

Verfahren zur Punktidentifizierung bei der Qualitätskontrolle im Maschinenbau unter Verwendung von Polarmesssystemen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Robin Ullrich

geboren am 19. August 1983 in Frankenberg

Gutachter:

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Möser
Technische Universität Dresden

Herr Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger
Technische Universität Dresden

Dresden, 16. Oktober 2017

Erklärung des Promovenden

Das vorliegende Exemplar der Dissertation entspricht einer redaktionell geringfügig überarbeiteten und von den Gutachtern genehmigten Version der Originaldissertation zum Thema:

„Verfahren zur Punktidentifizierung bei der Qualitätskontrolle im Maschinenbau unter Verwendung von Polarmesssystemen“.

Ort, Datum

Robin Ullrich

Kurzfassung

In der heutigen Zeit wird die Qualitätssicherung von großen Produktionsgütern des Maschinen- und Anlagenbaus vornehmlich durch flexibel einsetzbare Industrietachymeter oder Lasertracker vollzogen. Die vermessungstechnische Erfassung der qualitätsrelevanten Daten ist dabei in enge Prozessketten der Produktion eingebettet. Aufgrund dessen sind die Messabläufe meist softwareseitig gesteuert und gewährleisten eine vollständige und zeiteffiziente Erfassung aller Messpunkte. Damit die korrekte Überführung der Instrumentendaten in das Bezugssystem des Produkts sichergestellt werden kann, muss bei den Messungen ein besonderes Augenmerk auf die fehlerfreie Erfassung der Bezugs- und Verknüpfungspunkte gelegt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden daher Identifizierungsverfahren erarbeitet, welche insbesondere für regelmäßige Bezugs- oder Verknüpfungspunktverteilungen zur sicheren Koordinatentransformation beitragen. Inhaltlich wird zwischen direkten und indirekten Identifizierungsstrategien unterschieden. Während die direkten Verfahren in erster Linie durch die Auswertung von Signalintensitäten eines Tachymeters gekennzeichnet sind, machen sich indirekte Verfahren zusätzliche Distanzdaten eines Funksystems zunutze. Speziell für die Anforderung der Verknüpfungspunktmessung vervollständigen punktidentifizierende Reflektorhalterungen das Anwendungsspektrum.

Bei der direkten Identifizierungsvariante wurde das Konzept photogrammetrischer Zielzeichencodierungen aufgegriffen. Die Codierung der Zielmarke wird für tachymetrische Messungen durch verschieden stark reflektierende Zielmarkenbereiche erreicht, welche anhand der gemessenen Signalintensitäten voneinander trennbar sind. Mithilfe der empirisch ermittelten Instrumentenparameter zur Laserspotgröße und Intensitätsmessrate sowie Betrachtungen hinsichtlich minimaler Winkelgeschwindigkeiten wurde die Codeerfassung und -auswertung softwareseitig automatisiert. Die Validierung der Verfahren wurde mit einem Industrietachymeter Leica TDRA6000 für ring- und sektorförmig codierte Zielmarken durchgeführt.

Die Basis des indirekten Identifizierungsverfahrens ist die Kombination von Tachymeter- und Funkdaten. Der mobile Knoten eines Funksystems wurde dazu direkt am Tragegriff des Tachymeters angebracht und durch Bogenschnittverfahren im Bezugssystem positioniert. Angesichts der Vorinformation zur Mobilknotenposition wird die Identifizierung von tachymetrisch erfassten Bezugspunkten ermöglicht. Die Auswahl des Bezugspunkts wird aufgrund einer Kandidatenliste vollzogen, die in mehreren Filterstufen bis zum Verbleib eines einzigen Kandidaten reduziert wird. Neben definierten Distanzkriterien führen vor allem die Ergebnisse kandidatenbezogener Ausgleichungen mit Restriktionen zwischen den Unbekannten zur Identifizierung des Bezugspunkts. Das Konzept der funkgestützten Identifizierung wurde anhand einer Versuchsfeldanwendung verifiziert, wobei die Robustheit der Datenanalyse besonders durch die örtlichen Gegebenheiten des Maschinenbaus gefordert wird.

Am Beispiel der Qualitätssicherung schienengebundener Fahrzeuge wurde zudem veranschaulicht, wie die Anwendung der direkten und indirekten Identifizierungsverfahren innerhalb eines strukturierten Messablaufes zur zeiteffizienten und sicheren Qualitätskontrolle beitragen kann.

Abstract

Today, quality assurance of big production goods of mechanical and plant engineering are mainly performed by employing industrial total stations or laser trackers that can be used flexibly. The collection of quality-related data by means of measurement is thereby embedded in tight process chains of the production. Resulting from this, measuring procedures are mostly software-controlled and ensure a full and time-efficient data collection at all measuring points. In order to safeguard a correct transfer of the raw data from the instruments into the reference system of the product, special focus must be given on an error-free data collection at the reference and tie points during measurements.

Therefore, within the framework of the present paper, identification methods have been developed which contribute especially to a reliable coordinate transformation for regular reference and tie point distribution. With regard to content, it is distinguished between direct and indirect identification strategies. While the direct methods are primarily characterised by the evaluation of signal intensities of a total station, indirect methods utilise additional distance data of a radio system. Especially in order to fulfil the requirements of the tie point measurement, point-identifying target holders supplement the range of applications.

In the direct identification option, the concept of photogrammetric target encoding was taken up. Using total stations, the encoding of the target is reached by target areas reflecting in varying intensities, which can be distinguished by the signal intensities measured. By means of empirically determined instrument parameters on the size of the laser spot and measurement rate of intensity as well as considerations with regard to minimal angular velocity, the software for code recording and evaluation was automatised. The validation of methods was conducted by means of an industrial total station Leica TDRA6000 for ring- and sector-shaped encoded targets.

The basis for the indirect identification method is formed by the combination of total station and radio data. Therefore, the mobile node of a radio system was mounted directly at the carrying handle of the total station and positioned in the reference system by applying trilateration methods. By taking advantage of advance information on the positioning of the mobile node, the identification of reference points is made possible by using a total station. The selection of the reference point is performed on the basis of a list of candidates which is reduced in a series of filter stages down to the point where only one single candidate remains. Beside the defined distance criteria, in particular the results of candidate-related constrained adjustments lead to the identification of the reference point. The concept of radio-based identification was verified by means of test ground use, whereby the robustness of the data analysis was demanded especially by the local conditions of mechanical engineering.

Exemplified by the quality assurance of rolling stock, it was also demonstrated how the application of direct and indirect identification methods within a structured measurement process can contribute to a time-efficient and reliable quality assurance.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung/ Abstract	3
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Einleitung	13
1.1 Motivation	13
1.2 Zielsetzung	15
2 Grundlagen	17
2.1 Signalintensität und Laserspot	17
2.2 Signalisierung und Identifizierung	19
2.2.1 Photogrammetrische Zielmarken	20
2.2.2 Reflektoren und Halterungen	22
2.3 Positionierung innerhalb geschlossener Räume	25
2.3.1 Übersicht zu Funktechnologien des Radiofrequenzbereichs	26
2.3.2 Positionierung durch Lateration und Angulation	29
2.3.3 Positionierung durch Mustererkennung und Zellzuordnung	32
2.3.4 Einflussfaktoren	34
2.4 Qualitätssicherung schienengebundener Fahrzeuge	36
2.4.1 Messaufgaben	36
2.4.2 Kraftmessung und Geometriebestimmung	39
2.4.3 Automatisierung des Messablaufs	41
3 Untersuchungen zu Systemeigenschaften	47
3.1 Industrietachymeter Leica TDRA6000	48
3.1.1 Vorbetrachtung zur intensitätsbasierenden Punktidentifizierung	49
3.1.2 Fernrohrdesign	50
3.1.3 Spotgrößen	51
3.1.4 Signalintensitätsmessungen	53
3.1.5 Messungen zu geneigten Zieltafeln	58
3.1.6 Abtastgeschwindigkeit	60
3.2 Funksystem Metirionic MIC-DMK	63
3.2.1 Zielpunktkorrektur	65
3.2.2 Genauigkeitsbetrachtungen und Systemeigenschaften	66
3.2.3 Einfluss der Antennenausrichtung	70
3.2.4 Distanzfilterung für die Innenraumanwendung	72
3.3 Funksystem OpenBeacon	75

4	Direkte Punktidentifizierung	77
4.1	Punktcodeermittlung für ringförmig codierte Zielmarken	77
4.1.1	Prüftringsegmentierung	80
4.1.2	Segmentierung durch Referenzsignale	82
4.1.3	Validierung der Konzepte	85
4.2	Punktcodeermittlung für sektorförmig codierte Zielmarken	89
4.2.1	Neigungsbestimmung	91
4.2.2	Sektoridentifizierung	95
4.2.3	Untersuchungsergebnisse	97
4.3	Punktidentifizierung mit kugelförmigen Reflektoren	100
4.3.1	Reflektorhalterungen mit Tastschalter	101
4.3.2	Reflektorhalterungen mit doppelter Aufnahme	103
4.4	Anwendungen beim Schienenfahrzeugbau	106
4.4.1	Näherungslösung für die Instrumentenstationierung	107
4.4.2	Standpunktverknüpfung	109
5	Indirekte Punktidentifizierung	111
5.1	Kombination des Tachymeters mit einem Funksystem	111
5.1.1	Antennenoffset und Homogenisierung	112
5.1.2	Beschreibung des Versuchsfeldes	114
5.2	Grundlegende Positionierung	116
5.2.1	Näherungskoordinaten	116
5.2.2	Ausgleichsmodell	119
5.2.3	Erweiterte Modellbildung	122
5.3	Funkgestützte Punktidentifizierung	125
5.3.1	Primäres Identifizierungsverfahren	125
5.3.2	Identifizierung mit präzisen Zusatzdaten	129
5.4	Versuchsfeldanwendung	130
5.4.1	Ergebnisse der Positionierung	131
5.4.2	Ergebnisse der Identifizierung	135
5.5	Praxisbezogene Spezifizierungen	137
6	Zusammenfassung und Ausblick	139
	Literaturverzeichnis	143

Abbildungsverzeichnis

2.1	Einfluss des Einfallswinkels und der Laserdivergenz auf die resultierende Spotgröße	18
2.2	Form eines idealen Laserspots mit Gauß-Profil	19
2.3	Uncodierte Zielmarken	20
2.4	Codierte Zielmarken	21
2.5	Aufbau und Reflexionsprinzip kugelförmiger Reflektoren	23
2.6	Reflektorschichten retroreflektierender Folien	24
2.7	Reflektorhalterungen für kugelförmige Reflektoren	25
2.8	Frequenzmoduliertes Dauerstrichverfahren mit sägezahnförmigen Modulationsmuster	28
2.9	Positionierungsverfahren der Lateration	30
2.10	Positionierungsverfahren der Angulation	32
2.11	Zellbasierte Lokalisierung	33
2.12	Fresnel-Ellipsoid	35
2.13	Koordinatensystem eines Schienenfahrzeugs	38
2.14	Eckkraftmesseinrichtungen für die Endprüfung den Rohbau	39
2.15	Beispiele für Bezugspunktkonstellationen	40
2.16	Messaufgaben bei der Fertigung und Instandsetzung schienengebundener Fahrzeuge	42
2.17	Ausgangsdaten zur Punktidentifizierung	44
3.1	Strategien zur Punktidentifizierung	47
3.2	Industrietachymeter Leica TDRA6000	48
3.3	Zielmarken zur intensitätsbasierenden Punktidentifizierung	49
3.4	Optische Komponenten eines Leica Fernrohrs	50
3.5	Spotgrößen und Grauwertverteilung im reflektorlosen Modus	52
3.6	Spotdimensionen in Abhängigkeit zur Distanz	52
3.7	Signalintensität in Abhängigkeit zur Zielzeichenneigung	54
3.8	Retrozielmarken mit Filterfolien	55
3.9	Intensitätsmessungen beim Übergang zwischen verschiedenwertigen Codebits	56
3.10	Intensitäten beim Übergang zwischen schwarzen und retroreflektierenden Flächen	57
3.11	Distanzergebnisse verschiedener Zieltafelneigungen	58
3.12	Geometrische Konstellationen im Neigungsfall	59
3.13	Spotgröße unter Beachtung der Zieltafelneigung und Messdistanz	60
3.14	Minimale Winkelgeschwindigkeit des horizontalen Instrumentenantriebs	61
3.15	Differenzen zwischen Winkelgeschwindigkeiten	62
3.16	Metirionic MIC-DMK	63
3.17	Mess- und Kommunikationsschema des MIC-DMK	64
3.18	Zielpunktkorrektur	65
3.19	Funkmessungen im Freifeld	66
3.20	Ergebnisse der Dauermessung	67
3.21	Standardabweichungen der Funkdistanzen	68
3.22	Ergebnisse der Funkdistanzfilterung im Freifeld	70
3.23	Versuchsaufbau zur Analyse des Einflusses der Antennenausrichtung	71

3.24	Einfluss der Antennenausrichtung auf die Funkmessungen	71
3.25	Versuchsfeld für die Innenraumanwendung	72
3.26	Histogramme nach der Distanzfilterung	73
3.27	Sensorknoten des OpenBeacon-Systems	75
3.28	Netzwerkkonzept des OpenBeacon-Systems	76
4.1	Codierung in Ringform mit Prüfring	78
4.2	Relationen zwischen der Zielmarke in Nulllage und einem geneigten Zustand . . .	80
4.3	Mess- und Auswerteschema ringförmiger Zielmarken mit Prüfring	81
4.4	Versuchsaufbau zur tachymetrischen Punktidentifizierung	86
4.5	Intensitätsmessungen bei ringförmig codierten Zielmarken mit Prüfring	88
4.6	Intensitätsmessungen bei ringförmig codierten Zielmarken ohne Prüfring	88
4.7	Zielmarke mit Codierung in Sektorform	89
4.8	Dreipunktverfahren zur Bestimmung der Zielmarkenneigung	92
4.9	Zielmarke und Messsituation beim Prüfringverfahren mit sektorförmiger Codierung	93
4.10	Mess- und Analyseablauf für sektorförmig codierte Zielmarken	96
4.11	Zielmarke mit Sektorcodierung bei der Versuchsdurchführung	97
4.12	Abtastpositionen und Intensitäten einer Sektorzielmarke in Nulllage	99
4.13	Abtastpositionen und Intensitäten einer geneigten Sektorzielmarke	100
4.14	Modell einer Reflektorhalterung mit Tastschalter	101
4.15	Reflektorhalterung mit Tastschalter	102
4.16	Konzept einer Reflektorhalterung mit doppelter Aufnahme	103
4.17	Reflektorhalterung mit doppelter Aufnahme	105
4.18	Ergebnisse der Punkt-ID für justierbare Codeblockhöhen	106
4.19	Vorbereitung der Eckkraftmesseinrichtung	107
4.20	Messsituation beim Einsatz codierter Zielmarken mit einer EKM	108
4.21	Verknüpfungspunkte an der Eckkraftmesseinrichtung	110
5.1	Kombination des Tachymeters mit einem Funksystem	111
5.2	Bestimmung des Antennenoffsets	112
5.3	Reduzierung der Tachymeterdaten auf den Antennenursprung	113
5.4	Bauteil- und Messaufnahmen	114
5.5	Ankerknoten am Rollbock der EKM	115
5.6	Übersicht des Versuchsfeldes	116
5.7	Tetraeder der Ankerknoten und des Mobilknotens	117
5.8	Dämpfungsfunktion	121
5.9	Ausgleichungsverfahren für die Positionsbestimmung	124
5.10	Toleranzbereich zur Vorfilterung	126
5.11	Visualisierung des Hauptfilters	128
5.12	Schematischer Ablauf der indirekten Punktidentifizierung	131
5.13	Ergebnisse der Positionierungsverfahren	133
5.14	Korrekte Identifizierung aller Kandidaten	135
5.15	Falsch identifizierte Kandidaten	136
5.16	Beispiel zum Identifizierungsverfahren	137
5.17	Nivellierung des Schienenfahrzeugs	138

Tabellenverzeichnis

2.1	Akzeptanzwinkel kugelförmiger Reflektoren	22
2.2	Systeme zur funkgestützten Innenraumpositionierung	27
2.3	Prinzipien der funkgestützten Distanzmessung	27
2.4	Rechenschema bei der vermittelnden Ausgleichung	31
2.5	Umfang der Richtlinie DIN 25043:2012	37
2.6	Standardabweichungen der Gewichtseinheit beim zyklischen Vertauschen	44
2.7	Analyse der Netzgeometrie	45
3.1	Leica TDRA6000 Herstellerangaben	48
3.2	Leica TDRA6000 Laserparameter	51
3.3	Spotgrößen unterschiedlicher Messsysteme	53
3.4	Signalintensitätswerte von Zielmarken mit Filterfolien	55
3.5	Herstellerangaben Metirionic Funksystem	63
3.6	Ergebnisse der Funkdistanzfilterung im Freifeld	70
3.7	Ergebnisse der Funkdistanzfilterung im Innenraum	73
4.1	Ausgangsparameter zur intensitätsbasierenden Punktidentifizierung	77
4.2	Referenzsignale für ringförmig codierte Zielmarken in Nulllage	83
4.3	Untersuchung ringförmig codierter Zielzeichen mit Prüfring	86
4.4	Identifizierungsdaten für ringförmig codierte Zielmarken ohne Prüfring	87
4.5	Mess- und Berechnungsdaten sektorförmig codierter Zielmarken	97
4.6	Ergebnisse der Neigungsbestimmung für das Dreipunkt- und Prüfringverfahren	98
4.7	Intensitätsdaten der sektorförmig codierten Zielmarke in Nulllage	99
4.8	Intensitätsdaten	100
5.1	Parametrisierung der Ausgleichung	132
5.2	Positionierungsergebnisse	134

Abkürzungsverzeichnis

AK	Ankerknoten
AOA	Angle of Arrival (Einfallswinkel)
ASCII	American Standard Code for Information Interchange (Zeichencodierung)
ATR	Automatic Target Recognition (automatische Zielerkennung)
BRR	Break Resistant Reflector (bruchsicherer Reflektor)
CCR	Corner Cube Reflector (Tripelspiegelreflektor)
CER	Cat's Eye Reflector (Katzenaugenreflektor)
COO	Cell of Origin (Ursprungszelle)
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications (Telekommunikationsstandard)
EKM	Eckkraftmesseinrichtung
FMCW	Frequency-Modulated Continuous Wave (frequenzmoduliertes Dauerstrichverfahren)
GNSS	Global Navigation Satellite System (globales Satellitennavigationssystem)
GPL	General Public License (allgemeine Veröffentlichungsgenehmigung)
GSM	Global System for Mobile Communications (Mobilfunkstandard)
HF	High Frequency (Kurzwellen)
ID	Kennung (Identifikator)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Berufsverband von Ingenieuren der Elektrotechnik und Informationstechnik)
IMM	Intensitätsmessmodus
IR	Infrarot
ISM	Industrial, Scientific and Medical (Frequenzbänder für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen)
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
LF	Low Frequency (Langwellen)
LSB	Least Significant Bit (niedrigstwertiges Bit)
LMS	Least Median Square (Schätzverfahren)
MK	Mobilknoten

