stellgrößen u(t)	3	3	3	3	1	2,6
58	10	Umrechnung der Stellgrößen in Stellsignale	3	3	3	3	1	2,6
60	10	Variable Regelparameter	3	3	3	3	1	2,6
15	2	Visualisierung graphisch	3	3	2	2	1	2,2
47	9	Bestimmung der Objektausrichtung	2	2	3	3	1	2,2
48	9	Zeitstempel für Objekt-Positionen	3	3	2	2	1	2,2
51	9	Synchronisation verschiedener Sensoren	3	3	2	2	1	2,2
56	10	Führung 3D	3	3	1	3	1	2,2
28	4	Vorhaltung Objekt-Bewegungsmodelle	3	3	2	2	0	2,0
33	6	Aufmessung vorhandener Geometrien	2	2	2	2	2	2,0
49	9	Glättung der Ist-Positionen	3	3	2	2	0	2,0
53	9	Zustandsschätzung zu jeder Epoche	3	3	2	2	0	2,0
20	3	Integration weiterer Sensoren	3	1	2	1	2	1,8
39	7	Berechnung Abstand punktweise	0	0	3	3	3	1,8
45	8	Übernahme von externen Bahnplanungen	3	3	2	1	0	1,8
6	1	Positionsbestimmung des bewegten Objekts <5mm	3	3	1	1	0	1,6
7	1	Ein-Mann-System	3	0	3	0	2	1,6
26	4	Speicherung des aktuellen Systemzustands	3	3	1	1	0	1,6
35	6	Erfassung von Zwangspunkten zur Bahnplanung	1	1	3	3	0	1,6
36	6	Möglichkeit für individuelle Bahnplanung	1	1	3	3	0	1,6
40	7	Berechnung Abstand mit Interpolation	3	3	1	1	0	1,6
59	10	Kompensation der ungünstigen Tachymeterdynamik	3	3	1	1	0	1,6
22	3	Kontrolle der Objektgeschwindigkeit	3	2	1	1	0	1,4
30	5	Dokumentation	2	2	1	1	1	1,4
32	5	Warnung bei Überschreitung von v _{max}	3	2	1	1	0	1,4
54	10	Integration verschiedener Regel-Module	2	2	2	1	0	1,4
55	10	Führung 2D	1	1	3	1	1	1,4
5	1	Positionsbestimmung des bewegten Objekts]5mm-10mm]	1	1	2	2	0	1,2
9	1	Führungsmodul adaptierbar auf Arbeitsmittel	3	0	3	0	0	1,2
21	3	Integration weiterer Tachymeter	1	2	1	2	0	1,2
34	6	Berechnung relativer Soll-Maße	0	0	2	2	2	1,2
37	7	Homogenisierung der Soll-Trajektorie	3	3	0	0	0	1,2
50	9	Prädiktion des Systemzustands	2	2	1	1	0	1,2
11	1	Räumliche Trennung der Module	1	1	1	1	1	1,0
12	1	Tragbares Führungsmodul	0	1	0	1	3	1,0
38	7	Ausgleichung von Stochastiken der Soll-Trajektorie	3	2	0	0	0	1,0
42	7	Berechnung Abstand mit Approximation	3	2	0	0	0	1,0
24	4	Speicherung der Messwerte	1	1	1	1	0	0,8
46	8	Übernahme von Geländemodellen	3	0	0	0	0	0,6
41	7	Berechnung Abstand zu Trassierungselementen	2	0	0	0	0	0,4
Durchschnitt:			2,6	2,5	2,3	2,2	2,1	

Die Priorität der einzelnen Funktionen für die verschiedenen Anwendungsgattungen wird ähnlich wie die relative Häufigkeit ausgewertet. Anstelle der binären Betrachtungsweise – Funktion benötigt: ja/nein – tritt aber eine abstufige Einteilung. Zur Beurteilung der Wichtigkeit der für die jeweilige Anwendungsgattung benötigten Funktionen werden folgende Prioritäten eingeführt:

- 0 (nicht benötigt): Funktion wird für die Anwendungsgattung nicht benötigt.
- 1 (niedrige Priorität): Funktion kann zu einem späteren Zeitpunkt in das System integriert werden, um z.B. die Bedienung komfortabler zu machen oder das Anwendungsspektrum zu erweitern.
- 2 (mittlere Priorität): Funktion sollte in das System integriert werden, damit ein Großteil der Anwendungen der entsprechenden Gattung bedient werden kann und auch spezielle Anforderungen innerhalb der jeweiligen Anwendungsgattung bearbeitet werden können.
- 3 (hohe Priorität): Funktion muss implementiert werden, damit die Funktionalität des System überhaupt gewährleistet ist und die Anwendungsfälle der jeweiligen Gattung bearbeitet werden können.

Die in Tabelle 3.2 dargestellte Prioritätenmatrix ist analog zur Matrix mit den relativen Häufigkeiten nach Funktionsgruppen aufgeteilt und in Abbildung 3.5 zusammenfassend dargestellt. Dabei wird die durchschnittliche Priorität der für die jeweilige Anwendungsgattung notwendigen Funktionen berechnet. Es fällt auf, dass die Reihenfolge der Anwendungsgattungen identisch zu Abbildung 3.4 ist.

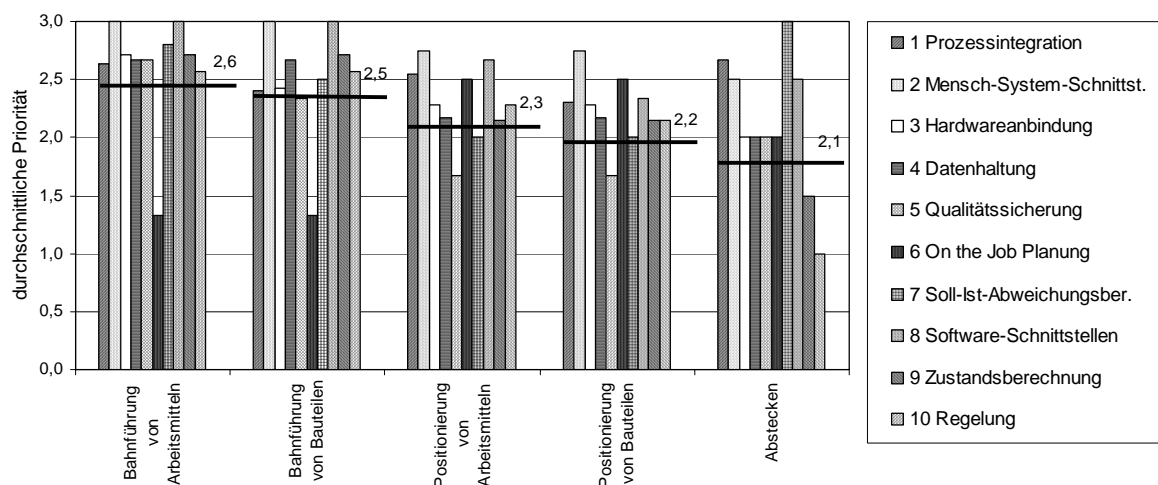


Abbildung 3.5: *Durchschnittliche Priorität der notwendigen Funktionen in den Anwendungsgattungen, aufgeteilt nach Funktionsgruppen.*

Die waagrechten Striche in jedem Balkenblock der Abbildung 3.5 kennzeichnen die durchschnittliche Priorität aller je Anwendungsgattung benötigten Einzelfunktionen. Mit einer durchschnittlichen Priorität von 2,6 benötigt die Anwendungsgattung „Bahnführung von Arbeitsmitteln“ die notwendigen Funktionen mit der höchsten Priorität, während in der Anwendungsgattung „Abstecken“ mit 2,1 die benötigten Funktionen mit der niedrigsten durchschnittlichen Priorität enthalten sind.

Die beiden Anwendungen zur Bahnführung benötigen ihre Einzelfunktionen aus den Gruppen 2 (Mensch-System-Schnittstellen) und 3 (Software-Schnittstellen) alle mit höchster

Priorität. Die Funktionsgruppe 6 (On-the-Job-Planung) hingegen wird bei diesen Anwendungsgattungen mit eher niedriger Priorität benötigt. So lassen bei weiterer Betrachtung der Abbildung 3.5 klare Unterscheidungen der fünf Anwendungsgattungen hinsichtlich ihrer Prioritäten-Charakteristik erkennen. Die Unterscheidungen zwischen den Gattungen hinsichtlich Bahnführung oder Positionierung sind wesentlich bedeutsamer, als die Unterscheidung hinsichtlich des jeweiligen Objekts (Arbeitsmittel oder Bauteil). Besonders in den Funktionen zur Zustandsberechnung und Regelung weisen die Bahnführungs-Anwendungen alle Funktionen mit höchster Priorität auf.

Die Komplexität eines Führungssystems steigt generell mit der Anzahl der benötigten Funktionen und deren Priorität. Diesbezüglich kommt die Analyse der Funktionalmatrizen hinsichtlich Häufigkeit und Priorität zu dem Ergebnis, dass die Anwendungsgattung „Bahnführung von Arbeitsmitteln“ den höchsten Komplexitätsgrad besitzt. Da aber ein hoher Funktionsumfang gleichzeitig ein weites Einsatzspektrum des Systems ermöglicht, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Entwurf des modularen Führungssystems an der Anwendungsgattung „Bahnführung von Arbeitsmitteln“ ausgerichtet. Auf Basis der Analyse der Funktionen soll so erreicht werden, dass möglichst viele Anwendungsfälle auch aus den anderen Anwendungsgattungen mit diesem Führungssystem bedient werden können.

3.4 Systemarchitektur

Ausgehend von einem modularen System zur Bahnführung von Arbeitsmitteln mit einem Tachymeter als 3-D-Positionssensor lässt sich eine in Abbildung 3.6 dargestellte Systemarchitektur aufstellen.

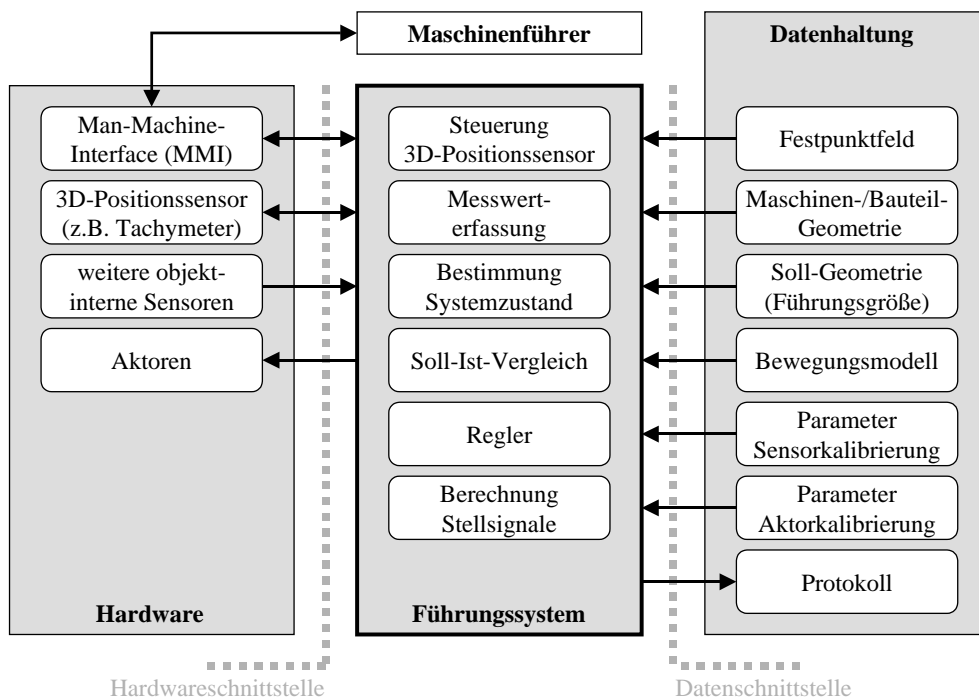


Abbildung 3.6: Architektur eines modularen Führungssystems für technische Systeme.

Die in Kapitel 3.3 analysierten Einzelfunktionen lassen sich auf Grund ihrer örtlichen und funktionalen Eigenschaften innerhalb der Systemarchitektur in voneinander abgegrenzte Einheiten unterteilen. Der menschliche Maschinenführer bedient sich gewisser Hardware (Abbildung 3.6 links), um eine gestellte Führungsaufgabe zu erledigen. Zur Automation wird

ein Führungssystem (Abbildung 3.6 Mitte) eingesetzt, das je nach Auslegung eine vollständige oder teilweise Automation der an den Maschinenführer gestellten Aufgabe ermöglicht. Dazu benötigt das Führungssystem verschiedenste digital gespeicherte Daten wie sie auf der rechten Seite der Abbildung 3.6 dargestellt sind. Innerhalb des Führungssystems und der vorhandenen Hardware befinden sich funktionale Blöcke. Jeder dieser Blöcke ist zwingend erforderlich, wie die Funktionalanalyse in Kapitel 3.3 gezeigt hat. Die individuelle Funktionsweise jedes einzelnen Blocks entscheidet später über die Einsatzmöglichkeiten des modularen Systems.

Zu den für ein modulares Führungssystem notwendigen Hardwarekomponenten zählen das Man-Machine-Interface zur Interaktion mit dem menschlichen Maschinenführer und ein Tachymeter als 3D-Positionssensor. Außerdem kann eine Beeinflussung des technischen Systems nur durch Aktoren (z.B. Hydraulikzylinder) erfolgen. Weitere interne Sensoren, wie z.B. Kreisel oder Neigungssensoren, müssen zur Abdeckung eines breiten Anwendungsspektrums vorgesehen werden.

Das Führungssystem beinhaltet in seiner Architektur die für eine Regelung notwendigen Funktionsblöcke auf Basis der in Kapitel 2 dargestellten Grundlagen der Regelungstechnik. Zwischen den Blöcken bestehen, bedingt durch den Regelkreis, gegenseitige Abhängigkeiten bezüglich der Reihenfolge und der Datenschnittstellen zwischen den Blöcken. Wichtiger Bestandteil des Gesamtsystems sind weiterhin die verschiedenen Datenquellen, die von dem Festpunktfeld zur Stationierung des Tachymeters über die innere Geometrie der Maschine oder des Bauteils im Objektkoordinatensystem (siehe Kapitel 2.3.3) bis hin zur Soll-Geometrie als Führungsgröße im Regelkreis (MC-Modell) reichen. Für die Regelung eines technischen Systems sind weiterhin das jeweilige Bewegungsmodell und die Kalibrierparameter für Sensoren und Aktoren notwendig. Diese Parameter und das Bewegungsmodell werden im Rahmen der Systemkalibrierung und Identifizierung bestimmt. Zur Qualitätssicherung bedarf ein automatisches Führungssystem weiterhin eines umfassenden Protokollwesens, um den Führungsprozess im nachhinein beurteilen zu können und mögliche Fehlerquellen zu lokalisieren.

Zur Verbindung der einzelnen Einheiten sieht die Systemarchitektur entsprechende Hardware- und Datenschnittstellen vor, die im Verlauf dieser Arbeit noch näher zu spezifizieren sind.

4 Entwurf eines modularen Führungssystems

Nach der Analyse der Anforderungen an ein modulares Führungssystem und der Ableitung einer Systemarchitektur im vorangegangenen Kapitel kann nun ein System entworfen werden. Der Systementwurf in diesem Kapitel führt zu einem Basissystem, das es ermöglicht, Führungssysteme für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle zu realisieren. Ziel ist es, den Systementwurf und die Module des Basissystems so zu gestalten, dass durch einfachen Austausch einzelner Module und Funktionseinheiten unterschiedliche Funktionalitäten des Gesamtsystems schnell und einfach realisiert werden können. Austauschbare Module und einzelne Funktionseinheiten werden dabei in einer Toolbox bereitgestellt. Dies trägt dazu bei, dem jeweiligen Systementwickler auf einfache Weise Expertenwissen zugänglich zu machen.

4.1 Systemkonzept

Das Systemkonzept sieht im Rahmen dieser Arbeit die Integration eines zielverfolgenden Tachymeters als Messeinrichtung in das Führungssystem vor. Je nach Bedarf und Anwendungsfall kann das Tachymeter auch durch einen GPS-Sensor ersetzt werden. Auf die dazu notwendige Systemanpassung wird in Kapitel 4.2.1 noch näher eingegangen.

4.1.1 Varianten der räumlichen Anordnung der Systemkomponenten

Aufgrund der Tatsache, dass ein Tachymeter ortsfest aufgestellt wird, während die zu führende Maschine oder das Objekt bewegt wird, lässt es sich nicht vermeiden, dass bestimmte Daten innerhalb des Führungssystems auf dem Luftweg transportiert werden müssen. Da das zu konzipierende Führungssystem für die verschiedensten Anwendungsfälle, mit unterschiedlichen Anforderungen einsetzbar sein soll, muss sichergestellt werden, dass bereits das Systemkonzept die räumliche Trennung einzelner Systemkomponenten zulässt.

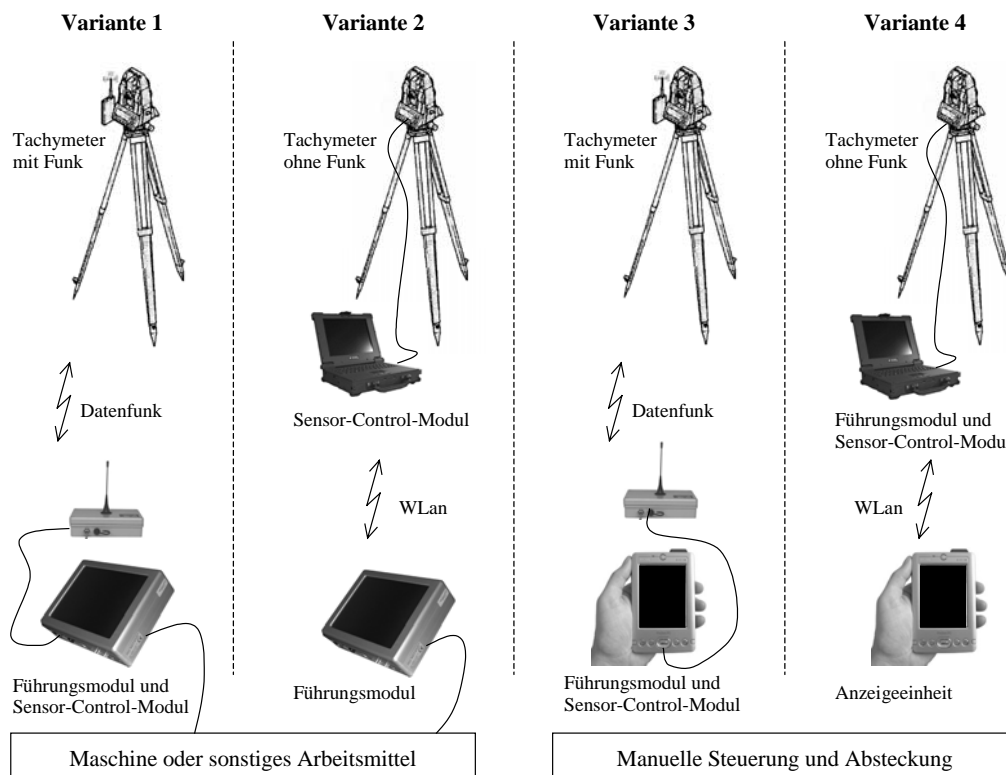


Abbildung 4.1: Systemkonzeptvarianten des Positionierungs- und Führungssystems.

In Abbildung 4.1 sind vier verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Anordnungen der Systemkomponenten und verschiedenen Übertragungsmedien dargestellt. Das Konzept der ersten Variante (links in Abbildung 4.1) stellt den Standardfall dar. Den meisten bisher realisierten Führungssystemen, wie sie im Stand der Wissenschaft in Kapitel 1.2 vorgestellt worden sind, liegt dieses Konzept zugrunde. Die Variante 1 geht davon aus, dass das Tachymeter über Datenfunk (üblicherweise 406-430MHz) mit einem leistungsfähigen Rechner auf der Maschine oder dem sonstigen Arbeitsmittel verbunden ist und die Rohdaten des Tachymeters übertragen werden. Die für die Steuerung des Tachymeters notwendige Software läuft zusammen mit der für die Führungsaufgabe benötigten Software auf dem Maschinenrechner. Außerdem können in diesem Fall weitere Sensoren (z.B. Neigungssensoren) auf der Maschine vom Rechner ausgelesen werden, um die räumliche Ausrichtung der Maschine zu berechnen.

Die zweite Variante des Systemkonzepts sieht eine räumliche Trennung der beiden Hauptsoftwarekomponenten vor. Es wird in dieser Variante davon ausgegangen, dass auf dem Maschinenrechner nur das Führungsmodul zur Bewältigung der jeweiligen Führungsaufgabe betrieben wird. Die für die Steuerung des Tachymeters benötigte Software, das Sensor-Control-Modul, läuft auf einem zweiten Rechner, der über ein serielles Kabel (RS232) mit dem Tachymeter verbunden ist. Die Kontrolle des Tachymeters und die Berechnung der Position des bewegten Reflektors auf der Maschine aus den Rohdaten des Tachymeters wird auf dem zweiten Rechner durchgeführt. Das Führungsmodul auf der Maschine erhält somit vorverarbeitete Positionsdaten über eine WLAN-Verbindung. Wie im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch zu sehen sein wird, birgt diese Variante Vorteile gegenüber der ersten Variante hinsichtlich der Adaption des Führungssystems an wechselnde Anwendungsszenarien.

Werden keine weiteren Sensoren zur Bestimmung der räumlichen Ausrichtung des zu führenden Objekts benötigt, kann der leistungsstarke Maschinenrechner gegen eine tragbare Recheneinheit (z.B. Pocket-PC) ausgetauscht werden. Die Variante 3 ermöglicht auf diese Art und Weise die Realisierung eines leichten und portablen Führungssystems. Aufgrund der zu erwartenden begrenzten Rechenleistung des portablen Rechners ist das mögliche Einsatzspektrum auf die weniger komplexen Anwendungsfälle (z.B. manuelle Steuerungen und Absteckaufgaben) begrenzt.

Die vierte Variante, in Abbildung 4.1 rechts dargestellt, sieht einen stationären Systemrechner vor, auf dem sowohl das Modul zur Tachymetersteuerung als auch das Führungsmodul läuft. Ein Pocket-PC dient in diesem Fall als reines MMI mit Anzeige- und Eingabemöglichkeiten und kommuniziert per WLAN mit dem Systemrechner. Diese Variante eignet sich beispielsweise bei einem fest installierten Tachymeter an einem exponierten Ort einer Baustelle. Mit tragbarem MMI und z.B. Mini-Reflektor können in Echtzeit Geometrieparameter mit den Planungsdaten verglichen werden, um die Qualität im Bauprozess zu steigern.

Da jede der vier vorgestellten Konzeptvarianten ihre Vor- und Nachteile besitzt, soll das zu entwerfende modulare Führungssystem für alle Varianten einsetzbar sein. Die Modularität besitzt deshalb im Systemkonzept hohe Priorität.

4.1.2 Modulare Ebenen

Im vorangegangenen Kapitel wurde auf die räumliche Trennung der Systemkomponenten des automatischen Positionierungs- und Führungssystems eingegangen. Damit aber wie gewünscht ein möglichst breites Anwendungsspektrum bedient werden kann, muss die Funktionalität des Gesamtsystems variabel bzw. einfach anpassbar sein. Dazu sieht das Systemkonzept vier

modulare Ebenen vor. Wie aus Abbildung 4.2 ersichtlich wird die erste modulare Ebene von den Hardwarekomponenten gebildet. Diese sind zum einen die 3D-Messeinrichtung (Tachymeter oder GPS verschiedener Hersteller) und zum anderen das zu führende System oder Objekt (z.B. Baumaschine oder Bauteil mit verschiedenen Aktorenansteuerungen). Dieser ersten Ebene direkt angebundnen finden das Sensor-Control-Modul und das Führungsmodul als wesentliche Softwarekomponenten ihren Platz in der zweiten Ebene des Systemkonzepts. Die beiden Softwarekomponenten der zweiten Ebene benötigen zur Erfüllung der jeweiligen Positionierungs- oder Führungsaufgabe in Abhängigkeit der Hardwarekomponenten in der ersten Ebene verschiedene Softwaremodule, die wiederum auf unterschiedlichste Parametersätze zurückgreifen. Dabei bilden die verschiedenen Softwaremodule, wie aus Abbildung 4.2 ersichtlich, die dritte Ebene des Systemkonzepts, während die unterschiedlichen Parametersätze in der vierten Ebene angesiedelt sind.

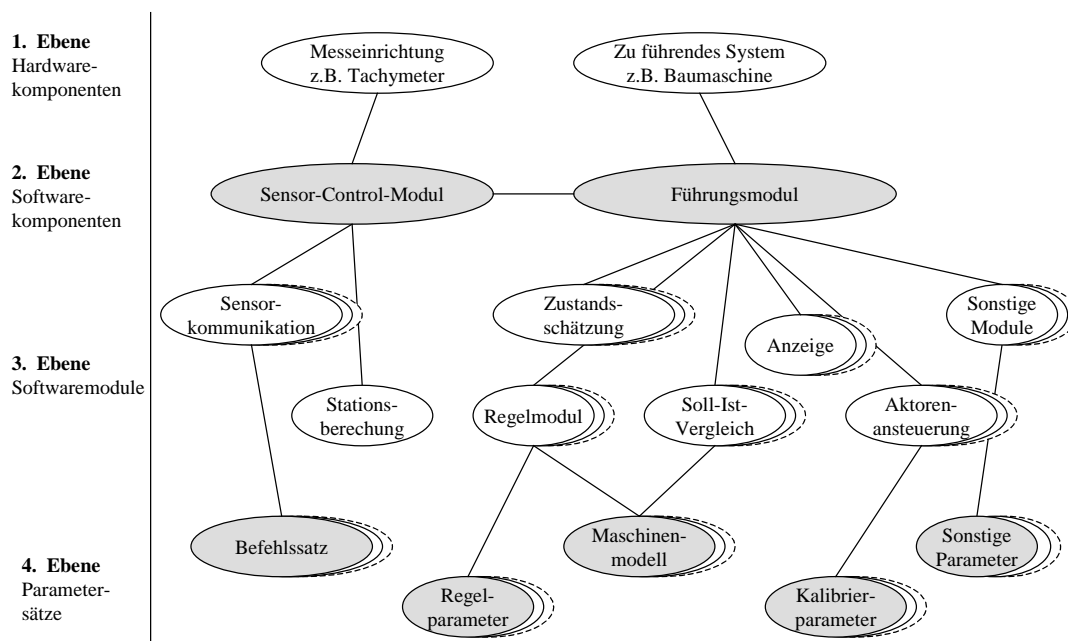


Abbildung 4.2: *Modulare Ebenen des Positionierungs- und Führungssystems mit auszugsweiser Darstellung der austauschbaren Inhalte.*

Die Softwaremodule der dritten Ebene stellen dabei die eigentliche Funktionalität des Gesamtsystems dar. Sie bündeln Expertenwissen über die Erfüllung der unterschiedlichsten Aufgaben innerhalb des Systems, wie z.B. der Sensorkommunikation, der Zustandschätzung des zu führenden Systems oder der zielgerichteten Beeinflussung (Regelung) des Systems. Dabei sind die Module der dritten Ebene und die Parametersätze der vierten Ebene, wie in Abbildung 4.2 angedeutet, austauschbar. Das Systemkonzept sieht folglich ein Basissystem bestehend aus Sensor-Control-Modul und Führungsmodul vor, das die softwaretechnische Infrastruktur für die Module der dritten Ebene darstellt. So können je nach Anwendungsfall verschiedene Module, bereitgestellt in einer Toolbox, in das Basissystem integriert werden. Je nach Zusammenstellung der Module der dritten Ebene werden unterschiedliche Parametersätze, wie z.B. Befehlssätze für die Kommunikation mit einem Tachymeter, Kalibrierparameter für die Aktorenansteuerungen oder Regelparameter, benötigt.

Wie dieses Modell der modularen Ebenen zeigt, ist das Systemkonzept des automatischen Positionierungs- und Führungssystems nicht nur auf Hardware-Ebene modular, sondern auch, und vor allem, auf den Software-Ebenen. Damit kann erreicht werden, dass das breite

Anwendungsspektrum durch einfache Systemanpassungen bedient werden kann. Gleichzeitig setzt dieses Systemkonzept einheitliche Schnittstellen und Datenformate zwischen den einzelnen Modulen voraus, damit die Austauschbarkeit gewährleistet ist. Auf diesen Aspekt wird im folgenden Kapitel noch näher eingegangen.

4.2 Systemdesign

Das Systemdesign zeigt im Folgenden die Funktionsweise und das Zusammenspiel der einzelnen Module. Dabei wird, wie bereits erwähnt, ein Basissystem für die Anwendungsfälle im Bereich der automatischen Führung von Maschinen entwickelt, da diese Anwendungsfälle wie in Kapitel 3.3 gezeigt worden ist, die größte Komplexität besitzen und so die Funktionalitäten zur Erfüllung der meisten Führungsaufgaben beinhalten. Das Design des modularen Führungssystems ist in Abbildung 4.3 skizziert. Auf der linken Seite ist das Sensor-Control-Modul mit einem Tachymeter als Positionssensor dargestellt. Das Führungsmodul mit dem zu führenden System (z.B. Baumaschine) befindet sich in Abbildung 4.3 in der Mitte. Jede Box innerhalb dieser beiden Softwarekomponenten stellt ein austauschbares Modul aus der Toolbox dar. Zusammen ermöglichen sie die für den jeweiligen Anwendungsfall notwendige Funktionalität des Gesamtsystems.

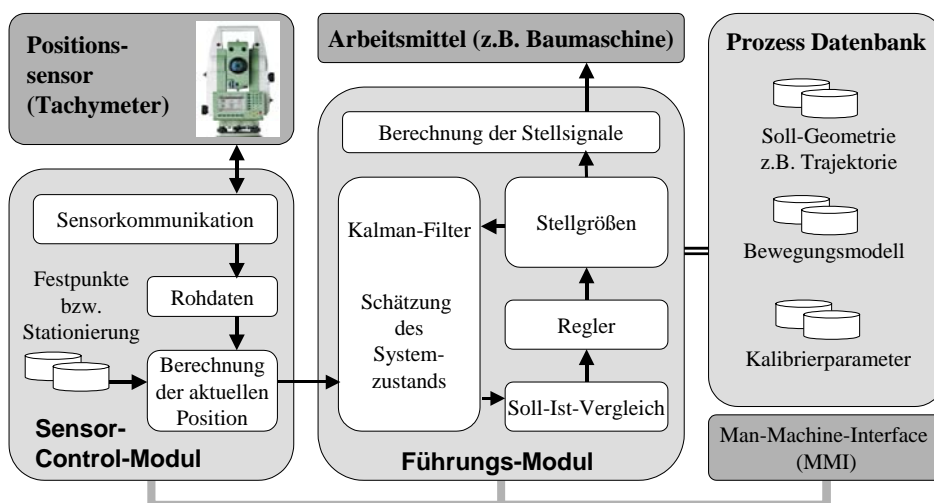


Abbildung 4.3: Systemdesign des modularen Führungssystems.

4.2.1 Das Sensor-Control-Modul

Das Sensor-Control-Modul (in Abbildung 4.3 links dargestellt) kommuniziert bidirektional mit dem Tachymeter über die serielle Schnittstelle (i.d.R. RS232) und ermöglicht die Positionsbestimmung des bewegten Reflektors auf der Baumaschine oder dem zu führenden Objekt. Das Tachymeter wird dabei vollständig in allen seinen benötigten Funktionen von diesem Modul gesteuert. Dies schließt auch die für die Berechnung der Positionen notwendige Stationierung mit ein. Die aktuelle Position des bewegten Reflektors wird mit einem Zeitstempel versehen und steht dem Führungsmodul in Form einer Positionsnachricht zur Verfügung. Die Spezifikation der Positionsnachricht wird in Kapitel 4.2.3 beschrieben.

Das Sensor-Control-Modul muss den Umgang mit einem Tachymeter als relativ komplexen Sensor so weit es geht vereinfachen und automatisieren, damit Fehlerquellen vermieden und

Arbeitsabläufe beschleunigt werden. Diesem Aspekt widmet sich auch das Kapitel 5 („Tachymeter als prozessintegrierter 3-D Positionssensor“).

Soll anstelle eines Tachymeters ein GPS-Sensor als Messeinrichtung in das Führungssystem integriert werden, so ist das Sensor-Control-Modul entsprechend anzupassen. Anstelle der bidirektionalen Kommunikation mit dem Tachymeter und den verschiedenen Betriebsmodi, wie z.B. Messung von Einzelpunkten zur Stationierung, Zielsuche und kinematische Messung eines bewegten Reflektors, tritt das einfache Auslesen der vom GPS-Sensor gesendeten Positionsnachricht (standardisiertes NMEA-Format). Stattdessen bedarf es bei der Benutzung eines GPS-Sensors eventuell einer Transformation vom WGS84-Koordinatensystem in ein lokales Koordinatensystem, wozu dann ein spezielles Softwaremodul mit den Transformationsparametern als zugeordnetem Parametersatz benötigt würde. In der Regel wird diese Transformation aber bereits vom GPS-Empfänger vorgenommen, so dass sich die Aufgabe des Sensor-Control-Moduls beim Einsatz eines GPS-Sensors als Messeinrichtung in der Regel stark vereinfacht.

Da ein GPS-Sensor außerdem, im Gegensatz zu einem Tachymeter, mit dem bewegten Objekt (z.B. Baumaschine) mitfährt, entfällt die Notwendigkeit zur räumlichen Trennung verschiedener Systemkomponenten. Die Varianten im Systemkonzept, dargestellt in Abbildung 4.1, beschränken dadurch in der Regel auf die erste Variante, wobei der GPS-Sensor direkt an den Maschinenrechner angeschlossen wird.

4.2.2 Das Führungsmodul

Das Führungsmodul (in Abbildung 4.3 mittig dargestellt) stellt die Hauptkomponente des Führungs- und Positionierungssystems dar. Aus den vom Sensor-Control-Modul erzeugten Positionsnachrichten wird vom Führungsmodul in einem ersten Schritt der aktuelle Systemzustand der Maschine oder des Objekts geschätzt. Dazu wird ein dynamisches KALMAN-Filter eingesetzt, wobei die aktuellen Zustandsvariablen, wie z.B. die Geschwindigkeit oder der Lenkwinkel als Stellgrößen modelliert werden (siehe auch Kapitel 2.2.7 und Kapitel 6.3.3). Der geschätzte Systemzustand wird dann mit der Soll-Geometrie verglichen und einem Zustands-Regler zugeführt. Dieser berechnet unter Kenntnis des Bewegungsmodells der Maschine die Stellgrößen für die Maschinen-Aktorik. Die geplante Soll-Trajektorie wird, ebenso wie die Kalibrierparameter der Maschine und der Aktorik, von der in Abbildung 4.2 dargestellten vierten Ebene der Parametersätze bereitgestellt.

Über die Aktorik wird die Bewegung und damit die Position der Maschine beeinflusst. Da diese permanent von der Messeinrichtung (Tachymeter) verfolgt wird, ist der Regelkreis geschlossen und die Maschine wird auf der geplanten Soll-Trajektorie oder hin zu einer geplanten Endposition geführt.

4.2.3 Spezifikation der Kommunikation zwischen den Softwarekomponenten

Das Führungsmodul (in Abbildung 4.3 mittig dargestellt) kommuniziert mit dem Sensor-Control-Module über eine TCP/IP-Verbindung. Dabei fungiert das Führungsmodul als Server und das Sensor-Control-Modul als Client. Wie in Abbildung 4.4 dargestellt dient eine TCP/IP-Verbindung als standardisierte Kommunikationsinfrastruktur zwischen entfernten Rechnern. In der Praxis stellt die Datenübertragung per TCP/IP ein weit verbreitetes Medium mit vielen unterschiedlichen Anwendungsvarianten dar. In Abbildung 4.4 sind für jede Schicht beispielhafte Vertreter aufgeführt, wobei die für das modulare Führungssystem relevanten Bereiche schraffiert dargestellt sind. Die Anwendung (in Abbildung 4.4 in der obersten Schicht dargestellt) bildet auf der einen Seite das Sensor-Control-Modul und auf der

anderen Seite das Führungsmodul. Als Transport- und Vermittlungsschicht fungieren dann die standardisierten Protokolle TCP und IP.

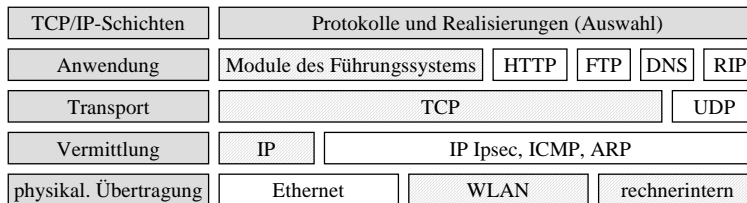


Abbildung 4.4: *Standardisierte Schichten der TCP/IP-Verbindung und beispielhafte Vertreter.*

Die Verbindung über TCP/IP birgt neben einer standardisierten Kommunikationsinfrastruktur und der Möglichkeit zur Synchronisation der Rechneruhren einen weiteren wichtigen Vorteil. So können die beiden Module ohne eine Änderung in der Software gemäß dem in Kapitel 4.1 vorgestellten Systemkonzept sowohl auf einem Rechner als auch örtlich getrennt auf zwei verschiedenen Rechnern laufen. Diese Variabilität wird durch die in Abbildung 4.4 dargestellte untere Schicht, der physikalischen Übertragung, ermöglicht. Zur Anwendung des Führungssystems auf nur einem Rechner wird die Kommunikation über rechnerinterne TCP/IP-Kanäle realisiert, während sich im Fall von getrennten Modulen eine Wireless-LAN-Verbindung (WLAN) anbietet. Diese entspricht in ihrer Reichweite bei Sichtverbindung von mehreren hundert Metern ungefähr der eines Tachymeters im Zielverfolgungsmodus. Auf eine genauere Spezifikation der standardisierten und in der Literatur (z.B. GOLLUB 2003, KAFKA 2005 und STEVENS 2004) hinreichend beschriebenen TCP/IP-Schnittstelle und WLAN-Verbindung soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

Zur Kommunikation zwischen Sensor-Control und Führungsmodul werden bei bestehender TCP/IP-Verbindung Befehle bzw. Daten ausgetauscht. Das Führungsmodul steuert das Sensor-Control-Modul mit den in Tabelle 4.1 dargestellten Befehlen.

Tabelle 4.1: *Spezifikation und Beschreibung der Befehle vom Führungsmodul zum Sensor-Control-Modul.*

Befehl: <Befehl>		
Befehl	Datentyp	Beschreibung
StartMeasurement	String	Startet die Generierung von Positionsnachrichten
SendData	String	Fordert zur Übertragung von Positionsnachrichten auf
StopMeasurement	String	Stoppt die Generierung von Positionsnachrichten

Nach dem Start der Messung durch den Befehl „StartMeasurement“ werden vom Führungsmodul in jedem Regelschleifendurchlauf die Positionsdaten mit dem Befehl „SendData“ angefordert. Das Sensor-Control-Modul antwortet daraufhin mit der in Tab. spezifizierten Positionsnachricht. Ist die Führungsaufgabe beendet, so stoppt das Führungsmodul die Messungen des Sensor-Control-Moduls mit dem Befehl „StopMeasurement“.

Tabelle 4.2: *Spezifikation und Beschreibung der Positionsnachricht vom Sensor-Control- zum Führungsmodul.*

Positionsnachricht: <Sensor-ID>,<TIME>,<X>,<Y>,<Z>,<SigmaX>,<SigmaY>,<SigmaZ			
Name	Datentyp	Format	Beschreibung
Sensor-ID	Zahl	6	ID des 3-D-Positionssensors
TIME	Zahl (in ms)	10	Zeit seit Start der Messung
X	Zahl (in m)	10.3	X-Wert der Position
Y	Zahl (in m)	10.3	Y-Wert der Position
Z	Zahl (in m)	10.3	Z-Wert der Position
SigmaX	Zahl (in m)	5.3	Standardabweichung des X-Wertes
SigmaY	Zahl (in m)	5.3	Standardabweichung des Y-Wertes
SigmaZ	Zahl (in m)	5.3	Standardabweichung des Z-Wertes

Die Kommunikation zwischen den beiden wichtigsten Komponenten des Führungssystems ist so aufgebaut, dass das Sensor-Control-Modul nach dem Start der Messung die Positionsnachricht generiert und in einem Puffer speichert, bis diese abgeholt wird. Wird bis zum Eintreffen neuer Daten vom Positionssensor diese Positionsnachricht nicht vom Führungsmodul abgefragt, so wird die im Puffer befindliche Nachricht überschrieben. In diesem Fall gehen zwar Positionsdaten verloren, aber es ist sichergestellt, dass nur die aktuellste Positionsnachricht an das Führungsmodul übertragen wird. Im Gegenzug wird eine vom Führungsmodul abgerufene Positionsnachricht aus dem Puffer des Sensor-Control-Moduls gelöscht. Erfolgt eine weitere Abfrage durch den Befehl „SendData“, so ist der Puffer leer, und das Sensor-Control-Modul muss mit der Antwort auf die Anfrage warten, bis neue Daten vom Sensor gemessen und eine neue Positionsnachricht generiert worden sind.

Diese Art der Datenkommunikation ermöglicht es, Sensoren mit unterschiedlichen Abtastraten einzusetzen, ohne den Kommunikationsablauf zu beeinträchtigen. Außerdem arbeitet der Regelkreis des Führungsmoduls je nach Leistung des Rechners und Umfang der implementierten Funktionen unterschiedlich schnell. So kann es beim Einsatz eines Sensors mit hoher Abtastrate vorkommen, dass nicht jede gemessene Position verarbeitet werden kann. Das im Rahmen dieser Arbeit realisierte Führungsmodul benötigt je nach Funktionsumfang maximal 50ms Rechenzeit pro Epoche. Dies entspricht einer Abtastrate von 20Hz. Das eingesetzte Tachymeter vom Typ Leica TCP1201 besitzt eine maximale Abtastrate von 10Hz. In diesem Fall wird somit das Führungsmodul in seiner Arbeitsgeschwindigkeit durch das Tachymeter als Sensor gebremst.

Der Datenaustausch zwischen den verschiedenen austauschbaren Softwaremodulen auf der dritten Hierarchieebene (siehe Abbildung 4.2) wird durch Variablen und Arrays realisiert. Auf die weiteren Softwareschnittstellen zur Datenhaltung, sowie Im- und Export von Daten, wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

4.2.4 Datenhaltung

Die Datenhaltung sowie der gesamte Im- und Export von Daten ist im automatischen Positionierungs- und Führungssystem durch Datenbanken realisiert. Zur Anwendung kommen SQL-Datenbanken, in denen die jeweiligen Daten in einer einfachen Tabellenstruktur abgelegt werden. Werden die beiden Komponenten Sensor-Control- und Führungsmodul auf getrennten Rechnern betrieben, so ist auf jedem Rechner eine Datenbank notwendig.

Na...	Type	Null	Default	Extra
ID	double	Yes	0	
X	double	Yes		
Y	double	Yes		
Z	double	Yes		

ID	X	Y	Z
10	11.753	7.747	1.751
11	12.427	0.607	2.633
12	6.241	0.189	2.479
13	0.173	1.766	1.698
14	0.255	6.648	2.133
15	6.337	6.748	2.365
148	12.464	3.808	1.731

Abbildung 4.5: *Definition und Realisierung einer Tabelle in einer SQL-Datenbank, dargestellt am Beispiel einer Tabelle mit Festpunktkoordinaten.*

Auf der Seite des Sensor-Control-Moduls werden beim Einsatz eines Tachymeters als 3-D-Positionssensor die Festpunktkoordinaten zur Stationierung benötigt. Soll ein GPS-Empfänger als Sensor eingesetzt werden, so bedarf es der Parameter für eine Transformation der WGS84-Koordinaten in das jeweilige örtliche Baustellenkoordinatensystem. In Abbildung 4.5 ist als Beispiel eine Tabelle (hier: festpunkte_k1) mit den Festpunktkoordinaten zur Stationierung eines Tachymeters als Teil einer SQL-Datenbank (hier: Remo) dargestellt. Diese in Abbildung 4.5 dargestellte Tabellenstruktur ist für alle koordinatenbasierte Daten innerhalb des Positionierungs- und Führungssystems zu benutzen. Dazu gehören insbesondere die Soll-Trajektorien für eine automatische Führung, die Positionen für Absteck- und Positionierungsaufgaben und die vom Sensor gemessenen Ist-Trajektorien.

Für die anderen Daten des Positionierungs- und Führungssystems werden meist von dem Beispiel in Abbildung 4.5 abweichende Tabellenstrukturen benötigt. So sind z.B. für die Kalibrierparameter eines linearen Aktors auf einer Maschine der Nullpunkt und der Maßstab zu speichern. Diese Daten würden in dem Fall in einer Tabelle (hier z.B.: lineare_Aktoren) eine Zeile pro Aktor benötigen. Über die Aktor-ID, die dem jeweiligen Datensatz in der ersten Spalte vorangestellt wird, wären verschiedene Kalibrierparameter für verschiedene Aktoren zu unterscheiden.

Für die verschiedenen Tabellentypen werden innerhalb der Modul-Toolbox jeweils ein Lese- bzw. Schreibemodul bereitgehalten, das die Schnittstelle zwischen dem jeweiligen Daten-Array im Führungssystem und der jeweiligen Tabelle in der Datenbank realisiert.

Die Vorteile einer Datenbank als Datenspeicher sind die schnellen Zugriffszeiten, der standardisierte Datenaustausch sowie die Möglichkeit, von mehreren Prozessen gleichzeitig auf die Datenbank zugreifen zu können. So kann durch den Einsatz einer Datenbank ein standardisierter Datenfluss und größtmöglicher Komfort auch bei der Vorbereitung bzw. Weiterverarbeitung der Daten durch andere Programme gewährleistet werden.

4.3 Vorteile von LabView® als Entwicklungsumgebung

Für die softwaretechnische Realisierung des Positionierungs- und Führungssystems wurde LabView® von National Instruments gewählt. LabView® ist eine graphische 32bit-Entwicklungsumgebung, in der die Variablen und Arrays durch Datenleitungen repräsentiert werden. Dies ist, in Abbildung 4.6 (links) beispielhaft am Quellcode eines Moduls zur Speicherung von Tachymeterrohdaten (Hz, V und S) in einer Datenbank zu sehen.

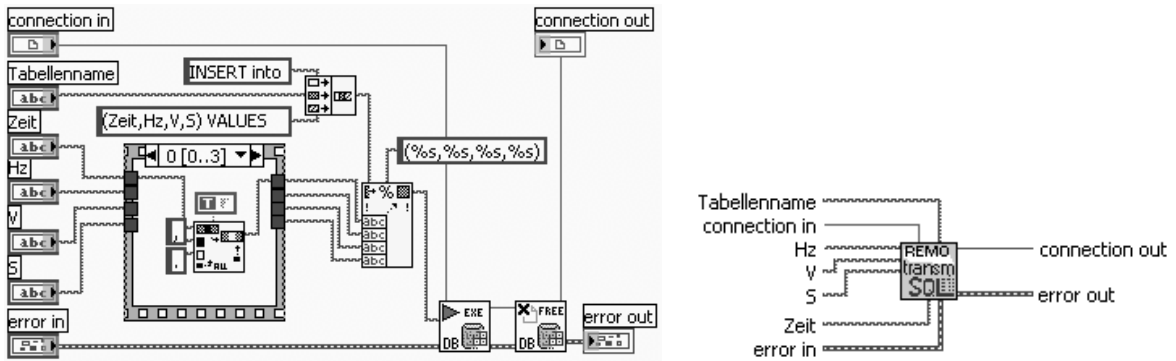


Abbildung 4.6: LabView®-Quellcode (links) u. Kapselung desselben in einem SubVi (rechts).

Die Vorteile von LabView® als Entwicklungsumgebung liegen in der guten Hardwareanbindung durch einen großen Umfang an Treibern und die sehr gute Unterstützung von modularer Programmierung. Die Abbildung 4.6 zeigt, wie der Quellcode (links) einzelner Programmteile in sogenannte SubVis (rechts) gekapselt werden kann. Diese SubVis können dann wiederum in übergeordneten Programmteilen verwendet werden. Der Aufbau einer Toolbox für das automatische Positionierungs- und Führungsmodul gestaltet sich somit sehr übersichtlich, und der spätere Austausch einzelner Module kann ohne tiefgreifende Programmierkenntnisse realisiert werden.

5 Tachymeter als prozessintegrierter 3-D-Positionssensor

Wie bereits mehrfach in dieser Arbeit erwähnt bedarf es für hochgenaue Positionierungs- und Führungsaufgaben im Baustellenumfeld der Integration zielverfolgender Tachymeter als 3-D-Positionssensoren in den automatischen Führungsprozess. Nur so ist es möglich, geometrische Führungen im Genauigkeitsbereich unter 1cm Standardabweichung zu realisieren. Die Leistungskriterien moderner zielverfolgender Tachymeter wurden bereits in Kapitel 2.3.2 als Teil der wissenschaftlichen Grundlagen dieser Arbeit beschrieben. In diesem Kapitel sollen, aufbauend auf den Leistungskriterien und Eigenschaften dieser Geräte, die resultierenden Problemfelder bei der Integration in einen automatischen Führungsprozess betrachtet und Lösungsansätze erarbeitet werden. Dabei stehen neben der erreichbaren Positionierungs- und Führungsgenauigkeit auch eine effiziente und praxistaugliche Arbeitsweise mit einem Tachymeter als Sensor im Fokus.

5.1 Automatisierung der Stationierungsaufgabe

Ein großer Unterschied bei der Nutzung eines zielverfolgenden Tachymeters im Gegensatz zu GPS als 3-D-Positionssensor besteht darin, dass ein Tachymeter nicht wie ein GPS-Empfänger nur eingeschaltet werden muss, um messbereit zu sein. Bevor aus den tachymeterinternen Polarkoordinaten (H_z , V und S) die Koordinaten des bewegten Reflektors im Baustellenkoordinatensystem berechnet werden können, bedarf es der Stationierung des Tachymeters. Im Rahmen der Stationierung werden die vier Transformationsparameter (X_0 , Y_0 , Z_0 und ϕ) berechnet. Dabei stellen X_0 , Y_0 und Z_0 den Nullpunkt des tachymeterinternen Polarkoordinatensystems im Baustellenkoordinatensystem und ϕ die Orientierungsunbekannte oder auch Rotation zwischen den beiden Koordinatensystemen dar. Die Berechnung dieser Transformationsparameter geschieht in der Regel im Rahmen einer Freien Stationierung nach Messung von mindestens drei Anschlusspunkten des Baustellenfestpunktfeldes. Als Grundlage der Berechnung bedarf es einer manuellen Zuordnung der gemessenen Polarkoordinaten zu dem jeweiligen Anschlusspunkt im Baustellenkoordinatensystem über die entsprechende Punktnummer.



Abbildung 5.1: Reflektor mit Schraubhülse zur effektiven und genauen Realisierung eines Baustellenfestpunktfeldes.

Die Anschlusspunkte des Baustellenfestpunktfeldes müssen zur Stationierung mit Reflektoren signalisiert werden. Es empfiehlt sich, das Baustellenfestpunktfeld, wie in Abbildung 5.1 zu sehen, durch Reflektoren mit Schraubhülsen zu realisieren. So entfällt der Aufbau von Stativen und damit die Notwendigkeit zur Berücksichtigung von Reflektorhöhen. Außerdem kann so die Signalisierung der Anschlusspunkte auch von fachfremden Personen effizient und genau durchgeführt werden.

Ziel ist es, das in Kapitel 4.2.1 beschriebene Sensor-Control-Modul mit der Funktionalität zur vollständig automatischen Stationierung eines Tachymeters auszustatten. Der Ablauf der

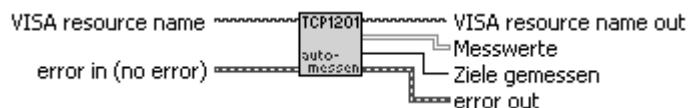
notwendigen Arbeiten, um das Tachymeters zur Zielverfolgung bereit zu machen, gestaltet sich dann folgendermaßen:

1. Aufstellen und horizontieren des Tachymeters an einem geeigneten Standpunkt
2. Starten des Sensor-Control-Moduls
3. Aufruf des Befehls zur automatischen Stationierung – Ergebnis abwarten
4. Anzielen des bewegten Reflektors und in den Lock-Modus schalten

Nach dem Durchlaufen dieser vier Arbeitsschritte ist das Führungssystem einsatzfähig. Im Folgenden werden die für eine automatische Stationierung erforderlichen Softwaremodule näher betrachtet.

5.1.1 Automatisches Messen aller möglichen Ziele

Nachdem das Tachymeter aufgestellt und horizontiert ist, wird die Kontrolle des Tachymeters vom Sensor-Control-Modul übernommen. Das Toolbox-Modul „Automessen“



führt, als Grundlage einer Stationierung, eine automatische Messung aller mit Reflektoren ausgestatteter Ziele durch. Dazu wird, ausgehend von der gerade aktuellen H_z -Richtung des Fernrohrs, der gesamte Horizont nach möglichen Zielen abgescannt. Hier kommt die automatische Grobzielsuche des jeweiligen Tachymeters zum Einsatz. Wird ein Ziel detektiert, werden nach der Feinanzielung die jeweiligen Polarkoordinaten (H_{z_i} , V_i und S_i) vom Tachymeter gemessen und vom Modul „Automessen“ der Reihe nach in einem Array gesammelt. Ist der gesamte Horizont abgescannt (400gon wurden überstrichen), ist die automatische Messung beendet und das Modul „Automessen“ gibt das Array mit den Messwerten zusammen mit der Anzahl gemessener Ziele aus. Außerdem werden vom Modul die Schnittstelle des Sensors (VISA resource name) und ein Fehlerarray (error in/out) durchgeschleift.

Aufgrund der automatischen Messung ist an dieser Stelle keine Zuordnung der gemessenen Ziele zu den jeweiligen Festpunkten möglich. Die Messwerte werden in der Messreihenfolge durchnummeriert. Auch kann es vorkommen, dass signalisierte Punkte des Festpunktfeldes aufgrund von Hindernissen nicht gemessen werden können oder sonstige Reflektoren, die nicht zum Festpunktfeld gehören, erfasst werden. Die resultierende Notwendigkeit der Zuordnung der Tachymetermessungen zu den jeweiligen Festpunkten stellt folglich die größte Herausforderung bei der Umsetzung einer automatischen Stationierung dar.

5.1.2 Zuordnung der Tachymetermessungen zu den Festpunkten

Die Zuordnung der Tachymetermessungen zu den jeweiligen Festpunkten erfolgt in dem Modul „Powerstation“, einem weiteren Modul aus der Toolbox. Dazu werden zunächst alle Festpunktkoordinaten des Baustellenfestpunktfeldes aus der Datenbank gelesen und zusammen mit den Messwerten des Moduls „Automessen“ an das Modul „Powerstation“

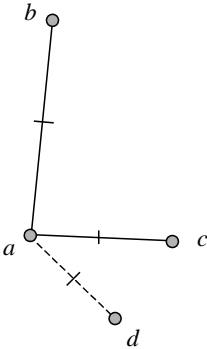
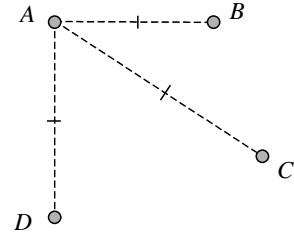
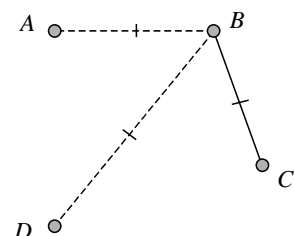
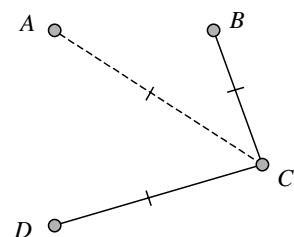
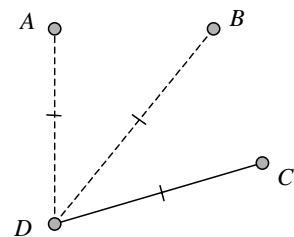


übergeben. Um die Tachymetermessungen den jeweiligen Festpunkten zuzuordnen, bedarf es in einem ersten Schritt der Umrechnung der Polarkoordinaten der Tachymetermessungen (H_{z_i} , V_i und S_i) in lokale kartesische Koordinaten (x_i' , y_i' und z_i') mit Hilfe des folgenden Gleichungssystems:

$$\begin{aligned}x_i' &= S_i \cdot \sin V_i \cdot \sin H_{z_i} \\y_i' &= S_i \cdot \sin V_i \cdot \cos H_{z_i} \\z_i' &= S_i \cdot \cos V_i\end{aligned}\tag{5.1}$$

In einem zweiten Schritt können jetzt zwischen den lokalen Koordinaten aus Tachymetermessungen und den Koordinaten des Baustellenfestpunktfeldes Strecken berechnet werden. Die Streckenlängen dienen dem Zuordnungsalgorithmus als Entscheidungsgrundlage. In Tabelle 5.1 ist die Logik einer Zuordnung beispielhaft dargestellt.

Tabelle 5.1: *Beispielhafte Zuordnung von Tachymetermessungen zu den entsprechenden Punkten des Baustellenfestpunktfeldes über Streckenlängen.*

Lokale Koordinaten (Tachymetermessungen)	Koordinaten des Baustellenfestpunktfeldes		Zuordnung über Streckenlängen
	Stecken von Punkt A		keine Zuordnung
	Stecken von Punkt B		$\overline{ac} = \overline{BC}$
	Stecken von Punkt C		$\overline{ab} = \overline{CD}$ $\overline{ac} = \overline{CB}$
	Stecken von Punkt D		$\overline{ab} = \overline{DC}$

Die Punkte in Tabelle 5.1 sind zur besseren Übersicht mit Buchstaben bezeichnet, wobei Kleinbuchstaben die lokalen Koordinaten aus den Tachymetermessungen und Großbuchstaben die Koordinaten des Baustellenfestpunktfeldes repräsentieren.

Die Zuordnung beginnt mit der Berechnung aller möglichen Strecken innerhalb der lokalen Koordinaten, wobei der erste gemessene Punkt (hier a) als Ausgangspunkt aller Strecken benutzt wird. Innerhalb der Festpunktkoordinaten werden die Strecken in allen möglichen Kombinationen berechnet. Dabei dient jeder Punkt einmal als Ausgangspunkt der Streckenberechnungen. In Tabelle 5.1 sind alle möglichen Streckenkombinationen in der mittleren Spalte dargestellt. Bei beispielsweise vier Festpunkten bedeutet dies vier Fälle an möglichen Streckenberechnungen.