MkQ	Methode der kleinsten Quadrate
MPE	Maximum Permissible Error (maximaler Werte für die Messabweichung)
MSB	Most Significant Bit (höchstwertiges Bit)
NN	Nearest Neighbor (nächstgelegener Nachbar)
OSI	Open Systems Interconnection (Referenzmodell für Netzwerkprotokolle)
UHF	Ultra High Frequency (Dezimeterwellen)
USB	Universal Serial Bus (serielles Bussystem)
UWB	Ultra Wideband (Ultra-Breitband-Technologie)
PDOA	Phase Difference of Arrival (Phasendifferenzverfahren)
POA	Phase of Arrival (Phasenmessungsverfahren)
PS	Power Search (Verfahren der Reflektorsuche)
RFID	Radio-Frequency Identification (Identifizierung mithilfe elektromagnetischer Wellen)
RL	Reflektorlos
RSS	Received Signal Strenght (empfangene Signalstärke)
RSSI	Received Signal Strenght Indicator (empfangener Signalstärkeindikator)
RTOF	Round Trip Time of Flight (Systemumlaufzeit)
RTR	Repeatability Target Reflector (Reflektor für Relativmessungen)
SMA	Sub-Miniature-A (Steckverbinderbauform)
SMR	Spherical Mounted Retroreflector (kugelförmiger Reflektor)
TBR	Tooling Ball Reflector (Miniaturreflektor)
TDOA	Time Difference of Arrival (Zeitdifferenzverfahren)
TOA	Time of Arrival (Ankunftszeitmethode)
TOF	Time of Flight (Synonym für TOA)
VfG	Varianzfortpflanzungsgesetz
WE1	Wagenende 1 (Schienenfahrzeug)
WE2	Wagenende 2 (Schienenfahrzeug)
WLAN	Wireless Local Area Network (drahtloses lokales Netzwerk)
WPAN	Wireless Personal Area Network (Kurzstreckenfunktechnik)

1 Einleitung

1.1 Motivation

In der heutigen Zeit sind geodätische Messmittel in nahezu allen Bereichen der industriellen Fertigung zu finden, und besonders im Maschinen- und Anlagenbau sind Flexibilität und Genauigkeit entscheidende Faktoren bei der Auswahl eines Messsystems. Viele geodätische Instrumente erfüllen dieses Anforderungsprofil von Haus aus oder wurden speziell für den industriellen Einsatz entwickelt. Die Spezialisierung der Messgeräte und -methodiken wurde insbesondere in den späten 1980er Jahren vorangetrieben; dies zeigt auch die in diesem Zeitraum vollzogene Prägung des heute verwendeten Begriffs der Industrievermessung (Werner 1987, Schlemmer und Welsch 1989).

Innovative Messtechnologien waren zugleich als Grundvoraussetzung für die Überprüfung zunehmend komplexer werdender Erzeugnisse nötig, welche im selben Zeitraum gefertigt wurden. Im Rahmen einer fertigungsorientierten Produkt- und Prozessgestaltung sollten Fehlerquellen möglichst früh ausgeschlossen und anspruchsvolle Fertigungstoleranzen eingehalten werden. Die eingesetzten Sensoren werden im Terminus der industriellen Produktion unter dem Sammelbegriff „Fertigungsmesstechnik“ zusammengefasst und umfassen auch geodätische Messmittel (Gevatter und Grünhaupt 2006, Pfeifer und Schmitt 2010). Durch ein umfassendes Qualitätsmanagement, welches detailliert bei Schmitt und Pfeifer (2015) dargestellt wird, erstreckt sich das Aufgabenfeld der Fertigungsmesstechnik über nahezu alle Phasen einer Produktionskette und ist somit als unverzichtbarer Teil des Qualitätsregelkreises zu erachten. Die Forderungen an das Qualitätsmanagementsystem, z. B. zur Durchführung von Eingangs-, Zwischen- und Endprüfungen, werden u. a. in der Normenreihe DIN EN ISO 9000ff aufgeschlüsselt.

Infolge der messtechnischen Produkterfassung in verschiedenen Arbeitsgängen kommt die Vielseitigkeit und Flexibilität geodätischer Sensoren besonders zum Tragen. Die stetige Steigerung des Einsatzpotenzials im industriellen Umfeld kann dabei durch die Publikationen von Werner (1987), Luhmann (2000), Hennes (2007) sowie Berthold und Imkamp (2013) nachvollzogen werden. So wurden für großvolumige Produktionsgüter früher z. B. elektronische Theodolitmesssysteme eingesetzt (Gottwald 1996, Schlemmer 1996), welche in der heutigen Zeit vornehmlich durch Industrietachymeter oder Lasertracker ersetzt werden (Möser 2007, Hennes 2016). Damals wie heute bedarf es keiner Beförderung des Messobjekts zum Prüfwerkzeug, wodurch die Messaufgabe zu einem beliebigen Messstandort verlagert werden kann.

Die Resultate der Bauteilvermessungen werden im Wesentlichen durch Form-, Lage-, Maß- und Positionskennwerte repräsentiert; darüber hinaus lassen sich Informationen zur Optimierung des Fertigungsprozesses ableiten. Das Zusammenspiel zwischen der Prozessoptimierung sowie der kontinuierlichen Messwerterfassung soll die kundenseitigen Qualitätsanforderungen erfüllen und zur Verkürzung der Durchlaufzeiten beitragen. Für Serienproduktionen müssen die Messergebnisse zudem vergleichbar sein, was in den meisten Fällen zur Automatisierung der Messabläufe führt. Nach Keferstein und Marxer (2015) ist der Mitarbeiter trotz der Automatisierung ein feststellbarer Faktor, welcher durch seine Qualifikation, Sorgfalt und Erfahrung wesentlich auf

das Messergebnis einwirkt. Dies spiegelt sich auch im Umgang mit vermessungstechnischen Applikationen und Instrumenten wider. Nicht selten wird die Qualitätsprüfung von Mitarbeitern eines fachfremden Arbeitsbereichs übernommen. Hinsichtlich dieser Zielgruppe versuchen auch die Instrumenten- und Softwarehersteller möglichst selbsterklärende Applikationen zu entwerfen (z. B. Ullrich und Ihra 2014). Innerhalb zugeschnittener Programmroutinen werden komplexe Ausgleichsmethoden angewendet und die Resultate zur einfachen Interaktion als übersichtliche Dialoge ausgegeben. Die geodätische Intelligenz wird in diesem Zusammenhang weitgehend auf die Software übertragen. Das geodätische Feingefühl und die Erfahrung im Umgang mit statistischen Informationen, der Interpretation von Messergebnissen, aber vor allem auch der Lokalisierung von Fehlerursachen sind in diesem Kontext nicht ersetzbar.

Als Hauptaufgabe müssen die gemessenen Koordinaten zumeist in übergeordnete Koordinatensysteme transformiert werden. Das kann z. B. mit Bezugspunktmessungen erfolgen. Grobe Fehler bei der Punktmessung führen in diesem Fall zu jenem Interpretationsbedarf, welcher für einen zeiteffizienten Messablauf möglichst vermieden werden sollte. Zudem ist die Suche nach der Ursache ein Zeitfaktor, der während eines Produktionsprozesses mit engen Prozessketten oft nicht eingeplant ist. Besonders problematisch ist dieser Sachverhalt bei regelmäßig verteilten Bezugspunkten, da die statistischen Ergebnisse einer Ausgleichung nicht zwingend auf eine Punktverwechslung hindeuten.

Die Vermeidung von Punktverwechslungen mittels sicherer Punktidentifizierungen stellt für Lasertracker- oder Tachymetermessungen eine Herausforderung dar. Zwar entwickelt die Firma Trimble spezielle Prismenadapter zur Zielidentifizierung (Berg u. a. 2011), aber die Baugröße und die feste Verbindung zum Reflektor limitieren den direkten Einsatz im industriellen Umfeld.

Beim Betrachten anderer Fachdisziplinen wie der Photogrammetrie wird die Aufgabe der Punktidentifizierung durch das zugrunde liegende Messprinzip gelöst. Infolge der kameratechnischen Aufnahme kann die Analyse des gesamten Bildbereiches im Einklang mit der Koordinatenermittlung erfolgen. Bei industriellen Anwendungen werden künstliche Signalisierungen in codierter und uncodierter Form verwendet (Maas und Kersten 1994, VGB 2008). Die Vielfalt reicht dabei von flachen, kugel- und zylinderförmigen Varianten bis hin zur Nutzung unterschiedlicher Materialien wie retroreflektierender Folien oder von Kunststoffen (Luhmann 2010). Besonders retroreflektierende Zielmarken, in Kombination mit geeigneten Kamera- und Blitzsystemen, lassen die Messstellen hinreichend im Bild hervortreten und gewährleisten somit eine gute Extrahierbarkeit (Kersten und Maas 1994). Während uncodierte Zielmarken allein dem Zweck der kameragestützten Punktmessung dienen, stellen codierte Zielmarken zusätzlich die Kennung (ID) des Messpunktes zur Verfügung. In Abhängigkeit zum Aufnahmesystem und Einsatzzweck wurden verschiedene Codierungsvarianten entwickelt. Ausgestaltungen in Ringform, barcodeähnliche Ansätze und sektorförmige Codierungsvarianten bilden nur einen Teil davon. Eine Zusammenstellung von Modellen und Codierungsstrategien wird z. B. bei Ahn und Rauh (1998) gegeben.

Für die Anwendung bei Serienprüfungen ist in erster Linie der Zeitaufwand zum Kleben und Lösen der Zielmarken als Grund dafür zu sehen, dass Tachymeter oder Lasertracker den Vorzug erhalten. Aktuelle Gerätegenerationen verfügen meist über integrierte Kamerasysteme, die eine Bildauswertung erlauben. Zudem existieren prototypische Systeme, welche das Nachrüsten der Kamera am oder anstelle des Okulars ermöglichen (Walser 2004, Bürki u. a. 2010, Wagner u. a. 2014). In beiderlei Hinsicht können die photogrammetrischen Auswertestrategien dann ebenfalls zur Punktidentifizierung herangezogen werden. Die Umsetzbarkeit wird z. B. bei Langfeld (2012) betrachtet. Videotachymeter erreichen jedoch (noch) nicht die Genauigkeiten von Industrietachymetern

oder Lasertrackern und kommen deshalb nur selten in der industriellen Fertigung zum Einsatz. Bei adaptiven Kamerasystemen schränkt die Kabelführung und mechanische Konstruktion den praxisnahen Einsatz in zumeist staubigen Messumgebungen ein.

Die Verfahren der Bildauswertung kommen darüber hinaus bei Instrumenten mit einem scannenden Messprinzip zur Anwendung. Als Messdaten stehen im Allgemeinen Punktwolken zur Verfügung, wobei neben den erfassten Koordinaten auch die Intensitätswerte des empfangenen Laserimpulses dokumentiert werden (Kraus 2004). Mithilfe ebener Abbildungen werden die Signalintensitäten in Form von Grauwerten als Intensitätsbild repräsentiert. In Analogie zu photogrammetrischen Aufnahmen treten retroreflektierende Signalisierungen besonders deutlich im erzeugten Bild hervor. Die Identifizierung der signalisierten Marken oder Objekte kann deshalb zur Verknüpfung mehrerer Scans genutzt werden (Schneider 2006, Neitzel u. a. 2010). Im Übrigen existieren vielfältige Einsatzbeispiele für die Extraktion von Merkmalen und Oberflächeneigenschaften auf Basis der Intensitätsdaten (Schütt u. a. 2004, Kaasalainen u. a. 2005, Höfle u. a. 2009).

1.2 Zielsetzung

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde, stehen für verschiedene Fachdisziplinen der Geodäsie vielfältige Ansätze der Punktidentifizierung zur Verfügung. Für Lasertracker und Industrietachymeter kann im Bereich der industriellen Fertigung jedoch auf keinerlei Standardkonzept zurückgegriffen werden. Besonders bei Verknüpfungs- und Bezugspunktmessungen bietet die Messstellenidentifizierung eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit, welche zur sicheren und zeiteffizienten Abarbeitung der Messaufgaben beitragen kann. Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung von Verfahrensweisen zur Punktidentifizierung innerhalb strukturierter Messabläufe und insbesondere unter dem Hintergrund regelmäßiger Verknüpfungs- oder Bezugspunktverteilungen. Als Anwendungsschwerpunkt wird das industrielle Umfeld des Maschinen- und Anlagenbaus im Nahbereich bis ca. 50 m Messdistanz gewählt.

Die zu entwickelnden Methoden sollen für eine möglichst große Produktpalette polarer Messinstrumente einsetzbar sein, wobei der Fokus auf Industrietachymeter und Lasertracker gelegt wird. Alle Untersuchungen werden exemplarisch mit einem Industrietachymeter Leica TDRA6000 durchgeführt. Zur Feststellung der Messpunktkenung wird im Kontext der Arbeit zwischen direkten und indirekten Identifizierungsmethoden unterschieden.

Die direkten Verfahren sollen eine eindeutige Identifizierung einzelner Messstellen während der Koordinatenerfassung ermöglichen. Da im Allgemeinen verschiedene Signalisierungen wie retroreflektierende Zielmarken oder kugelförmige Reflektoren zur Anwendung kommen, müssen Konzepte hinsichtlich beider Varianten erarbeitet werden. Für die Messung mit kugelförmigen Reflektoren ist die Punkt-ID direkt mit der zugehörigen Reflektorhalterung zu verknüpfen. Beim Einsatz retroreflektierender Zielmarken erweitern zusätzliche Codebereiche das Zielmarkenlayout und können durch das Instrument ausgewertet werden. Für die Auswertung soll im Rahmen der Arbeit auf kameratechnische Identifizierungen (z. B. beschrieben bei Niederoest und Maas 1996 oder Luhmann 2010) verzichtet und eine alternative Identifizierungsstrategie aufgezeigt werden.

Als nutzbare Subsysteme der Instrumente können dazu Distanz- und Winkelmesser sowie die Motorisierung zur Anwendung kommen. Angesichts z. T. komplexer Auswertungen der Signalintensität beim Laserscanning wird eine mögliche Nutzung dieser zusätzlichen Messinformation

für das eingesetzte Industrietachymeter untersucht. Die Signalintensität wird im Gegensatz zum Datenmaterial eines Laserscans zwar nicht direkt mit der Punktkoordinate verknüpft, kann aber über die Instrumentenschnittstelle abgerufen werden. Gemeinsam mit einer geeigneten Zielzeichencodierung wird das Messverfahren und die zugehörige Auswertestrategie für eine intensitätsbasierende Identifizierung entwickelt. Die grundlegenden Instrumentenparameter zu Intensitätsmessungen auf verschieden stark reflektierende Oberflächen oder die Laserspotgröße sind vorab genauer zu untersuchen und fließen in die Zielzeichengestaltung ein. Zur Gewährleistung einer automatisierten Punktmessung sowie Codeerfassung und -auswertung ist eine entsprechende Software-Applikation zu entwerfen.

Im industriellen Umfeld werden bis heute polar messende Instrumente verwendet, welche nicht zwingend den Anforderungen der direkten Identifizierung Genüge tragen. Dazu zählen Geräteeigenschaften wie die Motorisierung oder auch der schnittstellenseitige Intensitätsabgriff. Für diese Instrumente werden zusätzliche Lösungskonzepte in Form der indirekten Identifizierung zur Verfügung gestellt.

Einen vielversprechenden Ansatz stellt das Hinzunehmen eines distanzmessenden Funksystems dar, dessen Module z. B. als Mobil- und Ankerknoten bezeichnet werden. Begünstigt durch die Schaffung einheitlicher Funkstandards und intelligenter Auswerteelektroniken reicht der Einsatzbereich von der grundlegenden Positionsbestimmung einzelner Güter oder Personen bis hin zur zielgerichteten Navigation. Eine Übersicht diverser Innenraumpositionierungssysteme und -verfahren wird bei Gu u. a. (2009), Mautz (2009) und Lymberopoulos u. a. (2015) dargestellt. Systembedingt ist die Zuordnung der Funkdistanz zwischen dem Mobilknoten und fest installierten Ankerknoten immer gegeben. Durch die Adaption des mobilen Knotens am Messgerät kann folglich auf die genäherte Position innerhalb eines Bezugssystems geschlossen werden. Die einzusetzenden Funkmodule sind besonders im Hinblick auf die Baugröße zu wählen und die gemessenen Funkdistanzen anhand der erzielten Genauigkeiten zu bewerten. Vor allem die schwierigen Messumgebungen des industriellen Umfelds bedürfen eines geeigneten Kriteriums zur Distanzfilterung.

Um eine beständige Koordinierung der Ankerknoten im Bezugssystem zu gewährleisten, sollte von einer direkten Montage am Bauteil abgesehen werden; die Installation an den sogenannten Bauteilaufnahmen bietet sich daher an. Anhand dieser Montageanordnung und gefilterter Funkdistanzen kann unabhängig vom Prüfling auf die Instrumentenstationierung geschlossen werden. Die Stationierung dient in der weiteren Anwendung als Ausgangspunkt zur Identifizierung, welche durch eine Zuordnungsaufgabe gekennzeichnet ist. Grundsätzlich soll eine Tachymetermessung einem definierten Messpunkt zugeordnet werden. In strukturierten Messabläufen geht der zu identifizierende Messpunkt aus einer Menge zulässiger Kandidatenpunkte hervor. Die Methoden zur Zuordnung bzw. Filterung sind anhand von Distanzkriterien und unter Verwendung verschiedener Ausgleichungsansätze aufzustellen. Besonders die Resultate der Ausgleichung und abgeleitete Wahrscheinlichkeitsbeziehungen sind zur Lösung der Aufgabe zweckdienlich. Als Voraussetzung für die gemeinsame Betrachtung der Funk- und Tachymeterdaten muss außerdem von übereinstimmenden Systemnullpunkten ausgegangen werden. Da dieser Sachverhalt konstruktiv nicht umsetzbar ist, müssen die Messdaten vor der eigentlichen Identifizierung homogenisiert werden.

Sowohl die direkten als auch die indirekten Verfahren der Punktidentifizierung werden unabhängig voneinander validiert und anhand praxisorientierter Beispiele aus dem Bereich der Qualitätskontrolle schienengebundener Fahrzeuge verdeutlicht.

2 Grundlagen

Das folgende Kapitel befasst sich mit den Grundlagen der Arbeit. Für die Verfahren der direkten Identifizierung werden grundlegende Zusammenhänge zwischen der Signalintensität und Laserspotform dargelegt sowie verschiedene Möglichkeiten der Signalisierung und Identifizierung beschrieben. Ein Überblick zu den wesentlichen Methoden der Innenraumpositionierung bildet die Basis der indirekten Identifizierungsverfahren. Da die Qualitätssicherung schienengebundener Fahrzeuge in mehreren Kapiteln als praxisnahes Anwendungsbeispiel angeführt wird, werden die grundlegenden Messaufgaben und der Arbeitsablauf zusammenfassend geschildert.