Nach der Berechnung aller Strecken erfolgt anschließend eine Überprüfung, welche der berechneten Strecken zwischen den beiden Koordinatensätzen übereinstimmen. Das Ergebnis des Streckenvergleichs ist in Tabelle 5.1 in der rechten Spalte dargestellt. Für den ersten Fall (alle möglichen Strecken ausgehend von Punkt A) können keine gleichen Strecken gefunden werden. Für den zweiten und vierten Fall kann jeweils eine übereinstimmende Strecke gefunden werden, während der dritte Fall (alle möglichen Strecken ausgehend von Punkt C) zwei übereinstimmende Strecken ergibt.

Der Fall, der die meisten übereinstimmenden Strecken zwischen den beiden Koordinatensätzen ergibt, wird für eine erste Zuordnungsentscheidung herangezogen. Es ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Der Punkt a kann dem Punkt C zugeordnet werden, da die Streckenberechnungen innerhalb der lokalen Koordinaten vom Punkt a ausgehen, und es bei einer Streckenberechnung innerhalb der Festpunktkoordinaten ausgehend vom Punkt C die meisten Übereinstimmungen ergibt.
- Der Punkt b wird dem Punkt D und der Punkt c dem Punkt B zugeordnet, was direkt aus den gefundenen Streckenübereinstimmungen, ausgehend vom Punkt C , abgeleitet werden kann.
- Der Punkt d ist nicht Teil des Festpunktfeldes, da er an keiner Übereinstimmung teilnimmt.
- Der Punkt A ist nicht vom Tachymeter angemessen worden, da die Streckenberechnungen innerhalb der Festpunktkoordinaten, ausgehend vom Punkt A , keine Übereinstimmungen ergeben haben.

Mit diesem Ergebnis ist eine erste Zuordnung der Tachymetermessungen zu den jeweiligen Festpunktkoordinaten erfolgt. Um die Zuordnungsentscheidung robuster zu gestalten, wird die gesamte Zuordnungsprozedur sooft wiederholt, wie Punkte im lokalen Koordinatensystem vorhanden sind. Dabei würde jetzt der nächste Punkt der Tachymetermessungen (hier b) als Ausgangspunkt für die Streckenberechnungen innerhalb der lokalen Koordinaten gewählt werden. Eine Zuordnung gilt dann als erfolgreich, wenn mindestens drei Punkte dreimal erfolgreich zugeordnet werden konnten. Diese Punkte werden dann für die weitere Berechnung der Stationierung des Tachymeters herangezogen.

Die gesamte Zuordnungsprozedur basiert auf gleichen Strecken zwischen den Punkten des lokalen Koordinatensystems und dem Baustellenfestpunktfeld. Aufgrund der begrenzten Genauigkeit der Tachymetermessungen und des Baustellenfestpunktfeldes gibt es keine exakt gleichen Strecken zwischen den beiden Systemen. Deshalb werden zwei Strecken als gleich angesehen, wenn die jeweilige Differenz einen zu setzenden Grenzwert nicht überschreitet. Um den geeigneten Grenzwert zu setzen, muss die Genauigkeit der lokalen Koordinaten aus

Tachymetermessungen und die des Baustellenfestpunktfeldes wenigstens abgeschätzt werden. Die Genauigkeit des ungenauesten Systems wird erfahrungsgemäß sinnvollerweise mit dem Faktor drei multipliziert und ergibt so den gesuchten Grenzwert. Wird der Grenzwert zu klein gewählt, findet keine erfolgreiche Zuordnung statt. Hingegen führt ein zu groß gewählter Grenzwert eventuell zu einer fehlerhaften Zuordnung, die dann aber im Rahmen der anschließenden Berechnung der Stationierung anhand der Restklaffen erkannt wird.

5.1.3 Berechnung der Stationierung

Innerhalb des Moduls „Powerstation“ erfolgt im Anschluss an eine erfolgreiche Zuordnung der Tachymetermessungen zu den Festpunkten die Berechnung der Stationierung. Hierzu wird standardmäßig eine 3-D-Helmert-Transformation benutzt. Es ist aber auch möglich, den Maßstab zwischen den Tachymetermessungen und dem Festpunktfeld festzuhalten. Auf die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Berechnung der Stationierung soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Ergebnis der Berechnung sind die gesuchten Stationierungsparameter (X_0 , Y_0 , Z_0 und ϕ), die das Modul „Powerstation“ ausgibt, und mit deren Hilfe anschließend die Koordinaten eines bewegten Reflektors im Baustellenkoordinatensystem aus den Polarkoordinaten des Tachymeters berechnet werden können.

Aufgrund der hier vorgestellten Automatisierung der Stationierungsaufgabe wird die Integration eines Tachymeters in den Bauprozess wesentlich verbessert. Das Tachymeter kann nach dem Aufstellen und Horizontieren mit einem Knopfdruck messbereit gemacht werden. Eine Automation der Stationierung mit „PowerStation“ verhindert Punktverwechslungen und ermöglicht außerdem die Stationierung eines Tachymeters bei völliger Dunkelheit, da das manuelle Erkennen der signalisierten Festpunkte entfällt.

Die Dauer der automatischen Stationierung ist dabei im Wesentlichen von der Anzahl zu messender Ziele und der Bewegungsgeschwindigkeit des Tachymeters bei der Grobzielsuche abhängig. Der Zeitbedarf der Zuordnung über Streckenvergleiche und der Berechnung der Stationierung ist dagegen nicht nennenswert, solange die Gesamtanzahl der Festpunkte in der Datenbank die Marke von fünfzig Punkten nicht übersteigt. Bei Testmessungen in einem Festpunktfeld von zehn Punkten, wovon vier mit Reflektoren signalisiert waren und somit auch vom Tachymeter angemessen wurden, dauerte die automatische Stationierung ca. 40 Sekunden.

5.2 Überlegungen zur Positionsgenauigkeit im Bauprozess

Die Genauigkeit einer Positionsbestimmung bewegter Objekte mittels Tachymeter ist Gegenstand vieler Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen und als solche in den Grundlagen zu dieser Arbeit in Kapitel 2.3.2 hinreichend beschrieben. In diesem Kapitel soll die Positionsgenauigkeit speziell im Bezug auf automatisierte Bauprozesse betrachtet werden.

Die Automatisierung von Bauprozessen, wie sie in Kapitel 3.1 dieser Arbeit definiert worden sind, bedarf der hochgenauen Führung von Maschinen und Objekten mit Standardabweichungen unter einem Zentimeter. Diese hohen Genauigkeitsanforderungen bedingen, wie schon mehrfach in dieser Arbeit erwähnt, der Integration von zielverfolgenden Tachymetern als Positionssensoren in den jeweiligen Regelkreis. Zur erfolgreichen Erfüllung der Regelaufgabe muss die Positionsbestimmung dazu korrekt und zeitnah sein. Nur dann können in einem Regelkreis die Stellgrößen so berechnet werden, dass die Maschine oder das Objekt optimal geführt wird.

Neben den in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Einflüssen einer unzureichenden Synchronisierung der Subsysteme innerhalb eines Tachymeters haben besonders die relativ geringe Abtastrate und die zwangsläufig erhöhte Reflektorposition auf einer Maschine besonders negative Einflüsse auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung. Zur Verbesserung der Führungsqualität und als Grundlage einer Automatisierung der Querführung bewegter Objekte sollen diese beiden Aspekte im Folgenden näher betrachtet werden.

5.2.1 Auswirkung einer exponierten Reflektorposition auf die Qualität einer Positionsbestimmung.

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung mittels Tachymeters bezieht sich zunächst nur auf den bewegten Reflektor. Dieser wird, damit er von allen Seiten angezielt werden kann, meist an einer exponierten Stelle oberhalb der Maschinen- oder Objektaufbauten angebracht. In Abbildung 5.2 ist auf der linken Seite als Beispiel die Befestigung eines Reflektors an einem Grader dargestellt.

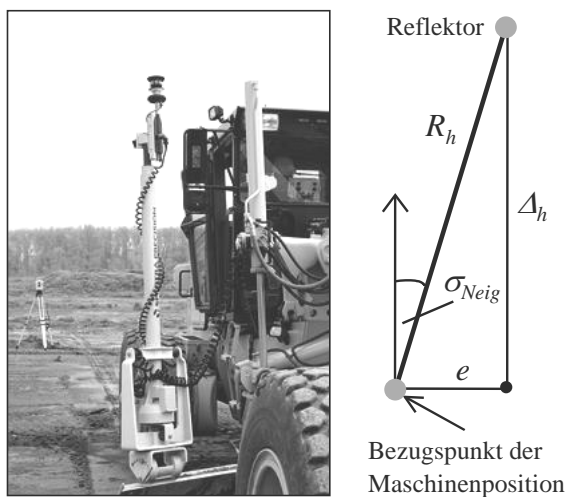
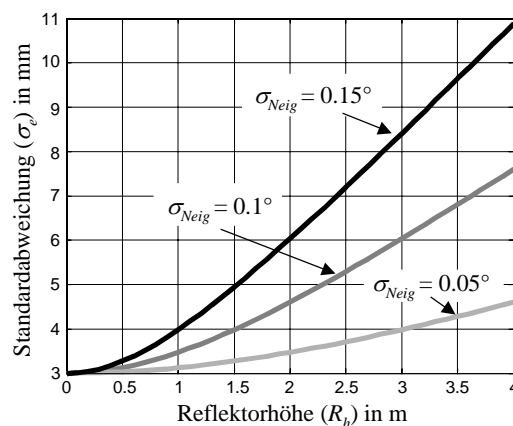


Abbildung 5.2: Exponierte Anordnung eines Reflektors (links) und die geometrische Beziehung (rechts).

Als Auswirkung der exponierten Reflektorposition hat die Neigung des Fahrzeugs oder Objekts entscheidenden Einfluss auf die Position des Bezugspunktes abgeleitet aus den Messungen zum Reflektor. Zur Umrechnung der Position des Reflektors in den Bezugspunkt des Maschinen- oder Objektkoordinatensystems bedarf es einer messtechnischen Erfassung der Neigungen mittels Neigungssensoren. Deren Genauigkeit ist letztendlich entscheidend für die Genauigkeit der berechneten Position des Bezugspunktes.

Abbildung 5.3: Genauigkeit der Positionsbestimmung in Abhängigkeit der Reflektorhöhe und der Genauigkeit der Neigungsmessung.



Auf die in der Praxis bereits angewandten Verfahren zur automatischen Höheneinstellung des Arbeitsgerätes einer Maschine wirkt sich die exponierte Position des Reflektors nur unwesentlich aus, da, wie aus Abbildung 5.2 rechts ersichtlich, die Unsicherheit in der Neigungsmessung σ_{Neig} nur mit dem Kosinus in die Höhenkomponente Δ_h eingeht. Anders verhält es sich, wenn eine automatische Querführung einer Maschine im Fokus der Betrachtungen steht. In diesem Fall wirkt sich eine Unsicherheit in der Neigungsmessung mit dem Sinus auf die Position des Bezugspunktes aus. Die resultierende Genauigkeit des Bezugspunktes in Querrichtung (σ_e) ist in Abbildung 5.3 in Abhängigkeit der Reflektorhöhe für drei unterschiedliche Genauigkeiten der Neigungsmessung dargestellt. Dabei wurde bei der Abschätzung zusätzlich eine Standardabweichung der Reflektorposition als Ergebnis der Tachymetermessung von $\sigma_{Tachy} = 3\text{mm}$ eingeführt.

Aus Abbildung 5.3 ist deutlich zu sehen, dass sich bereits kleine Unterschiede in der Genauigkeit der Neigungsmessung erheblich auf die Variation der Genauigkeit der Position auswirken. So beträgt die Standardabweichung der Position bei einer Reflektorhöhe von vier Metern bei einer Neigungsunsicherheit von $\sigma_{Neig} = 0,05^\circ$ nur 4,6 mm, während sie bei einer Neigungsunsicherheit von $1,5^\circ$ schon 11 mm erreicht. Generell lässt sich feststellen, dass die Genauigkeit der Position in Abhängigkeit der Reflektorhöhe stark abnimmt. Für eine automatische Führung einer Maschine oder eines Objektes im Genauigkeitsbereich unter 1 cm werden bereits bei einer Reflektorhöhe von 2 m und einer Neigungsmessung mit üblicher Genauigkeit ($\sigma_{Neig} = 0,1^\circ$) fast 50% der Genauigkeitsreserve eines automatischen Führungssystems durch die Positionsbestimmung des Bezugspunktes in Anspruch genommen.

5.2.2 Auswirkungen thermischer Last bei exponierter Reflektorposition

Neben der Neigung des Fahrzeugs, wie sie im vorangegangenen Kapitel untersucht worden ist, hat die thermische Last ebenfalls einen Einfluss auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung, abgeleitet aus den tachymetrischen Messungen zum exponiert angeordneten Reflektor. Wie aus Abbildung 5.2 ersichtlich, besteht der Reflektorträger im Wesentlichen aus einem Rohr mit dem Durchmesser b und der Höhe R_h . Dieses Rohr erwärmt sich bei Sonneneinstrahlung unterschiedlich. Gerade beim Einbau von langgestreckten Geometrien bewegt sich die Maschine nur in einer Richtung, so dass es zu nicht unwesentlichen Temperaturdifferenzen ΔT zwischen der sonnenzugewandten und sonnenabgewandten Seite kommt. Diese thermische Last führt zu einer Durchbiegung des Reflektorträgers und damit zu einer Auslenkung des Reflektors e_{therm} . Die Größenordnungen dieser Auslenkungen können nach folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$e_{therm} = \frac{R_h^2}{2 \cdot b} \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (5.2)$$

Für die Abschätzung wird davon ausgegangen, dass der Reflektorträger aus Stahl ist, und demnach einen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha = 10^{-5} \text{ 1/K}$ besitzt. In Abbildung 5.4 ist die Auslenkung des Reflektors e_{therm} in Abhängigkeit der Reflektorhöhe R_h für verschiedene thermische Lastfälle ΔT und Rohrdurchmesser b graphisch dargestellt.

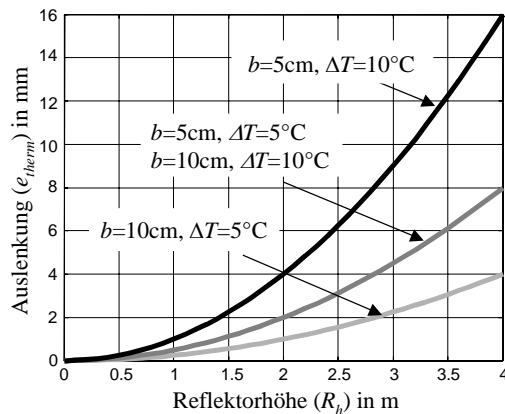


Abbildung 5.4: Auslenkung des Reflektors unter Einfluss thermischer Last (ΔT) auf den Reflektorträger in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers b und der Reflektorhöhe.

Aus Abbildung 5.4 ist ersichtlich, dass der thermische Einfluss im Fall eines Rohrdurchmessers von $b = 5\text{cm}$ und einer thermischen Last von $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ bei einer Reflektorhöhe von $R_h = 4\text{m}$ eine Auslenkung von $e_{therm} = 16\text{mm}$ zur Folge hat. Auch bei geringeren Lastfällen und einem dickeren Rohr bleibt der Einfluss im Millimeterbereich. So kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die thermischen Einflüsse auf die Positionsgenauigkeit wesentlichen Einfluss haben können und deshalb unbedingt beachtet werden müssen, zumal sie sich in der gleichen Größenordnung wie die zu erreichende Genauigkeit des automatischen Positionierungs- und Führungssystems bewegen.

5.2.3 Auswirkung der Totzeit auf die Regelabweichung

Werden zielverfolgende Tachymeter als Messeinrichtung in einem automatischen Führungssystem eingesetzt, so muss das dynamische Verhalten hinsichtlich Abtastrate und Delayzeit näher betrachtet werden. Die Delayzeit beschreibt dabei die benötigte Zeit von der Messung bis zur Verfügungsstellung der Position im Regelkreis. Für die weiteren Überlegungen soll die Delayzeit mit der Abtastrate zur Totzeit des Tachymeters zusammengefasst werden, da beide Effekte dazu führen, dass die Position des bewegten Objekts nicht in Echtzeit zur Verfügung gestellt wird. Das Vorhandensein einer Totzeit wirkt sich negativ auf das Regelziel aus, da die Regelabweichung e in Folge einer spät erkannten Störung wächst.

Bei einem automatischen Führungssystem besteht die Regelaufgabe, wie in Kapitel 2 eingeführt, darin, ein technisches System so zu beeinflussen, dass es einer vorgegebenen Soll-Trajektorie möglichst exakt folgt. Dabei gilt es, die durch Störeinflüsse auftretenden Abweichungen möglichst schnell aber ohne Überschwingen auszuregulieren. Die Aufgabe des Reglers besteht folglich darin, geeignete Stellgrößen in Abhängigkeit der durch die Störgrößen verursachten Regelabweichung e zu berechnen. Bei einer Folgeregelung, wie sie bei einem Führungssystem vorliegt, treten Regelabweichungen auch in Folge einer Richtungsänderung der Soll-Trajektorie auf. Deshalb muss die in den Regelkreis integrierte Messeinrichtung, hier ein zielverfolgendes Tachymeter, die Position des bewegten Objekts möglichst zeitnah ermitteln. Durch die vorhandene Totzeit führen Richtungsänderungen in der Soll-Trajektorie zwischen den Abtastzeitpunkten zwangsläufig zu einer Regelabweichung. Wie in Abbildung 5.5 dargestellt wirkt sich folglich eine Kurve wie eine Störgröße im Regelkreis aus.

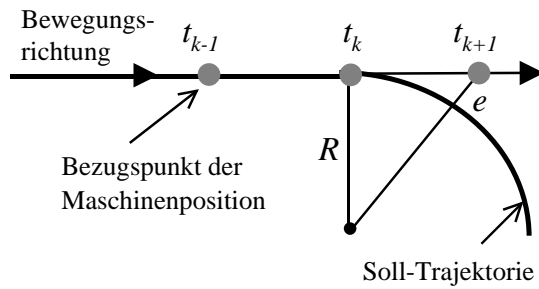


Abbildung 5.5: *Kurve in Soll-Trajektorie als Störgröße im automatischen Führungssystem.*

Jede Reglerauslegung stellt einen Kompromiss zwischen zwei Strategien dar. Zum einen kann einer Regelabweichung in Folge einer Störung schnell entgegengesteuert werden, was allerdings zwangsläufig zu Überschwingungen führt. Die andere Variante besteht darin, auftretende Störungen gedämpft auszugleichen, was dem Überschwingen entgegenwirkt. Da ein automatisch geführtes System aber auch engen Kurven möglichst exakt folgen soll, darf die Dämpfung nicht zu groß gewählt werden. Dies bedeutet im Gegenzug, dass die Regelabweichung in Folge von Störungen möglichst klein gehalten werden muss, um das System nicht zum Überschwingen anzuregen. Nach den obigen Ausführungen wird dazu eine Messeinrichtung mit einer kleinen Totzeit benötigt. Obwohl zielverfolgende Tachymeter mit bis zu 400ms (resultierend aus Abtastzeit und Delayzeit) eine recht große Totzeit aufweisen, werden sie für hochgenaue Führungsaufgaben eingesetzt, da es an alternativen hochgenauen 3-D-Positionssensoren mangelt.

Zur Veranschaulichung der Größenordnung einer durch die Totzeit verursachten Regelabweichung ist diese in Abbildung 5.6 in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit für drei verschiedene Totzeiten dargestellt. Den jeweiligen Totzeiten enthalten ist dabei ein Anteil aus einer Abtastzeit des Tachymeters von 10Hz. Weiterhin basiert die Berechnung auf einer Störgröße in Folge einer Kurve (siehe Abbildung 5.5) mit einem Radius von $R = 20\text{m}$.

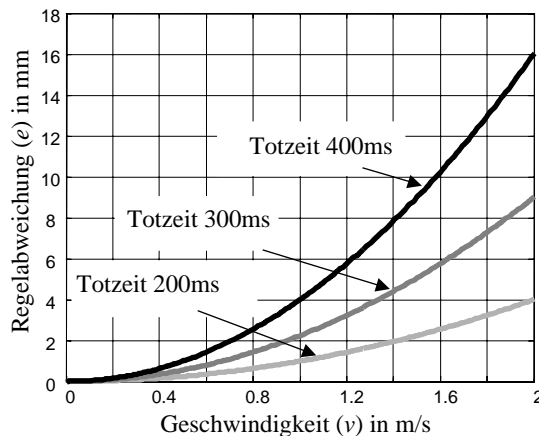


Abbildung 5.6: *Regelabweichung als Folge einer Kurve mit $R=20\text{m}$ als Störgröße.*

Aus Abbildung 5.6 ist ersichtlich, dass die Regelabweichung in Folge einer Kurve in der Soll-Trajektorie exponentiell in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des geführten Objekts anwächst. Bei einer mittleren Totzeit von 300ms wird bereits bei 1,5m/s eine Regelabweichung von 5mm, was 50% der Genauigkeitsreserve eines automatischen Führungssystems entspricht, erreicht. Gerade bei höheren Geschwindigkeiten wird deutlich, wie entscheidend die Totzeit für die Regelabweichung ist. Bei einer Geschwindigkeit von 2m/s verursacht eine Verdoppelung der Totzeit von 200ms auf 400ms eine Vervielfachung der Regelabweichung von 4mm auf 16mm. In Ergänzung der Abweichungen in Folge einer

Kurve als Störgröße, wie sie hier dargestellt worden ist, muss noch die Stochastik des Tachymeters mit in die resultierende Regelabweichung eingerechnet werden.

5.3 Zusammenfassende Beurteilung

Neben der traditionell guten Baustellentauglichkeit moderner Tachymeter konnte in diesem Kapitel gezeigt werden, dass durch spezielle Applikation, wie z.B. die automatische Stationierung (Kapitel 5.1), die Integration von Tachymetern in den Bauprozess weiter verbessert werden kann. Dabei ist eine gute Integration des relativ komplexen Sensors Tachymeter für die Akzeptanz und Effizienz zukünftiger automatischer Führungssysteme von entscheidender Bedeutung.

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung im kinematischen Modus ist, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, Gegenstand aktueller Forschung und auch die Gerätehersteller haben durch eine verbesserte Synchronisation zwischen den Subsystemen enorme Genauigkeitssteigerungen erzielt. Da aber für die automatische Führung die Genauigkeit des Bezugspunktes für die Position und nicht die Genauigkeit des Reflektors von Bedeutung ist, kommt der Anordnung des Reflektors am Objekt eine große Bedeutung zu. Wie in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 dargestellt, kommt es bei einer üblicherweise exponierten Anordnung des Reflektors über dem Fahrzeug oder Objekt zu großen Genauigkeitseinbußen durch thermische Einflüsse und Ungenauigkeiten bei der Neigungsmessung. Die Auswirkungen einer exponierten Reflektorposition wurden hier dargestellt - sie sollen aber im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht Gegenstand der Untersuchungen sein.

Wie die Betrachtungen in diesem Kapitel weiter gezeigt haben, besitzen Tachymeter mit ihrer geringen Abtastrate und ihrer somit resultierenden großen Totzeit ungünstige Eigenschaften für den Einsatz in einem Regelkreis zur automatischen Führung von Fahrzeugen oder Objekten. Die durch Richtungsänderungen in den Soll-Trajektorien verursachten Regelabweichungen sind bei der Nutzung eines Tachymeters als 3-D-Positionssensor nur für langsame Bewegungsgeschwindigkeiten kompensierbar. So werden in der Praxis Tachymeter bis jetzt nur für die Führung langsam bewegter Maschinen, z.B. Gleitschalungsfertiger mit Geschwindigkeiten von 1-2 cm/s, erfolgreich eingesetzt.

Die Geschwindigkeit des automatisch geführten Fahrzeugs oder Objekts zu erhöhen und dabei gleichzeitig eine hohe Führungsgenauigkeit im Bereich von Standardabweichungen unter 1 cm zu erreichen, wird Gegenstand der weiteren Untersuchungen dieser Arbeit sein. Dazu muss das Tachymeter mit seinen speziellen Eigenschaften, wie sie in diesem Kapitel aufgezeigt worden sind, besser in den Regelkreis des automatischen Führungssystems integriert werden, um die Auswirkungen der vorhandenen Totzeit zu kompensieren.

6 Einsatz des modularen Führungssystems im Experiment mit einem Modellfahrzeug

Wie bereits in der Einleitung beschrieben ist neben dem Entwurf und der Entwicklung auch die prototypische Realisierung eines automatischen modularen Positionierungs- und Führungssystems Ziel dieser Arbeit. So kann die Funktionsweise und der Systementwurf, basierend auf der in Kapitel 3 durchgeführten Anforderungsanalyse, getestet werden. Außerdem lassen sich die theoretischen Überlegungen zur besseren Integration eines zielverfolgenden Tachymeters als 3-D-Positionssensor in ein automatisches Führungssystem, als ein weiteres wichtiges Ziel dieser Arbeit, nur im Experiment überprüfen und optimieren.

Die prototypische Realisierung des Positionierungs- und Führungssystems soll den in Kapitel 3.1 definierten Anwendungsfall „Bahnführung von Arbeitsmitteln“ bedienen, da sich Anwendungen zur automatischen Führung von Fahrzeugen und Objekten entlang vorgegebener Soll-Trajektorien in der Analyse der notwendigen Funktionalitäten (siehe Kapitel 3.3) als am komplexesten erwiesen haben. Gerade die Funktionalitäten zur Automatisierung der Führungsaufgabe in Form einer hochgenauen Querregelung des geführten Systems stellen hohe Anforderungen an die Systemintegration, besonders wenn die Positionsbestimmung des bewegten Objekts allein auf den kinematischen Messungen eines zielverfolgenden Tachymeters beruhen soll.

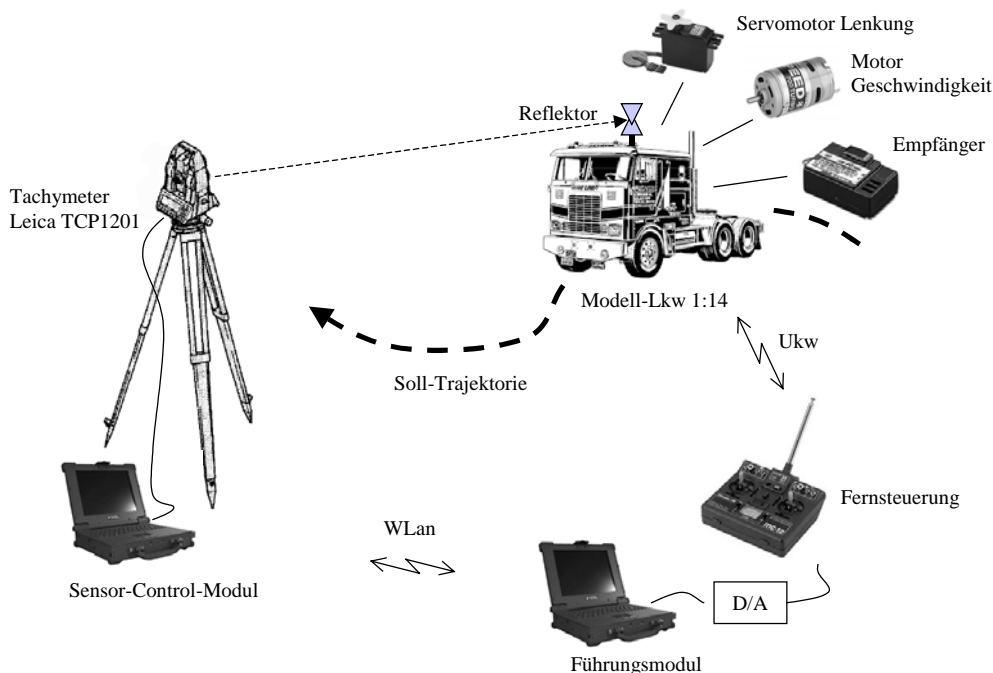


Abbildung 6.1: Hardwarekomponenten des automatischen Führungssystems im Experiment mit Modell-Lkw.

Im Rahmen dieser Arbeit wird als zu führendes Objekt ein Modell-Lkw (Maßstab 1:14) gewählt, da dieser gut unter Laborbedingungen betrieben werden kann und, wie der Versuchsaufbau im folgenden Kapitel zeigen wird, elegant in ein automatisches Führungssystem integrierbar ist. Des Weiteren lässt sich der Modell-Lkw leicht als dynamisches System modellieren und identifizieren, so dass sich das Experiment auf die wesentlichen Ziele, wie oben beschrieben, konzentrieren kann. Letztlich bietet die Führung des Modell-Lkws die Möglichkeit einer praxisnahen Modellierung, und die Ergebnisse der

experimentellen Untersuchungen lassen sich auf eine Vielzahl automatisierter Bauprozesse der Anwendungsgattung „Bahnführung von Arbeitsmitteln“ übertragen.

6.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau sieht vor, den Modell-Lkw automatisch auf einer vorgegebenen Trajektorie zu führen. Diese Querregelung entspricht einer 2-D-Führung, da die Höhenkomponente nicht beeinflusst wird. Zur Vereinfachung des Experiments fährt der Lkw auf einem ebenen Untergrund, was eine Messung und Berücksichtigung der Fahrzeugneigungen, wie sie in Kapitel 5.2.1 beschrieben werden, überflüssig macht. Außerdem wird die Geschwindigkeit für jedes Experiment vorgegeben, so dass keine Längsregelung realisiert werden muss. Dies entspricht durchaus den meisten Anwendungsfällen beim automatischen Führen von Arbeitsmitteln.

6.1.1 Hardwarekomponenten und deren Interaktion im Experiment

Die für den Versuchsaufbau notwendigen Hardwarekomponenten und deren Interaktion sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Das Sensor-Control-Modul und das Führungsmodul werden auf zwei unterschiedlichen Rechnern betrieben. Diese Systemvariante entspricht der Variante 2, wie sie in Kapitel 4.1.1 vorgestellt worden ist. Als 3-D-Positionssensor dient ein Tachymeter vom Typ Leica TCP1201, welches über eine serielle Kabelverbindung mit dem Sensor-Control-Modul-Rechner verbunden ist. Die Position des fahrenden Lkws wird über eine TCP/IP-Verbindung (siehe Kap 4.2.3) an das Führungsmodul übertragen. Der Modell-Lkw ist mit einem Reflektor ausgestattet, um die Position des fahrenden Lkws vom Tachymeter zu bestimmen.

Der Modell-Lkw als zu führendes dynamisches System verfügt über zwei Elektromotoren. Der eine Motor sorgt für den Antrieb und ist dazu stark untersetzt und kontinuierlich in seiner Drehzahl einstellbar. So sind konstante, fein einstellbare und auch extrem langsame Geschwindigkeiten möglich. Der zweite Motor steuert den Einschlagwinkel der Lenkung. Da es sich bei dem Experiment um eine Querregelaufgabe handelt, ist die Steuerung des zweiten Motors zu automatisieren. Der Einschlagwinkel der Lenkung δ_V stellt folglich die einzige veränderliche Stellgröße des dynamischen Systems dar.

Da der Modell-Lkw zu klein ist, um den Rechner mit dem Führungsmodul zu tragen und so die Motoren direkt anzusteuern, wie es im praktischen Anwendungsfall vorgesehen ist, wird eine Fernsteueranlage benutzt. Die Fernsteuerung, die eigentlich zur manuellen Steuerung des Lkws gedacht ist, wurde für das Experiment umgebaut und kann nun, wie aus Abbildung 6.1 ersichtlich, an den Rechner mit dem Führungsmodul angeschlossen werden. Die Spannungen, die im manuellen Betrieb durch die zwei Steuerknüppel und den angeschlossenen Potentiometern vom Mensch erzeugt werden, können jetzt direkt von einer im Rechner integrierten Digital-Analog-Wandelkarte vorgegeben werden. Was von der eigentlichen Nutzung der Fernsteueranlage übriggeblieben ist, ist die Übertragung der erzeugten Spannungspegel über Ukw-Funk an einen im Modell-Lkw integrierten Empfänger, der die Signale in Impulse, mit je nach anliegender Spannung unterschiedlichen Frequenzen, umwandelt und so die Motoren im Lkw steuert.

Das zielverfolgende Tachymeter folgt der durch die Motoren hervorgerufenen Bewegung des Modell-Lkws und bestimmt mit maximaler Abtastrate von ca. 10 Hz die Position des Reflektors auf dem Lkw. Das Führungsmodul berechnet auf Basis der vom Sensor-Control-Modul übertragenen Position zunächst die Abweichung des Lkws zur Soll-Trajektorie und

anschließend die Stellgröße (Lenkwinkel), um eine mögliche Abweichung zu kompensieren. Aufgrund der neuen Stellgröße wird die Bewegung des Lkws beeinflusst und der Regelkreis damit geschlossen.

6.1.2 Vorgabe der Soll-Trajektorie

Die Soll-Trajektorie wird dem Führungsmodul, wie in der Praxis üblich, als Polygon vorgegeben. Zur Speicherung der Trajektorie wird diese, wie im Kapitel 4.2.4 beschrieben, in der auf dem Rechner mit dem Führungsmodul laufenden SQL-Datenbank hinterlegt. Jeder Punkt der Soll-Trajektorie ist über eine ID eindeutig gekennzeichnet. Gleichzeitig gibt die ID die Speicherrichtung, also die Aufeinanderfolge, der Polygonpunkte vor. Da es sich bei dem hier beschriebenen Experiment um eine 2-D-Führungsaufgabe handelt liegt die Trajektorie auch nur in Form zweidimensionaler Koordinaten vor. Die Koordinaten repräsentieren dabei die Lage der Trajektorie im Baustellenkoordinatensystem. Da das Tachymeter, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, ebenfalls im Baustellenkoordinatensystem stationiert wird, ist eine direkte Beziehung der vom Tachymeter gemessenen Position des bewegten Modell-Lkws und der jeweiligen Soll-Trajektorie gegeben.

Für das Experiment mit dem Modell-Lkw wird eine ovale Soll-Trajektorie gewählt und durch die Trassierungselemente Gerade, Kreis und Klothoide beschrieben. In Abbildung 6.2 ist die Soll-Trajektorie dargestellt.

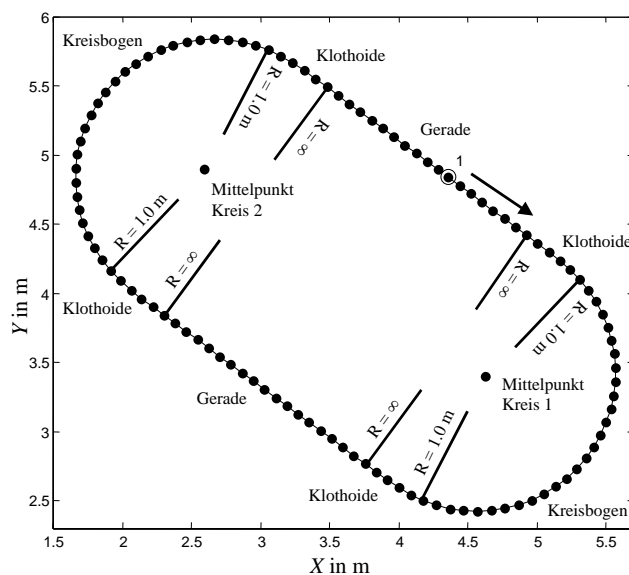


Abbildung 6.2: *Definition einer ovalen Soll-Trajektorie als Testszenario.*

Da die Trajektorie in das Labor transformiert werden muss, ist die Ausdehnung begrenzt. Die Radien der Kreisbögen haben einen Radius von $R = 1\text{m}$ und der Umfang der Trajektorie beträgt 11m . Die so definierte Soll-Trajektorie wird durch 110 Polygonpunkte, was einem Punktabstand von 10cm entspricht, repräsentiert und in der Datenbank des Führungssystems gespeichert.

6.1.3 Testszenario

Dem Testszenario liegt die in Kapitel 6.1.2 beschriebene Soll-Trajektorie zugrunde. Der Modell-Lkw soll mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,2\text{m/s}$ automatisch dem Verlauf der Trajektorie folgen. Die auftretenden Abweichungen zur Soll-Trajektorie, die

Regelabweichungen e , werden aufgezeichnet und dienen als Bewertungsgrundlage für die Qualität der automatischen Führung.

Gemäß der in Kap 5.2.3 untersuchten Auswirkungen einer Kurve als Störgröße sind bei dieser Geschwindigkeit und der oben definierten Soll-Trajektorie mit $R = 1\text{m}$, die in Tabelle 6.1 dargestellten Regelabweichung in Folge der Totzeit der Messeinrichtung zu erwarten.

Geschwindigkeit Modell-Lkw: $v = 0,2\text{m/s}$ Radius Kurve: $R = 1\text{m}$	
Totzeit der Messeinrichtung	Regelabweichung in Folge Kurve
200 ms	8 mm
300 ms	18 mm
400 ms	32 mm

Tabelle 6.1: *Erwartete Regelabweichungen in Folge der Kurven mit $R = 1\text{m}$ für verschiedene Totzeiten der Messeinrichtung.*

Das Tachymeter wird so aufgestellt, dass sich die Zielweiten im Bereich von 5 – 9m bewegen. Dieses Testszenario stellt mit den geringen Zielweiten und den sehr kleinen Radien der Soll-Trajektorie extrem hohe Anforderungen an das automatische Führungssystem. So kann mit Sicherheit behauptet werden, dass die Führungsqualität bei einer größeren Ausdehnung des Szenarios, wie es in der Realität wohl wahrscheinlicher ist, nur besser, nicht aber schlechter ausfallen wird.

6.2 Modell-Lkw als zu führendes dynamisches System

6.2.1 Mathematisches Modell

Im Rahmen der prototypischen Realisierung des modularen Führungssystems dient ein Modell-Lkw im Maßstab 1:14 als zu führendes dynamisches System. Der Modell-Lkw ist in Abbildung 6.3 (links) zu sehen. Die zweite Hinterachse wurde hochgelegt, so dass es sich bei dem Modell um ein zweiachsiges Fahrzeug mit einer gelenkten Vorderachse handelt. Die Ausdehnung des 9,4kg schweren Modells ist aus Abbildung 6.3 (rechts) ersichtlich.

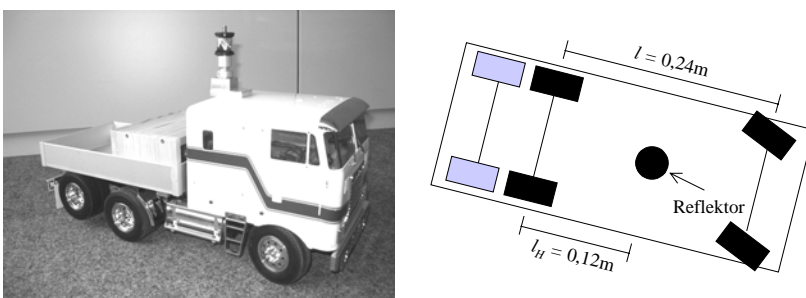


Abbildung 6.3: Modell-Lkw als dynamisches System.

Der Lkw verfügt über zwei Freiheitsgrade, Geschwindigkeit v und Vorderradeinschlagwinkel δ_v , die über die Stellung zweier Servomotoren festgelegt werden. Im Rahmen dieses Experiment wird ein Führungssystem zur Ausregelung der Querabweichung von einer Soll-Trajektorie aufgebaut. Deshalb wird die Geschwindigkeit während der automatischen Führung konstant gehalten. Somit verfügt das dynamische System Lkw über eine Stellgröße, nämlich den Lenkwinkel δ_v .

Das Bewegungsverhalten des Modell-Lkws kann mit Hilfe des geometrischen Einspurmodells beschrieben werden. Es wird zur Vereinfachung angenommen, dass die Räder der Vorder- und Hinterachse zu jeweils einem Rad zusammengefasst werden können. Das Modell ist in Abbildung 6.4 graphisch dargestellt und für langsame Geschwindigkeiten gültig.

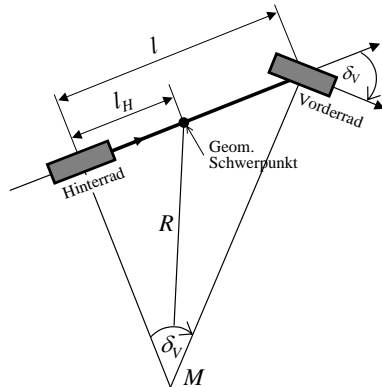


Abbildung 6.4: *Geometrisches Einspurmodell nach MITSCHKE, WALLENTOWITZ (2004).*

Weiterhin werden im Rahmen dieser Arbeit die dynamischen Einflussfaktoren auf die Fahrzeugbewegung, wie Schlupf und Drift, auf Grund der relativ geringen Fahrtgeschwindigkeiten vernachlässigt.

Auf Basis des vereinfachten Modells lässt sich folgender Zusammenhang zwischen dem Vorderradeinschlagwinkel δ_v und dem Radius des befahrenen Kreisbogens R herstellen:

$$\delta_v = \arctan \frac{l}{\sqrt{R^2 - l_H^2}} \quad (6.1)$$

Dabei ist l die Fahrzeuglänge und l_H die Entfernung der Hinterachse vom geometrischen Schwerpunkt des Fahrzeugs.

Der Bezugspunkt für die Fahrzeugposition wird im Rahmen dieses Versuchsaufbaus zur Vereinfachung in den Reflektormittelpunkt gelegt. Der Reflektor, als Bezugspunkt für die Positionsbestimmung mittels Tachymeter, befindet sich in der Mitte zwischen Vorder- und Hinterachse auf der Fahrzeuglängsachse.

6.2.2 Systemidentifikation - Kalibrierung der Lenkung

Zur automatischen Führung des Modell-Lkws ist es, wie in Kapitel 6.1.1 erläutert, erforderlich, einen mathematischen Zusammenhang zwischen dem vom Regler berechneten Vorderradeinschlagwinkel δ_v und der entsprechenden an die Fernsteueranlage anzulegenden Spannung V herzustellen. Es gilt der funktionale Zusammenhang

$$V = f(\delta_v). \quad (6.2)$$

Zur Bestimmung des funktionalen Zusammenhangs bedarf es einer Kalibrierung der Lenkung des Modell-Lkws – das System ist zu identifizieren. Dazu sind folgende Schritte erforderlich:

- Abfahren verschiedener Kreise mit unterschiedlichen, fest eingestellten Spannungswerten; dabei Aufzeichnung der jeweils befahrenen Trajektorie mittels zielverfolgendem Tachymeter.
- Schätzung des jeweiligen Radius für jede Kreisfahrt mittels einer Ausgleichung nach dem Gauss-Helmert-Modell. Für jeden eingestellten Spannungswert ergibt sich so ein Radius des jeweils befahrenen Kreises.

- Berechnung des jeweiligen Vorderradeinschlagwinkels aus den Radien nach Gleichung 6.1 unter Berücksichtigung des mathematischen Modells des Lkws.
- Schätzung der Funktionsparameter zwischen Vorderradeinschlagwinkel und Spannung mittels Regression.

Zur Schätzung des jeweiligen Radius R_k aus den abgefahrenen Kreisen mittels einer Ausgleichung nach dem Gauss-Helmert-Modell wird folgendes funktionales Modell angesetzt:

$$R_k^2 = (x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2 \quad (6.3)$$

Dabei stellen x_i und y_i die mittels Tachymeter gemessenen Punkte und x_m und y_m die jeweiligen Kreismittelpunkte dar.

Die Designmatrix A und die Bedingungsgleichungen B gestalten sich folgendermaßen:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \\ \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \cdot (x_1 - x_m^0) & 2 \cdot (y_1 - y_m^0) & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 2 \cdot (x_2 - x_m^0) & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial l_i} \\ \frac{\partial f_i}{\partial l_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \cdot (x_1 - x_m^0) & -2 \cdot (y_1 - y_m^0) & -2 \cdot R_k^0 \\ -2 \cdot (x_2 - x_m^0) & -2 \cdot (y_2 - y_m^0) & -2 \cdot R_k^0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Der Widerspruchsvektor w der Ausgleichung ergibt sich zu

$$w = \begin{bmatrix} (x_1 - x_m^0)^2 + (y_1 - y_m^0)^2 - R_k^{02} \\ (x_2 - x_m^0)^2 + (y_2 - y_m^0)^2 - R_k^{02} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Die Näherungswerte x_m^0 , y_m^0 und R_k^0 der Kreisparameter werden durch drei beliebige Punkte des jeweils abgefahrenen Kreises berechnet.

Tabelle 6.2: An die Fernsteuerung angelegte Spannungen und die resultierenden Vorderradeinschlagwinkel der jeweils abgefahrenen Kreisbögen.

Rechtsbögen		
Messung	Spannung in V	Vorderrad- einschlagwinkel in rad
1	1.111	0.3129
2	1.366	0.2646
3	1.621	0.2027
4	2.131	0.1044
5	2.386	0.0570
6	2.641	0.0149

Linksbögen		
Messung	Spannung in V	Vorderrad- einschlagwinkel in rad
7	3.125	-0.0549
8	3.380	-0.1039
9	3.635	-0.1493
10	3.880	-0.1875
11	4.145	-0.2399
12	4.400	-0.2885
13	4.680	-0.3222

Nach der Berechnung des jeweiligen Vorderradeinschlagwinkels aus den geschätzten Radien ergeben sich für den Modell-Lkw die von BEETZ (2003) in Vorbereitung auf diese Arbeit ermittelten und in Tabelle 6.2 dargestellten Werte.

Die Spannungen lassen sich nun, wie in Abbildung 6.5 dargestellt, über den jeweiligen Vorderradeinschlagwinkeln auftragen. Die Kennlinie zeigt eine lineare Beziehung zwischen den beiden Größen. Folglich kann der gesuchte funktionale Zusammenhang durch eine lineare Regression ermittelt werden.

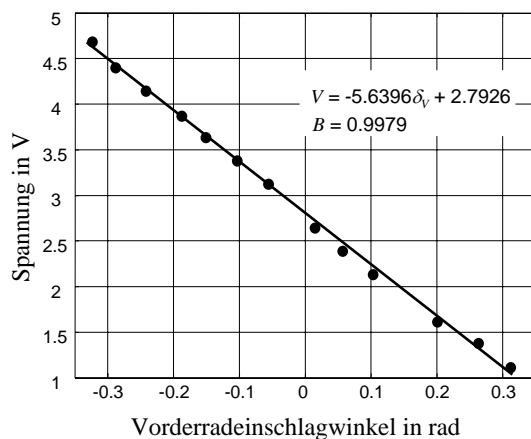


Abbildung 6.5: Kennlinie der Lenkung des Modell-Lkws.

Wie aus Abbildung 6.5 weiter zu erkennen ist, weichen die einzelnen Werte nur geringfügig von der linearen Regressionsgeraden ab. Zur Bewertung der Regressionsgüte wird das Bestimmtheitsmaß B als Quadrat des Korrelationskoeffizienten zwischen den Messwerten, Vorderradeinschlagwinkel und Spannungen) berechnet. Die Regression ergibt in diesem Fall ein Bestimmtheitsmaß von $B = 0,9979$, was eine sehr gute Approximationsgüte widerspiegelt. Für die Lenkung des Modell-Lkws ergibt sich die folgende lineare Beziehung zwischen dem Vorderradeinschlagwinkel und der anzulegenden Spannung:

$$V = -5,6396 \cdot \delta_v + 2,7926 \quad (6.7)$$

Zur korrekten Steuerung des Modell-Lkws mittels der Beziehung in Gleichung 6.7 müssen Linkskurven durch einen negativen und Rechtskurven durch einen positiven Vorderradeinschlagwinkel δ_v beschrieben werden.

Die Kalibrierung der Fahrgeschwindigkeit des Lkws gestaltet sich wesentlich einfacher als die der Lenkung. Da die Geschwindigkeit des Lkws während des Experiments konstant ist, muss hier nur der einer Geschwindigkeit von $0,2\text{m/s}$ entsprechende Spannungswert ermittelt werden. Aus der Zeitdifferenz und dem Abstand benachbarter Positionen, gemessen mit dem Tachymeter, kann folgende Beziehung ermittelt werden:

$$0,2\text{m/s} \cong 2,9V \quad (6.8)$$

Die Nullstellung der Geschwindigkeit ($v = 0\text{m/s}$) liegt bei $2,3V$.

6.3 Realisierung des automatischen Führungssystems

Das automatische Führungssystem wird analog zum Systementwurf, in Kapitel 4 dargestellt, realisiert. Das Sensor-Control-Modul und das Führungsmodul stellen dabei zwei unabhängige aber interagierende Programme dar. Das Sensor-Control-Modul wurde bereits mit seinen wesentlichen Komponenten in Kapitel 5 vorgestellt, weshalb in diesem Kapitel besonderes Augenmerk auf das Führungsmodul gerichtet wird. Der Fokus dieses Kapitels liegt auf den

mathematischen Grundlagen des Führungsmoduls, wie z.B. der Berechnung der Regelabweichung e und dem Reglerentwurf. Auf die softwaremäßige Realisierung, wie z.B. den Quellcode soll im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden. Der interessierte Leser sei auf GLÄSER (2003) verwiesen.

6.3.1 Realisierung des Führungsmoduls mit LabView®

Zur Umsetzung des Systementwurfs wird, analog zum Sensor-Control-Modul, LabView® als Entwicklungsumgebung gewählt. Unter der Zielsetzung, ein automatisches Führungssystem zur Steuerung des Modell-Lkws zu realisieren, bedarf es im Wesentlichen der Implementierung folgender Funktionen:

- Datenbankanbindung zur Übernahme der Soll-Trajektorie, des Fahrzeugmodells und zur Speicherung der befahrenen Ist-Trajektorie zum Zwecke der Dokumentation
- Hardwareanbindung zur Kontrolle der Aktoren (Lenkung und Geschwindigkeit des Modell-Lkw)
- Kommunikation mit dem Sensor-Control-Modul und Übernahme der Positionsnachrichten
- Berechnung der Regelabweichung zwischen aktueller Position und Soll-Trajektorie
- Berechnung der Stellgröße zur zielgerichteten Beeinflussung des Modell-Lkws durch das Regelmodul
- Visualisierung des automatischen Führungsvorgangs

Die Benutzeroberfläche des Führungsmoduls ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Während der Initialisierungsphase nach dem Programmstart werden alle notwendigen Einstellungen zur Integration des Führungsmoduls in die System- und Datenumgebung getätigt.

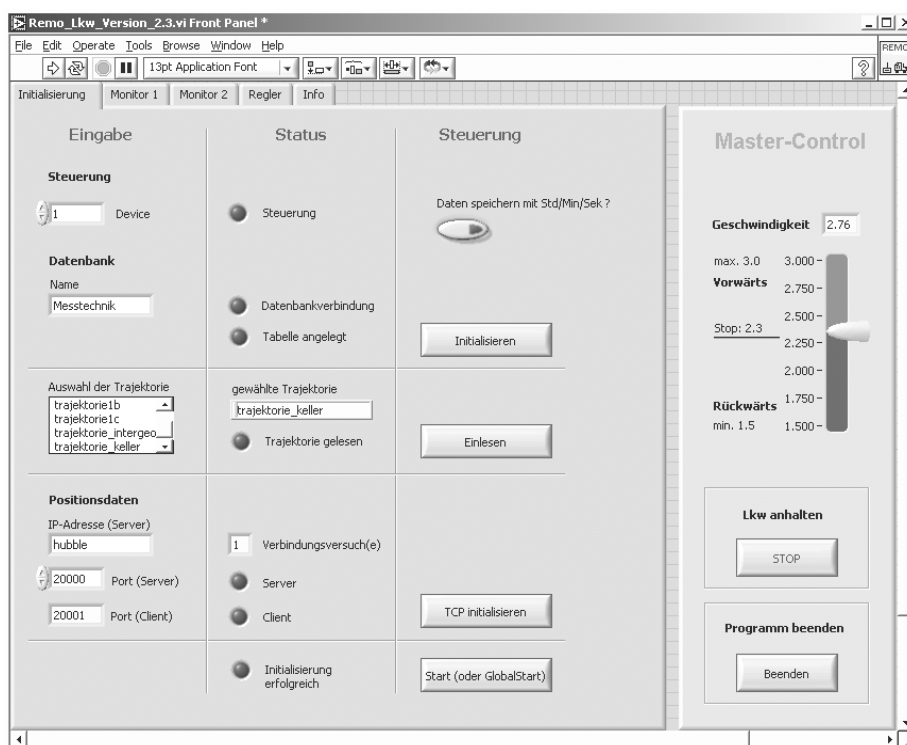


Abbildung 6.6: Benutzeroberfläche des Führungsmoduls während der Initialisierungsphase.

Wie Abbildung 6.6 zeigt, bedarf es zunächst zur Initialisierung der Eingabe der „Hardware-Device-Nummer“, um die Digital-Analog-Wandelkarte zu adressieren. Weiterhin ist der Name der Datenbank zu wählen. Aus der Datenbank ist im nächsten Schritt die Tabelle mit der Soll-Trajektorie zu wählen. Gleichzeitig wird im Hintergrund eine neue Tabelle zur Aufnahme der befahrenen Ist-Trajektorie angelegt. Die Kommunikation mit dem Sensor-Control-Modul erfolgt, wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, über eine TCP/IP-Verbindung, wobei das Führungsmodul als Client fungiert. Bevor sich nun das Führungsmodul beim Sensor-Control-Modul anmelden kann, muss letzteres gestartet worden sein. Die IP-Adresse des Servers bzw. der Rechnernahme wird vom Benutzer zusammen mit der Port-Nummer im Führungsmodul eingegeben. Im Zuge des Kommunikationsaufbaus bekommt das Führungsmodul eine Client-Port-Nummer zugewiesen, womit die Kommunikation aufgebaut ist.

Nach erfolgreicher Initialisierung des Führungsmoduls kann die automatische Steuerung des Modell-Lkws mit dem „Start-Button“ gestartet werden. Die Bedienoberfläche des Moduls wechselt daraufhin automatisch in den Automatik-Monitor, wie er in Abbildung 6.7 zu sehen ist.

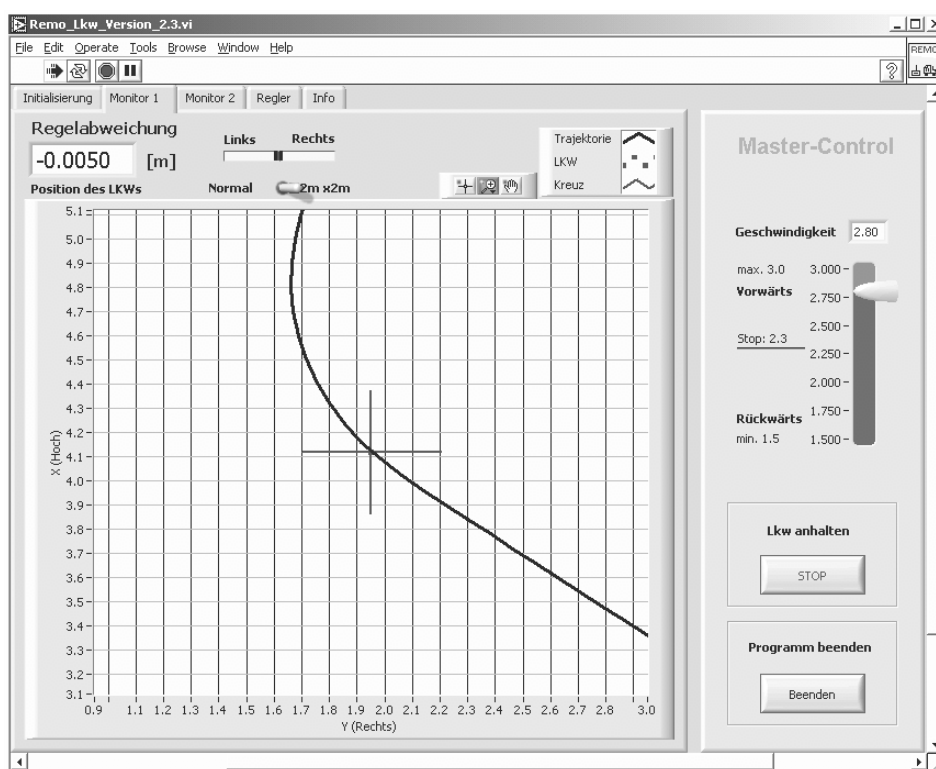


Abbildung 6.7: Benutzeroberfläche des Führungsmoduls während des Automatikbetriebs.

Während des Automatikbetriebs bekommt der Benutzer einen visuellen Eindruck von der Soll-Trajektorie und der aktuellen Ist-Position. Gleichzeitig wird die aktuelle Regelabweichung oben links angezeigt. Wie bereits in Kapitel 6.1.1 erwähnt behält der Benutzer die manuelle Kontrolle über die Geschwindigkeit des Lkws und kann diesen bei Problemen auch sofort anhalten.

6.3.2 Entwurf eines PI-Zustandsreglers mit Beobachter

Aufbauend auf den in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen der Systemtheorie und der Regelungstechnik wird im Folgenden ein Regler für das Führungssystem zur automatischen Steuerung des Modell-Lkws entworfen. Da der Modell-Lkw nur über eine Stellgröße, den Vorderradeinschlagwinkel δ_v , verfügt, handelt es sich um ein Eingrößensystem. Wie in Kapitel 2.2.2 eingeführt kann das dynamische Verhalten eines Eingrößensystems im Zustandsraum vollständig durch die Systemmatrix $A(n,n)$, den Steuervektor $b(n,1)$, den Ausgangsvektor $c'(1,n)$ und der Störmatrix $G(n,q)$ beschrieben werden. Der Zustandsvektor $x(n,1)$ des Modell-Lkws als dynamisches System ist folgendermaßen aufgebaut:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \alpha \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - \text{Koordinate der aktuellen Position} \\ Y - \text{Koordinate der aktuellen Position} \\ \text{Richtung der Fahrzeuglängsachse} \\ \text{Geschwindigkeit} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Wie in Kapitel 2.2.6 grundlegend eingeführt wird der Regler zur automatischen Führung des Modell-Lkws im Zustandsraum entworfen. Das Blockschaltbild des Zustandsreglers ist in Abbildung 6.8 dargestellt.

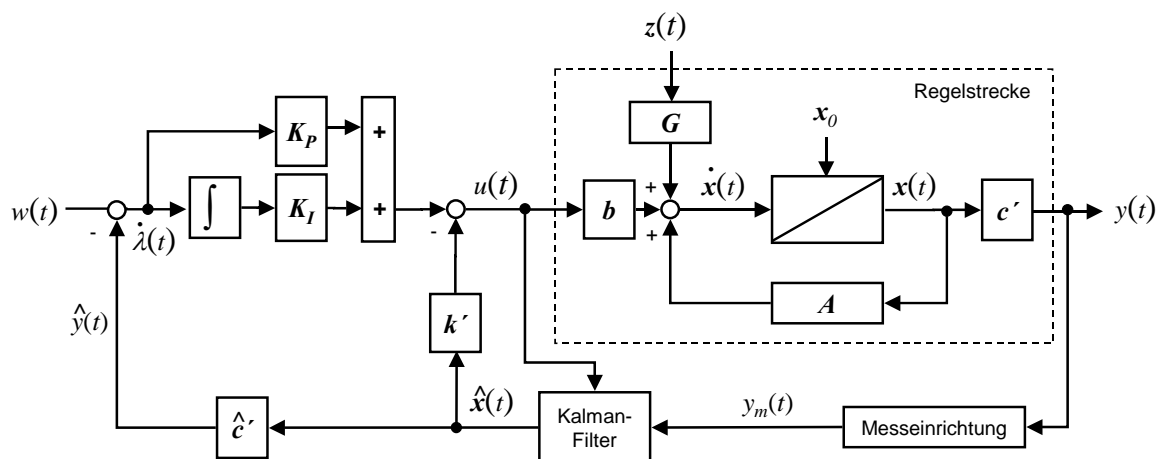


Abbildung 6.8: *PI-Zustandsregler mit Ausgangsrückführung und KALMAN-Filter als Beobachter.*

Damit der Modell-Lkw der Trajektorie folgen kann, bedarf es dem Aufbau einer Folgeregelung. Dazu muss der Zustandsregler durch einen Vorfilter ergänzt werden. In Abbildung 6.8 ist auf der linken Seite der Vorfilter in Form eines PI-Reglers dargestellt. Der P-Anteil des Vorfilters ermöglicht ein Folgen der Trajektorie, während der I-Anteil dafür sorgt, dass verbleibende Restabweichungen zur Soll-Trajektorie ausgeregelt werden können. Die Theorie zu dieser Entwurfsmethode ist in Kapitel 2.2 ausführlich beschrieben.