2.1 Signalintensität und Laserspot

Die Signalintensität I (auch Signalstärke oder Beleuchtungsstärke) beschreibt im Allgemeinen den Anteil der Strahlungsleistung $d\Phi$ (Strahlungsfluss) einer Lichtquelle, bezogen auf einen beliebigen Raumwinkelbereich $d\omega$ (Kickingeder 2007):

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} . \quad (2.1)$$

Aus physikalischer Sicht verhält sich die Signalintensität indirekt proportional zum Quadrat der Entfernung (Lindner 1991). Für elektrooptische Distanzmesser mit einem Laser als Signalquelle ist der Strahlungsfluss durch den Hersteller definiert. Der Raumwinkel zur Bestimmung von I kann damit anhand der Strahldivergenz des Lasers ermittelt werden. Im Unterschied zu dieser grundlegenden Berechnung wird die Signalintensität bei Tachymetern, Lasertrackern oder auch Laserscannern als Verhältnis zwischen der ausgesendeten und empfangenen Signalstärke angegeben – diese Betrachtungsweise wird in der vorliegenden Arbeit übernommen. Instrumentenseitig erfolgt die Ausgabe des Intensitätswertes am Display, in Verbindung mit weiteren Messdaten, oder über die Instrumentenschnittstelle. Der konkrete Zahlenwert wird dabei auf einen Bereich zwischen Null und Eins normiert oder in prozentualer Darstellungsweise ausgegeben.

Neben den Laserparametern prägen vor allem die Eigenschaften der reflektierenden Oberfläche den Intensitätswert. Eine Kennzeichnung und Einordnung der Flächen kann durch den Reflexionsgrad (Reflektanz) erfolgen, welcher allgemein aus dem Verhältnis zwischen der empfangenen und reflektierten Leistung einer elektromagnetischen Welle bestimmt wird (Meschede 2005). Bei Stöcker (2004) wird diese Relation als spektraler Reflexionsgrad ϕ in Abhängigkeit zur Wellenlänge λ dargestellt, wobei der emittierte Strahlungsfluss Φ_e und der reflektierte Strahlungsfluss Φ_r als Bezugsgrößen dienen (Gl. 2.2).

$$\phi(\lambda) = \frac{\Phi_r(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} \quad (2.2)$$

Des Weiteren besteht neben des Einflusses der Oberflächeneigenschaften wie Rauheit und Farbe eine Abhängigkeit zur Flächenneigung (Schulz und Ingensand 2004, Richter und Juretzko 2007). Dieser Sachverhalt soll anhand von Abbildung 2.1 verdeutlicht werden, wobei das gemeinsame

Wirken von Objektneigung und Strahldivergenz hinsichtlich der resultierenden Spotgröße dargestellt wird. Es wird besonders deutlich, dass der Einfallswinkel des Lasers erheblichen Einfluss auf die Spotgröße hat. Im Gegensatz zu kleinen Einfallswinkeln (γ_1, γ_2) kann der Laserspot für große Einfallswinkel in zwei Bereiche d_{31} und d_{32} unterteilt werden. Im weiter entfernten Bereich zur Strahlquelle d_{32} ist die Lichtenergie weniger stark konzentriert als in d_{31} . Das Ergebnis der Distanzmessung liefert in diesem Fall einen zu geringen Wert, da die unterschiedliche Gewichtung beider Bereiche zu einem Mischsignal führt (Joeckel u. a. 2008). An Objektunstetigkeiten wie Kanten oder Verwerfungen können diese Effekte besonders extrem ausfallen.

Darüber hinaus stellt Juretzko (2006) die Distanzgenauigkeit eines Leica R300 Distanzmoduls in Abhängigkeit zum Reflexionsgrad verschiedener Oberflächen dar; ein wesentliches Ergebnis der Publikation wird anhand der resultierenden Messabweichungen deutlich. Diese liegen auch für nicht ideale Reflektoren, z. B. schwarz beschichtete Zieltafeln, im Bereich der Herstellerangaben. Zurückzuführen ist dieses Verhalten auf die Filterung und Intensitätsregulierung des Sendes- und Empfangssignals. Neben den äußeren Einflussfaktoren muss zur Bewertung eines Intensitätswertes folglich auch der oberflächenspezifische Kalibrierzustand des Distanzmoduls beachtet werden.

Der resultierende Intensitätswert stellt jedoch nur das Endergebnis einer internen Prozessierung der gesamten Laserspotfläche dar. Die Intensitätsverteilung innerhalb des Laserspots variiert im Allgemeinen. Beim Modellfall eines idealen Laserspots folgen die Intensitäten einer dreidimensionalen Gauß-Verteilung (Abb. 2.2). Das Maximum wird im Zentrum des Spots erreicht, welcher durch identische Spotbreiten S_B und -höhen S_H gekennzeichnet ist. Unter realen Messbedingungen ist für größer werdende Distanzbereiche hingegen zunehmend Peripherielicht um die stark reflektierende Laserspotmitte festzustellen. Richter und Juretzko (2007) beschreiben zudem die Zweiteilung des Intensitätsprofils nahe der Laserspotmitte. Besonders die optischen Bauelemente des Distanzmessers sind hierfür ursächlich. Beugungen an Linsenrändern sowie die Strahltaile des Lasers führen außerdem zu Strahldivergenzen ν , welche sich unterschiedlich auf die Spotdimensionen auswirken (Schlemmer 1996). Meist ist eine Asymmetrie in elliptischer Form zu erkennen. Die genaue Laserspotform und Intensitätsverteilung kann z. B. durch die bei Yoshida und Asakura (1976), Juretzko (2005) sowie Schäfer (2014) dargelegten Verfahren ermittelt werden.

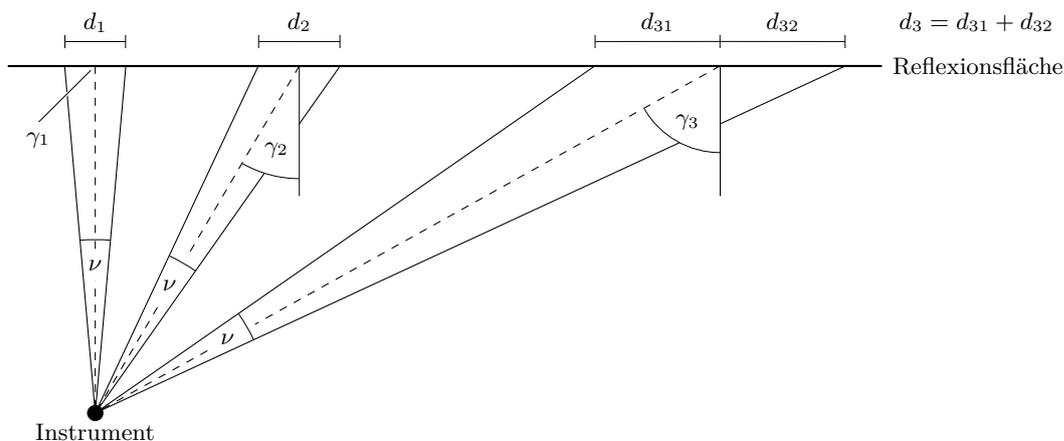


Abb. 2.1: Einfluss des Einfallswinkels γ und der Laserdivergenz ν auf die resultierende Spotgröße (nach Joeckel u. a. 2008)

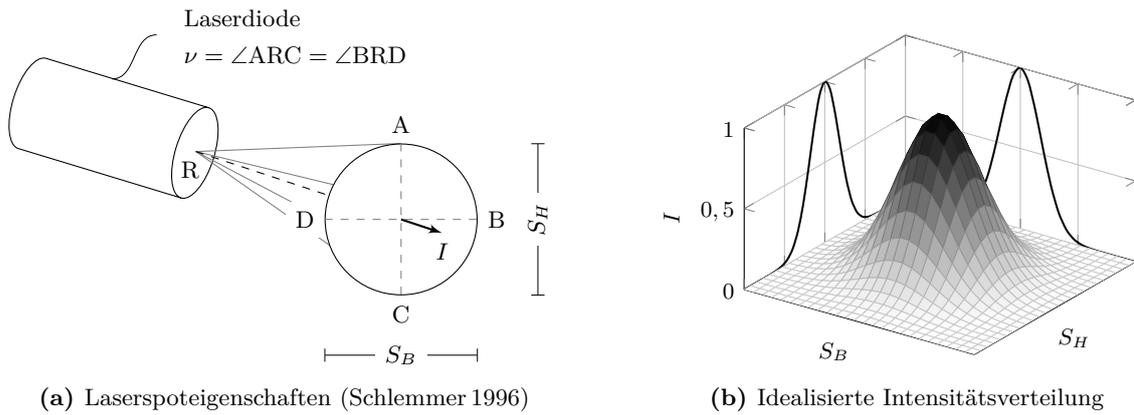


Abb. 2.2: Form eines idealen Laserspots mit Gauß-Profil

Eine Berechnungsvorschrift des absoluten Intensitätswertes wird bei Loser (2001) für polarisationsmodulierte Distanzmesser unter Verwendung der Literatur von Froome und Bradsell (1966) sowie Bolsakov u. a. (1985) hergeleitet. Die am Detektor aufgenommene Signalintensität ergibt sich dabei aus der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ des demodulierten Signals und der maximalen Intensitätsamplitude I_0 :

$$I = I_0 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) . \tag{2.3}$$

Bei Joeckel u. a. (2008) wird die resultierende Intensität als Funktion der Distanz D dargestellt, wobei $z \sim 1/\lambda^4$ den Extinktionskoeffizienten symbolisiert (Gl. 2.4). Die Extinktion wird allgemein als Maß für die Signalminderung verstanden, welche durch absorbierende und streuende Teilchen der Atmosphäre verursacht wird.

$$I = I_0 \cdot e^{-z \cdot D} \tag{2.4}$$

Neben den atmosphärischen Bedingungen wirkt sich die Strahldivergenz des Lasers im Zusammenspiel mit der gemessenen Distanz ebenfalls mindernd auf den Intensitätswert

$$I \sim \frac{I_0}{\nu^2 \cdot D^2} \tag{2.5}$$

aus. Eine ähnliche Relation kann für die Reflexion am Reflektor aufgestellt werden, wobei die Abschwächung in erheblicher Form durch die Reflexionseigenschaften des eingesetzten Reflektormodells bestimmt wird. Reflektoreigenschaften wie der Divergenzwinkel werden in diesem Zusammenhang bei Herrmann (2014) beschrieben.

2.2 Signalisierung und Identifizierung

Im geodätischen Sinne werden Signalisierungen als definierte Markierungen von Messstellen betrachtet, welche zur Messung und/oder Identifizierung der Messpunkte dienen. Die Notwendigkeit einer künstlichen Signalisierung kann durch verschiedene Anforderungen begründet werden. Dazu zählen die zugrunde liegende Messtechnik, der gewünschte Automatisierungsgrad der Messanwen-

dung (Punktmessung, Punktidentifizierung und Datenanalyse), die geforderten Genauigkeiten oder auch die Wiederholbarkeit. Erfolgen die Punktmessungen auf natürliche Oberflächen, können sie als signalisierungsfrei oder berührungslos bezeichnet werden (Kern 2003). Bei Messgeräten mit einem polaren Messprinzip wird in den meisten Fällen von reflektorlosen Messungen gesprochen.

Sowohl photogrammetrische Anwendungen als auch polar messende Sensoren greifen zur Erreichung maximaler Genauigkeiten auf Signalisierungen zurück. Trotz der gegensätzlichen Sensor-konzepte sind Schnittstellen bzgl. der verwendeten Signalisierungsmittel feststellbar. So kommen bei beiden Sensortechnologien retroreflektierende Zielmarken zum Einsatz. Die Ausgestaltung und Verwendung differiert jedoch in vielerlei Hinsicht. Die unterschiedlichen Anwendungen und Reflektortypen sollen in den folgenden Kapiteln genauer betrachtet werden.

2.2.1 Photogrammetrische Zielmarken

Photogrammetrische Zielmarken kommen in codierter und uncodierter Form bei vielen Anwendungen zum Einsatz. Dazu zählen die Nahbereichs-, Luftbild-, Architektur- und Unfallphotogrammetrie. Ebenso vielfältige Bezeichnungen sind gebräuchlich. In der Literatur von Konecny und Lehmann (1984), Kraus (1997), Albertz und Wiggenhagen (2009) sowie Luhmann (2010) werden Begriffe wie Zielmarke, Zielzeichen, Retro-Target, Landmarke, Bildmarke, Messmarke oder Rahmenmarke verwendet. Die Begrifflichkeiten sind je nach Anwendungsfall mit verschiedenen Zielmarkendesigns verbunden. Variationen bestehen bzgl. der Form (kugelförmig, zylinderförmig, flache Marken) und der verwendeten Materialien (retroreflektierende Folien, Kunststoffe, gedruckte Klebefolien); eine ausführliche Aufstellung ist bei Luhmann (2010) zu finden.

Als häufig eingesetzte Varianten sind flache Zielmarken zu nennen. Diese können mit geringem Aufwand am Messobjekt angebracht werden und kommen sowohl in codierter als auch uncodierter Form zur Anwendung. Uncodierte Zielmarken dienen allein dem Zweck der Punktmessung und geben keinerlei Auskunft über die Punkt-ID. Weit verbreitet sind Punkt-, Linien- oder Kreuzmuster, deren Mittelpunkt eindeutig durch Bildverarbeitungsalgorithmen bestimmt werden kann (Abb. 2.3).

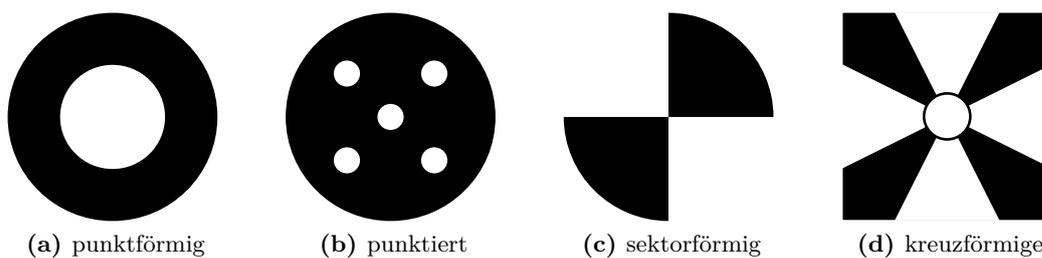


Abb. 2.3: Uncodierte Zielmarken (Luhmann 1986, Raguse und Wiggenhagen 2003)

Zugehörige Verarbeitungsverfahren wie die Kreuzkorrelation oder das Least Squares Matching werden nicht zuletzt von Förstner (1985), Grün (1985), Baltsavias (1991), Heipke (1990) sowie Schneider (1991b) erläutert. Mittels moderner Rechentechnik und der leistungsstarken digitalen Bildverarbeitung stellt die Analyse der Muster heutzutage keinerlei Herausforderung dar. Sie dienen daher zunehmend zur Automatisierung und Optimierung von Messprozessen jeglicher Art (Fraser 1997).

Im Allgemeinen kann die Effizienz eines Messprozesses anhand der zugrunde liegenden Zuverlässigkeit, Geschwindigkeit der Durchführung und der Genauigkeit von Messergebnissen bewertet werden. Codierte Zielmarken können einen wesentlichen Anteil zur Steigerung dieser Effizienz beisteuern. Besonders die hochgenaue Messung und sichere Punktidentifizierung in Verbindung mit kurzen Verarbeitungszeiten sind Gründe für das breit gefächerte Einsatzspektrum.

Die geringen Prozessierungszeiten umfassen eine zweiphasige Auswertung der codierten Zielmarke. Für die Zielmarken in Abbildung 2.4 erfolgt die Ermittlung der Punkt-ID zeitgleich oder im Anschluss an die Koordinatenbestimmung. In Abhängigkeit zum jeweiligen Codierungsmuster kommen dabei unterschiedliche Bildverarbeitungsalgorithmen zur Anwendung. Eine umfangreiche Beschreibung der Analysemethoden wird z. B. bei Van Den Heuvel u. a. (1993), Homainejad und Shortis (1995) sowie Schneider und Sinnreich (1993) vorgenommen.

Um einen möglichst flexiblen Einsatz der Marken zu gewährleisten, werden zudem verschiedene Anforderungen an die Funktionalität der Marke gestellt (Niederöst und Maas 1996, Luhmann 2010). Zu diesen Anforderungen gehören

- die Invarianz gegenüber affinen und perspektivischen Verzerrungen,
- die Robustheit der Decodierung auch im Falle einer Verdeckung,
- die präzise Zentrumsdefinition und -bestimmbarkeit,
- die Effektivität im Sinne einer minimalen Flächengröße sowie Verarbeitungszeit und
- die Wirtschaftlichkeit durch geringe Herstellungskosten.

Aufgrund dieser Anforderungen variieren die in Abbildung 2.4 dargestellten Zielmarken bezüglich der Codemuster und Messstellen zur Koordinatenbestimmung. Generell lassen sich barcodeähnliche Strukturen erkennen, welche zeilenweise oder in Ring- und Sektorform angeordnet sind.

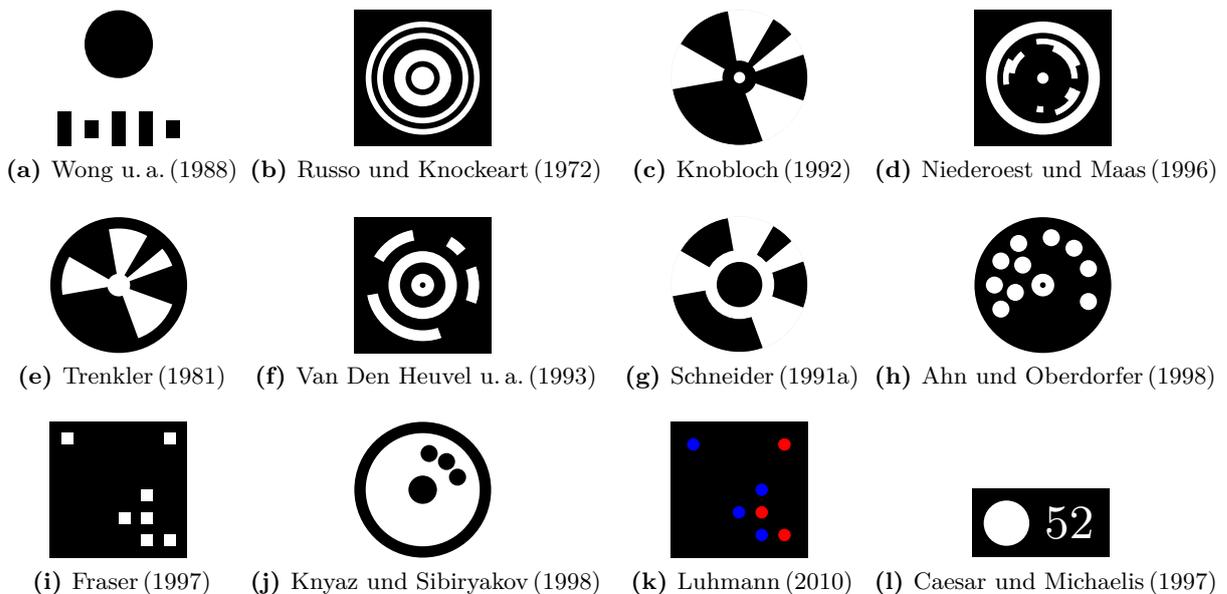


Abb. 2.4: Codierte Zielmarken: Ring-, Sektor- und Zeilencodierung (a–g), Koordinatenmuster (h–k), Textcodierung (l)

Darüber hinaus kann die Codierung durch Koordinatenmuster erfolgen, welche matrixartig über den gesamten Zielmarkenbereich verteilt und durch automatisierte Lesealgorithmen auswertbar sind. In seltenen Fällen erfolgt die direkte Textcodierung. Präzise Messpunktbestimmungen werden anhand punktförmiger Markierungen vollzogen, welche vorrangig im Zentrum der Zielmarke angeordnet sind. Die kombinatorische Auswertung mehrerer Punkte, Kreise oder Quadrate führt hingegen bei Koordinatenmustern zur gesuchten Punktcoordinate.