6.3.3 Mathematische Umsetzung des Führungsmoduls

Die Umsetzung des in Kapitel 6.3.2 dargestellten PI-Zustandsregler mit Beobachter bedarf einer Reihe von ineinander greifenden Rechenmodulen. Der Ablauf der mathematischen Umsetzung folgt dem in Abbildung 6.9 dargestellten Flussdiagramm. Zur Umsetzung des Regelkreises auf einem digitalen Prozessrechner bedarf es dabei einem Übergang von der

kontinuierlichen Darstellung in eine diskrete Darstellung. Die einzelnen Epochen k_i des Regelkreises werden mit einem Zeitabstand Δt durchlaufen.

Die Beschreibung der Rechenschritte im Regelkreis beginnt, wie in Abbildung 6.9 oben links dargestellt, mit dem Eingang der Position des bewegten Lkws, bestimmt aus den Tachymetermessungen. In einem ersten Schritt wird die Position einem KALMAN-Filter zugeführt, um den Systemzustand \hat{x} zu schätzen. Das KALMAN-Filter stellt somit zum Einen eine geglättete Ist-Position des Lkws zur Verfügung und zum Anderen dient der geschätzte Systemzustand als Basis der Zustandsrückführung. Im Rahmen dieser wird in einem nächsten Rechenschritt mit Hilfe des Rückführvektors k' der Anteil der Stellgröße u_{ZR} berechnet.

Ein weiteres Rechenmodul benutzt den geschätzten Systemzustand, um in Verbindung mit der Soll-Trajektorie (Führungsgröße) die Regelabweichung e zu berechnen. Diese stellt den Abstand des Modell-Lkws normal zur Soll-Trajektorie dar und dient dem nächsten Rechenmodul zur Berechnung der Stellgröße u_{PI} als Eingang.

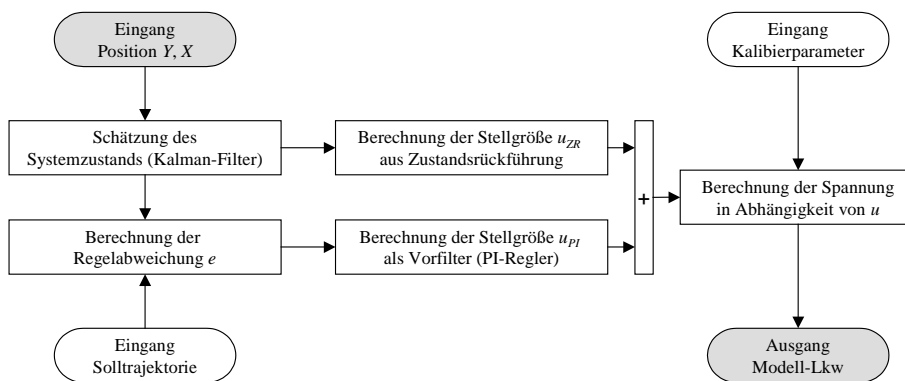


Abbildung 6.9: Ablauf der Rechenschritte im Führungsmodul.

Damit sind beide Komponenten der Stellgröße berechnet und können addiert werden. Als letzten Rechenschritt muss die Stellgröße mit Hilfe der Kalibrierfunktion der Lenkung des Lkws in einen Spannungswert umgerechnet werden, der dann an die Fernsteueranlage des Modell-Lkws übertragen wird.

Die einzelnen Rechenmodule sollen im Folgenden dargestellt werden.

Kalmanfilter als Beobachter

Durch Integration des Tachymeters als einzige Messeinrichtung wird die Geschwindigkeit und die Richtung des Modell-Lkws nicht gemessen. Da diese Größen aber dennoch im Regelkreis zurückgeführt werden sollen, wird wie in Kapitel 2.2.7 eingeführt, ein KALMAN-Filter als Beobachter in den Regelkreis integriert. Im Rahmen der Anwendung im Regelkreis des Führungssystems wird ein dynamisches KALMAN-Filter mit Stellgröße, wie es in Kapitel 2.2.7 vorgeschlagen wird, verwendet. Für die Querregelung des Modell-Lkws, oder allgemein eines Fahrzeugs, sehen die erweiterten, teilweise nicht linearen Systemgleichungen des KALMAN-Filters folgendermaßen aus:

$$\begin{pmatrix} X_{k+1} \\ Y_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_k \\ Y_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \alpha_k & \sin \alpha_k \\ -\sin \alpha_k & \cos \alpha_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{v_k \Delta t}{\Delta \alpha_{k+1}} (1 - \cos \Delta \alpha_{k+1}) \\ \frac{v_k \Delta t}{\Delta \alpha_{k+1}} \sin \Delta \alpha_{k+1} \end{pmatrix}$$

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + \Delta \alpha_{k+1} \quad (6.10)$$

$$v_{k+1} = v_k$$

Als Bewegung des Fahrzeugs wird hier eine Kreisbewegung modelliert, wie es in EICHORN (2005) vorgeschlagen wird. Mit $\Delta \alpha$ wird die Änderung der Fahrzeugorientierung als Stellgröße in das KALMAN-Filter eingeführt, um das dynamische Verhalten des Filters zu verbessern. So kann das Filter auch bei stärkeren Richtungswechseln ohne großes Überschwingen folgen. Die Änderung der Fahrzeugorientierung $\Delta \alpha$ ergibt sich dabei aus der Stellgröße im Regelkreis (Vorderradeinschlagwinkel δ_v) unter Berücksichtigung von Gleichung 6.1 und bekannter Geschwindigkeit des Fahrzeugs v zu:

$$\Delta \alpha = \begin{cases} 0 & \text{für } \delta_v = 0 \\ \frac{v \cdot \Delta t}{\sqrt{\left(\frac{l}{\tan \delta_v}\right)^2 + l_H^2}} & \text{für } \delta_v \neq 0 \end{cases} \quad (6.11)$$

Die lineare Systemgleichung des KALMAN-Filters zur Berechnung des prädizierten Zustands \bar{x}_{k+1} ergibt sich in allgemeiner Form nach Einführung der Transitionsmatrix \mathbf{T} , der Steuermatrix \mathbf{B} und der Störmatrix \mathbf{G} zu:

$$\bar{x}_{k+1} = \mathbf{T} \cdot \hat{x}_k + \mathbf{B} \cdot u_k + \mathbf{G} \cdot z_k \quad (6.12)$$

Die Störgröße z_k repräsentiert die zufällige Abweichung in der Querrichtung zwischen zwei Epochen. Werden die nichtlinearen Systemgleichungen (6.12) im Betriebspunkt linearisiert, ergeben sich unter Berücksichtigung der Störgröße z_k nachfolgende linearisierte, gestörte Systemgleichungen:

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} \tilde{X}_{k+1} - \bar{X}_{k+1} \\ \tilde{Y}_{k+1} - \bar{Y}_{k+1} \\ \tilde{\alpha}_{k+1} - \bar{\alpha}_{k+1} \\ \tilde{v}_{k+1} - \bar{v}_{k+1} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & \hat{v}_k \Delta t \frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \sin \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} & -\Delta t \frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \cos \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} \\ 0 & 1 & \hat{v}_k \Delta t \frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \cos \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} & \Delta t \frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \sin \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{X}_k - \hat{X}_k \\ \tilde{Y}_k - \hat{Y}_k \\ \tilde{\alpha}_k - \hat{\alpha}_k \\ \tilde{v}_k - \hat{v}_k \end{pmatrix} \\
&+ \begin{pmatrix} \hat{v}_k \Delta t \left(\frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1})}{\Delta\alpha_{k+1}} + \frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \cos \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}^2} \right) \\ \hat{v}_k \Delta t \left(\frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1})}{\Delta\alpha_{k+1}} - \frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \sin \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}^2} \right) \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\tilde{\alpha}_{k+1} - \Delta\alpha_{k+1} \end{pmatrix} \\
&+ \begin{pmatrix} -\frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \cos \hat{\alpha}_k}{2\Delta\alpha_{k+1}} \Delta t^2 \\ \frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \sin \hat{\alpha}_k}{2\Delta\alpha_{k+1}} \Delta t^2 \\ 0 \\ \Delta t \end{pmatrix} z_k \tag{6.13}
\end{aligned}$$

Die Herleitung der Transitionsmatrix \mathbf{T} , der Steuermatrix \mathbf{B} und der Störmatrix \mathbf{G} ist in EICHORN (2005) ausführlich dargestellt.

Mit den Gleichungen (6.10) bis (6.13) sind die Systemgleichungen des diskreten KALMAN-Filters für das Bewegungsmodell des Modell-Lkws festgelegt. Die Messgleichungen ergeben sich mit

$$\begin{pmatrix} X_{Tachy} \\ Y_{Tachy} \end{pmatrix}_{k+1} - \begin{pmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \end{pmatrix}_{k+1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{Y} \end{pmatrix}_{k+1} \tag{6.14}$$

recht übersichtlich, da bei der automatischen Führung des Lkws nur die zweidimensionale Position, als Beobachtung vorliegt. Die Orientierung der Fahrzeuglängsachse α und die Geschwindigkeit v , als weitere Zustandsgrößen des Lkws, können nicht gemessen werden. Die Schätzung dieser Zustandsgrößen erfolgt deshalb ausschließlich im KALMAN-Filter ohne Stützung durch entsprechende Messungen.

Zur Initialisierung des Kalman-Filters wird eine zusätzlich Epoche k_0 benötigt, so dass sich Anfangsorientierung α_1 und Anfangsgeschwindigkeit v_1 als erste Näherung aus zwei aufeinanderfolgenden Positionsbestimmungen des Modell-Lkws ergibt:

$$\alpha_1 = \arctan \left(\frac{X_{Tachy,1} - X_{Tachy,0}}{Y_{Tachy,1} - Y_{Tachy,0}} \right) \tag{6.15}$$

$$v_1 = \frac{\sqrt{(X_{Tachy,1} - X_{Tachy,0})^2 + (Y_{Tachy,1} - Y_{Tachy,0})^2}}{\Delta t} \tag{6.16}$$

Das stochastische Modell des Kalman-Filters zur Epoche t_{k+1} ergibt sich bei Vernachlässigung von Korrelationen zu:

$$\Sigma_{LL,k+1} = \left(\begin{array}{ccc|c} \Sigma_{\hat{x}\hat{x},k} & 0 & 0 & 0 \\ & \Sigma_{uu,k} & 0 & 0 \\ & & \Sigma_{zz,k} & 0 \\ \hline & & & \Sigma_{LL,k+1} \end{array} \right) \quad (6.17)$$

Die Varianz der Beobachtungen ergibt sich aus der Varianz der Positionsbestimmung des Modell-Lkws mittels Tachymeter zu $\sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = 4\text{mm}^2$. Für die Stellgröße u des Modell-Lkws, der Störgröße z und des Systemzustands \hat{x} ergeben sich die Varianzen aus der Epoche k .

Berechnung der Stellgröße aus Zustandsrückführung

Der Rückführvektor $\mathbf{k}'(1,n)$, in Abbildung 6.8 mittig angeordnet, entscheidet, welche Zustandsgrößen des Modell-Lkws im Regelkreis zurückgeführt werden und so zur Berechnung der Stellgröße $u(t)$ beitragen. Da sowohl die Richtung α als auch die Geschwindigkeit v , neben der aktuellen Position des Modell-Lkws, Einfluss auf die Berechnung des Vorderradeinschlagwinkels δ_V als Stellgröße haben, muss der Rückführvektor voll besetzt sein, um den Systemzustand (Gleichung 6.9) vollständig zurückzuführen. Die Berechnung des Rückführvektors erfolgt nach folgender Gleichung:

$$\mathbf{k}' = \mathbf{q}' (\bar{a}_0 \mathbf{I} + \bar{a}_1 \mathbf{A} + \dots + \bar{a}_{n-1} \mathbf{A}^{n-1} + \mathbf{A}^n) \quad (6.18)$$

wobei sich die Koeffizienten $\bar{a}_0, \bar{a}_1, \dots, \bar{a}_{n-1}$ wie in Kapitel 2.2.6 beschrieben aus dem charakteristischen Polynom der Regelstrecke ableiten lassen. Der Vektor \mathbf{q}' ergibt sich aus der letzten Zeile der Steuerbarkeitsmatrix \mathbf{Q}_s , die in Kapitel 2.2.6 mit Gleichung (2.25) berechnet wird.

$$\mathbf{q}' = (0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1) \mathbf{Q}_s^{-1} \quad (6.19)$$

Die Matrix \mathbf{A} stellt in Gleichung (6.18) die Systemmatrix dar, die sich für den Modell-Lkw analog zur Transitionsmatrix \mathbf{T} des KALMAN-Filter zu

$$\mathbf{A} = \left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & \hat{v}_k \Delta t \frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \sin \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} & -\Delta t \frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \cos \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} \\ 0 & 1 & \hat{v}_k \Delta t \frac{\cos(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \cos \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} & \Delta t \frac{\sin(\hat{\alpha}_k + \Delta\alpha_{k+1}) - \sin \hat{\alpha}_k}{\Delta\alpha_{k+1}} \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad (6.20)$$

ergibt.

Der Anteil der Stellgröße aus der Zustandsrückführung $u_{ZR,k+1}$ berechnet sich für die Epoche t_{k+1} folgendermaßen:

$$u_{ZR,k+1} = -\mathbf{k}' \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k+1} \quad (6.21)$$

Berechnung der Regelabweichung

Die Regelabweichung e_{k+1} stellt den Abstand des Modell-Lkws zur Soll-Trajektorie dar und dient der Folgeregelung für die nächste Epoche t_{k+1} als Grundlage Zur Berechnung der

Regelabweichung wird die geschätzte Regelgröße $\hat{\mathbf{y}}_{k+1}$ benutzt. Dazu wird die Position aus dem Zustandsvektor $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}$ extrahiert:

$$\hat{\mathbf{y}}_{k+1} = \begin{pmatrix} \hat{X}_{k+1} \\ \hat{Y}_{k+1} \end{pmatrix} \quad (6.22)$$

Die Regelabweichung wird im Führungssystem durch den Abstand ds der geschätzten Ist-Position $\hat{\mathbf{y}}_{k+1}$ normal zur gegebenen Soll-Trajektorie beschrieben. Für das Experiment zur automatischen Führung des Modell-Lkws, bei dem die Soll-Trajektorie, wie in Kapitel 6.1 beschrieben, als Polygon in der Ebene vorliegt, bedarf es folglich der Berechnung des Abstandes eines Punktes auf ein Polygon im zweidimensionalen Koordinatenraum. Die Situation ist in Abbildung 6.10 dargestellt.

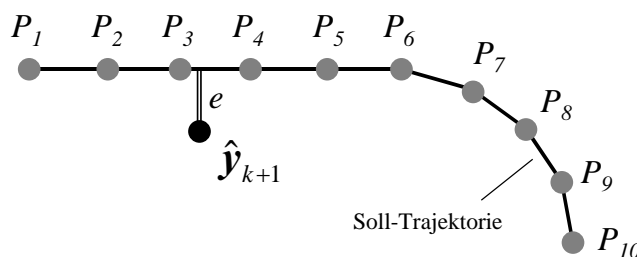


Abbildung 6.10: Definition der Regelabweichung im Experiment mit Modell-Lkw.

In einem ersten Schritt wird der Polygonpunkt P_i der Soll-Trajektorie gesucht, der der Ist-Position des Lkws am nächsten ist. In Abbildung 6.10 wäre das der Punkt P_3 . Der implementierte Suchalgorithmus basiert auf Streckenvergleichen zwischen der Ist-Position und allen Polygonpunkten P_n der Soll-Trajektorie

$$P_i = \min \left\{ \sqrt{(\hat{X}_{k+1} - X_{P_i})^2 + (\hat{Y}_{k+1} - Y_{P_i})^2} \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.23)$$

Die Punkte P_{i-1} und P_{i+1} werden zur Beschreibung der Geometrie der Soll-Trajektorie im Bereich der aktuellen Position des Lkws hinzugenommen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Bewegungsrichtung des Modell-Lkws im Bezug zur Speicherreihenfolge der Polygonpunkte der Soll-Trajektorie bekannt ist.

Die Geometrie der Soll-Trajektorie im Bereich der aktuellen Position des Lkws ist für die Berechnung des normalen Abstands von Bedeutung. Auf Basis der Definition der Soll-Trajektorie (siehe Kap 6.1.2) kommen hier Geraden, Kreise oder Klothoide in Frage. Wie in BEETZ (2003) aber nachgewiesen werden konnte, kann eine Klothoide ohne nennenswerte Genauigkeitseinbuße bei der Abstandsberechnung durch einen Kreisbogen approximiert werden, wenn nur ein kleiner Ausschnitt im Bereich der jeweiligen aktuellen Ist-Position betrachtet wird. Da dies hier gegeben ist, erfolgt die Berechnung der Regelabweichung im Führungsmodul des automatischen Positionierungssystems ausschließlich auf Geraden und Kreisbögen. So kann die Rechenzeit minimiert werden, da eine Abstandsberechnung auf eine Klothoide nur iterativ möglich wäre.

Zur Entscheidung, ob die oben ermittelten drei Punkte eine Gerade bilden oder auf einem Kreisbogen liegen, werden die zweidimensionalen Koordinaten in ihre entsprechenden dreidimensionalen Koordinaten überführt. Nach BARTELME (2000) kann jeder Punkt in der Ebene (X, Y) durch das Tripel (X, Y, t) seiner homogenen Koordinaten dargestellt werden. Als Faktor kann z.B. $t = 1$ gewählt werden. Die homogenen Koordinaten der drei Punkte können

nun in einer 3x3-Matrix zusammengefasst werden. Die Entscheidungsfindung basiert auf der Determinante dieser Matrix, wobei die folgenden Entscheidungskriterien gelten:

$$\begin{aligned} \text{Det} \begin{bmatrix} X_i & X_{i-1} & X_{i+1} \\ Y_i & Y_{i-1} & Y_{i+1} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = 0 &\Rightarrow \text{ Gerade} \\ \text{Det} \begin{bmatrix} X_i & X_{i-1} & X_{i+1} \\ Y_i & Y_{i-1} & Y_{i+1} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \neq 0 &\Rightarrow \text{ Kreisbogen} \end{aligned} \quad (6.24)$$

Je nach Entscheidung erfolgt die Berechnung der Regelabweichung e_{k+1} im Bezug auf eine Gerade oder einen Kreisbogen.

Fall 1 – Gerade:

Zur Berechnung der Regelabweichung e_{k+1} im Bezug auf eine Gerade wird eine Ebenentransformation durchgeführt, wie sie z.B. bei GRUBER, JOECKEL (2001) beschrieben ist.

Die Koordinaten im lokalen System ergeben sich wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Geradenanfang: } x_a = 0, \quad y_a = 0 \\ \text{Geradenende: } \quad x_e = 0, \quad y_e = \sqrt{(X_{i+1} - X_{i-1})^2 + (Y_{i+1} - Y_{i-1})^2} \end{aligned} \quad (6.25)$$

Die Verdrehung des lokalen Systems gegenüber dem übergeordneten System ergibt sich zu:

$$\Phi = \arctan\left(\frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{Y_{i+1} - Y_{i-1}}\right) \quad (6.26)$$

Anschließend können die Transformationsparameter wie folgt berechnet werden:

$$o = -\frac{(X_{i+1} - X_{i-1})}{y_e} = -\sin \Phi \quad (6.27)$$

$$a = \frac{(Y_{i+1} - Y_{i-1})}{y_e} = \cos \Phi \quad (6.28)$$

$$x_0 = -o \cdot Y_{i-1} - a \cdot X_{i-1} \quad (6.29)$$

$$y_0 = -a \cdot Y_{i-1} + o \cdot X_{i-1} \quad (6.30)$$

Nach der Berechnung der Transformationsgleichungen

$$x_i = x_0 + o \cdot Y_i + a \cdot X_i \quad (6.31)$$

$$y_i = y_0 + a \cdot Y_i - o \cdot X_i \quad (6.32)$$

Ergibt sich die Regelabweichung zu:

$$e_{k+1} = x_i \quad (6.33)$$

Außerdem lässt sich an dieser Stelle der Lotfußpunkt als Nebenprodukt berechnen:

$$X_{FP} = X_{i-1} + \sin(\Phi) \cdot y_i \quad (6.34)$$

$$Y_{FP} = Y_{i-1} + \cos(\Phi) \cdot y_i \quad (6.35)$$

Fall 2 – Kreisbogen:

Zur Berechnung der Regelabweichung e_{k+1} im Bezug auf einen Kreisbogen muss in zwei Schritten erfolgen. In einem ersten Schritt werden aus den drei Punkten der Soll-Trajektorie (P_{i-1}, P_i, P_{i+1}) die Kreisparameter – Mittelpunkt (X_m, Y_m) und gerichteter Radius (R) – nach dem folgenden Gleichungssystem berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass sie drei Punkte im Uhrzeigersinn angeordnet sind. Wenn nicht, müssen die drei Punkte entsprechend umbenannt werden.

Nach der Berechnung zweier Hilfspunkte

$$X_{H_1} = \frac{X_{i-1} + X_i}{2}, \quad Y_{H_1} = \frac{Y_{i-1} + Y_i}{2} \quad (6.36)$$

$$X_{H_2} = \frac{X_i + X_{i+1}}{2}, \quad Y_{H_2} = \frac{Y_i + Y_{i+1}}{2} \quad (6.37)$$

können die Richtungswinkel zwischen den Punkten berechnet werden:

$$t_{P_{i-1}, P_i} = \arctan \frac{X_i - X_{i-1}}{Y_i - Y_{i-1}} \quad (6.38)$$

$$t_{P_i, P_{i+1}} = \arctan \frac{X_{i+1} - X_i}{Y_{i+1} - Y_i} \quad (6.39)$$

$$t_{H_1, H_2} = \arctan \frac{X_{H_2} - X_{H_1}}{Y_{H_2} - Y_{H_1}} \quad (6.40)$$

Anschließend können die Streckenabschnitte

$$s_{H_1, H_2} = \sqrt{(X_{H_2} - X_{H_1})^2 + (Y_{H_2} - Y_{H_1})^2} \quad (6.41)$$

$$s_{H_2, m} = \frac{s_{H_1, H_2} \cdot \cos(t_{H_1, H_2} - t_{P_{i-1}, P_i})}{\sin(t_{P_i, P_{i+1}} - t_{P_{i-1}, P_i})} \quad (6.42)$$

und die Koordinaten des Kreismittelpunkts berechnet werden:

$$X_m = X_{H_2} + s_{H_2, m} \cdot \cos t_{P_i, P_{i+1}} \quad (6.43)$$

$$Y_m = Y_{H_2} - s_{H_2, m} \cdot \sin t_{P_i, P_{i+1}} \quad (6.44)$$

Die Berechnung des ungerichteten Radius r erfolgt nach folgender Gleichung:

$$r = \sqrt{(X_m - X_i)^2 + (Y_m - Y_i)^2} \quad (6.45)$$

Nach Berechnung des Kreisparameters A

$$A = X_{i-1} \cdot (Y_{i+1} - Y_i) + X_i \cdot (Y_{i-1} - Y_{i+1}) + X_{i+1} \cdot (Y_i - Y_{i-1}) \quad (6.46)$$

Ergibt sich der gerichtete Radius R zu:

$$R = r \cdot \frac{A}{|A|} \quad (6.47)$$

Besitzt der Radius ein negatives Vorzeichen, so handelt es sich um eine Linkskurve, sonst um eine Rechtskurve.

In einem zweiten Schritt kann jetzt die Regelabweichung e mittels einer Radialtransformation berechnet werden, wie es z.B. bei HÄBLER, WACHSMUTH (1994) nachzulesen ist.

Dazu werden zunächst die Zentriwinkel im Mittelpunkt des Kreisbogens (X_m, Y_m) berechnet:

$$D = \frac{R}{|R|}, \quad R = |R| \quad (6.48)$$

$$t_{m,P_{i-1}} = \arctan \frac{X_{P_{i-1}} - X_m}{Y_{P_{i-1}} - Y_m} \quad (6.49)$$

$$t_{m,P_{i+1}} = \arctan \frac{X_{P_{i+1}} - X_m}{Y_{P_{i+1}} - Y_m} \quad (6.50)$$

$$t_{m,\hat{y}_{k+1}} = \arctan \frac{\hat{X}_{k+1} - X_m}{\hat{Y}_{k+1} - Y_m} \quad (6.51)$$

$$\alpha = t_{m,\hat{y}_{k+1}} \cdot D - t_{m,P_{i-1}} \cdot D \quad (6.52)$$

$$\beta = t_{m,P_{i+1}} \cdot D - t_{m,P_{i-1}} \cdot D \quad (6.53)$$

$$\gamma = t_{m,P_{i+1}} \cdot D - t_{m,\hat{y}_{k+1}} \cdot D \quad (6.54)$$

Anschließend kann der Fußpunkt FP berechnet werden:

$$X_{FP} = X_m + R \cdot \sin t_{m,\hat{y}_{k+1}} \quad (6.55)$$

$$Y_{FP} = Y_m + R \cdot \cos t_{m,\hat{y}_{k+1}} \quad (6.56)$$

Weiterhin ergibt sich der Richtungswinkel der Tangente im Fußpunkt zu:

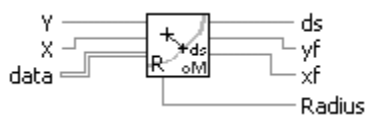
$$t_{FP} = t_{m,\hat{y}_{k+1}} + 100\text{gon} \cdot D \quad (6.57)$$

Jetzt kann die Regelabweichung e auf den Kreisbogen nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$e_{k+1} = \left(\hat{X}_{k+1} - X_{FP} \right) \cdot \cos t_{FP} - \left(\hat{Y}_{k+1} - Y_{FP} \right) \cdot \sin t_{FP} \quad (6.58)$$

Wenn e ein negatives Vorzeichen besitzt, befindet sich der Modell-Lkw in Fahrtrichtung links von der Soll-Trajektorie.

Das Modul zur Berechnung der Regelabweichung beinhaltet eine Vielzahl von Rechenschritten, weshalb es bei der Umsetzung mit LabView® in einem SubVi (Unterfunktion) gekapselt worden ist. Das SubVi



benötigt die Soll-Trajektorie ($data$) und die Koordinate der geschätzten Ist-Position des Modell-Lkws (X, Y) als Eingangsgrößen. Es liefert als Ergebnis, neben der gesuchten Regelabweichung e (normaler Abstand ds), auch die Koordinaten des Fußpunktes FP auf der Soll-Trajektorie (X_{FP}, Y_{FP}) und den gerichteten Radius R der Soll-Trajektorie im Fußpunkt.

Die Regelabweichung dient dem nächsten Rechenschritt, einem PI-Regler (Vorfilter), gemäß Abbildung 6.9 als Eingang.

PI-Regler als Vorfilter

Wie bereits in Kapitel 2.2.6 beschrieben, kann ein Zustandsregler ein System nur im Betriebspunkt stabilisieren. Eine Folgeregelung mit sich verändernder Führungsgröße ist nicht möglich. Deshalb bedarf es bei der Umsetzung des automatischen Führungsmoduls der Integration eines Vorfilter, der als PI-Regler ausgelegt wird. Der P -Anteil arbeitet dabei nach dem Prinzip: Je größer die Regelabweichung ist, umso größer muss die Stellgröße sein. Der proportionale Anteil des Reglers wird durch den Faktor K_P vorgegeben.

Der integrale Anteil des Reglers arbeitet hingegen nach dem Prinzip: Solange eine Regelabweichung auftritt, muss die Stellgröße verändert werden. Damit wird die Stellgröße bei gleichbleibender Regelabweichung in Abhängigkeit der Zeit immer größer. Die Regelabweichung wird deshalb über die Epochen aufintegriert. Der Parameter des I -Anteils wird mit K_I bezeichnet.

Nach Einführung von $\dot{\lambda}_{k+1}$ als

$$\dot{\lambda}_{k+1} = e_{k+1} = w_{k+1} - \hat{y}_{k+1} \quad (6.59)$$

lässt sich die Stellgröße $u_{PI,k+1}$ folgendermaßen berechnen:

$$u_{PI,k+1} = K_I \cdot \lambda_{k+1} + K_P \cdot \dot{\lambda}_{k+1} \quad (6.60)$$

Die eigentliche Stellgröße u_{k+1} im Regelkreis des automatischen Führungssystems setzt sich nach den Ausführungen der letzten Seiten folglich aus zwei Anteilen zusammen – dem Anteil aus der Zustandsrückführung (Gleichung 6.21) und dem Anteil des PI-Reglers (Gleichung 6.60). Zusammenfassend lässt sich die Stellgröße u_{k+1} , welche im Fall des Modell-Lkws den Vorradeinschlagwinkel δ_V darstellt, mit folgender Gleichung berechnen.

$$u_{k+1} = -\mathbf{k}' \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k+1} + K_I \cdot \lambda_{k+1} + K_P \cdot \dot{\lambda}_{k+1} \quad (6.61)$$

Die Stellgröße u_{k+1} dient in der nächsten Epoche $k+2$ dem dynamischen KALMAN-Filter als Eingangsgröße zur Berechnung der Differenz der Fahrzeuglängsachse $\Delta\alpha$ als Stellgröße, wie es weiter vorne in diesem Kapitel beschrieben worden ist.

Anzulegende Spannung an der Fernsteueranlage

Als letzten Rechenschritt bedarf es im Führungsmodul der Umrechnung der Stellgröße $u_{k+1} = \delta_{V,k+1}$ in eine Spannung, um diese dann an der Fernsteueranlage anzulegen. Die in Kapitel 6.2.2 beschriebene Systemidentifizierung liefert die Kalibrierfunktion der Lenkung (Gleichung 6.7). Mit Hilfe dieser Kalibrierfunktion berechnet sich die Spannung V wie folgt:

$$V = -5.6396 \cdot \delta_V + 2.7926$$

Mit Anlegen der Spannung V an der Fernsteueranlage des Modell-Lkws ist eine Epoche des Regelkreises beendet und der Rechenalgorithmus beginnt von neuem.

6.3.4 Ergebnis Fahrversuch

Wird der in den Kapiteln 6.3.2 und 6.3.3 beschriebene Regler in das modulare System zur Führung des Modell-Lkws integriert, so gelingt eine geometrische Führung entlang der Soll-Trajektorie. Wie in Abbildung 6.11 links zu sehen ist, folgt der Lkw zwar der Soll-

Trajektorie, jedoch mit relativ großen Abweichungen. In Abbildung 6.11 rechts sind die Abweichungen des Lkws gegenüber der Soll-Trajektorie dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der automatisch geführte Lkw mit Abweichungen von bis zu 40mm um die Soll-Trajektorie pendelt, was aufgrund der großen Totzeit des Tachymeters und der engen Kurven der Soll-Trajektorie nach den Erkenntnissen aus Kapitel 5.2.3 zu erwarten war.

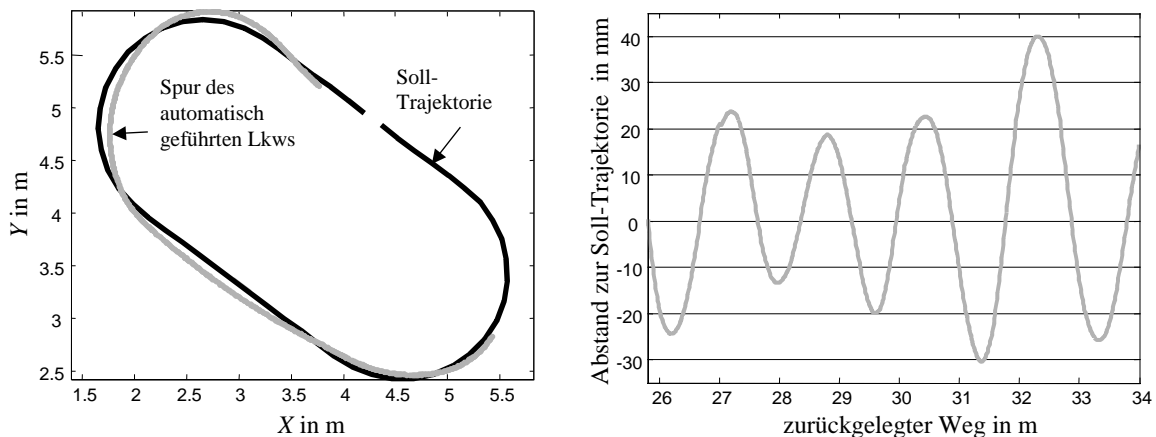


Abbildung 6.11: Spur des automatisch geführten Modell-Lkws (links) und die Abweichungen zur Soll-Trajektorie (rechts).

6.4 Verbesserung der Regelgüte durch antizipatorische Steuerung

Die Führungsqualität des in den Kapiteln 6.3.2 und 6.3.3 entworfenen Regelsystems erfüllt nicht die Anforderungen von Genauigkeiten unter einem Zentimeter, wie sie in den Zielen dieser Arbeit definiert worden sind. Als eine der Hauptursachen konnte in den vorangegangenen Kapiteln das schlechte dynamische Verhalten des Tachymeters als Messeinrichtung identifiziert werden. Für eine Verbesserung der Regelgüte wird in diesem Kapitel eine Möglichkeit zur besseren Integration des Tachymeters in den Regelkreis erarbeitet. Ziel ist es, den Regler so zu modifizieren, dass er in der Lage ist, die durch Kurven in der Soll-Trajektorie hervorgerufenen Störungen, trotz der Totzeit der Messeinrichtung, zu kompensieren. Dazu wird im Folgenden zunächst der Mensch als Regler bei der Erfüllung der Fahraufgabe im Straßenverkehr analysiert.

6.4.1 Analyse des menschlichen Reglers bei Fahraufgaben

Eine der Fahraufgaben bei der Führung eines Kfz im Straßenverkehr ist die Querregelung des Fahrzeugs. Dem menschlichen Regler kommen dabei ähnliche Aufgaben zu wie dem automatischen Führungssystem, nämlich das Fahrzeug auf der Straße zu führen. Untersuchungen in der Vergangenheit haben gezeigt, dass der menschliche Fahrer über dynamische Eigenschaften verfügt, die durchaus mit denen des modularen Führungssystems mit Tachymeter als Messeinrichtung vergleichbar sind. So arbeitet der menschliche Regler nach HUANG (2004) mit einer Totzeit von 300-460ms, die sich aus der Reaktionszeit von 200-300ms und der neuromuskulären Verzögerungszeit von 100-160ms zusammensetzt. Die Korrektur von Abweichungen zur Idealspur der Fahrbahn durch entsprechende Lenkbewegungen wird vom Menschen mit einer Abtastrate von 0,2-1,0Hz durchgeführt. Damit ist der menschliche Fahrzeugführer in seinem Regelverhalten dem des modularen Führungssystems mit Tachymeter als Messeinrichtung sogar unterlegen. Trotzdem gelingt es

dem menschlichen Fahrer, der Straße auch bei hoher Geschwindigkeit zu folgen, wenn auch die Genauigkeitsanforderungen auf Grund der Fahrbahnbreite nicht sonderlich hoch sind.

Nach DONGES (1978) optimiert der menschliche Fahrzeugführer die Regelgüte der Fahrzeugquerführung trotz ungünstigem dynamischen Verhalten, indem er den zukünftigen Verlauf der Straße visuell erfasst und daraufhin aus Erfahrung den Lenkradeinschlagwinkel antizipiert. Dabei verbleibt eine kleine Restabweichung, die dann ausgeregelt werden muss. Würde der menschliche Fahrer nur über die aktuelle Abweichung und nichts über den zukünftigen Verlauf der Straße wissen, so könnte er dem Verlauf der Straße nicht mit hoher Geschwindigkeit folgen.

6.4.2 Vorsteuerung zur Erhöhung der Phasenreserve

Die Erkenntnisse der Analyse des menschlichen Reglers bei der Querregelung eines Kraftfahrzeugs können auf das automatische Führungssystem übertragen werden, mit dem Ziel, die Regelgüte beim Einsatz eines Tachymeters als Messeinrichtung zu steigern. Dazu wird im Vorwärtszweig des Regelkreises ein zusätzlicher Ast implementiert, der ohne Rückkopplung die Stellgröße $u(t)$ nur auf Grund des Verlaufs der Soll-Trajektorie berechnet. Die Restabweichungen werden dann innerhalb des Regelkreises durch ein rückgekoppeltes Regelglied kompensiert. In Abbildung 6.12 ist die Struktur eines Zwei-Ebenen-Reglers mit antizipatorischer Steuerung dargestellt.

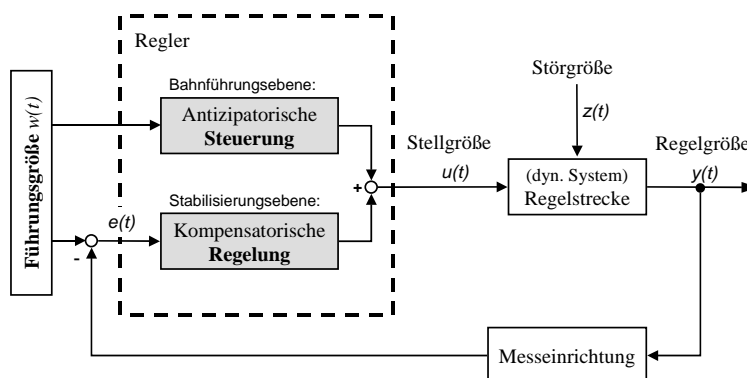


Abbildung 6.12: Zwei-Ebenen-Regler mit antizipatorischer Vorsteuerung nach DONGES (1978).

Die antizipatorische Steuerung setzt Kenntnisse über den Ist-Zustands des Systems (aus Gedächtnis und Messung) und über den aktuellen Verlauf der Soll-Trajektorie voraus. Beide Informationen liegen im Fall des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Führungssystems vor, so dass der Vorderradeinschlagwinkel $\delta_V(w)$ des Modell-Lkws in Abhängigkeit der Führungsgröße im vereinfachten Fahrzeugmodell (siehe Kapitel 6.2) nach Gleichung 6.1 berechnet werden kann. Der zur Berechnung erforderliche Radius R der Soll-Trajektorie im Bereich der aktuellen Position des Modell-Lkws wurde bereits vom Modul zur Berechnung der Regelabweichung (siehe Kapitel 6.3.3) bereitgestellt.

6.4.3 Erweiterung des PI-Zustandsreglers um Vorsteuerung

Der in Kapitel 6.3.2 vorgestellte Entwurf eines Zustandsreglers zur automatischen Führung des Modell-Lkws kann jetzt um die antizipatorische Vorsteuerung erweitert werden. In Abbildung 6.13 ist der erweiterte Reglerentwurf allgemeingültig dargestellt.

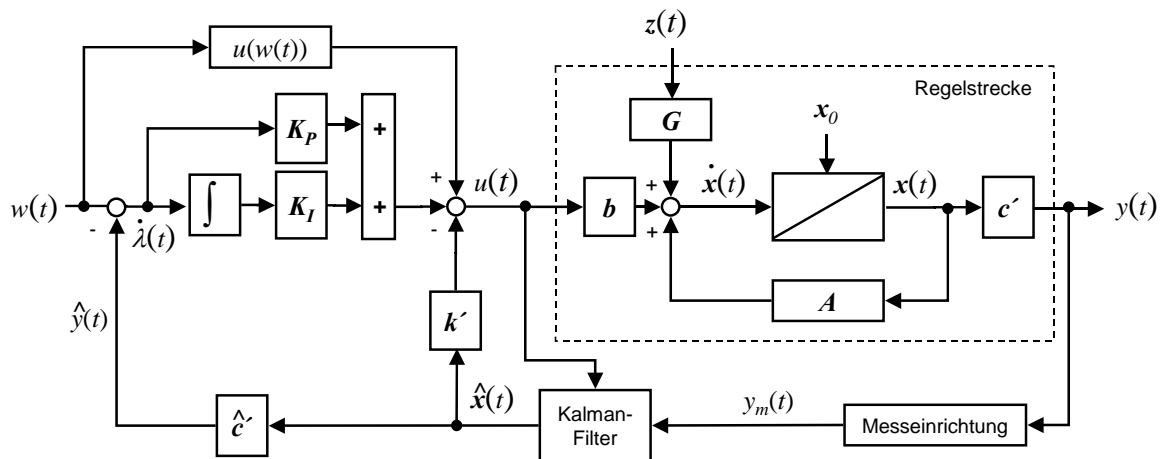


Abbildung 6.13: PI-Zustandsregler mit Ausgangsrückführung, KALMAN-Filter als Beobachter und Erweiterung um die Vorsteuerung $u(w(t))$.

Im linken oberen Bereich der Abbildung 6.13 ist der Vorsteuerblock $u(w(t))$ zu sehen. Er stellt die direkte Verbindung der Führungsgröße w zur Stellgröße her. Die Stellgröße berechnet sich in diesem modifizierten Modell gemäß Gleichung 6.61 mit Ergänzung eines Terms zur Vorsteuerung folgendermaßen:

$$u_{k+1} = -k' \cdot \hat{x}_{k+1} + K_I \cdot \lambda_{k+1} + K_P \cdot \dot{\lambda}_{k+1} + u(w_{k+1}) \quad (6.62)$$

Der hier entworfene PI-Zustandsregler ermöglicht die Kompensation des ungünstigen dynamischen Verhaltens der Messeinrichtung, indem die kompensatorisch auszuregelnden Abweichungen auch in Kurvenfahrten durch die Vorsteuerung klein gehalten werden. Als Ergebnis der Fahrversuche mit dem Modell-Lkw ist in Abbildung 6.14 die Abweichung des automatisch geführten Lkws zur Soll-Trajektorie dargestellt. Unter Verwendung des modifizierten Reglers mit Vorsteuerung kann das in Kapitel 6.3.4 beschriebene und in Abbildung 6.11 dargestellte starke Überschwingen des Lkws stark vermindert werden. Die Kompensation der nach der Vorsteuerung verbleibenden Restabweichungen gelingt mit maximalen Abweichungen von $\pm 6\text{mm}$.

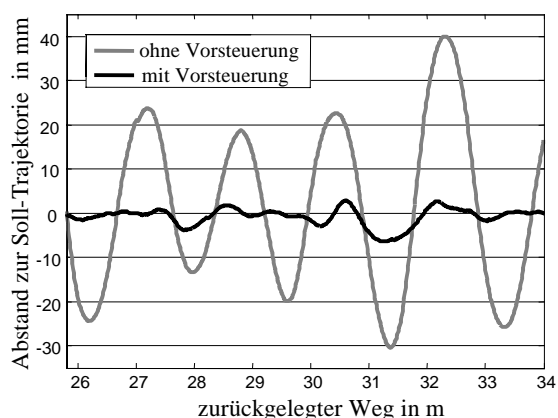


Abbildung 6.14: Abweichungen zur Soll-Trajektorie mit und ohne Vorsteuerung.

6.5 Analyse der erreichten Genauigkeiten

Zur Beurteilung der erreichten Genauigkeiten bei der automatischen Führung des Modell-Lkws, als auch bei der Positionsbestimmung mittels zielverfolgendem Tachymeter bedarf es einer näheren Betrachtung der zurückgelegten Spur des Lkws. Die Untersuchungen in diesem

Kapitel stützen sich auf eine stochastische Analyse der jeweiligen Abweichungen und nutzen neben der empirischen Standardabweichung auch Konfidenzbänder zur Beschreibung der erreichten Genauigkeiten. Als Datengrundlage dient die Spur des automatisch geführten Modell-Lkws mit Vorsteuerung, deren Abstand zur Soll-Trajektorie bereits in Abbildung 6.14 dargestellt worden ist.

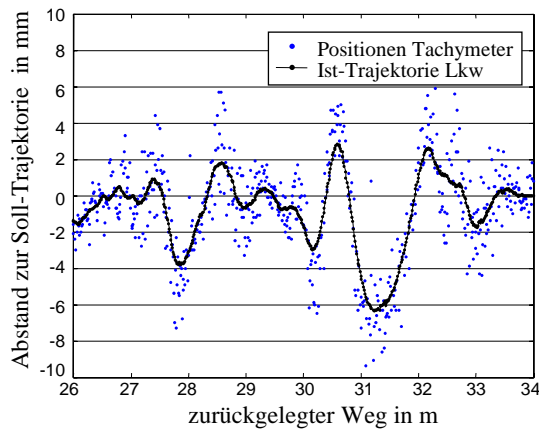


Abbildung 6.15: *Positionen des Lkws aus Tachymetermessungen und gefilterte Ist-Trajektorie.*

Die Qualität des automatischen Führungssystems, wie es im Rahmen dieser Arbeit entworfen worden ist, basiert neben der Güte des Regelalgorithmus auch auf der Genauigkeit der Positionsbestimmung des fahrenden Lkws mittels zielverfolgendem Tachymeter. Diese beiden Einflussfaktoren lassen sich nicht ohne weiteres trennen, da die Genauigkeit der Positionsbestimmung zwangsläufig einen direkten Einfluss auf die Führungsqualität hat. Weiterhin besteht die Schwierigkeit der Genauigkeitsanalyse darin, dass im Experiment das zielverfolgende Tachymeter als einziger Positionssensor verwendet wurde, da kein höherwertiger 3-D-Positionssensor im entsprechenden Dynamikbereich, wie z.B. ein Lasertracker, zur Verfügung stand. So kann sich die Beschreibung der Ist-Trajektorie des Lkws nur auf die gemessenen Positionen des Tachymeters stützen, die gleichzeitig als Eingangsgröße in den Regelalgorithmus verwendet worden sind.

Die verrauschten Positionen des fahrenden Modell-Lkws, wie sie vom Tachymeter gemessen wurden, sind in Abbildung 6.15 als Punkte dargestellt. Da das dynamische Modell des Regelkreises, bestehend aus der Übertragungsfunktion des Reglers und des Modell-Lkws, dämpfend auf die verrauschte Positionsbestimmung des Tachymeters reagiert, kann die Ist-Trajektorie des Lkws als deterministischer Anteil der verrauschten Positionen durch einen Tiefpassfilter berechnet werden. Zur Anwendung kommt ein gleitender Rechteckfilter mit folgender Gewichtsfunktion:

$$g(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{für } |\tau| \leq q \\ 0 & \text{für } |\tau| > q \end{cases} \quad (6.63)$$

Dabei steht τ für die einzelnen Abtastzeitpunkte und q für die Größe des Filterfensters. Im vorliegenden Fall lassen sich mit einem Filterfenster von 31 Werten, was bei einer Abtastrate von 10Hz ca. 3sec bedeutet, gute Ergebnisse erzielen, wie aus Abbildung 6.15 zu sehen ist.

6.5.1 Abweichungen zur Soll-Trajektorie als Indikator für Führungsqualität

Zur Analyse der Abweichungen d zur Soll-Trajektorie wird der deterministische Anteil der verrauschten Positionen aus Abbildung 6.15 als Ist-Trajektorie des Modell-Lkws näher betrachtet. Die empirische Standardabweichung des Abstands der Ist-Trajektorie zur Soll-

Trajektorie ergibt sich zu $s_d = 2,08\text{mm}$. Die Berechnung erfolgt dabei ohne Abzug des Mittelwerts, da es sich bereits um Abweichungen handelt nach folgender Gleichung:

$$s = \sqrt{\frac{\mathbf{d}^T \cdot \mathbf{d}}{n}}. \quad (6.64)$$

Teilt man die Abweichungen \mathbf{d} in Klassen auf und summiert die Häufigkeiten in jeder Klasse, so ergibt sich nach der Normierung der Häufigkeiten das in Abbildung 6.16 links dargestellte Histogramm der Abweichungen. Zur besseren Beurteilung der Verteilungsfunktion der Abweichungen ist in Abbildung 6.16 links außerdem die Standard-Normalverteilung zu sehen.

Wie das Histogramm in Abbildung 6.16 links zeigt, sind die Abweichungen \mathbf{d} des Modell-Lkws zur Soll-Trajektorie in dem betrachteten Ausschnitt augenscheinlich nicht normalverteilt. Es besteht eine Schiefe in den negativen Bereich.

Um zu testen, ob die Abweichungen \mathbf{d} normalverteilt sind, kann der χ^2 -Anpassungstest nach PEARSON angewendet werden. Dabei gilt die Nullhypothese:

$$H_0 : \mathbf{d} \sim N(\mu, \sigma^2). \quad (6.65)$$

Da es sich bei den zu testenden Abweichungen \mathbf{d} um empirische Werte handelt, müssen der Erwartungswert μ und die theoretische Varianz σ^2 mangels Kenntnis durch die Schätzwerte Mittelwert \bar{x} und empirische Varianz s^2 ersetzt werden. Da die Abweichungen \mathbf{d} , wie oben bereits beschrieben, mittelwertfrei sind, wird der Mittelwert mit $\bar{x} = 0$ angenommen. Die empirische Varianz s^2 berechnet sich aus dem Quadrat der Gleichung (6.64).

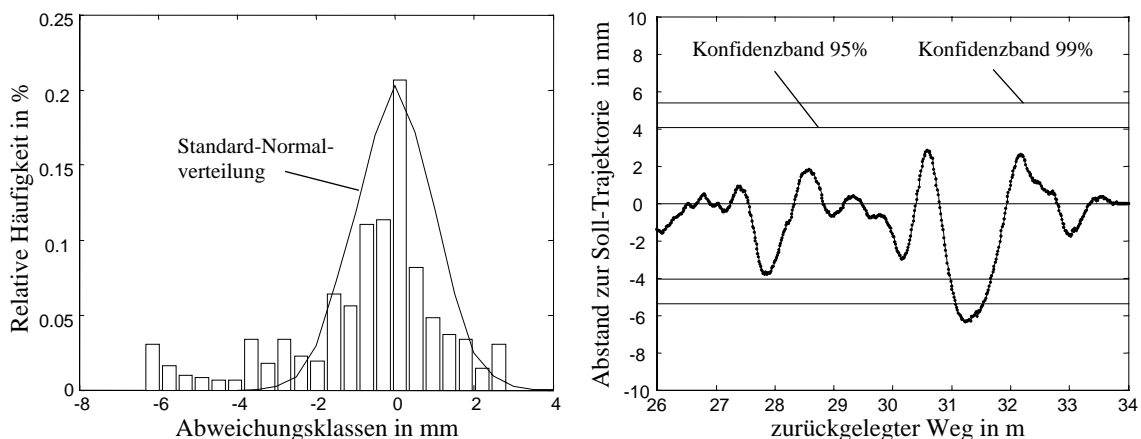


Abbildung 6.16: *Histogramm (links) und Konfidenzbänder (rechts) der Abweichungen des Modell-Lkws zur Soll-Trajektorie.*

Die Testidee nach PEARSON besteht darin, die Abweichungen \mathbf{d} in gleichbreite Klassen, deren Anzahl m sich aus

$$m = 5 \cdot \log(n) \quad (6.66)$$

berechnen lässt, einzuteilen. Nach HÖPCKE (1980) werden anschließend die absoluten Häufigkeiten der Abweichungen \mathbf{d} in den einzelnen Klassen N_{emp} ausgezählt und mit der theoretischen Klassenhäufigkeit N_{th} verglichen. Die Testgröße T des Tests berechnet sich aus der Quadratsumme der normierten Differenzen wie folgt:

$$T = \sum_1^m \left(\frac{N_{emp} - N_{th}}{\sqrt{N_{th}}} \right)^2 \quad (6.67)$$

Danach wird die Quadratsumme der normierten Differenzen (Testgröße T) mit dem Quantil der χ^2 -Verteilung verglichen. Dabei gilt die Wahrscheinlichkeitsbeziehung

$$P\{T > \chi_{f,1-\alpha/2}^2 \mid H_0\} = \alpha \quad (6.68)$$

und die Testregel

$$\begin{aligned} \text{wenn } T \leq \chi_{f,1-\alpha/2}^2 & \text{ dann } H_0 \text{ annehmen} \\ \text{wenn } T > \chi_{f,1-\alpha/2}^2 & \text{ dann } H_0 \text{ ablehnen} \end{aligned} \quad (6.69)$$

Die Anzahl Freiheitsgrade f ergibt sich zu

$$f = m - 3. \quad (6.70)$$

Wird der χ^2 -Anpassungstest auf die Abweichungen des Modell-Lkws zur Soll-Trajektorie angewandt, so ergibt sich eine Testgröße von $T = 64,58$ bei einer Klassenanzahl von $m = 13$. Das Quantil der beidseitigen χ^2 -Verteilung kann für $\alpha = 1\%$ und $f = 10$ mit $\chi_{10,0,995}^2 = 25,19$ aus der Tabelle der Verteilungsfunktion abgelesen werden. Damit kommt es zu folgender Testentscheidung: Da $T > \chi_{10,0,995}^2$ ist, kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 1\%$ gesagt werden, dass die Abweichungen d des Modell-Lkws zur Soll-Trajektorie nicht normalverteilt sind.

Zur weiteren stochastischen Beurteilung der Führungsqualität werden im Folgenden neben der oben bereits angegebenen Standardabweichung zusätzlich Konfidenzbänder unterschiedlicher Sicherheitswahrscheinlichkeit berechnet. Das Konfidenzband beschreibt die Wahrscheinlichkeit P , mit der die Abweichungen des automatisch geführten Lkws in einem bestimmten Bereich um die Soll-Trajektorie liegen. Dabei wird der Bereich durch die untere Grenze a und die obere Grenze b beschrieben. Es gilt folgende Wahrscheinlichkeitsbeziehung:

$$P\{a \leq \mu \leq b\} = 1 - \alpha \quad (6.71)$$

Der Erwartungswert μ des automatisch geführten Lkws stellt dabei die Soll-Trajektorie dar. Da es sich hier um eine Betrachtung der Abweichungen handelt, gilt: $\mu = 0$.

Das Konfidenzband berechnet sich dann nach folgender Gleichung:

$$\begin{aligned} a &= -Y_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_d \\ b &= Y_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_d \end{aligned} \quad (6.72)$$

Das Quantil $Y_{1-\alpha/2}$ der zweiseitigen t-Verteilung, das bei der hohen Anzahl Werte dem der Normalverteilung entspricht, ergibt sich für $\alpha = 95\%$ zu $Y_{1-\alpha/2} = 1,96$ und für $\alpha = 99\%$ zu $Y_{1-\alpha/2} = 2,58$. Es ergeben sich die in Tabelle 6.3 dargestellten Bereiche für die Konfidenzbänder.

Tabelle 6.3: *Konfidenzbereiche der Abweichungen des automatisch geführten Modell-Lkws zur Soll-Trajektorie.*

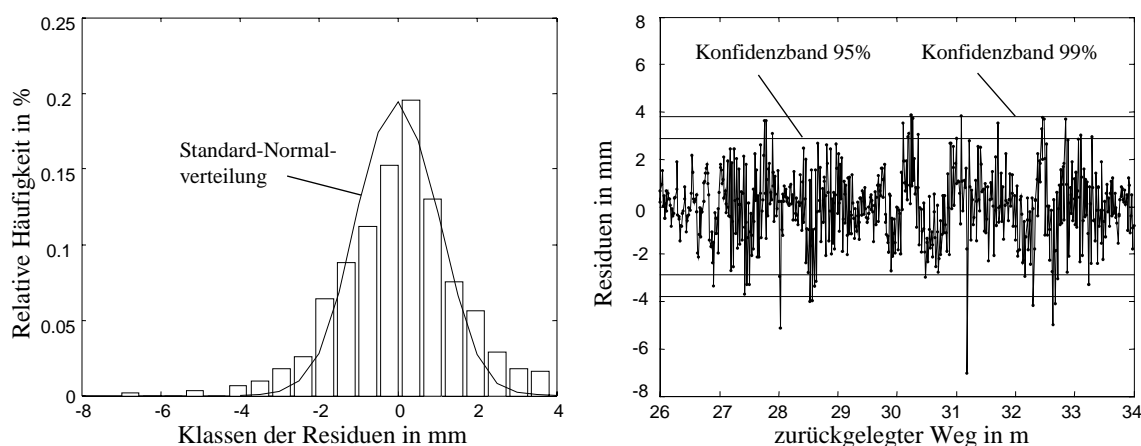
Konfidenzbereich	$\alpha = 95\%$	$\alpha = 99\%$
untere Grenze a	-4,08 mm	-5,37 mm
obere Grenze b	4,08 mm	5,37 mm

Die beiden Konfidenzbänder sind in Abbildung 6.16 rechts graphisch dargestellt. Aufgrund der Diskrepanz der Verteilungsfunktion der Abweichungen zur Normverteilung ist die Aussagekraft der Konfidenzbänder herabgesetzt. Wie aus Abb. rechts zu sehen ist, werden die Konfidenzbänder nur an einer Stelle verletzt. Da die zur Analyse benutzte Datenbasis aber sowohl gute als auch schlechtere Bereiche beinhaltet, kann von einer gewissen Aussagekraft dieser Ergebnisse ausgegangen werden. Demnach liegen die Abweichungen zur Soll-Trajektorie des automatisch geführten Modell-Lkws mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% im Bereich von $\pm 4,08$ mm sowie im Bereich von $\pm 5,37$ mm bei einer Wahrscheinlichkeit von 99%.

6.5.2 Genauigkeit der Positionsbestimmung mittels Tachymeter

Durch Abspaltung der Ist-Trajektorie des Modell-Lkws als deterministischen Anteil von den verrauschten Positionen des fahrenden Lkws (siehe Abbildung 6.15) erhält man als verbleibenden Anteil die Stochastik der Tachymetermessungen. Die so erhaltenen Abweichungen zwischen den Tachymetermessungen und der Ist-Trajektorie des Lkws werden im folgenden als Residuen bezeichnet und zur Analyse der Genauigkeit der Positionsbestimmung mittels Tachymeter benutzt.

Die Vorgehensweise zur Analyse der Residuen erfolgt analog zu Kapitel 6.5.1. Die empirische Standardabweichung zur Beschreibung der Streuung der Tachymetermessungen ergibt sich zu $\sigma_R = 1,47$ mm. Zur Berechnung der Standardabweichung der Residuen bedarf es keiner Berechnung des Mittelwerts, da der Erwartungswert von Residuen stets $\varepsilon = 0$ ist.