2.2.2 Reflektoren und Halterungen

Elektrooptische Distanzmessverfahren nutzen die Reflexionseigenschaften von elektromagnetischen Wellen an Grenzflächen zwischen verschiedenen Medien (Deumlich und Staiger 2002). Besonders die Konstruktion der eingesetzten Reflektoren basiert auf den Wellenausbreitungseigenschaften und der Kenntnis über die Reflektanz eingesetzter Materialien (künstlicher Grenzflächen). In diesem Zusammenhang ermöglichen Spiegelemente einen minimalen Intensitätsverlust. Anhand der Spiegelanordnung und -beschaffenheit können die gefertigten Reflektoren in

- Oberflächenreflektoren (Planspiegel),
- Tripelspiegelreflektoren (Corner Cube Reflector, CCR) und
- Kugelschalenreflektoren (Cat's Eye Reflector, CER)

kategorisiert werden. Beim Einsatz im Maschinen- und Anlagenbau bestehen zusätzliche Anforderungen an die Robustheit, deshalb werden die Spiegelkonzepte innerhalb widerstandsfähiger, kugelförmiger Gehäuse implementiert und als Oberbegriff die Bezeichnung kugelförmige Reflektoren (Spherical Mounted Retroreflector, SMR) verwendet. Die Spezifizierungen der SMR differieren je nach Anwendungszweck. Kugeldurchmesser von 12,7 mm, 22,225 mm sowie 38,1 mm bilden den Standard, wobei optische Zentrierungenauigkeiten zwischen 2,5 μm und 12,7 μm realisierbar sind (Faro 2007). Die zu erreichenden Distanzgenauigkeiten werden darüber hinaus bei Yang und Friedsam (1999) aufgezeigt.

Aufgrund des niedrigen Gewichts werden Tripelspiegelreflektoren häufig bei händisch ausgeführten Messaufgaben eingesetzt. Die Bauformen variieren zwischen sogenannten Air-Path CCR und Glasprismen. Bei Air-Path CCR sind drei einzeln gefertigte Planspiegel orthogonal zueinander angeordnet. Der vom Instrument emittierte Laserstrahl wird dadurch parallel zur Eintrittsrichtung reflektiert und breitet sich bei freier Sicht ausschließlich im Messmedium aus. Bei Glasprismen hingegen muss zusätzlich der homogene Glaskörper des Reflektors durchdrungen werden. Die zugrunde liegende Pyramidenform wird aus einem einzigen Grundkörper hergestellt und ist außer

Tab. 2.1: Akzeptanzwinkel kugelförmiger Reflektoren (Harding 2013, Hexagon 2015)

SMR-Typ	Einfallswinkelbereich
Air-Path Corner Cube Reflector (CCR)	$\pm 25^\circ$ bis $\pm 30^\circ$
Break Resistant Reflector (BRR)	$\pm 25^\circ$ bis $\pm 30^\circ$
Glasprismen	$\pm 40^\circ$
Tooling Ball Reflector (TBR)	$\pm 22^\circ$ bis $\pm 50^\circ$
Repeatability Target Reflector (RTR)	$\pm 50^\circ$
Cat's Eye Reflector (CER)	$\pm 60^\circ$

des Eintrittsbereichs vollflächig spiegelnd beschichtet (Burnside 1991, Joeckel u. a. 2008). Damit stehen die reflektierenden Flächen in Analogie zur Air-Path-Variante senkrecht aufeinander, sodass der optische Lichtweg zwischen der ersten und letzten Reflexion stets konstant bleibt. Beim Vergleich beider Bauformen zeichnen sich Glasprismen besonders durch den größeren Akzeptanzwinkel aus (Tab. 2.1 auf der vorherigen Seite). Dieser Sachverhalt spiegelt sich bei gleichen Baugrößen vor allem im größeren Eintrittsbereich wider (Dreiecksfläche ABC in Abb. 2.5a).

Neben den robusten Gehäusen müssen auch die Reflexionsflächen hinsichtlich der Schlag- und Stoßfestigkeit industriellen Ansprüchen genügen. Da die Planspiegelflächen des Air-Path CCR anfällig gegenüber Sprungbildungen sind, wurden bruchsichere Reflektoren (Break Resistant Reflector, BRR) für die tägliche Arbeit entwickelt. Der BRR wird aus einem einzigen Metallstück gefertigt, wobei der spiegelnde Charakter der Reflexionsflächen durch ausgewählte Polierverfahren erreicht wird.

Als spezielle Bauformen der Glasprismen kommen TBR (Tooling Ball Reflector) und RTR (Repeatability Target Reflector) zum Einsatz. Mit dem Fokus auf der Kosten- und Gewichtsreduzierung werden größere absolute Messabweichungen bewusst in Kauf genommen und der Einsatzbereich vornehmlich auf Relativmessungen beschränkt (Loser 2001). Besonders durch den großen Akzeptanzwinkel (Tab. 2.1) sind Applikationen bei der Bestimmung von Drift- oder Deformationserscheinungen gängige Praxis.

Die Gruppe der Kugelschalenreflektoren werden aufgrund ihres höheren Gewichts und großen Akzeptanzwinkels zumeist fest montiert und z. B. zur Roboter- oder Maschinensteuerung eingesetzt (Harding 2013). Der Reflektor kann aus einer einzigen Kugel (Abb. 2.5b) oder der Kombination zweier Halbkugeln bestehen (Abb. 2.5c). Die Parallelität des einfallenden und austretenden Lichtstrahls sowie die Gleichheit der optischen Lichtwege werden hierbei mit einer halbseitigen Verspiegelung der Kugeloberfläche realisiert, an der das Licht durch eine Totalreflexion zurückgeworfen wird (Joeckel u. a. 2008). Für CER in Halbkugelform besitzen beide Glashalbkugeln

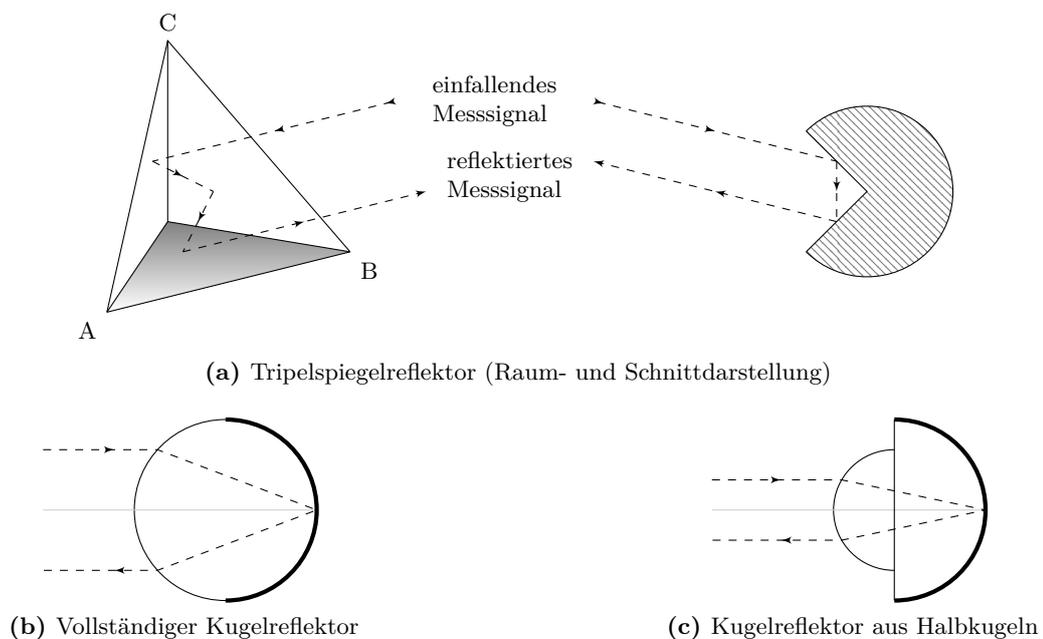


Abb. 2.5: Aufbau und Reflexionsprinzip kugelförmiger Reflektoren

einen identischen Brechungsindex, aber unterschiedliche Radien. Der Radius der kleineren Kugel wird dabei so gewählt, dass der Brennpunkt des einfallenden Lichtstrahls mit der spiegelnden Beschichtung der größeren Halbkugel zusammenfällt. Fertigungsbedingte Abweichungen der Linsendicke werden durch ein zusätzliches Glaselement korrigiert (Bernhart und Hennes 2012).

Die Ausnutzung des beschriebenen Prinzips findet vor allem bei der Produktion retroreflektierender Folien Anwendung (Abb. 2.6). Wird eine große Anzahl an transparenten Glas- oder Kunststoffkugeln mit Radien kleiner als 0,05 mm in eine silberfarbene Folie eingelassen, entsteht ein Verspiegelungseffekt wie bei Kugelschalenreflektoren. Gleiches wird bei der Folienherstellung anhand von Miniaturprismen durchgeführt, deren Pyramidenform das Modell der Glasprismen aufgreift.

Als Ergänzung zu der jeweiligen Reflektorschicht bilden Deckschichten einen Schutz gegen Umwelteinflüsse und Trägerschichten stabilisieren die Folie. Zur Sicherstellung optimaler Messergebnisse ist beim Einsatz der Folien auf die Sauberkeit und Unversehrtheit zu achten. Verschmutzungen oder Brüche beeinflussen die Genauigkeit in gleicher Weise wie der Einfallswinkel des Messsignals. Aus diesem Grund geben die meisten Folienhersteller den Rückstrahlwert in Abhängigkeit zum Beobachtungswinkel an. Für die Reflexfolie 3M der Firma Reflexia beträgt der Rückstrahlwert z. B. 55 % des emittierten Signals bei Beobachtungswinkeln von 45° (Ullrich u. a. 2013). Generell ist im Vergleich zu herkömmlichen Glasprismen von einem ca. 100-fach kleineren Intensitätswert auszugehen (Löffler 2002). Aufgrund der damit erreichten Messgenauigkeit und niedriger Produktionskosten werden Reflexfolien deshalb oft bei Messungen mit weniger hohen Ansprüchen an die Genauigkeit oder zur Dauervermarkung verwendet.

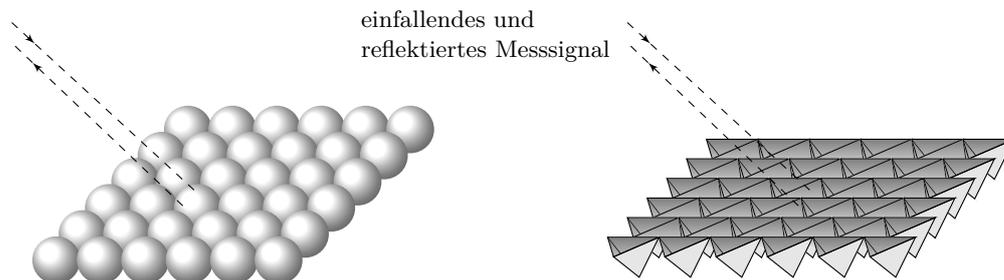


Abb. 2.6: Reflektorschichten retroreflektierender Folien: Kombinationen mehrerer Kugelreflektoren (links), Kombinationen mehrerer Tripelspiegelreflektoren (rechts)

Außer den industriell gefertigten Modellen sind Spezialreflektoren entwickelt worden, welche die optischen Eigenschaften und den Arbeitsbereich für bestimmte Messmethoden sowie Umgebungsbedingungen optimieren. Als zwei Beispiele seien die Publikationen von Bernhart und Hennes (2012) sowie Braun u. a. (2013) genannt. Die Darstellungen gehen einerseits auf die Verwendung eines „Reflektor 160A“ ein, welcher durch einen besonders großen Einfallswinkelbereich von $\pm 80^\circ$ gekennzeichnet ist und verdeutlichen andererseits den Einsatz einer Reflexfolienvariante für die Verwendung im Bereich der Qualitätskontrolle von Stahlkonstruktionen.

Kugelförmige Reflektoren werden in der Praxis aufgrund ihrer hohen Formgüte zum direkten Antasten (Probing) der zu prüfenden Werkstücke genutzt. In Kombination mit Reflektorhalterungen wird dieses Anwendungsspektrum z. B. hinsichtlich der Messung von Verknüpfungspunkten erweitert. Je nach Hersteller und Verwendungszweck sind die Bezeichnungen Drift Nest, Mount (Befestigung) oder Holder (Halterung) üblich. Eine Auswahl von Halterungen zur Boden- und Wandmontage wird in Abbildung 2.7 zusammengestellt.

Während der Messung sind die SMR durch definierte Auflagestellen mit der Halterung verbunden. Im Allgemeinen werden dazu Dreipunktauflagen oder Fräsungen gemäß dem Reflektordurchmesser zur Verfügung gestellt. Um eine stabile Verbindung zwischen beiden Komponenten zu gewährleisten, können zusätzliche Magnete in den Grundkörper der Reflektorhalterung eingebracht werden. Die zugrunde liegende Robustheit wird dabei durch die verwendeten Materialien wie Edelstahl oder Aluminium in hochfester Form sichergestellt. Für die Boden- und Wandmontage können die Halterungen ergänzend mit einem Gewinde oder Schaft versehen sein, welcher die Montage und Demontage vereinfacht. Zur temporären Installation werden zudem verschiedene Klebemittel eingesetzt.

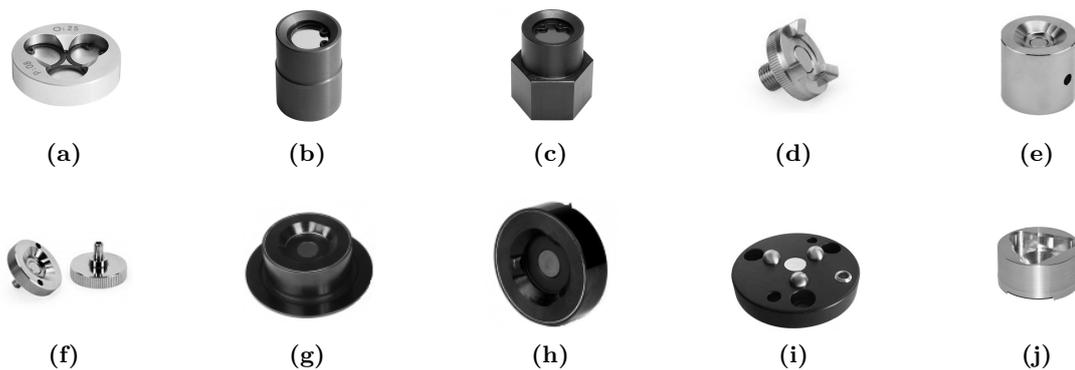


Abb. 2.7: Reflektorhalterungen für kugelförmige Reflektoren: (a–c) Halterungen der Firma Aimess (Aimess 2013), (d–f) Firma Brunson (Brunson 2012), (g–h) Firma Hubbs (Hubbs 2011), (i) Firma Geomics (Geomics 2003), (j) Firma A.S.T (AST 2010)

Als entscheidendes Kriterium für die Einsatzfähigkeit der Halterungen ist die Wiederholgenauigkeit des Antastens zu sehen. Unter stabilen Messbedingungen sollte sich eine Koordinate zuverlässig im Rahmen der Messunsicherheit des Instruments reproduzieren lassen. Die Dimensionierung des Werkstücks, insbesondere der Auflagestellen, ist aus diesem Grund derart eng toleriert, dass die fertigungsbedingten Formabweichungen unterhalb der Messunsicherheit des Instruments anzusiedeln sind.

2.3 Positionierung innerhalb geschlossener Räume

Ortsbezogene Daten des Innenraumbereichs bilden in der heutigen Zeit einen Grundbaustein moderner Infrastrukturen. Sowohl in der industriellen Anwendung als auch im medizinischen Umfeld und dem Freizeitbereich steigen die Anforderungen an den Umfang der Daten stetig. Die Positionierung innerhalb geschlossener Räume bildet einen Teil davon und wird auch als Indoor-Positionierung oder -Lokalisation bezeichnet. Die Vielzahl der dazu entwickelten Messsysteme und Einsatzszenarien unterstreichen diesen Sachverhalt. So ist die Verfolgung von Produktionsgütern bei der Prozesskontrolle z. B. durch Radio-Frequency Identification (RFID) möglich (Thiesse u. a. 2006, Zhou u. a. 2007). Im Bereich der Medizin und häuslichen Krankenpflege ist neben der Lokalisierung von Patienten und Personal auch die Einnahmekontrolle von Medikamenten mit Funksystemen realisierbar (Pappu u. a. 2004, Fry und Lenert 2005, Becker u. a. 2009). Bei öffentlichen Einrichtungen wie Museen oder Flughäfen sind semantische Positionsangaben von

Bedeutung (Al Rifai 2009, Kühn u. a. 2011, Sieck 2012). Dazu zählen z. B. Etagennummern, die Fahrstuhlidentifikation oder der Terminalname.

Bei weiteren Anwendungen werden darüber hinaus hohe Genauigkeiten, robuste Verarbeitungsmethoden oder eine sehr gute Zuverlässigkeit gefordert. Müller und Schwendemann (2009) stellen in diesem Zusammenhang ein Messsystem zur Positionierung in Tunnelvortriebsnetzen auf Basis von Infrarotlicht dar. Auf die Vermessung von Abwasserkanälen durch mobile Kamerasysteme wird bei Striegl u. a. (2010) eingegangen. Nach Blankenbach u. a. (2014) können Magnetfelder zur Positionierung in Umgebungen mit starken Verbauungen genutzt werden. Zur Umwälzung von Getreide in großen Lagerräumen wird bei Schneider u. a. (2006) ein Verfahren der akustischen Positionsbestimmung eingesetzt.