Abbildung 6.17: *Histogramm (links) und Konfidenzbänder (rechts) der Residuen zwischen Ist-Trajektorie des Modell-Lkws und Tachymetermessungen.*

Wie bereits in Kapitel 6.5.1 beschrieben, werden die Residuen zur weiteren Analyse in Klassen eingeteilt und die relativen Häufigkeiten in den einzelnen Klassen im Histogramm

dargestellt. Das Histogramm ist zusammen mit der Verteilungsfunktion der Standard-Normalverteilung in Abbildung 6.17 links dargestellt.

Es ist zu sehen, dass die Verteilungsfunktion der Residuen gut zur Normalverteilung passt, wie auch der χ^2 -Anpassungstest nach PEARSON im Folgenden zeigt. Wird der Test, ausführlich beschrieben in Kapitel 6.5.1, auf die Residuen angewandt, so ergibt sich eine Testgröße von $T = 23,01$ bei einer Klassenanzahl von $m = 13$. Das Quantil der beidseitigen χ^2 -Verteilung wird wie in Kapitel 6.5.1 mit $\chi_{10,0,995}^2 = 25,19$ aus der Tabelle der Verteilungsfunktion abgelesen. Damit kommt es zu folgender Testentscheidung: Da $T < \chi_{10,0,995}^2$ ist, kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 1\%$ gesagt werden, dass die Residuen zwischen der Ist-Trajektorie des Modell-Lkws und den Tachymetermessungen normalverteilt sind. Dementsprechend ist kein verbleibender Trend in den Residuen enthalten, was für eine erfolgreiche Abspaltung des deterministischen Anteils spricht. Damit wird die oben beschriebene Vorgehensweise zur Bestimmung der Ist-Trajektorie des Lkws mittels Filterung der verrauschten Tachymetermessungen bestätigt.

Die Berechnung der Konfidenzbänder der Residuen erfolgt analog zu Gleichung 6.72 unter Annahme der in Gleichung 6.71 aufgestellten Wahrscheinlichkeitsbeziehung, deren Gültigkeit durch das Histogramm in Abbildung 6.17 links nachgewiesen worden ist. Es ergeben sich folgende Bereiche für die Konfidenzbänder der Residuen:

Tabelle 6.4: *Konfidenzbereiche der Residuen zwischen Ist-Trajektorie des Modell-Lkws und Tachymetermessungen.*

Konfidenzbereich	$\alpha = 95\%$	$\alpha = 99\%$
untere Grenze a	-2,89 mm	-3,80 mm
obere Grenze b	2,89 mm	3,80 mm

Wie aus Tabelle 6.4 zu sehen fällt die Positionsbestimmung des bewegten Lkws mittels Tachymeter mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% in einen Bereich von $\pm 2,89$ mm und mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% in einen Bereich von $\pm 3,80$ mm um den Erwartungswert. Diese Ergebnisse weisen eine hohe Genauigkeit des Tachymeters im Zielverfolgungsmodus aus, zumal die kurzen Zielweiten im Labor von 5 – 9m schwierige Bedingungen darstellen.

Da die Residuen durch die Trendabspaltung allerdings nur noch stochastische Anteile enthalten, kann an dieser Stelle keine Aussage über die systematischen Fehler des Tachymeters, wie sie z.B. nach Kapitel 2.3.2 durch eine mangelnde Synchronisation der Subsysteme des Tachymeters entstehen können, gemacht werden. Derartige Aussagen wären, wie oben bereits erwähnt, nur bei unabhängiger Bestimmung der Ist-Trajektorie des Lkws durch einen noch genaueren 3-D-Positionssensor möglich.

6.5.3 Auswirkungen der Positionsgenauigkeit auf die automatische Führung

Zur Analyse der Auswirkungen der Positionsgenauigkeit auf die Qualität der automatischen Führung werden im Folgenden die Konfidenzbänder der Residuen, berechnet im vorangegangenen Kapitel als Maß für die Positionsgenauigkeit, um die Ist-Trajektorie des Modell-Lkws gelegt. Dabei gilt folgende Rechenvorschrift:

$$\begin{aligned}
 K_{i,\alpha,unten} &= d_i - Y_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_R \\
 K_{i,\alpha,oben} &= d_i + Y_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_R
 \end{aligned}
 \tag{6.73}$$

In Abbildung 6.18 ist zur besseren Lesbarkeit der Grafik nur das Konfidenzband mit $\alpha = 95\%$ dargestellt. Es ist zu sehen, dass alle Positionsbestimmungen des automatisch geführten Modell-Lkws mit 95-prozentiger Sicherheit einen Abstand von $\pm 10\text{mm}$ zur Soll-Trajektorie nicht überschreiten.

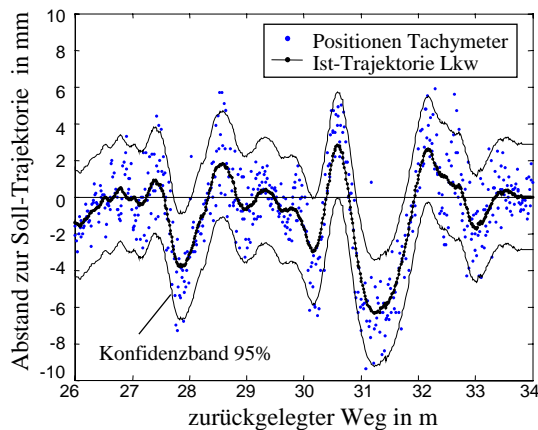


Abbildung 6.18: *Ist-Trajektorie des Lkws zusammen mit den Tachymetermessungen und dem Konfidenzband der Residuen.*

Weiterhin ist aus Abbildung 6.18 zu erkennen, dass die Tachymetermessungen immer im Bereich der lokalen Maxima des Abstands zur Soll-Trajektorie das Konfidenzband der Residuen überschreiten. Folglich liegt es nahe, von einer direkten Abhängigkeit zwischen der Abweichung des automatisch geführten Modell-Lkws zur Soll-Trajektorie und der Qualität der Tachymetermessungen zu sprechen. Außerdem sind die Lenkbewegungen des Modell-Lkws in Bereichen großer Abweichungen besonders groß, vor allem wenn diese Korrektur mit einer Kurve der Soll-Trajektorie zusammenfällt. Dies ist z.B. an der Stelle des zurückgelegten Weges von 31m der Fall. Es kann also angenommen werden, dass die heftigen Lenkbewegungen des Lkws wiederum die Genauigkeit der Positionsbestimmung mittels Tachymeter negativ beeinflussen. Ein Aufschaukeln der Abweichung des Lkws zur Soll-Trajektorie in Folge dieser wechselseitigen Abhängigkeit wird aber, wie das Experiment gezeigt hat, durch die Dämpfung des Regelkreises verhindert.

6.6 Ergebnisse der experimentellen Untersuchung

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung zeigen zunächst einmal, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, modular aufgebaute Führungssystem erfolgreich für die automatische Steuerung des Modell-Lkws eingesetzt werden kann.

Die mit dem Modell-Lkw und dem modularen Führungssystem durchgeführten Experimente zeigen weiterhin, dass eine erhebliche Verbesserung der Führungsqualität trotz bestehender Totzeit der Messeinrichtung möglich ist. Durch die Ergänzung des Reglers um eine antizipatorische Vorsteuerung wird es möglich, ein Tachymeter optimal als Messeinrichtung in den Regelkreis der automatischen Führung zu integrieren. Dabei setzt die Anwendung der antizipatorischen Steuerung eine möglichst exakte Berechnung des Radius der Soll-Trajektorie im Bereich der aktuellen Fahrzeugposition voraus. Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, stellt die Berechnung des Abstands zur Trajektorie im Bereich von Klothoiden nur eine Näherung dar. Dies erhöht den kompensatorischen Anteil der Stellgröße und

verursacht je nach Totzeit des Tachymeters Abweichungen zur Soll-Trajektorie im Bereich von $\pm 6\text{mm}$. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf, um die Berechnung des Radius, gerade auch bei qualitativ nicht so hochwertigen Soll-Trajektorien wie sie in der Praxis vorkommen können, zu optimieren.

Die Führung des Modell-Lkws gelingt mit einer maximalen Abweichung von $\pm 6\text{mm}$ bei einer Geschwindigkeit von 20cm/sec . Dies bedeutet eine um den Faktor 10 gesteigerte Geschwindigkeit im Vergleich zu den in der Praxis üblichen Geschwindigkeiten bei hohen Genauigkeitsanforderungen. Die Genauigkeitsuntersuchung der Abweichungen hat gezeigt, dass eine Wechselseitige Beziehung zwischen der Genauigkeit der Positionsbestimmung und Abstand des automatisch geführten Modell-Lkws zur Soll-Trajektorie besteht. Allerdings ist das Regelsystem in der Lage die Stochastik des Tachymeters weitestgehend zu kompensieren, so dass mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% die gemessenen Positionen des automatisch geführten Lkws im Bereich von $\pm 10\text{mm}$ liegt. Dabei weisen die Tachymetermessungen mit einer Standardabweichung von $\sigma_R = 1,47\text{mm}$ eine sehr hohe Genauigkeit auf.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hatte, wie bereits in der Einführung vorgestellt, im wesentlichen das Ziel, ein modulares System für die flexible Automatisierung von Bauprozessen zu entwerfen. Weiterhin sollte vor allem die Integration von Tachymetern als 3-D-Positionssensoren in die Regelkreise des Automatisierungssystems optimiert werden, um die Führungsqualität auch bei höheren Bewegungsgeschwindigkeiten im Genauigkeitsbereich unter einem Zentimeter Standardabweichung zu gewährleisten. Zur Erreichung dieser Ziele bedurfte es außerdem der Erweiterung geodätischer Kompetenzen im Bereich der Regelungstechnik.

Der Stand der Wissenschaft, dargestellt in Kapitel 1.2, zeigt umfassend die verschiedenen Automatisierungsaktivitäten im Bereich des Straßen- und Hochbaus sowie in der Landtechnik und bei der Fahraufgabe von Kraftfahrzeugen. Alle Forschungsaktivitäten haben als gemeinsame Ziele, den Menschen bei der Bedienung komplexer Systeme zu entlasten, die Qualität des Produkts und die Sicherheit zu steigern und gleichzeitig die Kosten zu senken. Aber gerade im sich dynamisch verändernden Baustellenumfeld bedarf es zum Erreichen dieser Ziele sehr flexibler Automatisierungssysteme, die sich je nach Situation effektiv an neue Umgebungsbedingungen und Aufgabenbereiche anpassen lassen. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass starre, nur für eine explizite Aufgabe geeignete Systeme, schlecht akzeptiert werden und somit nur in Nischen zu finden sind.

Als Grundlage des Entwurfs eines neuartigen, modularen Positionierungs- und Führungssystems bedurfte es in Kapitel 2 der Erarbeitung theoretischer Grundlagen auf den Gebieten der Systemtheorie, der Regelungstechnik und der Messtechnik. Diese Grundlagen wurden dabei weitestgehend anhand dem beispielhaften Entwurfs einer Kranregelung eingeführt.

Im dritten Kapitel wurde in einem generischen Ansatz das Anforderungsprofil an ein automatisches Positionierungs- und Führungssystem erarbeitet. Dazu wurden fünf Anwendungsgattungen definiert und die zur Erfüllung der Führungsaufgaben notwendigen Funktionen abgeleitet. Die Auswertung der aus 60 Einzelfunktionen bestehenden Funktionalmatrix prädestinierte die Anwendungsgattung „Führen von Arbeitsmitteln“ als Grundlage einer Systementwicklung, da sie sich als am komplexesten herausstellte. So konnte sichergestellt werden, dass das zu entwerfende Führungssystem auch für andere, weniger komplexe Anwendungsgattungen eingesetzt werden kann. Die Fülle der notwendigen Funktionen und die Variabilität der Anwendungsfälle bedingt den Entwurf eines modularen Systems, dessen Funktionalität einfach durch zusätzliche Module aus einer Toolbox verändert und erweitert werden kann.

Aufgrund der Modularität des Führungssystems ergeben sich vielfältige Ausprägungsvarianten, die wiederum hohe Anforderungen an die Spezifikation der Systemschnittstellen stellen. So waren diese beiden Aspekte schwerpunktmäßig bei dem in Kapitel 4 beschriebenen Systementwurf zu beachten. Das Systemkonzept wurde so angelegt, dass möglichst umfassendes Expertenwissen in den einzelnen Modulen des Führungssystems enthalten ist und der Anwender schnell und einfach das Führungssystem an neue Automatisierungsaufgaben anpassen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde als Messeinrichtung für die Positionierungs- und Führungsaufgaben auf zielverfolgende Tachymeter zurückgegriffen, da sie die höchste 3-D-Genauigkeit bei der Positionsbestimmung eines bewegten Objekts bieten. Wie sich moderne Tachymeter als prozessintegrierte 3-D-Positionssensoren verhalten, wo ihre Vorteile und Schwachstellen sind, war Gegenstand des fünften Kapitels. So wurde ein neues Verfahren zur vollständig automatischen Stationierung eines Tachymeters entwickelt, wodurch die

Integration von Tachymetern in Prozessabläufe wesentlich verbessert werden kann. Weiterhin konnte herausgearbeitet werden, dass die hohe Genauigkeit des Tachymeters im Führungsprozess nicht immer erreicht werden kann, da die zwecks freier Rundumsicht zwangsweise erhöhte Reflektorposition zu Genauigkeitseinbußen durch Neigungen des Objekts und durch thermische Einflüsse führt. Neben der reinen Positionsgenauigkeit hat die Dynamik des Tachymeters einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität einer automatischen Führung. Da Tachymeter, bedingt durch Abtastraten im Bereich von 10Hz und Delayzeiten von mehreren hundert Millisekunden, eine für regelungstechnische Maßstäbe sehr große Totzeit besitzen, führen Kurven in der Soll-Trajektorie zwangsläufig zu großen, nicht zu tolerierenden Abweichungen im Bereich mehrerer Zentimeter. Der Zusammenhang zwischen Totzeit, Radius der Soll-Trajektorie und Geschwindigkeit wurde hergestellt.

Das sechste Kapitel widmete sich der prototypischen Realisierung eines Führungssystems zur automatischen Steuerung eines Modell-Lkws. In diesem Experiment wurde bewusst auf einen Modell-Lkw als zu führendes System zurückgegriffen, da dieser über den Vorderradeinschlagwinkel als Stellgröße einfach zu beeinflussen und unter Laborbedingungen zu betreiben ist. Weiterhin wurde im Rahmen dieses Kapitels speziell auf die Abstandsberechnung zwischen Modell-Lkw und Soll-Trajektorie zur Bestimmung der Regelabweichung und auf den Reglerentwurf eingegangen. Der entworfene Zustandsregler ist in der Lage, den Lkw nur aufgrund der Positionsbestimmung mittels Tachymeter automatisch auf einer Soll-Trajektorie zu führen. So konnte authentisch die prinzipielle Eignung des entworfenen Führungssystems nachgewiesen werden.

Aufgrund des ungünstigen dynamischen Verhaltens des Tachymeters wiesen die ersten Fahrversuche Abweichungen von bis zu 40mm zur Soll-Trajektorie auf. Allerdings konnte der Regler durch die Analyse des menschlichen Verhaltens bei der Kraftfahrzeugführung wesentlich verbessert werden. Der Mensch besitzt ähnlich ungünstige dynamische Eigenschaften wie ein Regelkreis mit integriertem Tachymeter als Messeinrichtung. Trotzdem kann er, auch bei hohen Geschwindigkeiten, mit seinem Fahrzeug dem Straßenverlauf folgen, da er den Vorderradeinschlagwinkel aus Erfahrung und aufgrund der Kenntnis über den zukünftigen Straßenverlauf antizipiert. Basierend auf diesen Erkenntnissen konnte der Zustandsregler des automatischen Führungssystems um eine Vorsteuerung erweitert werden, um so das Tachymeter besser in den Regelkreis zu integrieren. Als Ergebnis zeigte sich, dass der Modell-Lkw mit dem modifizierten Regler der Soll-Trajektorie auch bei Geschwindigkeiten von 20cm/s mit Genauigkeiten im Bereich von ± 6 mm folgen kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das in dieser Arbeit entwickelte modulare Positionierungs- und Führungssystem es erstmalig ermöglicht, ein breites Spektrum an verschiedenen Bauprozessen mit einer Standardabweichung unter 1 cm zu automatisieren. Der Gedanke, das Automatisierungssystem auf einer Toolbox aufzubauen ist dabei entscheidend für die breite Anwendbarkeit des modularen Positionierungs- und Führungssystems. Außerdem ist das System damit offen für weitere Entwicklungen, so dass eine hochgenaue Automatisierung beliebiger Bauprozesse möglich ist. Die erarbeiteten genauigkeitsbegrenzenden Faktoren beim Einsatz von zielverfolgenden Tachymetern im Bauprozess sind dabei genauso von entscheidender Bedeutung wie die Entwicklung einer vollautomatischen Stationierung des Tachymeters. So kann dieser komplexe Sensor optimal in den Baubetrieb integriert werden. Dies trägt zusammen mit dem breiten Anwendungsspektrum des modularen Positionierungs- und Führungssystems entscheidend dazu bei, dass die Akzeptanz dieser Automatisierungslösung auf der Baustelle erhöht wird.

Ausblick

Auf Basis dieser Arbeit ergeben sich verschiedene direkte und indirekte Möglichkeiten für zukünftige Forschungsaktivitäten. So besteht die Notwendigkeit, den Umfang der Toolbox mit zusätzlichen Modulen zu erweitern, um weiteres Expertenwissen zugänglich zu machen. Die Integration unterschiedlicher 3-D-Positionssensoren sollte ebenso wie die Nutzung zusätzlicher Sensoren, wie z.B. Neigungssensoren, realisiert werden. Dabei gilt der Grundsatz: Je umfangreicher die Toolbox, desto einfacher kann das modulare Positionierungs- und Führungssystem an neue Automatisierungsaufgaben angepasst werden. Die Berechnung der Regelabweichung bietet vielfältige Forschungsmöglichkeiten im Bereich der Nutzung von Approximationsalgorithmen, um die Genauigkeit der Radius- und Abstandsberechnung auch bei verrauschten Soll-Trajektorien zu verbessern. Erste Untersuchungen zu diesem Thema wurden in Döring (2005) durchgeführt.

Eine weitere Steigerung der Führungsqualität hinsichtlich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit verspricht die Integration von mehreren 3-D-Positionssensoren. So besteht die Möglichkeit, mehrere Tachymeter zur Positionsbestimmung eines bewegten Objekts einzusetzen. Bei einer Unterbrechung der Sichtverbindung zu einem Tachymeter könnte die Führungsaufgabe trotzdem fortgesetzt und das ausgefallene Tachymeter automatisch wieder zum bewegten Ziel geführt werden. Die bei der Nutzung mehrerer Tachymeter auftretenden Überbestimmungen würden sich, basierend auf einer Ausgleichung, genauigkeitssteigernd auf die Positionsbestimmung des bewegten Objekts auswirken. Der modulare Aufbau des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Führungssystems begünstigt solche Überlegungen, da die Schnittstelle des Führungsmoduls für Positionsnachrichten jeglicher Herkunft offen ist. Weiterhin wurde die Positionsnachricht bereits zur Übertragung von Genauigkeitsinformationen spezifiziert. So könnte der Regler je nach Genauigkeit der Positionsbestimmung dynamisch in seinem Verhalten angepasst werden, was weitere Qualitätssteigerungen der automatischen Positionierung und Führung mit sich bringen würde.

Am Ende bleibt die Erkenntnis, dass die hochgenaue geometrische Positionierung und Führung von technischen Systemen jetzt und auch zukünftig vielfältige Entwicklungsmöglichkeiten bietet. Durch die konsequente Zusammenführung der Kenntnisse und Methoden aus den Bereichen der beteiligten Fachdisziplinen ergeben sich ungeahnte Automatisierungsmöglichkeiten für das Bauwesen.

Literatur

- ABDERRAHIM, M., GARCIA, E., DIEZ, R., BALAGUER, C. (2003): A Mechatronic Security System for Construction Site. In: Proceedings of 20st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Eindhoven, Netherlands.
- ACHTEN, V.T.J.M., DE GROOT, A.T., GOENSE, D. (2001): Implement Guidance Based on RTK-DGPS. In: Proceedings of Conference: Agricultural Engineering, Hannover, S. 331-336, VDI Verlag, Düsseldorf.
- BALAGUER, C., ABDERRAHIM, M., NAVARRO, J.M., BOUDJABEUR, S., AROMAA, P., KAHKONEN, K., SLAVENBURG, S., SEWARD, D., BOCK, T., WING, R., ATKIN, B. (2002): FutureHome: An integrated Construction Automation Approach. In: IEEE Robotics and Automation Society (Hrsg.): IEEE Robotics and Automation magazine, Vol. 9, Nr. 1, S. 55-66.
- BALAGUER, C. (2004): Nowadays Trends in Robotics and Automation in Construction Industry: Transition from hard to soft Robotics. In: Proceedings of 21st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Jeju, Korea.
- BARTELME, N. (2000): Geoinformatik. Modelle, Strukturen, Funktionen, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- BAYER, G., HECK, U., MÖNICKE, H.-J. (1998): Einsatz einer CCD-Kamera bei der Objektführung mittels Motortheodolit. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 11-12, 96. Jg., Hüthig Verlag, Heidelberg, S. 423-430.
- BAYER, G. (1992): Zur hochgenauen automatischen Führung langsam bewegter Objekte mit Zielverfolgungssystemen im Nahbereich. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 398, München.
- BAYER, G. (2004): Geometrische Führung von Baumaschinen. In: SCHWIEGER, V, FOPPE, K. (Red.): Kinematische Messmethoden – Vermessung in Bewegung, DVW Schriftenreihe, Band 45, Wißner Verlag, Augsburg, S. 215-232.
- BEETZ, A. (2003): Entwicklung ausgewählter Komponenten eines Regelkreises zur Fahrzeugsteuerung und deren Realisierung in einem Testsystem. Diplomarbeit am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Universität Stuttgart, unveröffentlicht.
- BERGER, M. (2001): Grundkurs der Regelungstechnik mit Anwendung der Student Edition of Matlab und Simulink. Books on Demand GmbH, Norderstedt.
- BOCK, T., KREUPL, K. (2004): Procedure for the Implementation of autonomous mobile Robots on the Construction Site. In: Proceedings of 21st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Jeju, Korea.
- BÖGE, A. (2003): Technische Mechanik. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden.
- BOUVET, D., GARCIA, G., GORHAM, B.J., BETAÏLE, D. (2000): 3-D Localization of Pavers in a Computer Integrated Road Construction Context. In: Proceedings of the 1st IARP Workshop on Advances In Robotics for Mining and Underground Applications, Brisbane, Australia.
- BRAMMER, K., SIFFLING, G. (1994): Kalman-Bucy-Filter. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- CASPARY, W. (2002): Kinematische Messmethoden. In: Deutscher Verein für Vermessungswesen e.V. (Hrsg.): Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV), Heft 5, Wißner Verlag, Augsburg,
- CHO, C.-Y., PARK, J., LEE, J., KIM, H.-S., KIM, J.-T. (2004): A Study on Development of the Automated Vertical Controllable Pilot-Type Equipment for PHC Piles. In: Proceedings of 21st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Jeju, Korea.

- CORKE, P. (2003): Dragline Automation: Experimental Evaluation through Productivity Trial. In: Proceedings of 4th International Conference on Field and Service Robots, Lake Yamanaka, Japan.
- DEPENTHAL, C. (2004): Twists and Tilts of Tripods Using Robot Tacheometers. In: KOPACIK, WUNDERLICH, GRÜNDIG (Hrsg.): INGENIO 2004, Proceedings of 3rd International Conference on Engineering Surveying and FIG Regional Event for the Central and Eastern Europe, TS4, Bratislava, Slowakei, (CD).
- DICKMANN, E.D. (1991): Vehicle Guidance by Computer Vision. In: PAPAGEORGIOU, M. (Eds.): Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems, Pergamon Press, S. 597-602.
- DIEKHANS, N. (2000): Automatische Spurführung bei Landmaschinen. In: Proceedings of Conference: Agricultural Engineering, Münster, S. 337-341, VDI Verlag, Düsseldorf.
- DIERKS, K. (2003): Zambezi Brücke. Internetquelle –<http://www.klausdierks.com>
- DIN (1994): Internationales Wörterbuch der Metrologie, Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.
- DÖRING, T. (2005): Gleitende Approximation von Polygonen zur Generierung glatter Trajektorien. Studienarbeit am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Universität Stuttgart, unveröffentlicht.
- DONGES, E. (1978): Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 24. Jahrgang, S. 98-112.
- DÜNISCH, M. (1999): Programmierprinzipien prozessgesteuerter Tachymeter. In: DVW-Landesverein Baden-Württemberg (Hrsg.): Mitteilungen, Heft 2, 46. Jg., Heft 2, S. 115-121.
- EICHHORN, A. (2005): Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven Kalman-Filterung. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 585, München.
- FELDMANN, K., KOCH, M. (2000): Chances, Obstacles and a possible Trend of Automation in Construction from the Point of View of the German Construction Industry. In: Proceedings of 17th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Taipei, Taiwan.
- FLEISCHMANN, R., VISCOMI, B.V., LU, L.W. (1992): Development, Analysis and Experimentation of ATLSS Connections for Automated Construction. In: Proceedings of 1st World Conference on Steel Structure, Acapulco, Mexico.
- FÖLLINGER, O. (1994): Regelungstechnik. Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. 8. überarbeitete Auflage. Hüthig Buch Verlag, Heidelberg.
- FOPPE, K., SCHWIEGER, V., STAIGER, R. (2004): Grundlagen kinematischer Mess- und Auswertverfahren. In: SCHWIEGER, V., FOPPE, K. (Red.): Kinematische Messmethoden – Vermessung in Bewegung, DVW Schriftenreihe, Band 45, Wißner Verlag, Augsburg, S. 3-18.
- FRANKE, U. (1999): Aktives Sehen in aktiven Fahrzeugen? Künstliche Intelligenz, Heft 1, S. 31-32.
- FRANKE, U., GAVRILA, D., GÖRZIG, S., LINDNER, F., PARTZOLD, F., WÖHLER, C. (1999): Autonomous Driving approaches Downtown. IEEE Intelligent Systems, Vol. 13, Nr. 6.
- FREUND, E. (1987): Regelungssysteme im Zustandsraum I. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- FURLANI, K.M., PFEFFER, L.E. (2001): Automated Tracking of Structural Steel Members at the Construction Site. In: Proceedings of 18th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Kraków, Poland.
- GAMBO, E., BALAGUER, C. (1997): Robot Assembly System for the Construction Process Automation. In: Proceedings of the IEEE international Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, USA.

- GEOiD (1998): Firmenprospekt der Firma GEOiD Ingenieure, Veitshöchheim.
- GILSINN, D.E., CHEOK, G.S., LYTLE, A.M. (2004): Pose of I-Beams for Construction Site Automation. In: Proceedings of 21st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Jeju, Korea.
- GIROD, B., RABENSTEIN, R., STENGER, A. (1997): Einführung in die Systemtheorie. Teubner Verlag, Stuttgart.
- GLÄSER, A., KNIHS, M., KUHLMANN, H., MÖHLENBRINK, W. (2002): Einrichtung zum zielgeführten Positionieren eines handgeführten Werkzeuggeräts. Patent, Nr. DE10133321A1.
- GLÄSER, A. (2003): Steuerung autonomer Baumaschinen - Ein Simulator. In: Jamal, R., Jaschinski, H. (Hrsg.): Virtuelle Instrumente in der Praxis, VIP2003, Hüthig Verlag, Heidelberg, München, S. 277-282.
- GLÄSER, A., SCHOLLMMEYER, R. (2004): Messwerterfassung und -synchronisation in Multisensorsystemen. In: SCHWIEGER, V, FOPPE, K. (Red.): Kinematische Messmethoden – Vermessung in Bewegung, DVW Schriftenreihe, Band 45, Wißner Verlag, Augsburg, S. 35-58.
- GLÄSER, A. (2005): A Modular System for Guidance and Control Applications for Construction Machines. In: GRÜN, A., KAHMEN, H. (Eds.): Proceedings of the 7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Volume I, pp. 307-316, Vienna.
- GLATTFELDER, A.H., SCHAUFELBERGER, W. (1997): Lineare Regelsysteme - Eine Einführung mit Matlab. Hochschulverlag an der ETH Zürich.
- GLAUS, R., LAUENER, N., MÜLLER, U., BAUMELER, M. (2004): Der Gleismesswagen Swiss Trolley: Leistungsmerkmale und Anwendungen. In: INGENSAND, H. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2004, Reprozentrale ETH Höngerberg, S. 27-37.
- GOLLUB, L. (2003): Messen, Steuern und Regeln mit TCP/IP. Franzis-Verlag, Poing.
- GRIEPENTROG, H.-W., NORREMARK, M. (2001): Bestandsführung mittels kartierter Pflanzenpositionen. In: Proceedings of Conference: Agricultural Engineering, Hannover. S.285-290.
- GROSS, D., HAUGER, D., SCHNELL, W., SCHRÖDER, J. (2004): Technische Mechanik 3 – Kinetik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- GRUBER, F.J., JOECKEL, R. (2001): Formelsammlung für das Vermessungswesen, 10. Auflage, Wittwer-Verlag, Stuttgart.
- HA, Q.P., NGUYEN, Q.H., RYE, D.C., DURRANT-WHYTE H.F. (2000): Impedance Control of a hydraulically-actuated Robotic Excavator. In: KALAY, Y.E., SKIBNIEWSKI M.J. (Eds.): Journal of Automation in Construction, Volume 9, n° 5-6, Verlag Elsevier Science, Amsterdam, S. 421-435.
- HACHE, (2004): Architekturbüro. Internetquelle – <http://architekt-hache.de>.
- HÄBLER, J., WACHSMUT, H. (1994): Formelsammlung für den Vermessungsberuf, 5. Auflage, W. Bing-Verlag, Korbach.
- HEIKKILÄ, R., JAAKKOLA, M. (2003a): Automatic Control of Road Construction Machinery - Feasibility and Requirements. In: Proceedings of 20st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Eindhoven, Netherlands.
- HEIKKILÄ, R., JAAKKOLA, M. (2003b): Intelligent Road Construction Site - Development of Automation into total Working Process of Finnish Road Construction. In: Proceedings of 20st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Eindhoven, Netherlands.