Die genannten Beispiele verdeutlichen in erster Linie die Vielzahl der eingesetzten physikalischen Grundprinzipien. Bezüglich der Trägerwelle kommen Licht-, Radio- und Ultraschallwellen sowie Magnetfelder zum Einsatz (Schlemmer 2010, Torres-Solis u. a. 2010). Ein Überblick zum Stand der Technik sowie der erreichbaren Auflösungen und Genauigkeiten kann Mautz (2009) und Blankenbach u. a. (2016) entnommen werden.

In den folgenden Kapiteln soll genauer auf den Einsatz von Radiowellen zur Innenraumpositionierung eingegangen werden. Die Einordnung der Positionierungsverfahren nach Angulation und Lateration sowie Fingerprinting und Zellzuordnung erfolgt in Anlehnung an Liu u. a. (2007). Weitere Gliederungsmöglichkeiten werden bei Hightower und Borriello (2001), Roth (2002) oder Händler (2012) dargestellt.

2.3.1 Übersicht zu Funktechnologien des Radiofrequenzbereichs

Viele Funkanwendungen nutzen zur Signalübertragung elektromagnetische Wellen im Radiofrequenzbereich. Häufig werden die lizenzfreien Bänder für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen (Industrial, Scientific and Medical, ISM) genutzt. Die zulässigen Frequenzbereiche zwischen 9 kHz und 244 GHz werden in Deutschland von der Bundesnetzagentur festgelegt (BNA 2015), wobei in

- Niederfrequenzbereiche (Low Frequency, LF),
- Hochfrequenzbereiche (High Frequency, HF),
- Ultrahochfrequenzbereiche (Ultra High Frequency, UHF) und den
- Mikrowellenbereich

eingeteilt werden kann. Bei den Funkanwendungen werden die Trägerwellen durch analoge oder digitale Verfahren der Modulation von Amplitude, Frequenz oder Phase modifiziert (Mäusl und Göbel 2002). Die Informationsübertragung erfolgt zumeist in einem Netzwerk aus verschiedenen Sensoren. Für kabellose lokale Netzwerke wie WLAN (Wireless Local Area Network) oder WPAN (Wireless Personal Area Network) werden die Netzwerkstandards des IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) im 1980 gegründeten Projekt 802 beschrieben (Netzwerkstandard IEEE 802). Diese Standards definieren das Kommunikations- bzw. Netzwerkprotokoll zum Datenaustausch auf den beiden untersten Ebenen des OSI-Schichtenmodells (Open Systems Interconnection, OSI). Viele Innenraumpositionierungssysteme greifen vorhandene Infrastrukturen, Sensoren oder Datenübertragungsprotokolle auf. Die mathematisch-physikalischen Grundlagen der Systeme beruhen gemeinhin auf der Analyse von Signalparametern (Laufzeit,

Phase, Empfangswinkel) oder der Empfangsstärke als Signalmetrik (Song u. a. 2009). Eine Auswahl von Systemlösungen wird in Tabelle 2.2 zusammengestellt, wobei das zugehörige Messprinzip der Tabelle 2.3 entnommen werden kann. Die erreichten Positionsgenauigkeiten liegen für die angeführten Systeme in einem Bereich von 1 m bis 15 m. Zur Steigerung der Genauigkeit werden verschiedene Messprinzipien miteinander kombiniert und zusätzliche Module wie Ultraschall- oder Infrarotsensoren hinzugezogen. Derartige Hybridsysteme sind z. B. SmartLocus, Eiris, Topaz und Cricket (Liu u. a. 2007).

Für die Verarbeitung der Messdaten ist vor allem die Struktur des Funknetzwerks ausschlaggebend. Drane u. a. (1998) differenziert drei Systemtopologien, welche zur Selbstpositionierung (Self-Positioning), Fernpositionierung (Remote-Positioning) und indirekten Positionierung (Indirect-Positioning) dienen. In der Netzwerktechnik wird zur Beschreibung der Systemtopologie verallgemeinernd von Knoten gesprochen. Die Knoten dienen zur Übermittlung und Verarbeitung von Daten und können z. B. in Form von Sendern, Empfängern, Servern oder Rechnern auftreten (Harnisch 2009). Hinsichtlich dieser Terminologie besteht ein selbstpositionierendes System aus einem mobilen Knoten, welcher Signale von stationären Ankerknoten (Referenzknoten) empfängt. Da die Ankerkoordinaten in einem definierten Bezugssystem bekannt sind und dem mobilen Knoten zur Verfügung stehen, kann dessen Position autonom errechnet werden. Empfangen mehrere Ankerknoten gleichzeitig das Signal eines mobilen Knotens, kann dessen Position durch eine zentrale Recheneinheit bestimmt werden. Der mobile Knoten dient bei dieser Betrachtungsweise im weitesten Sinne als Signalreflektor und führt keine eigenständige Positionsbestimmung aus (Fernpositionierung). Eine indirekte Positionierung besteht dann, wenn zwischen dem mobilen

Tab. 2.2: Systeme zur funkgestützten Innenraumpositionierung: Erweiterter Überblick auf der Grundlage von Liu u. a. (2007), Gu u. a. (2009) und Zhang u. a. (2010)

Technologie	System	
WLAN	RADAR ¹ , Horus ¹ , DIT ¹ , Ekahau ² , MultiLoc ¹ , TIX ¹ , COMPASS ¹	¹ RSS
DECT	GPPS ⁵	² RSSI
GSM	GSM fingerprinting ¹	³ TDOA
UHF	WhereNet ³ , PinPoint ⁶	⁴ AOA
UWB	Sappire Dart ³ , Ubisense ^{3,4}	⁵ COO
Aktives RFID	SpotON ¹ , LANDMARC ¹ , OpenBeacon ²	⁶ RTOF

Tab. 2.3: Prinzipien der funkgestützten Distanzmessung

Grundprinzip	Akronym
Signallaufzeitmessung	Time of Arrival (TOA) oder Time of Flight (TOF)
Signallaufzeitdifferenz	Time Difference of Arrival (TDOA)
Messung der Umlaufzeit des Funksignals	Round Trip Time of Flight (RTOF)
Verarbeitung der Signalstärke	Received Signal Strength (RSS)
Verarbeitung des Signalstärkeindikators	Received Signal Strength Indicator (RSSI)
Analyse der Signalphase	Phase of Arrival (POA)
Analyse der Phasendifferenz	Phase Difference of Arrival (PDOA)
Messung der Einfallsrichtung des Signals	Angle of Arrival (AOA)
Bestimmung der Herkunftszelle	Cell of Origin (COO)

Knoten und der zentralen Recheneinheit eine Datenverbindung besteht. Anhand dieser Verbindung wird die Positionslösung des mobilen Knotens an die Recheneinheit transferiert und dort weiterverarbeitet (indirekte Fernpositionierung) oder in umgekehrter Weise die am Zentralrechner bestimmten Positionsdaten an den mobilen Knoten übertragen (indirekte Selbstpositionierung).

Frequenzmoduliertes Dauerstrichverfahren

Eine weitere Systemarchitektur zur Funkdistanzmessung bildet das frequenzmodulierte Dauerstrichverfahren (Frequency-Modulated Continuous Wave, FMCW). Besonders bei industriellen Anwendungen (Materialprüfungen, Füllstandskontrollen, Brems- und Abstandsassistenten) oder in der Umwelttechnik (Analyse der Atmosphäre, geologische Untersuchungen) stellt die Anwendung dieses Messprinzips ein bewährtes Verfahren dar (Brumbi 1997, Mansilla 2006, Schuricht u. a. 2007). Eine weitere Verwendung zur Innenraumpositionierung ist durch die vergleichbaren Genauigkeiten hinsichtlich der bereits beschriebenen Technologien gegeben. Entsprechende Nachweise sind bei Stelzer u. a. (2004) sowie Gierlich u. a. (2007) zu finden. Die folgenden Erläuterungen zum grundlegenden Messprinzip stützen sich auf Thürmel (1996), Komarov und Smolskiy (2003), Voges (2004) und Zheng (2005).

Beim FMCW wird das Sendesignal kontinuierlich übertragen. Aufgrund vorhandener Infrastrukturen werden bevorzugt ISM-Bänder um 2,4 GHz und 5,8 GHz verwendet. Zur Realisierung der Distanzmessungen wird das Sendesignal periodisch hinsichtlich der Frequenz moduliert. Modulationsmuster in Sägezahn-, Dreieck-, Rechteck- oder Treppenform bilden den Standard. Neben der Dreieckform findet vor allem die Sägezahnform Anwendung (Abb. 2.8).

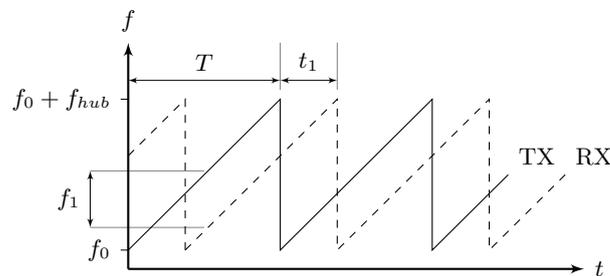


Abb. 2.8: FMCW mit sägezahnförmigen Modulationsmuster

Ausgehend von der Basisfrequenz f_0 wird der Frequenzhub f_{hub} für eine Periodendauer T auf das Signal aufmoduliert. Die Momentanfrequenz

$$f(t) = f_0 + \frac{f_{\text{hub}}}{T} \cdot t = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad \text{mit} \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.6)$$

und die Momentanphase $\varphi(t)$ können demnach für jeden Zeitpunkt t als gegeben betrachtet werden. Da die Modulation sehr langsam erfolgt, wird das reflektierte Signal RX bereits empfangen, bevor das Sendesignal TX vollständig übermittelt wurde. Die Zeitverzögerung t_1 (Signallaufzeit) zwischen dem Senden und Empfangen ist in diesem Zusammenhang sehr viel kleiner als die Periodendauer ($t_1 \ll T$). Durch die Mischung beider Signale kann die Differenzfrequenz

$$f_1 = \frac{f_{\text{hub}} \cdot t_1}{T} \quad (2.7)$$

ermittelt werden. Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass während der Messung keine Relativbewegung zwischen dem Sender und Reflektor stattgefunden hat. Nur in diesem Fall kann eine direkte Proportionalität der Differenzfrequenz zur Signallaufzeit vorausgesetzt werden und die gesuchte Distanz

$$D = c \cdot \frac{t_1}{2} = c \cdot \frac{T f_1}{2 f_{\text{hub}}} \quad (2.8)$$

kann mit dem Weg-Zeit-Gesetz, der Lichtgeschwindigkeit c und unter Verwendung von Gleichung 2.7 bestimmt werden. Zur Ermittlung der Distanz kann demnach auf eine Zeit- oder Frequenzmessung zurückgegriffen werden. Systeme mit Frequenzzählern tasten das Signal in Intervallen von $\Delta f = 1/T$ ab, wodurch die Distanzauflösung mit

$$\delta_D = \frac{cT \cdot \Delta f}{4 f_{\text{hub}}} = \frac{c}{4 f_{\text{hub}}} \quad (2.9)$$

angegeben werden kann. Zur gezielten Distanzmessung zwischen einem mobilen Knoten und fest installierten Ankerknoten kommen zudem aktive Reflektoren zum Einsatz. Hierbei wird das Signal am Reflektor verstärkt bevor es in Richtung des mobilen Knotens zurückgeworfen wird (Vossiek und Gulden 2008). Darüber hinaus wird bei Wehrli (2011) ein Identifizierungsverfahren für Reflektoren aufgrund modifizierter Frequenzdrifts beschrieben. Beispiele für Systeme mit identifizierbaren, aktiven Reflektoren werden z. B. bei Metirionic (2014) sowie Joram (2015) dargestellt.

2.3.2 Positionierung durch Lateration und Angulation

Die Verfahren der Lateration und Angulation bestimmen die Position eines mobilen Knotens MK relativ zu n im Raum verteilten Ankerknoten AK_i ($i = 1 \dots n$). Dabei sind die Koordinaten der Anker in einem lokalen kartesischen Koordinatensystem (Bezugssystem) gegeben. Während Laterationsverfahren die Distanzen D_i zwischen den Sensorknoten verwenden, werden bei Angulationsverfahren die gemessenen Signaleinfallswinkel zur Positionsbestimmung herangezogen. Beide Verfahren sollen im Folgenden genauer betrachtet werden.

Lateration

Als geometrische Betrachtungsweise verwenden Laterationsverfahren den Schnitt mehrerer Kugeln (zirkuläre Lateration) oder Hyperboloiden (hyperbolische Lateration) zur Positionsbestimmung. Das in Abbildung 2.9a dargestellte Prinzip des Kugel- bzw. Bogenschnitts umfasst als funktionalen Zusammenhang die gesuchte Koordinate des mobilen Knotens (X, Y, Z) sowie die Ankerkoordinaten (X_i, Y_i, Z_i):

$$D_i = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2} \quad (2.10)$$

Die Distanzen D_i sind mit Messunsicherheiten behaftet und stellen die abgeleiteten Messgrößen des Funksystems dar. Da ausgehend von jedem der n Ankerknoten ein Zusammenhang nach Gleichung 2.10 aufgestellt werden kann, entspricht das resultierende Gleichungssystem als Matrixschreibweise dem Ausdruck in Gleichung 2.11. Im dreidimensionalen Fall ist dieses

Gleichungssystem überbestimmt, wenn mehr als drei Ankerknoten verwendet und die korrespondierenden Distanzen zum MK ermittelt wurden.

$$\begin{bmatrix} D_1^2 \\ D_2^2 \\ \vdots \\ D_n^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2 + (Z_1 - Z)^2 \\ (X_2 - X)^2 + (Y_2 - Y)^2 + (Z_2 - Z)^2 \\ \vdots \\ (X_n - X)^2 + (Y_n - Y)^2 + (Z_n - Z)^2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Zur Schätzung der unbekanntenen Position anhand des funktionalen Modells kann im Allgemeinen eine vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (MkQ) angewendet werden. Das zugrunde liegende Vorgehen wird detailliert bei Jäger u. a. (2005) sowie Niemeier (2008) beschrieben und als Rechenschema in Tabelle 2.4 dargestellt.

Der räumliche Bogenschnitt ist hingegen nicht lösbar, wenn alle Anker und der mobile Knoten in ein und derselben Ebene liegen. Als ideale geometrische Konstellation wird bei Schlemmer (1996) ein Tetraeder genannt. Aufgrund der Tatsache, dass das Gleichungssystem 2.11 zur Anwendung der MkQ linearisiert werden muss und somit Näherungen der Unbekannten unabdingbar sind, wurden Algorithmen zur direkten Lösung des räumlichen Bogenschnitts entwickelt. Diese werden durch Grafarend u. a. (1989), Singer u. a. (1993), Lichtenegger (1995) und Norrdine (2008) beschrieben und ein Teil davon bei Haralick u. a. (1994) vergleichend betrachtet.

Bei anderen Anwendungen werden anstelle der Funkdistanzen auch Distanzdifferenzen zur Positionsbestimmung verwendet, welche z. B. aus Signallaufzeit- oder Phasenwinkeldifferenzen abgeleitet werden. In diesem Fall wird von einer hyperbolischen Lateration nach Abbildung 2.9b gesprochen. Die Distanzdifferenzen beschreiben in diesem Zusammenhang einen Hyperboloid, dessen Punkte einen konstanten Abstand zum mobilen Knoten aufweisen. Der Schnitt von mindestens drei Hyperboloiden ergibt deshalb die gesuchte Position des mobilen Knotens. In der praktischen Anwendung wird häufig ein Knoten als sogenannter Masterknoten definiert und die zugehörige Distanz D_j als Subtrahend zur Bildung der Distanzdifferenzen

$$d_{ij} = D_i - D_j \quad \text{mit } i \neq j \quad \text{und } i = 1 \dots n \quad (2.12)$$

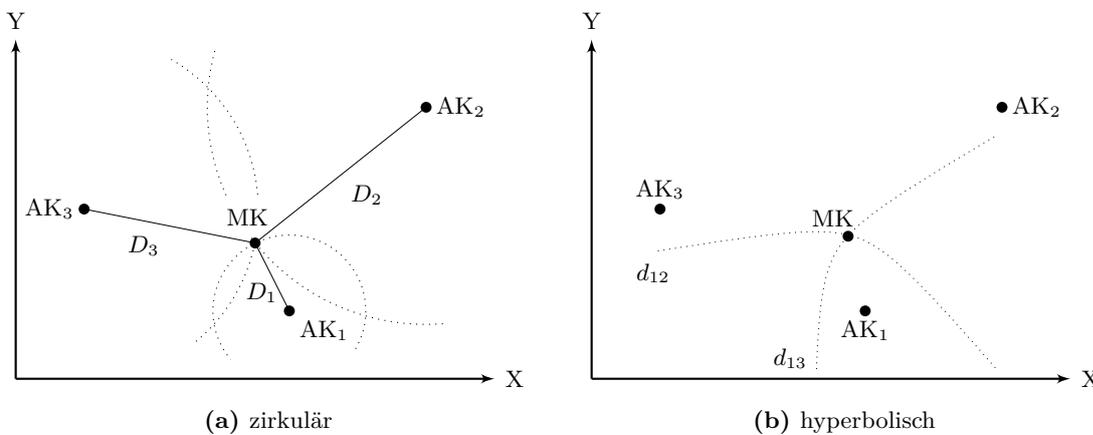


Abb. 2.9: Positionierungsverfahren der Lateration (zweidimensionale Darstellung)

verwendet. Durch das Einsetzen von Gleichung 2.10 in Gleichung 2.12 kann in Analogie zum Ansatz der zirkulären Lateration ein Gleichungssystem aufgestellt werden, welches nach erfolgter Linearisierung mit der MkQ zur Schätzung der Position führt. Ein Verfahren zur direkten Lösung des räumlichen Hyperbelschnitts wird darüber hinaus bei Kleusberg (1994) beschrieben.

Angulation

Bei Angulationsverfahren werden Signaleinfallswinkel zur Positionsbestimmung genutzt. Der Winkelwert wird an jedem Anker in Abhängigkeit zur Lage des mobilen Knotens aufgezeichnet (Abb. 2.10). Da die Winkelmessungen aufgrund einer gemeinsamen Bezugsbasis ausgeführt werden müssen, ist die definierte Ausrichtung der Anker sicherzustellen.

Aus technischer Sicht wird die Winkelmessung anhand direktonaler Antennen oder Antennenarrays realisiert, welche den Einfallswinkel aus den Laufzeitdifferenzen zwischen den Arraykomponenten ermitteln (Ingensand und Bitzi 2001). Eine genügend große Anzahl an Winkelmessungen schafft in diesem Zusammenhang abermals die Voraussetzung zur Anwendung der MkQ und einer damit verbundenen Positionsbestimmung. Beim zugrunde liegenden funktionalen Modell gehen die Einfallswinkel

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{Y_i - Y}{X_i - X}\right) \quad (2.13)$$

Tab. 2.4: Rechenschema bei der vermittelnden Ausgleichung

Schritt	Formel	Beschreibung und Parameter
1)	$\tilde{\mathbf{L}} = f(\tilde{\mathbf{X}})$ $\hat{\mathbf{L}} = f(\hat{\mathbf{X}}) = \mathbf{L} + \mathbf{v}$	Funktionaler Zusammenhang: – wahre Werte $\tilde{\mathbf{L}}$, Unbekanntenvektor $\tilde{\mathbf{X}}$ Darstellung mit Messgrößen: – ausgeglichene Werte $\hat{\mathbf{L}}$, $\hat{\mathbf{X}}$ – Beobachtungen \mathbf{L} , Verbesserungen \mathbf{v}
2)	$\mathbf{A}_{n,u} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1(\mathbf{X})}{\partial X_1}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_1(\mathbf{X})}{\partial X_u}\right)^0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n(\mathbf{X})}{\partial X_1}\right)^0 & \dots & \left(\frac{\partial f_n(\mathbf{X})}{\partial X_u}\right)^0 \end{bmatrix}$ $\mathbf{l} = \mathbf{L} - \mathbf{L}^0$	Designmatrix, Linearisierung (falls nötig): – Designmatrix \mathbf{A} – Anzahl der Unbekannten u – Anzahl an Beobachtungen n – Näherungslösung \mathbf{X}^0 Verkürzter Beobachtungsvektor: – Funktionswerte \mathbf{L}^0 an Stützstellen \mathbf{X}^0
3)	$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}$ $\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$	Modell der vermittelnden Ausgleichung: – Zuschläge $\hat{\mathbf{x}}$ Normalgleichungssystem: – Gewichtsmatrix \mathbf{P} – Forderung MkQ: $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \rightarrow \min$
4)	$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}$ $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \hat{\mathbf{x}}$	Verbesserungen Vektor der ausgeglichenen Unbekannten

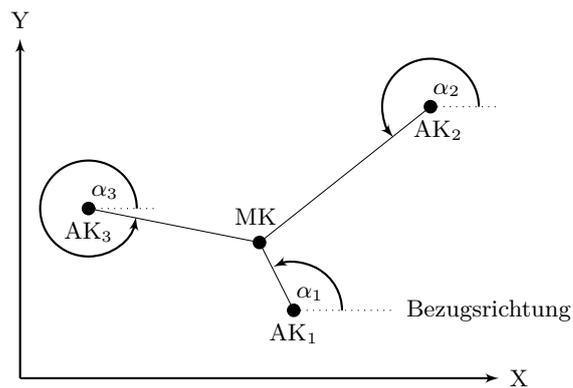


Abb. 2.10: Positionierungsverfahren der Angulation (zweidimensionale Darstellung)

aus dem Arkustangens der Quotienten von Anker- und Mobilknotendifferenzen hervor. Mit Antennenmatrizen anstelle der Antennenarrays kann eine zusätzliche Höhenkomponente bestimmt werden, welche zur dreidimensionalen Positionierung dient (Blankenbach u. a. 2007).

2.3.3 Positionierung durch Mustererkennung und Zellzuordnung

Verfahren der Mustererkennung und Zellzuordnung nutzen Merkmale oder Nachbarschaftsrelationen zur Bestimmung der Position. Ein direkter mathematischer Zusammenhang zwischen den Messgrößen und der gesuchten Position ist aufgrund dessen nicht zwingend gefordert. Die Bestimmung der Knotenposition innerhalb eines Funkrasters wird dabei als zellbasierte Lokalisierung (Cell of Origin, COO) bezeichnet. Techniken der Mustererkennung können u. a. in Form der Fingerabdruckmethode (Fingerprinting) oder Szenenanalyse zur Anwendung kommen. Da die Szenenanalyse bildbasierende Informationen verarbeitet, soll keine nähere Betrachtung erfolgen. Verwendete Systeme und Methoden werden z. B. bei Mautz (2012) dargestellt.

Zellbasierte Lokalisierung

Die Basis der zellbasierten Lokalisierung ist ein matrixartig angelegtes Netz von Ankerknoten, deren Positionen und Aktionsradien bekannt sind. Wird ein mobiler Knoten innerhalb dieses Aktionsbereiches detektiert, kann die Position des Mobilknotens dem Aktionsbereich des Ankers zugewiesen werden (Abb. 2.11). Die Genauigkeit der Position ist dabei direkt abhängig von der Feinmaschigkeit des Sensornetzes. Da die Aktionsbereiche der Anker z. B. durch Überschneidungen nicht immer eindeutig voneinander abgrenzbar sind, können virtuelle Anker in Form von Interpolationsknoten gebildet werden, welchen der Mobilknoten zugeordnet werden kann.

Fingerprinting

Der Vergleich charakteristischer Signaturen stellt den grundlegenden Ansatz des Fingerprintings dar. Allein aus diesem Umstand ist ersichtlich, dass das Verfahren aus mindestens zwei Phasen bestehen muss. In einer Trainingsphase, welche zur Generierung der charakteristischen Fingerabdrücke dient, wird eine Datenbank mit raumbezogenen Informationen gefüllt. Dazu

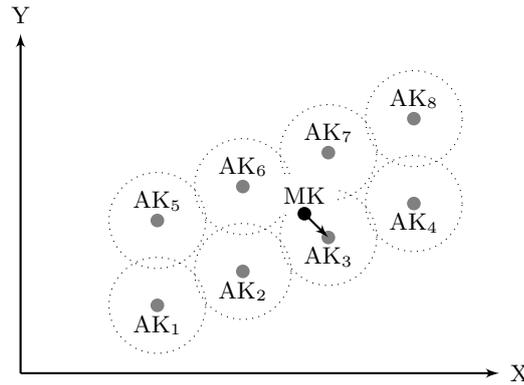


Abb. 2.11: Zellbasierte Lokalisierung (zweidimensionale Darstellung)

werden Signaturen wie Signalstärkeparameter an einer Vielzahl von Messpositionen des gesamten Messraums erfasst. Zusätzlich erfolgt eine entsprechende Koordinierung im Bezugssystem.

Während der Lokalisierungsphase wird für die aktuelle Position des mobilen Knotens eine äquivalente Signatur \mathbf{X} erstellt. Ein Vergleich dieses Datensatzes gegenüber den Trainingsdaten \mathbf{X}' liefert die am geringsten abweichende Signatur und damit auch die genäherte Position. Als Standardwerkzeuge kommen Nachbarschaftsanalysen (Nearest Neighbor, NN) zum Einsatz, welche die Trainingsdaten mathematisch betrachtet in Matrixform zusammenstellen (Cover 1968). Eine zeilenweise Sortierung nach der Anzahl von Trainingspunkten n und spaltenweise nach der Signaturdimension J wäre denkbar. Die Berechnung der euklidischen Distanz

$$d_i = f(\mathbf{X}, \mathbf{X}'_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^J (X_j - X'_{ij})^2} \quad (\mathbf{X}, \mathbf{X}' \in \mathbb{R}^J) \quad (2.14)$$

stellt ein einfaches Beispiel dar (Lim u. a. 2010). Für die abschließende Zuordnung der Signatur \mathbf{X} zu einem Datensatz der Trainingsdaten wird in diesem Fall die Forderung

$$d_i \rightarrow \min \quad (i = 1 \dots n) \quad (2.15)$$

herangezogen. Diejenige Signatur \mathbf{X}'_i , welche das Minimumkriterium erfüllt, stellt die Koordinate für die Position des mobilen Knotens bzgl. des Bezugssystems zur Verfügung. Eine Steigerung der Positionierungsgenauigkeit kann durch die Interpolation zwischen mehreren Referenzdatensätzen erreicht werden (Lau u. a. 2009). Bildlich betrachtet wird das Volumen um den mobilen Knoten stetig erweitert bis k Trainingsdatensätze im erweiterten Raum liegen. Die Bestimmung von euklidischen Distanzen und Verfahren der Minimumbildung führen auch bei diesen Anwendungen zur gesuchten Position. Weiterführende Zuordnungsmethoden erweitern den Ansatz z. B. durch distanzabhängige Gewichtungen, Cluster- oder Segmentanalysen, das Säubern von Trainingsdaten sowie der Nutzung von Baum- oder Templatestrukturen. Eine Zusammenstellung der Algorithmen wird bei Bhatia und Vandana (2010) vorgenommen.

Zur Generierung eines Fingerabdrucks können beliebige Funkssysteme unabhängig vom zugrunde liegenden Signaltyp eingesetzt werden. Mindestens eine Signalcharakteristik muss jedoch hinsichtlich der Positionierung nutzbar sein. Damit werden im Allgemeinen keine anspruchsvollen technischen Forderungen an die Sensoren gestellt, wodurch vorhandene Infrastrukturen wie

WLAN oder DECT besonders häufig in Kombination mit der Methode des Fingerprintings verwendet werden.

2.3.4 Einflussfaktoren

Die beschriebenen Grundlagen der Positionierung gründen sich in ihren physikalisch-mathematischen Zusammenhängen auf unverfälschte Signalausbreitungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten. Im Innenraumbereich werden die Signale jedoch durch verschiedene Einflussfaktoren beeinträchtigt. Eine mögliche Gliederung in

- Selbststörungen,
- Fremdstörungen sowie
- Slow- und Fast-Fading-Effekte (Schwund bzw. Schwankung der Empfangsleistung)

wird bei Tost (2009) vorgenommen. Zur Gruppe der Selbststörungen werden alle Effekte zugeordnet, die direkt vom Sensor bzw. dessen Bauelementen oder Schaltkreisen verursacht werden. Thermisches Rauschen entsteht in Leitern oder Widerständen z. B. aufgrund einer temperaturabhängigen Potenzialdifferenz zwischen den Leiterenden. Treten in Halbleitern Schwankungen der Leitfähigkeit auf, rufen diese ein sogenanntes Funkelrauschen hervor (Read 2004). Nachbarkanalinterferenzen treten zudem bei zeitgleicher Nutzung eng beieinander liegender Kanäle auf und führen zur additiven Überlagerung der Trägerwelle (Connor 1989).

In ähnlicher Weise wie die Störeinflüsse wirken auch die Kenngrößen der verwendeten Antennen auf die Signalausbreitung ein. Im Allgemeinen werden die Antennenkenngrößen für das Fernfeld angegeben, da in diesem Bereich von der Bildung ebener Wellen ausgegangen wird (radialer Leistungstransport). Der minimale Abstand A zwischen der Antenne und dem Beginn des Fernfeldes wird bei Kark (2016) mit $A \geq 2\lambda$ angegeben. Für große Antennen ist neben der Abhängigkeit zur Wellenlänge λ die maximale Antennenausdehnung l zu berücksichtigen (Gl. 2.16).

$$A \geq \frac{2 \cdot l^2}{\lambda} \quad \text{für } l > \lambda \quad (2.16)$$

Innerhalb des Bereichs zwischen der Antenne und dem Beginn des Fernfeldes – dem Nahfeld, besitzen die magnetischen und elektrischen Feldkomponenten dagegen nicht die gleiche Phasenlage. Es erfolgt lediglich eine Energiespeicherung, die induktiv oder kapazitiv genutzt werden kann. Für Aufgaben der funkgestützten Positionierung sollte dieser Bereich folglich vermieden werden oder er kann, wenn überhaupt, zur zellbasierten Lokalisierung dienen.

Fremdstörungen werden vor allem durch konkurrierende Funkssysteme verursacht. Insbesondere im häufig verwendeten ISM-Band können Interferenzerscheinungen zwischen Kommunikationssystemen der Infrastruktur und dem Positionierungssystem auftreten (Zhang u. a. 2010). Des Weiteren geht im industriellen Umfeld von großen Maschinen oder Anlagen ein potenzielles Störvermögen aus. Besonders wenn die elektromagnetische Verträglichkeit nicht gewährleistet werden kann, wirken diese als direkte Rauschquellen (Hering u. a. 1999).

Neben den Einflüssen elektrischer Bauelemente und koexistierender Rauschquellen ist die Wellenausbreitung zwischen der Sende- und Empfangsantenne von Bedeutung. Die Sendeantenne wandelt die zugeführte Leistung in elektromagnetische Wellenfelder um, wodurch die Leistung weitertransportiert wird. Im ungestörten Ausbreitungsfall wird eine Freiraumwelle erzeugt, deren

Energie durch die Empfangsantenne aufgenommen wird. Slow- und Fast-Fading-Effekte treten besonders dann auf, wenn die Ausbreitung nicht ungestört erfolgen kann. Die Ausprägung ist im besonderen Maße von den örtlichen Gegebenheiten und der verwendeten Wellenlänge abhängig. Abschattungen und Dämpfungen führen zu einer langsamen Variation der empfangenen Leistung, dem Slow-Fading.

Fast-Fading wird aufgrund von Erscheinungen der Beugung, Streuung und Reflexion hervorgerufen. Die Funkwelle legt in diesem Fall einen größeren Weg zwischen dem Sender und Empfänger zurück (Gustrau 2013). Beide Effekte werden sowohl bei fest installierten Objekten verschiedener Baumaterialien als auch bei bewegenden Strukturen oder Lebewesen sichtbar (Mautz 2009). Zur Beschreibung des Raumes, in welchem sich die Funkwelle hinsichtlich optimaler Empfangsleistungen ungestört ausbreiten sollte, wird in vielen Fällen das Fresnel-Ellipsoid nach Abbildung 2.12 genutzt.

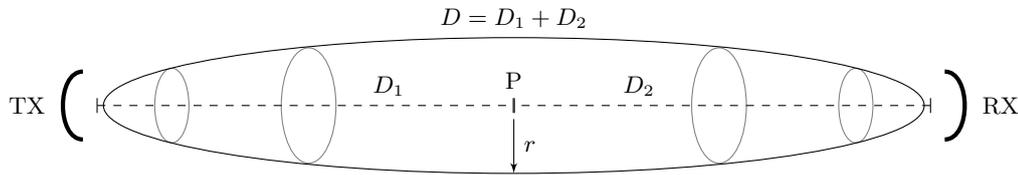


Abb. 2.12: Fresnel-Ellipsoid ($n = 1$)

Der Rotationsellipsoid erstreckt sich zwischen dem Sender TX und Empfänger RX, wobei in der dargestellten Form ausschließlich die Fresnel-Zone erster Ordnung ($n = 1$) abgebildet wird. Fresnel-Zonen höherer Ordnung können in der Regel vernachlässigt werden, da der Hauptanteil der Feldstärke in der ersten Zone übertragen wird (Voges 2004). Darüber hinaus ist der Radius r des Ellipsoids von der Wellenlänge λ abhängig, wobei kurze Wellenlängen kleinere Radien

$$r = \sqrt{\frac{n \cdot \lambda \cdot D_1 \cdot D_2}{D}} \quad \text{mit} \quad D = D_1 + D_2 \quad (2.17)$$

erzeugen. In Anbetracht der gewählten Parametrisierung kann r für beliebige Positionen P entlang der Funkstrecke D ermittelt werden, wenn D_1 (Abstand von TX zu P) oder D_2 (Abstand von RX zu P) bekannt ist. Der maximale Radius des Ellipsoids entsteht dadurch bei $D_1 = D_2$. Wird die Funkübertragung innerhalb des Ellipsoids durch Hindernisse beeinträchtigt, hat dies Auswirkungen auf die empfangene Feldstärke. Eine ausführliche Betrachtung möglicher Szenarien wird bei Hölzler und Thierbach (1966) vorgenommen. Doch selbst in Anbetracht eines ungestörten Wellenausbreitens wird die Leistungsdichte der elektromagnetischen Wellen durch das Ausbreitungsmedium reduziert. Dieser Sachverhalt gilt auch für geschlossene Räume mit dem dämpfenden Medium Luft. Unter Vernachlässigung der Antennengewinne wird zur Beschreibung des Sachverhalts die Funkfelddämpfung

$$F = \frac{P_{\text{TX}}}{P_{\text{RX}}} = \left(\frac{4\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2 \quad (2.18)$$

verwendet (Gustrau 2013). Diese stellt die Relation zwischen der ausgesendeten Leistung P_{TX} und empfangenen Leistung P_{RX} dar. Streng genommen sind die formalen Zusammenhänge lediglich im Vakuum gültig. Nach Böge und Pläßmann (2007) ist zur näherungsweise Betrachtung des Energietransports auch die Verwendung für das Medium Luft möglich.

Die Generierung von Korrekturansätzen ist aufgrund der vielen Einflussfaktoren nur selten möglich. Besonders die Modellierung der Umgebungsbedingungen lässt sich beim Vorhandensein eines empirischen Modells nur bedingt auf andere Umgebungsparameter übertragen (Pahlavan u. a. 2002, Tost 2009). Des Weiteren erschweren zufällige Faktoren wie die Schwankung der atmosphärischen Parameter, unbekannte Antennenausrichtungen, Personenbewegungen sowie die Positionsänderung von großem Equipment und Einrichtungsgegenständen eine sichere Lösungsfindung (Lim u. a. 2010).

2.4 Qualitätssicherung schienengebundener Fahrzeuge

Im Maschinen- und Anlagenbau besteht die Forderung, dass der Zustand eines Produkts in möglichst vielen Stadien des Produktionszyklus abrufbar sein muss. Dieser Anspruch liegt auch für die Produktion schienengebundener Fahrzeuge vor. Durch strenge Qualitätssicherungsregularien wird die gesamte Prozesskette, begonnen bei der Fertigung von Rohbaukomponenten bis hin zur Endabnahme, von durchgängigen Güteprüfungen begleitet. Ein nicht zu vernachlässigender Teil der Qualitätskontrollen wird dabei mit geodätischen Sensoren umgesetzt. Neben einfachen Komponententests, z. B. der Seitenwände, Langträger oder des Untergestells, sind komplexe Geometrieprüfungen nach dem vollständigen Aufbau des Wagenkastens (Ende der Rohbauphase) sowie im fertigen Ausbauzustand vorgesehen. Die grundlegenden Messvorgänge, das anzuwendende Fahrzeugbezugssystem und die Rahmenbedingungen während der Vermessung werden für Reisezugwagen, Triebwagen, Dienstwagen, Triebköpfe und Lokomotiven in der Norm DIN 25043 : 2012 festgehalten und werden durch die meisten Fahrzeughersteller umgesetzt. Für Güterwagen gilt zudem die europäische Norm DIN EN 13775 : 2004. Detaillierte Erläuterungen zur Entwicklung, Produktion und Instandsetzung von Schienenfahrzeugen können z. B. PEP (2005) und Brandhorst u. a. (2014) entnommen werden.