- HEIKKILÄ, R., JAAKKOLA, M. (2004): 3-D Real-Time Accuracy Control of automated Road Construction Machines. In: Proceedings on 21st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Jeju, Korea.
- HENNES, M. (2000): Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit trackender Totalstationen. In: SCHNÄDELBACH, K., SCHILCHER, M. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, S. 334-339.
- HEUNECKE, O. (1995): Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filter). Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 208, Hannover.
- HEUNECKE, O., KUHLMANN, H. (2002): Auswerteverfahren für Deformationsmessungen aus geodätischer Sicht. In: SCHWARZ, W. (Red.): Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen, Schriftenreihe des DVW, Band 43, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, S. 103-116.
- HEUNECKE, O., NIEMEIER, W. (2004): Paradigmenwechsel bei der Auswertung ingenieurgeodätischer Messungen: Konzepte, Herausforderungen, Trends. In: INGENSAND, H. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2004, Reprozentrale ETH Höggerberg, S. 131-142.
- HIERSCHE, E.-U. (1990): Automatische Fahrzeugführung auf Autobahnen. In: Automobil-Industrie, Nr. 2, Verlag Vogel Auto Medien GmbH & Co. KG, S. 199ff.
- HÖPCKE, W. (1980): Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung. Verlag Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- HOFFMANN, J. (Hrsg.) (2002): Taschenbuch der Messtechnik. 3. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Wien.
- HUANG, P. (2004): Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften. Dissertation, Lehrstuhl für Maschinenwesen, Technische Universität München.
- HUEP, W. (1986): Zur Positionierung im gestörten KALMAN-Filter am Beispiel eines manövrierenden Wasserfahrzeuges. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 143, Hannover.
- IKEDA, H., SUGIMOTO, N., SAITO, T., ONISHI, M. (2000): Safety Control Mechanism for Construction Working Robots in Collaboration with Human Workers. In: Proceedings of 17th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Taipei, Taiwan.
- ISERMANN, R. (1974): Prozessidentifikation. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- ISERMANN, R. (1988a): Identifikation dynamischer Systeme. Band 1, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo.
- ISERMANN, R. (2002): Regelungstechnik I. Shaker Verlag, Aachen.
- ISERMANN, R. (2005): Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren. In: Zeitschrift für Automatisierungstechnik, Nr. 53, Ausgabe 1, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 1-3.
- JAAKKOLA, M., HEIKKILÄ, R. (2004): Towards Model based Automation - Different Types of 3-D Machine Control Models for the automatic Control of Road Construction Machinery. In: Proceedings of 21st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Jeju, Korea.
- JURASZ, J., KLEY, K.L (2002): A Cost-Effective Positioning Solution for Asphalt Rollers Based on Low-Cost DGPS Receivers. In: Proceedings of 19th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Gaithersburg, Maryland, pp. 403-408.

- JURETZKO, M. (2005): Reflektorlose Video-Tachymetrie - ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 588, München.
- KAFKA, G. (2005): WLAN. Hanser Verlag, München, Wien.
- KAHMEN, H., SCHWÄBLE, R., SUHRE, H. (1984): Ein "intelligentes" polares Vermessungssystem für die Beobachtung statischer Punktfelder und kinematischer Vorgänge. In: Deutscher Verein für Vermessungswesen e.V. (Hrsg.): Zeitschrift für Vermessungswesen, 109. Jg., Heft 11, S.553-563.
- KAHMEN, H., STEUDEL, J. (1988): Das automatisch zielende Meßsystem GEOROBOT II. In: SCHNÄDELBACH, K., EBNER, H. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 88, Dümmler Verlag, Bonn.
- KAHMEN, H. (1995): Regelkreisgesteuerte Meßprozesse: Ein bedeutender Schritt in der geodätischen Meßtechnik, In: Festschrift "Draheim, Kuntz, Mälzer", S. 103-111, Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe.
- KAHMEN, H., RETSCHER, G. (1997): Gleisvermessung mit einem Multi-Sensorsystem und linearen Filterverfahren. In: Deutscher Verein für Vermessungswesen (Hrsg.): Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 12, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, S. 549-560.
- KAHMEN, H., WUNDERLICH, TH., RETSCHER, G., KUHN, M., PLACH, H., TEFERLE, F.N., WIESER, A. (1998): Ein modulares Konzept zur Absteckung von Hochgeschwindigkeitstrassen. In: Deutscher Verein für Vermessungswesen (Hrsg.): Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 4, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, S. 115-121.
- KAHMEN, H., RETSCHER, G. (1999): Precise 3-D Navigation of Construction Machine Platforms. In: Proceedings of the International Workshop on Mobile Mapping Technology, Bangkok, Thailand. S. 5A-2.1-5A-2.5.
- KARAMITSOS, F. (1991): DRIVE. In: PAPAGEORGIU, M. (Eds.): Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems, Pergamon Press, S. 107-112.
- KHOSHNEVIS, B. (2003): Toward Total Automation of On-Site Construction - An Integrated Approach based on Contour Crafting. In: Proceedings of 20st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Eindhoven, Netherlands.
- KILPELÄINEN, P., NEVALA, K., TUKEVA, P., RANNANJÄRVI, L., NÄYHÄ, T., PARKKILA, T. (2004): The intelligent Construction Site - The modular Control System for the Road Construction Machines. Forschungsbericht der VTT Elekroniikka - Research Notes: 2255, Finland.
- KOPF, M. (1994): Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 12, Nr. 203, VDI-Verlag Düsseldorf.
- KRAISS, K.-F. (1998): Benutzergerechte Automatisierung - Grundlagen und Realisierungskonzepte. In: Zeitschrift für Automatisierungstechnik, Nr. 46, Ausgabe 10, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 457-467.
- KRAMER, E., SCHWARZ, J. (2004): Anforderungen zukünftiger Einsatzszenarien an autonome Feldroboter. In: Zeitschrift für Landtechnik, Heft 5, Landwirtschaftsverlag, Münster, S. 258-259.
- KRICKEL, B. (2004): Leistungskriterien zur Qualitätskontrolle von Robottachymetern. Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Nr. 92.
- KUHLMANN, H. (2001): Alignment of rails on slab track with robotic tacheometers. In: Proceedings of the 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Kairo.

- KUHLMANN, H. (2004): Mathematische Modellbildung zu kinematischen Prozessen. In: SCHWIEGER, V., FOPPE, K. (Red.): Kinematische Messmethoden – Vermessung in Bewegung, DVW Schriftenreihe, Band 45, Wißner Verlag, Augsburg, S. 19-33.
- KUTZBACH, H.D., STOLL, A. (2004): Autonome Fahrzeuge - Mit Satellitennavigation präzise fahren. In: Universität Hohenheim (Hrsg.): Landinfo 03/2004, Landwirtschaftlicher Hochschultag, S. 16-24.
- LIGIER, A., FLIEDNER, J., KAJANEN, J., PEYRET, F. (2001): Open System for Road Information Support. In: Proceedings of 18th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Kraków, Poland.
- LINKWITZ, K., HANGLEITER, U. (Eds.) (1995): High Precision Navigation 95. Dümmler Verlag, Bonn.
- LOVE, P. (2003): A Project Management Quality Cost Information System for the Construction Industry. In: Information and Management 40, pp. 649-661.
- LUNZE, J. (2001): Regelungstechnik 1. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- LUNZE, J. (2005): Regelungstechnik 2. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- LUTZ, H., WENDT, W. (2003): Taschenbuch der Regelungstechnik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main.
- LYTLE, A., SAIDI, K., STONE, W. (2002): Development of a Robotic Structural Steel Placement System. In: Proceedings of 19th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Gaithersburg, Maryland.
- MAGNUS, K., MÜLLER, H. H. (1990): Grundlagen der Technischen Mechanik. Verlag Teubner, Stuttgart.
- MAI, C. (1998): Effiziente Produktplanung mit Quality Function Deployment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- MANSFELD, W. (1998): Satellitenortung und Navigation. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden.
- MASAKI, I. (Eds.) (1992): Vision-based Vehicle Guidance. Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg.
- MAYR, R. (1991): Verfahren zur Bahnfolgeregelung für ein automatisch geführtes Fahrzeug. Dissertation der Fakultät für Elektrotechnik der Universität Dortmund.
- MAYR, R. (1995): A Nonlinear Control Strategy for Automated Vehicle Following. In: REMBOLD, U. (Eds.): Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, Karlsruhe, IOS Press, Amsterdam, Oxford, Washington D.C.
- MAYR, R. (2001): Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- MEYER, H. (2003a): Anwendung leitdrahtloser Maschinensteuerungen bei Straßenfertigern. In: Verband Deutscher Vermessungsingenieure (Hrsg.): Der Vermessungsingenieur – Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, Heft 3, Verlag Chmielorz GmbH, Wiesbaden, S. 188-191.
- MEYER, H. (2003b): Anwendung von geodätischen Positionsmesssystemen in Straßenbaumaschinen. In: Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen, Heft 23, Frankfurt.
- MICHALOWSKI, S., SOBCZYK, A., TRZASKA, W. (2001): The Influence of Structure of mobile Construction Manipulators on their kinematic and dynamic Characteristics. In: Proceedings of 18th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Kraków, Poland.
- MITSCHE, M., WALLENTOWITZ, H. (2004): Dynamik der Kraftfahrzeuge. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

- MÖHLENBRINK, W. (1989a): Realtime Surveying in Close Range Area with Inertial Navigation Systems and Optical Target Tracking Techniques. In: LINKWITZ, K., HANGLEITER, U. (Eds): High Precision Navigation, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 443-456.
- MÖHLENBRINK, W. (1989b): Hochgenaue Richtungsmessung mit automatischer Zielerfassung. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 2. Wichmann Verlag, Heidelberg. Ausgabe 5, S. 177-184.
- MÖHLENBRINK, W. (1999): Zielverfolgende Tachymeter im Bauprozeß. In: DVW-Landesverein Baden-Württemberg (Hrsg.): Mitteilungen, Heft 2, 46. Jg., Heft 2, S. 73-78.
- MÖHLENBRINK, W., KUHLMANN, H., DÜNISCH, M. (2002): Vermessung "Feste Fahrbahn", Verfahren für die Vermessung der Bauart "Feste Fahrbahn". In: Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure- VDEI- E.V. (Hrsg.): Eisenbahn-Ingenieur-Kalender, Tetzlaff-Verlag, Hamburg, S. 159-176.
- MÖHLENBRINK, W. (2004): High-Speed-Track Köln-Rhein-Main - Robot Tacheometers for semi-automatic Construction Processes. In: KOPACIK, WUNDERLICH, GRÜNDIG (Hrsg.): INGENEO 2004, Proceedings of 3rd International Conference on Engineering Surveying and FIG Regional Event for the Central and Eastern Europe, TS4, Bratislava, Slowakei, (CD).
- MÖNICKE, H.-J., DIETZ, E.-N., FRITSCHI, J. (1996): Zur Integration von Vermessung und Baumaschinenführung. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 2. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- MÖSER, M. (2000): Handbuch Ingenieurgeodäsie: Grundlagen. In: Möser, M., Müller, G., Schlemmer, H., Werner, H. (Hrsg.): Handbuch der Ingenieurgeodäsie. Wichmann, Heidelberg.
- MÜLLER, W.H., FERBER, F. (2003): Technische Mechanik für Ingenieure. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Wien.
- MUHR, T. (2004): Georeferenzierung und Navigation - Ortungssensoren als Schlüsseltechnologie für Precision Farming. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Berichte 1829, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 37-44.
- NAAB, K. (2000): Automatisierung bei der Fahrzeugführung im Straßenverkehr. In: Zeitschrift für Automatisierungstechnik, Nr. 48, Ausgabe 5, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 211-223.
- NEUMANN, A. (1996): Quality Function Deployment. Dissertation, Band 29, Shaker Verlag, Aachen.
- NISHIMURA, J., AZUCHI, T., AITA, H., KOBAYASHI, H., NOMURA, H. (2000): Navi-System: Automated Survey System for Marking Work in Construction Site. In: Proceedings of 17th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Taipei, Taiwan.
- NOACK, P.O. (2004): GPS gestützte automatische Lenksysteme. In: Zeitschrift für Landtechnik, Heft 5, Landwirtschaftsverlag, Münster, S. 256-257.
- OBERNDORFER, (2005): Fertigteilbau. Internetquelle – <http://www.oberndorfer.at>
- PEYRET, F. (1999): The Paradigm of Computer Integrated Construction applied to Civil-Engineering. In: Proceedings of 16th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Madrid, Spain.
- PEYRET, F. (2000): The Achievements of the "Computer Integrated Road Construction" Project. In: Proceedings of 17th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Taipei, Taiwan.
- PEYRET, F., JURASZ, J., CARREL, A., ZEKRI, E., GORHAM, B. (2000): The Computer Integrated Road Construction Project. In: KALAY, Y.E., SKIBNIEWSKI M.J. (Eds.): Journal of Automation in Construction, Volume 9, n° 5-6, Verlag Elsevier Science, S. 447-461.

- PEYRET, F., MIYATAKE, H. (2001): Standardization of Information Systems for Civil-Engineering Sites. In: Proceedings of 18th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Kraków, Poland.
- POLTINGER, A. (1998): Construction Machine Guidance - Reliable Sensors in Harsh Enviroment. In: Kahmen, H., Brückl, E., Wunderlich, Th. (Eds.): Proceedings of 1st IAG-Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Eisenstadt, Austria, S. 67-78.
- POPPY, W., UNGER, E. (2000): CANopen for mobile Construction Machines - An open Communication Network for Control and Automation. In: Proceedings of 17th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Taipei, Taiwan.
- PRITSCHOW, G., KURZ, J., DALACKER, M., LUBMANN, A. (1995): Mobile Mauerroboter für den Baustelleneinsatz: Programmierung, Wirtschaftlichkeit und erste experimentelle Ergebnisse. In: Dillmann, R., et al. (Hrsg.): Autonome Mobile Systeme 1995. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 10-19.
- PRITSCHOW, G., DALACKER, M., KURZ, J., MCCORMAC, S. (1996): Praxisgerechte Sensorstrategien für die Lokalisierung eines mobilen Mauerroboters auf der Baustelle. In: Schmidt, G., et al. (Hrsg.): Autonome Mobile Systeme 1996. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 302-311.
- PRITSCHOW, G., KURZ, J., ZEIHNER, J., FESSELE, T. (1997): Konzept für einen praxisgerechten mobilen Bauroboter zum teilautomatisierten Verputzen von Innenwänden. In: Levi, P., et al. (Hrsg.): Autonome Mobile Systeme 1997. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 246-257.
- PROFOS, P., PFEIFER, T. (1997): Grundlagen der Messtechnik. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- REINELT, W., KLIER, W., REIMANN, G. (2005): Systemsicherheit des Active Front Steering. In: Zeitschrift für Automatisierungstechnik, Nr. 53, Ausgabe 1, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 36-43.
- REITERER, A., KAHMEN, H., EGLY, U., EITER, T. (2003): 3D-Messverfahren mit Videotheodoliten und automatisierter Zielpunkterfassung mit Hilfe von Interest Operatoren. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 4, 110. Jg., Hüthig Verlag, Heidelberg, S. 150-156.
- RETSCHER, G., EGBONU, U. (2000): Problem der Lageveränderung des Drehpunktes von Baumaschinen bei der kinematischen Steuerung. In: Deutscher Verein für Vermessungswesen (Hrsg.): Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 9, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- RETSCHER, G. (2001): Trajectory Determination for Machine Guidance Systems. In: Proceedings of KIS2001 Symposium, June 5-9, Banff, Canada.
- RETSCHER, G. (2002): Multi-Sensor Systems for Machine Guidance and Control. In: Proceedings of FIG XXII International Congress, TS6, April 19-26, Washington, D.C. USA.
- RIEDER, A. (2000): Fahrzeuge sehen: multisensorische Fahrzeugerkennung in einem verteilten Rechnersystem für autonome Fahrzeuge. Dissertation an der Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik.
- ROBERTS, W., OGUNDIPE, O., DODSON, A.H. (2002): Construction Plant Control Using RTK GPS. In: Proceedings of the FIG XXII International Congress, Washington, D.C. USA.
- SBG (2006): SBG, Firmenprospekt GeoRog. Internetquelle –<http://www.sbg.se>
- SCHLEMMER, H. (1996): Grundlagen der Sensorik. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- SCHMIDT, F. (2003): Hochgenaue digitale Geländemodelle: Untersuchungen zur Erstellung, Analyse und Anwendung in der Landwirtschaft. Dissertation, Universität Rostock.
- SCHMIDT, G. (1991): Grundlagen der Regelungstechnik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

- SCHMITT, J., SCHORN, M., STÄHLIN, U., ISERMANN, R. (2005): Entwicklungsumgebung mit echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugmodellen für sicherheitskritische Fahrerassistenzsysteme. In: Zeitschrift für Automatisierungstechnik, Nr. 53, Ausgabe 1, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 28-35.
- SCHNEUWLY, B. (1988): TOPOMAT, ein Vermessungsroboter. In: SCHNÄDELBACH, K., EBNER, H. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 88, Dümmler Verlag, Bonn.
- SCHWARZ, W. (1996): Kinematische Sensoren – Klassifizierung und Leistungsfähigkeit. In: Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung, Schriftenreihe des DVW, 22/1996, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- SHLADOVER, S.E. (1993): Highway Automation: Regional Mobility Impacts Assessment. In: Proceedings of Transportation Research Board, 72nd Annual Meeting, Washington, D.C..
- SKUTEK, M., LINZMEIER, D. (2005): Fusion von Sensordaten am Beispiel von Sicherheitsanwendungen in der Automobiltechnik. In: Zeitschrift für Automatisierungstechnik, Nr. 53, Ausgabe 7, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 295-305.
- SONG, S.-H., LEE, H.-S. (2004): Analysis and Utilization of Quality Cost in Construction Projects. In: Proceedings of 21st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Jeju, Korea.
- SONG, J., CALADAS, C., ERGEN, E., HAAS, C., AKINCI, B. (2004): Field Trials of RFID Technology for Tracking Pre-fabricated Pipe Spools. In: Proceedings of 21st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Jeju, Korea.
- STEMPFHUBER, W., SCHNÄDELBACH, K., MAURER, W. (2000): Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern. In: SCHNÄDELBACH, K., SCHILCHER, M. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, S.144-154.
- STEMPFHUBER, W., MAURER, W. (2001): Leistungsmerkmale von zielverfolgenden Tachymetern bei dynamischen Applikationen. In: HEISTER, H. (Eds.): Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik, 54. DVW-Fortbildungsseminar, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- STEMPFHUBER, W. (2004): Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr.576, München.
- STEVENS, W.R. (2004): TCP-IP. Hüthig Verlag, Heidelberg.
- STOLL, A., KUTZBACH, H.D. (2000): Führung von Landmaschinen mit GPS. In: Proceedings of Conference: Agricultural Engineering, Münster, S.331-336, VDI Verlag, Düsseldorf.
- STOLL, A., BREUNINGER, T. (2004): Messverfahren zur Bestimmung der Fahrgenauigkeit GPS geführter Maschinen. In: Zeitschrift für Landtechnik, Heft 3, Landwirtschaftsverlag, Münster, S.150-151.
- TAYLOR, M., WAMUZIRI, S.C., SMITH, G.N. (2000): Analysis of Risk in Construction Automation Investment. In: Proceedings of 17th International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Taipei, Taiwan.
- TRÄCHTLER, A. (2005): Integrierte Fahrdynamikregelung mit ESP, aktiver Lenkung und aktivem Fahrwerk. In: Zeitschrift für Automatisierungstechnik, Nr. 53, Ausgabe 1, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 11-19.
- UNBEHAUEN, R. (1980): Systemtheorie: Eine Darstellung für Ingenieure. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- UNBEHAUEN, R. (1997): Systemtheorie 1: Allgemeine Grundlagen, Signale und lineare Systeme im Zeit- und Frequenzbereich. Oldenbourg Verlag, München, Wien.

- UNBEHAUEN, R. (1998): Systemtheorie II: Mehrdimensionale, adaptive und nichtlineare Systeme. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- VOY, CHR., HAMM, L., PANIK, F., REISTER, D. (1986): PROMETHEUS, ein europäisches Forschungsprojekt zur Gestaltung des Straßenverkehrs der Zukunft. In: VDI-Berichte 612, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 1-13.
- WASMEIER, P. (2004): Potenzial der Objekterkennung mit dem Servotachymeter TCA2003. In: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (Hrsg.): Geomatik Schweiz, Heft 2, Verlag SIGImedia AG, Scherz, S. 62-65.
- WEICHERT, N., WÜLKER, M. (2000): Messtechnik und Messdatenerfassung. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- WEILKES, M., BÜRKLE, L., RENTSCHLER, T., SCHERL, M. (2005): Zukünftige Fahrzeugführungsassistenten – Kombinierte Längs- und Querregelung. In: Zeitschrift für Automatisierungstechnik, Nr. 53, Ausgabe 1, Oldenbourg Verlag, München, Wien, S. 4-10.
- WELSCH, W. M., HEUNECKE, O., KUHLMANN, H. (2000): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. In: MÖSER, M., MÜLLER, G., SCHLEMMER, H., WERNER, H. (Hrsg.): Handbuch Ingenieurgeodäsie, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- WELSCH, W. M., HEUNECKE, O. (2001): Models and Terminology for the Analysis of Geodetic Monitoring Observations. In: Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Commission 6, Orange, 390-412.
- WERNER, M. (2000): Signale und Systeme. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden.
- WIKIPEDIA (2006a): Freie Enzyklopädie, Internetquelle – <http://de.wikipedia.org/wiki/Positionierung>
- WIKIPEDIA (2006b): Freie Enzyklopädie, Internetquelle – <http://de.wikipedia.org/wiki/Ortung>
- WILTSCHKO, T. (2004): Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 12, Nr. 570, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- WIRTGEN (2002): Wirtgen GmbH, Firmenprospekt. Internetquelle – <http://www.wirtgen.de>
- WUNDERLICH, TH. (2004): Geodetic Monitoring with Prismless Polar Methods. In: KOPACIK, WUNDERLICH, GRÜNDIG (Hrsg.): INGEO 2004, Proceedings of 3rd International Conference on Engineering Surveying and FIG Regional Event for the Central and Eastern Europe, TS4, Bratislava, Slowakei.
- YAMAZAKI, Y., MAEDA, J. (1998): The SMART system: an integrated application of automation and information technology in production process. In: Journal of Computers in Industry, Volume 35, n° 1, Verlag Elsevier Science, S. 87-99.
- YAMAZAKI, Y. (2004): Future Innovative Construction Technologies: Directions and Strategies to Innovate Construction Industry. In: Proceedings of 21st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Jeju, Korea.
- YOSHIDA, T., HIRASHITA, H. (2003): Study of Data Exchange for Use by Construction Information Systems. In: Proceedings of 20st International Symposium on Automatization and Robotics in Construction, Eindhoven, Netherlands.
- ZIEGLER, H. (1970): Vorlesungen über Mechanik. Birkhäuser Verlag, Basel, Stuttgart.
- ZIMMERMANN, D. (2004): Dreidimensional gesteuerte Baumaschinen. In: INGENSAND, H. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2004, Repräsentative ETH Höngerberg, S. 193-204.

Verzeichnis der Variablen

A	Designmatrix
a	Beschleunigung, Koeffizient einer Differentialgleichung oder Polynom
B	Matrix der Bedingungsgleichungen
B	Bestimmtheitsmaß der Regression
b	Koeffizient einer Differentialgleichung
D	Impulsmoment
d	orthogonaler Abstand eines Punktes zu einer Trajektorie oder zu einem anderen Soll-Punkt, im Umfeld eines Kalman-Filters auch Bezeichnung der Innovation
ds	Abstand der aktuellen Position normal zur gegebenen Soll-Trajektorie
e	Regelabweichung ($e = w - y$)
F	gerichtete Kraft
$F(j\omega)$	Fouriertransformierte
$F(s)$	Laplace-transformierte
$G(s)$	Übertragungsfunktion eines Systems im Frequenzbereich
$ G(s) $	Amplitudenverstärkung eines Systems im Frequenzbereich
k	statische Verstärkung (z.B. Teil der Übergangsfunktion eines P-Gliedes)
K, k	Rückführmatrix, Rückführvektor eines Zustandsreglers
l	beliebige Variable (Faktor), Abstand Fahrzeug-Vorderachse zu Hinterachse
l_H	Abstand Fahrzeug-Hinterachse zu geometrischem Schwerpunkt
M	Kreismittelpunkt
M_P	Momente des in Punkt P angreifenden Kräftesystems
m	Masse eines Körpers, Zählvariable
n	Zählvariable, Exponent einer Differentialgleichung oder Polynom (Ordnung)
O	Bezeichnung des Angriffspunktes einer Kraft F
P	beliebiger Punkt P
p	Impuls
q	Exponent einer Differentialgleichung oder Polynom (Ordnung), Zählvariable
R	Radius
r_P	Ortsvektor zum Punkt P
r	Messrauschen, Zählvariable
S	Störmatrix des gestörten KALMAN-Filters
s	komplexe Frequenz
s_i, s_{oi}	Pole, Nullstellen eines dynamischen Systems
T	Transitionsmatrix des KALMAN-Filters

t	Zeitvariable, Epoche
u, \mathbf{u}	Eingangsgröße(n) eines Systems
V	Spannung
v	Geschwindigkeit
w	Führungsgröße
w_R	Rauschvektor des gestörten KALMAN-Filters
X	X-Koordinate des übergeordneten Baustellenkoordinatensystems
X_0	Ursprung des tachymeterinternen Polarkoordinatensystems im Baustellensystem
x	Zustandsvariable
\mathbf{x}	Zustandsvektor
Y	Y-Koordinate des übergeordneten Baustellenkoordinatensystems
Y_0	Ursprung des tachymeterinternen Polarkoordinatensystems im Baustellensystem
y, \mathbf{y}	Ausgangsgröße(n) eines Systems oder Regelgröße
y_m	gemessene Regelgröße als Ausgang der Messeinrichtung
Z	Z-Koordinate des übergeordneten Baustellenkoordinatensystems
Z_0	Ursprung des tachymeterinternen Polarkoordinatensystems im Baustellensystem
z	Störgröße
α	Fahrzeugorientierung
δ	Dämpfungskonstante
δ_v	Vorderradeinschlagwinkel
θ	Rollwinkel eines Systems gegenüber dem Zielkoordinatensystem
λ	Eigenwert
τ	Zeitraum
ϕ	Orientierungsunbekannte
φ	Phasenverschiebung, Nickwinkel eines Systems gegenüber dem Zielkoordinatensystem
ψ	Gierwinkel eines Systems gegenüber dem Zielkoordinatensystem
ω	Frequenz
ω_s	Schnittfrequenz im Amplitudengang einer Übergangsfunktion $G(s)$

Lebenslauf

Name: Andreas Gläser
Geburtsdatum: 26. Januar 1973
Geburtsort: Detmold
Familienstand: ledig

Schul- und Berufsausbildung

1983 - 1992 Christian-Dietrich-Grabbe-Gymnasium in Detmold
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
1992 - 1994 Ausbildung beim Katasteramt des Kreis Lippe
Abschluss: Vermessungstechniker

Hochschulstudium

1994 - 1999 Studium der Geodäsie an der Universität Hannover
Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufstätigkeit

1999 - 2006 Wissenschaftlicher Angestellter an der Universität Stuttgart,
Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen
seit Mai 2006 Angestellt bei der Dornier Consulting Automotive Systems
GmbH, Sindelfingen

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Beschäftigung als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Möhlenbrink.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Möhlenbrink für die Freiräume und Freiheiten, die er mir für die Durchführung meiner Arbeit gewährte sowie für die gewinnbringenden Diskussionen, für sein Verständnis, sein Vertrauen und seine aktive Unterstützung dieser Arbeit.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen für die bereitwillige Übernahme des Koreferates, die Anregungen und das große Interesse an dieser Arbeit bedanken.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen sei für viele hilfreiche Diskussionen sowie für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre herzlich gedankt. Besonders erwähnen möchte ich Herrn Alexander Beetz der im Rahmen seiner Diplomarbeit mit seinem Engagement einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet hat.

Besonderer Dank gilt auch Frau Christel Schüler, die das Manuskript unermüdlich korrigiert hat und mir stets menschliche Fürsorge zuteil werden lies, sowie Herrn Martin Knihs, ohne dessen technisches Geschick die Durchführung der Experimente nicht möglich gewesen wäre.

Meiner Freundin Carola Schüler danke ich für ihr unerschöpfliches Verständnis und ihre große Geduld. Nur mit ihrer Hilfe war es mir möglich, die notwendigen Freiräume für das Entstehen dieser Arbeit, zu schaffen.

Abschließend möchte ich mich bei meinem Bruder, Thomas Gläser, für die vielen interdisziplinären und damit horizonterweiternden Diskussionen, und bei meinen Eltern für die unzähligen motivierenden Gespräche, die mich immer wieder ermuntert haben, sowie die unermüdliche Unterstützung während meiner gesamten Ausbildungszeit, bedanken. Ohne diesen Rückhalt wäre das Entstehen dieser Arbeit nicht möglich gewesen.