Die Vielzahl der Prüfaufgaben ist in zeitlich eng bemessene Produktionsphasen integriert. Entsprechend effizient und trotzdem präzise müssen die Messaufgaben umgesetzt werden. Aus diesem Grund wird der Einsatz von Formlehren oder die Schnurgerüstvermessung in der heutigen Zeit hauptsächlich durch Industrietachymeter und Lasertracker ersetzt. Infolge des größeren Zeitaufwandes zum Anbringen und Lösen der Zielmarken kommen photogrammetrische Systeme nur selten bei der Wagenvermessung zum Einsatz. Eines der wenigen Einsatzbeispiele wird bei Leica (1999) beschrieben.

2.4.1 Messaufgaben

Die Qualitätskontrolle schienengebundener Fahrzeuge wird in den meisten Fällen durch eine Komplexprüfung der wirkenden Kräfte und Geometrie durchgeführt. Insbesondere die Verbindungsstellen zum Drehgestell liefern wichtige Daten zur Bewertung des Fahrzeugs. Die beiden genannten Arbeitsgänge können zwar thematisch exakt voneinander abgegrenzt werden, bedingen sich in der Praxis aber gegenseitig. Dieser Sachverhalt spiegelt sich sowohl im Arbeitsablauf als auch in der Richtlinie DIN 25043 : 2012 wider. Eine detaillierte Beschreibung der innerhalb einer Fahrzeuggeometrie wirkenden Kräfte wird bei Lauck und Richter (2005) durchgeführt. Darüber hinaus stellt Ullrich (2015) das Zusammenspiel zwischen der Kraftmessung und Geometriebestimmung ausführlich dar. Beide Publikationen stützen sich auf Messvorgänge an Schienenfahrzeugen

mit einer Vierpunktstützung zwischen Wagenkasten und Fahrwerk, welche in den acht Teilen der Norm DIN 25043 : 2012 angeführt werden (Tab. 2.5).

Tab. 2.5: Umfang der Richtlinie DIN 25043 : 2012

DIN 25043	Beschreibung
Teil 1	Messgrundlagen
Teil 2	Messvorgänge am Wagenkasten von Reisezugwagen und Triebwagen
Teil 3	Messvorgänge am Wagenkasten von Lokomotiven und Triebköpfen
Teil 4	Messen und Berechnen der wirkenden Kräfte an der Schnittstelle zwischen Wagenkasten und Fahrwerk
Teil 5	Messvorgänge am Fahrwerkrahmen
Teil 6	Messvorgänge an Wiege/ Traverse des Fahrwerks
Teil 7	Messvorgänge am kompletten Fahrwerk im Druckstand
Teil 8	Messvorgänge bei auf dem Fahrwerk aufgesetztem Wagenkasten

In den einzelnen Teilen wird abhängig vom Bauzustand auf die Berechnung der wirkenden Kräfte zwischen Wagenkasten und Fahrwerk sowie auf die Lage verschiedener Messstellen am Produkt eingegangen. Punktmessungen werden per Definition an Bezugspunkten (reproduzierbare Referenzpunkte am Schienenfahrzeug) und Messstellen (reproduzierbare Punkte am Schienenfahrzeug zur Abmaßbestimmung) durchgeführt. Durch eine definierte Syntax der Maßbenennung kann der Bauzustand und die Position der Messstelle auf den ersten Blick identifiziert werden. Eine Messstelle y32.3R_1 beschreibt z. B. den Abstand der Seitenwand zur Wagenlängsachse (y32) auf der rechten Wagenseite (R) im Messquerschnitt Drei des Bauzustands der Vorfertigung (Kennziffer Eins).

Der Umfang an Messstellen mit zugehörigen Detailbeschreibungen wird vom Hersteller in fahrzeugspezifischen Messblättern definiert. Dadurch wird eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zwischen verschiedenen Bauzuständen gewährleistet. Darüber hinaus werden die qualitäts- und sicherheitsrelevanten Messergebnisse von den Fahrzeugherstellern zum Nachweis der Verkehrstauglichkeit verwendet. Rückschlüsse auf die Laufgüte des Fahrzeugs, die Einhaltung des Fahrzeugbegrenzungsprofils und die Entgleisungssicherheit bilden die Kernaussagen des Ergebnisses der Qualitätskontrolle.

Sämtliche Messstellen beziehen sich auf ein definiertes Produktkoordinatensystem. Als Ausgangspunkt wird für jeden Fahrzeugtyp konstruktiv eine Bezugsebene angegeben, welche als horizontale Nullebene betrachtet wird (Abb. 2.13). Die Wagenlängsmittle, bzw. eine orthogonal auf der Bezugsebene stehende Vertikalebene, verläuft durch die geometrische Mitte des Fahrzeugs von Wagenende 2 (WE2) nach Wagenende 1 (WE1). Das WE1 ist dabei immer der Fahrtrichtung zugewandt. Zugleich wird der Wagenkasten bzgl. der Fahrtrichtung in einen linken und rechten Bereich abgegrenzt. Die Trennung des vorderen und hinteren Bereichs wird durch eine vertikale Fahrzeugquerebene erreicht. Diese ist sowohl zur Bezugsebene als auch zur Fahrzeuglängsebene orthogonal und ist am geometrischen Mittelpunkt zwischen den Fahrwerksanbindungen oder Traversen zu finden.

Infolge fertigungsbedingter Toleranzen sind neben den geometrischen Parametern auch die Kräfteverteilungen innerhalb des Konstrukts zu berücksichtigen. Das Augenmerk wird dabei in erster Linie auf die wirkenden Kräfte zwischen dem Wagenkasten und der Vierpunktaufgabe des Fahrwerks gelegt. Da das Gesamtgewicht des Fahrzeugs an diesen vier Übertragungspunkten

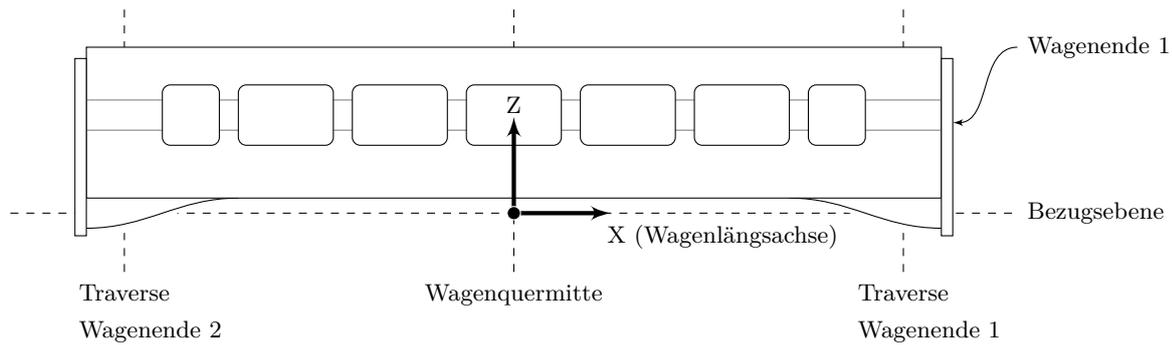


Abb. 2.13: Koordinatensystem eines Schienenfahrzeugs (zweidimensionale Darstellung)

auf das später montierte Drehgestell übertragen wird, sind die anteiligen Gewichtskräfte F_M (Aufstandskräfte) durch eine geeignete Messeinrichtung zu bestimmen. Die Messeinrichtung ermittelt dann die Gegenkraft F_E (Eckkraft) zur jeweiligen Aufstandskraft. Anhand der gemessenen Eckkräfte an den vier Auflagepunkten (1L, 1R, 2L, 2R) kann die Gewichtskraft

$$G_W = |F_{E_{1L}} + F_{E_{1R}} + F_{E_{2L}} + F_{E_{2R}}| \quad (2.19)$$

aus dem Betrag der Eckkraftsumme berechnet werden. Als weitere Information steht die geometrische Lage der Abstützpunkte hinsichtlich der Wagenlängsachse Y_M und Querachse X_M zur Verfügung. Die abgeleiteten Koordinaten des Fahrzeugschwerpunkts

$$\begin{aligned} X_S &= G_W^{-1} \cdot X_M \cdot [(F_{E_{1L}} + F_{E_{1R}}) - (F_{E_{2L}} + F_{E_{2R}})] , \\ Y_S &= G_W^{-1} \cdot Y_M \cdot [(F_{E_{1L}} + F_{E_{2L}}) - (F_{E_{1R}} + F_{E_{2R}})] \end{aligned} \quad (2.20)$$

können dann zur Bewertung des Fahrzeugs dienen. Im Allgemeinen liegt der Schwerpunkt nahe des Koordinatenursprungs. Die mathematischen Relationen der Gleichungen 2.19 und 2.20 setzen jedoch symmetrisch verteilte Aufstandspunkte und übereinstimmende Kraftmess- und Krafteinleitungspunkte (Drehgestellanbindung) voraus. Die erweiterte Parametrisierung der Gleichung kann diesbezüglich Lauck und Richter (2005) sowie Ullrich (2015) entnommen werden.

Neben den Messgrundlagen werden in der Norm DIN 25043:2012 elementare Abläufe zur Qualitätsprüfung genannt. Die enthaltenen Begriffsdefinitionen werden zum besseren Verständnis der weiteren Ausführungen an dieser Stelle aufgeführt:

- Die torsionsarme Lage eines Wagenkastens ist diejenige Lage, bei der das Schienenfahrzeug in horizontaler Ausrichtung auf den Abstützpunkten der Eckkraftmesseinrichtung eine minimale Verwindung (Torsion) aus Eigengewicht und der Wirkung der Aufstandskräfte erfährt.
- Die Bezugslage eines Wagenkastens entspricht einer torsionsarmen Lage, bei der beide Wagenenden zusätzlich das konstruktiv festgelegte Höhenniveau aufweisen und das Fahrzeugbegrenzungsprofil eingehalten wird.
- Die am Schienenfahrzeug definierte Bezugsebene ist eine konstruktiv festgelegte horizontale Nullebene in Bezugslage.

- Beilagen werden an der Schnittstelle zwischen dem Wagenkasten und Fahrwerk montiert und dienen dem Ausgleich von Höhenunterschieden zwischen den Abstützpunkten; des Weiteren dienen sie zur Optimierung der Radaufstandskräfte und der Einhaltung des Fahrzeugbegrenzungsprofils.

2.4.2 Kraftmessung und Geometriebestimmung

Die Beförderung des Schienenfahrzeugs zur Bauteilaufnahme, welche im vorliegenden Fall auch als Eckkraftmesseinrichtung (EKM) bezeichnet wird, bildet den Beginn der Qualitätskontrolle. In Abhängigkeit zum Produktionszustand des Fahrzeugs erfolgt der Transport entweder auf Hilfsdrehgestellen oder durch den Einsatz eines Krans. Fest installierte Nasenhubböcke nehmen den Wagenkasten auf und befördern ihn auf eine erhöhte Lage, damit die EKM unter dem Wagen an den Positionen der Auflagepunkte positioniert werden kann. Je nach Ausbauzustand des Produkts kommt die Eckkraftmesseinrichtung als Rollbockvariante oder mit zusätzlichem Richtstand zum Einsatz (Abb. 2.14). Beide Systemkonzepte verfügen über insgesamt vier Kraftaufnehmer, welche an den oberen Enden der Feinhubeinrichtungen verbaut sind. Je zwei Feinhubeinrichtungen, zusammen mit einem mobilen Rollbock oder einem massiven Unterbau, bilden ein Messmodul. Zur Realisierung der Vierpunktauflage sind folglich zwei Module nötig, welche im Idealfall unter den Schnittstellenpunkten zum Fahrwerk positioniert sind. Die Feinhubeinrichtungen ermöglichen in der Folge das Ausheben des Wagens bis zur vollständigen Kraftaufnahme. Damit ist der Ausgangszustand für den Prüfprozess gegeben, welcher durch die Phasen der

- Nivellierung des Schienenfahrzeugs,
- Herstellung der torsionsarmen Lage in kombinierter Eckkraftmessung,
- geometrischen Vermessung sowie
- Auswertung der Messdaten zur Protokollerstellung und Analyse

gekennzeichnet ist. Nachdem der Wagen vollständig auf die EKM aufgesetzt wurde, werden die Höhendifferenzen der vier Auflagepunkte bestimmt. Anhand der Differenzen wird die horizontale Lage des Wagenkastens durch die Feinhubeinrichtungen eingestellt. In dieser Lage werden die gemessenen Eckkräfte mit den korrespondierenden Sollwerten verglichen. In der Regel ist eine Torsion (Verwindung) des Fahrzeugs aufgrund fertigungsbedingter Toleranzen festzustellen,

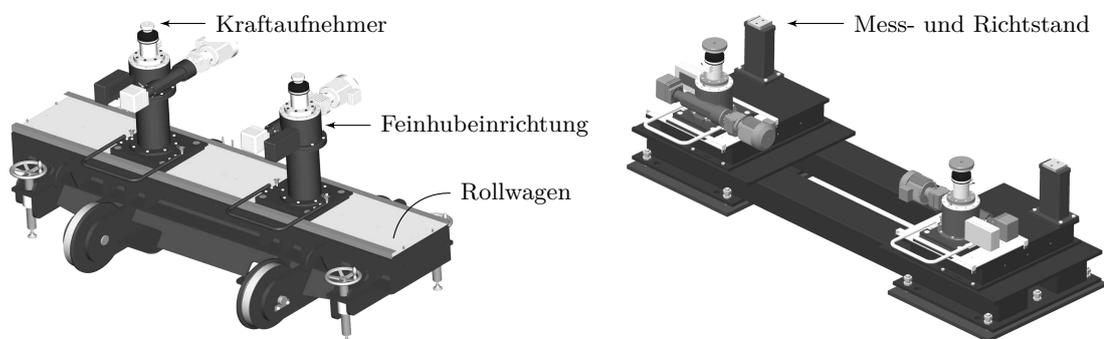


Abb. 2.14: Eckkraftmesseinrichtungen der Firma A.S.T. GmbH: EKM 305-F für die Endprüfung (links) und EKM 305-S für den Rohbau (rechts)

welche durch die auftretenden Kraftdifferenzen nachweisbar ist. Ein iterativer Regelungsprozess steuert die Feinhubeinrichtungen in der Folge derart, dass die Differenz zwischen der Soll- und Aufstandskraft weniger als 500 N beträgt. Der Wagen befindet sich danach in der torsionsarmen Lage und die Berechnung des Schwerpunktes ist möglich.

Aus geodätischer Sicht sind damit alle Voraussetzungen für die Geometriebestimmung gegeben. In Anlehnung an Abbildung 2.13 ist die X - Y -Ebene des Fahrzeugsystems identisch mit der konstruktiv festgelegten Bezugsebene. Die positive X -Achse läuft in diesem Zusammenhang durch die Fahrzeuglängsmittle zum WE1 und entspringt in der Wagenquermitte. Die Z -Achse vervollständigt das rechtshändige Koordinatensystem.

Bezugspunkte zur Koordinatentransformation zwischen dem Instrumenten- und Wagensystem sind in den meisten Fällen im Bereich der Traversen und Kupplungen zu finden. In Abbildung 2.15 wird eine Auswahl von drei verschiedenen Bezugspunktconstellationen dargestellt. Da die Bezugspunkte an den Traversen in erster Linie mit den Positionen der Drehgestellanbindungen korrespondieren, entsprechen vier der Bezugspunkte zumeist den Positionen der Eckkraftmessung. Im Allgemeinen besteht zwischen den Bezugspunkten eine Symmetrie hinsichtlich der X - und Y -Achse des Fahrzeugsystems. Zudem sind sie in den meisten Fällen in einer Ebene, z. B. der Bezugsebene, koordiniert. Nur in seltenen Anwendungen wird für jedes Wagenende eine separate Bezugsebene angegeben. Dabei ist die Position des sogenannten Sprungs der Bezugsebene im Fahrzeugsystem definiert, wodurch zusätzliche Höhendifferenzen der Bezugspunkte vorzufinden sind, die ebene Symmetrie jedoch erhalten bleibt. Aufgrund der Symmetrie und identischen Vermarkung der Bezugspunkte (Bohrungen, Körnungen, Gewinde, Passungen) besteht bei der Punktmessung grundsätzlich ein Potenzial für grobe Fehler wie Punktverwechslungen.

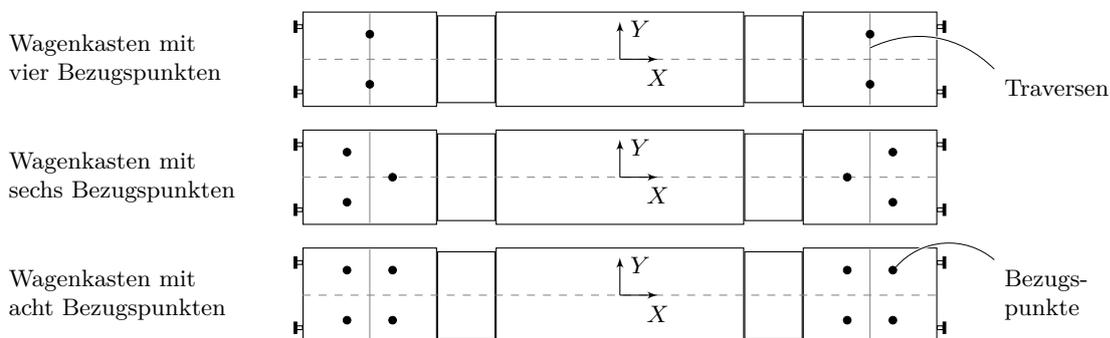


Abb. 2.15: Beispiele für Bezugspunktconstellationen

Zusätzliche Messstellen an den Seitenwänden sind für die Bestimmung der Bezugs Lage nötig. Generell kann durch die Verteilung der Messstellen davon ausgegangen werden, dass mehrere Instrumentenstandpunkte zur vollständigen Punktaufnahme nötig sind. Die Bestimmung der Transformationsparameter zwischen den Standpunkten erfolgt anhand von Verknüpfungspunkten, deren standpunktbezogene Koordinaten \mathbf{X} mit einer Helmert-Transformation

$$\mathbf{X}' = \mathbf{X}_0 + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{X} \tag{2.21}$$

ohne Maßstabsanpassung ($m = 1$) in ein einheitliches System \mathbf{X}' überführt werden. Die Anzahl der Verknüpfungspunkte wird im Allgemeinen so gewählt, dass die Transformationsparameter der Rotationen \mathbf{R} und Translationen \mathbf{X}_0 durch eine vermittelnde Ausgleichung bestimmt werden. Das so geschaffene Netz wird am Ende aller Messungen anhand der gemessenen Bezugspunkte

mit dem Fahrzeugkoordinatensystem zur Deckung gebracht. Zugleich muss die Einhaltung der Bezugslage überprüft werden.

Treten bei der Analyse nicht tolerable Abweichung hinsichtlich der Einhaltung des Fahrzeugbegrenzungsprofils oder der Höhendifferenzen zwischen den Wagenenden auf, erfolgt ein virtueller Kippvorgang anhand der gemessenen Fahrzeuggeometrie. Die Kippwinkel werden aus den zugehörigen Koordinaten abgeleitet und als zusätzliche Transformation in Form von Rotationen um die Wagenlängs- und Querachse auf die Messungen angewendet. Die Aneinanderreihung der Teiltransformationen (Verknüpfung T_1 , Bezugssystem T_2 , Kippvorgang T_3) ist besonders softwareseitig effizient durch die Verwendung homogener Koordinaten zu bewerkstelligen. Dabei werden die Transformationsparameter in einer gemeinsamen Transformationsmatrix

$$T = \begin{bmatrix} & R & & X_0 \\ & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

zusammengefasst (Menges 1992). Aufgrund der Dimensionen von T muss sowohl der Koordinatenvektor X als auch der resultierende Vektor X' um ein Element w erweitert werden. Für $w = 1$ werden Punkte im Raum beschrieben. In diesem Zusammenhang kann die Aneinanderreihung der genannten Teiltransformationen durch Gleichung 2.23 beschrieben werden.

$$X'_h = T_3 \cdot T_2 \cdot T_1 \cdot X_h \quad \text{mit} \quad X_h = \begin{bmatrix} X \\ w \end{bmatrix}, \quad X'_h = \begin{bmatrix} X' \\ w \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Als Resultat der verketteten Transformationen werden die Koordinaten sämtlicher Messstellen bezogen auf einen Wagen in Bezugslage dargestellt. Die geforderten Dimensionen nach Angaben des Herstellers können somit direkt aus den transformierten Koordinaten abgeleitet werden.

Darüber hinaus werden die Höhendifferenzen zwischen den Auflagepunkten bzw. Drehgestellanbindungen analysiert. Bei auftretenden Abweichungen zum Vorgabewert werden entsprechende Beilagen vorgesehen, damit sowohl eine minimale Torsion als auch geringe Höhendifferenzen zwischen den Auflagepunkten gewährleistet werden können. Die beschriebenen Messaufgaben und Prozessabläufe werden jeweils bei der Rohbau- und Endfertigung durchgeführt. Auch nach Instandsetzungsmaßnahmen und der Reparatur von Fahrzeugen sind derartige Messungen vorgesehen. Der Umfang an Messaufgaben wird in Abbildung 2.16 zusammengefasst.

2.4.3 Automatisierung des Messablaufs

Durch die Automatisierung von Messabläufen werden die Arbeitsschritte eines Messprozesses innerhalb eines strukturierten Ablaufplans zusammengefasst. In erster Linie sollen dadurch kurze Messzeiten, eine einfache Praktikabilität, die automatisierte Auswertung der Ergebnisse und die Senkung von Kosten erzielt werden. Für die Qualitätssicherung schienengebundener Fahrzeuge muss die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zwischen verschiedenen Produktionsphasen und Wagenkästen zusätzlich gewährleistet werden. Die konkreten Mess- und Prüfaufgaben sind im Allgemeinen genau definiert und die zugehörigen Messstellen in herstellereigenen Messblättern

beschrieben. Aus den zugrunde liegenden Informationen können folgende Automatisierungsgrade bei der Punktaufnahme erreicht werden:

- keine Automatisierung,
- Teilautomatisierung,
- (in vielen Arbeitsabschnitten) Vollautomatisierung.

Keine Automatisierung: Der Messablauf ist nicht automatisiert, lediglich die abzuarbeitenden Messstellen sind bekannt. Die Messpunkte werden in einer beliebigen Reihenfolge aufgenommen und die Zuordnung der Punktkennung erfolgt manuell vom Anwender. Alle nötigen Koordinatentransformationen, z. B. standpunkt- oder bauteilbezogene, werden am Ende der Vermessung

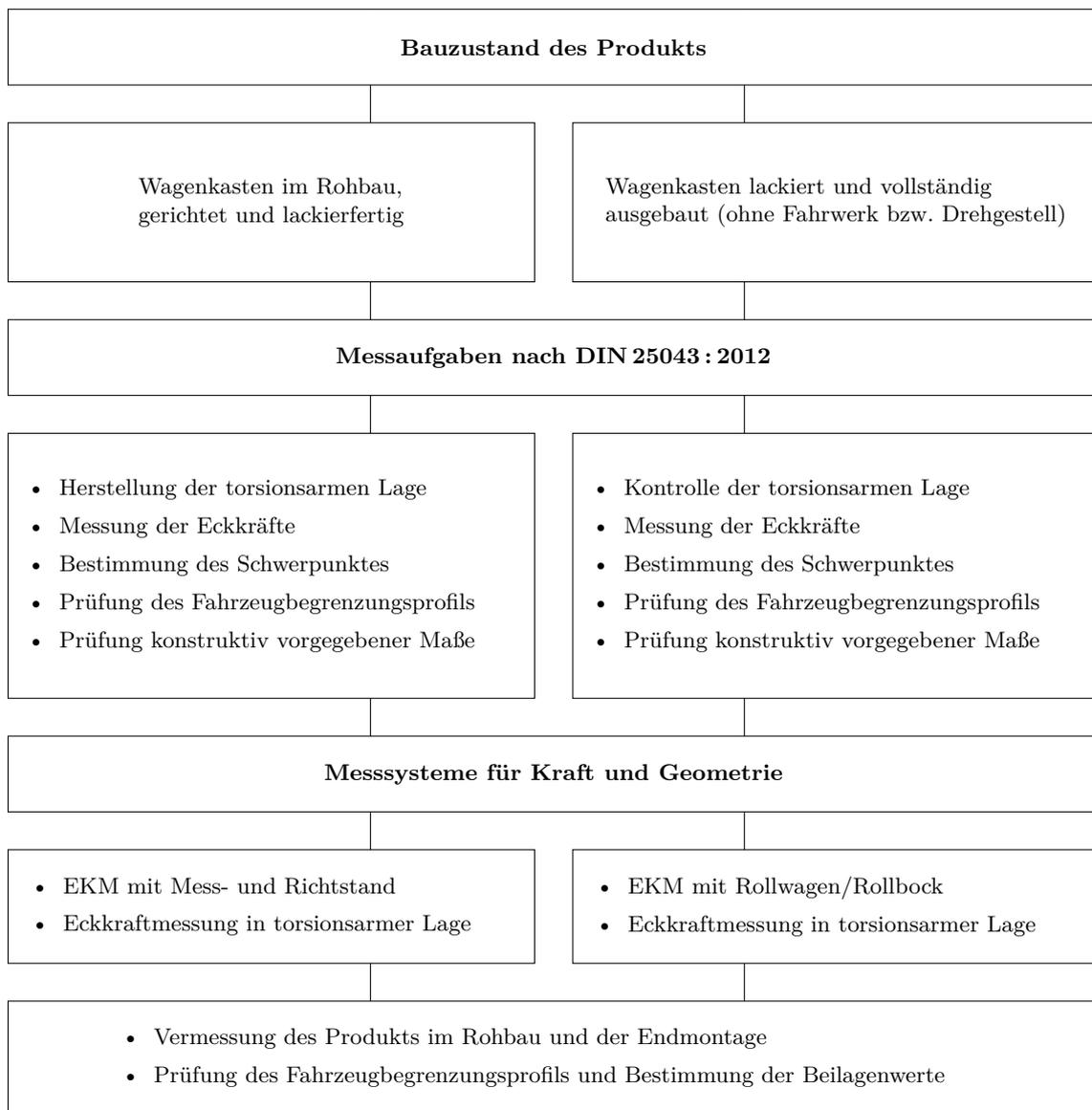


Abb. 2.16: Messaufgaben bei der Fertigung und Instandsetzung schienengebundener Fahrzeuge

berechnet und angewendet. Die Aufbereitung der Messergebnisse zur Erstellung des Prüfprotokolls wird ebenfalls vom Anwender übernommen. Dieser Ablauf entspricht einer nahezu freien Messung unter der Vorgabe von Messstellen.

Teilautomatisierung: Die Vorgehensweise bei der Messung ist durch einen Messplan detailliert beschrieben und softwareseitig implementiert. Die Abarbeitung der Messstellen erfolgt nach einem tabellarischen Schema. Der Anwender erhält zu jeder Messstelle detaillierte Informationen z. B. in Form von Text- oder Bildansichten des jeweiligen Messblatts. Die Koordinatentransformationen oder auch sinnvolle Näherungen können durch die definierte Abfolge der Punktmessungen bereits während der Messung berechnet werden. Besonders die vollständige Erfassung aller Messstellen kann dadurch gewährleistet werden. Nach dem Abschluss der Vermessung können die transformierten Koordinaten direkt ausgewertet und automatisiert in das Prüfprotokoll übertragen werden.

Vollautomatisierung: Neben den Messstelleninformationen sind die zugehörigen Koordinaten im Bezugssystem (Sollkoordinaten) direkt ausgewiesen oder wurden bereits messtechnisch erfasst. Entsprechend des teilautomatisierten Vorgehens werden die Messaufgaben tabellarisch durchgeführt. Durch möglichst wenige Punktmessungen wird zu Beginn der Messung eine gute Näherung für die Transformationsparameter zwischen dem Instrumenten- und Bauteilkoordinatensystem bestimmt. Anhand des Vorliegens der Sollkoordinaten und Transformationen können die Messpunkte vor der Messung durch den Instrumentenlaser signalisiert werden. Zudem können grobe Fehlmessungen durch Echtzeitprüfungen (Soll-Ist-Vergleich) vermieden werden. Somit wird neben der Messstellenvollständigkeit und automatisierten Prüfprotokollgenerierung auch die korrekte Messausführung kontrolliert.

Im Zuge einer effektiven und vollständigen Messung sind die beiden letztgenannten Automatisierungsgrade zielführend. Um die beschriebenen Kontroll- und Automatisierungsmöglichkeiten möglichst oft nutzen zu können, sollte der Messablauf derart gestaltet werden, dass die Bezugspunkte frühzeitig erfasst werden.

Punktidentifizierung durch Ausgleichung oder Netzgeometrie

Die Bezugspunktmessungen unterliegen in erster Betrachtung allerdings keiner Kontrolle. Aufgrund der symmetrischen Anordnung besteht das Potenzial zu groben Fehlern, die sich auf den gesamten (automatisierten) Verlauf der Messung auswirken. Das gleiche gilt für Verknüpfungspunkte, welche zu Beginn einer Instrumentenstationierung gemessen werden. Als Kontrollmechanismen lassen sich in diesen Fällen lediglich Verfahren der Punktidentifizierung durch Ausgleichung oder Netzgeometrie heranziehen.

Um beide Verfahren genauer zu erläutern, wird auf ein Beispiel einer Lasertrackermessung eingegangen. Die in Abbildung 2.17 dargestellten Bezugspunkte P'_1 bis P'_6 sind im Zielsystem \mathbf{X}' gegeben. Die zugehörigen Messungen eines API T3 werden mit P_1 bis P_6 angegeben und stehen im Instrumentensystem \mathbf{X} zur Verfügung. Beide Koordinatensysteme sollen durch eine Helmert-Transformation nach Gleichung 2.21 zur Deckung gebracht werden. Aufgrund der Anzahl an Messungen werden die $u = 6$ unbekanntem Transformationsparameter mit einer vermittelnden Ausgleichung bestimmt. Zur Beurteilung der Ausgleichungsergebnisse ist die Verbesserungsquadratsumme $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}$ von besonderer Bedeutung. Schätzungen zur Genauigkeit der n Beobachtungen sowie zur Gültigkeit des funktionalen Modells bilden einen Teil der

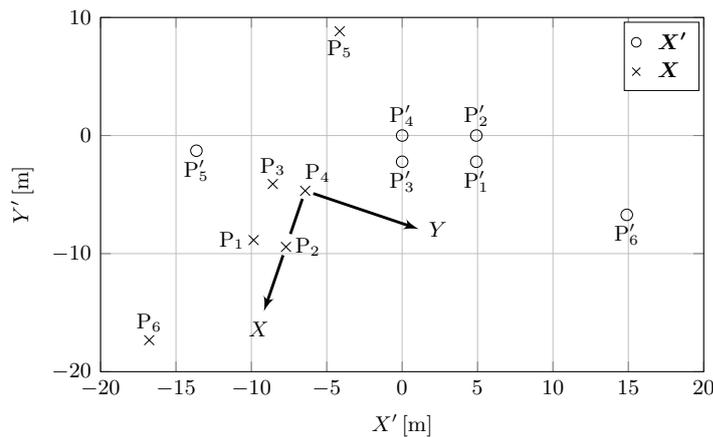


Abb. 2.17: Ausgangsdaten zur Punktidentifizierung (Grundrissdarstellung)

resultierenden Auswertemöglichkeiten. Des Weiteren wird das Genauigkeitsniveau der Messung durch die empirische Standardabweichung der Gewichtseinheit

$$\hat{s}_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u}} \quad (2.24)$$

repräsentiert, welche im Zuge des Ausgleichsprozesses geschätzt wird. Große Standardabweichungen können auf ungenaue Messdaten, Fehler im funktionalen Modell oder auf die zugrunde liegenden Genauigkeitsrelationen zwischen den Beobachtungen zurückzuführen sein (Niemeier 2008). Mit Messabweichungen im Rahmen der Instrumentengenauigkeit können große Standardabweichungen dementsprechend auch auf Punktverwechslungen hindeuten. Bezüglich des automatisierten Messablaufes besteht dieses Risiko besonders für die Punkte P_1 bis P_4 und deren regelmäßige Anordnung, die vergleichbar mit der symmetrischen Bezugspunktverteilung am Schienenfahrzeug ist. Die richtige Zuordnung der Punkte kann in diesem Fall durch die Bewertung der Ausgleichsergebnisse aller Punktkombinationen zwischen dem Ziel- und Ausgangssystem realisiert werden. In Tabelle 2.6 werden die empirischen Standardabweichungen der Gewichtseinheit exemplarisch für eine Reihe von zyklischen Permutationen hinsichtlich des Punktindex aufgezeigt.

Tab. 2.6: Standardabweichungen der Gewichtseinheit beim zyklischen Vertauschen

Permutation	\hat{s}_0 [mm] (P_1 - P_6)	\hat{s}_0 [mm] (P_1 - P_4)
0	0,03	0,02
+1	7037,48	2840,20
+2	8270,96	0,22
+3	7127,13	2840,22
+4	8270,96	-
+5	7037,49	-

Aus den Ergebnissen lässt sich eindeutig auf die richtige Zuordnung (grau hinterlegt) schließen. Werden die gemessenen Punkt als Verknüpfungs- oder Bezugspunkte interpretiert, sind nicht zwingend alle sechs Punkte von jedem Instrumentenstandpunkt sichtbar. Im ungünstigsten Fall

sind lediglich die regelmäßig angeordneten Punkte (P_1 - P_4) messbar. Besonders die Ausgleichsergebnisse der reduzierten Punktzahl verdeutlichen die entstehende Problematik (Tab. 2.6). Die korrekte Punktkombination liefert zwar nach wie vor die kleinste Standardabweichung, der nächst größere Wert von 0,22 mm kann jedoch nicht vollkommen als Lösung ausgeschlossen werden. Unsaubere Messausführungen, Vibrationen oder Luftverwirbelungen könnten als Ursache der größeren Standardabweichung in Betracht kommen. Die Daten sind dementsprechend punktweise zu überprüfen und der richtige Parametersatz für die Transformation manuell festzulegen.

Neben der Punktzuordnung durch eine Mehrfachausführung der vermittelnden Ausgleichung kann die innere Netzgeometrie als Zuordnungskriterium herangezogen werden. In einem ersten Schritt werden die Strecken zwischen allen Punkten gebildet. Im Zielsystem werden die Strecken mit S' gekennzeichnet, im Ausgangssystem mit S . Tabelle 2.7a stellt einen Auszug der berechneten Strecken sowie die Differenzen ΔS zwischen S' und S bei korrekten Punktzuordnungen dar. Zur Beurteilung der Punktzuordnungen kann in einem weiteren Schritt die Standardabweichung der Streckendifferenzen $s_{\Delta S}$ gebildet werden. Entsprechend des Vorgehens bei der Betrachtung des Ausgleichungsansatzes werden die Standardabweichungen für zyklische Permutationen in Tabelle 2.7b dargestellt.

Tab. 2.7: Analyse der Netzgeometrie

Strecke	S' [m]	S [m]	ΔS [mm]	Permutation	$s_{\Delta S}$ [mm] (P_1 - P_6)	$s_{\Delta S}$ [mm] (P_1 - P_4)
P_1 - P_2	2,220 51	2,220 48	-0,03	0	0,05	0,03
P_2 - P_3	5,397 54	5,397 54	0,00	+1	12 584,41	3668,11
P_3 - P_4	2,220 97	2,221 00	0,03	+2	17 594,37	0,44
P_4 - P_5	13,704 84	13,704 84	0,00	+3	17 525,44	3668,11
P_5 - P_6	29,057 15	29,057 04	-0,11	+4	17 594,35	-
P_6 - P_1	10,949 56	10,949 49	-0,07	+5	12 584,37	-

(a) Streckendaten

(b) Standardabweichungen

Die Analyse der Netzgeometrie liefert auch in diesem Fall die korrekte Punktzuordnung in Form der niedrigsten Standardabweichung (grau hinterlegt). Lediglich eine weitere Permutation ($\hat{s}_0 = 0,44$ mm) könnte als Lösung in Betracht gezogen werden, wobei aufgrund der eingesetzten Messtechnik wahrscheinlich von einer Verwendung abgesehen würde. In anderen Anwendungen, z. B. der Messung präziser Bohrbilder, können die Differenzen weitaus geringer ausfallen, wodurch beide Datensätze genauer miteinander verglichen werden müssten. Eine eindeutige Identifizierung einer oder mehrerer Messpunkte wäre auch in diesem Zusammenhang hilfreich.

In zusammenfassender Betrachtung muss festgestellt werden, dass durch regelmäßige Bezugs- oder Verknüpfungspunktverteilungen grobe Fehler nicht in jedem Fall aufgedeckt werden. Die statistischen Ergebnisse der vermittelnden Ausgleichung oder der Analyse von Netzgeometrien sind für verschiedene Punktkombinationen nahezu identisch, liefern aber unterschiedliche Transformationsparameter. Die Verwendung des falschen Satzes an Transformationsparametern könnte bei der weiteren Fahrzeugvermessung deshalb nicht bemerkt werden.

Da die geforderten Ergebnisse der Fahrzeugvermessung nicht durch Koordinaten sondern durch Abmaße bzgl. des Fahrzeugkoordinatensystems oder als Abstand zwischen Messstellen repräsentiert werden, ist auch in diesem Fall nicht sofort auf falsche Transformationsparameter zu schließen. Im Allgemeinen können zwar mehrere Ausgleichungsvarianten und Analysen der Netzgeometrie

vergleichend gegenübergestellt sowie bewertet werden, aus den folgenden Gründen sollte aber eine sichere automatisierte Zuordnung möglichst am Beginn der Vermessung vorgezogen werden:

- Die statistischen Ergebnisse können für regelmäßig angeordnete Punkte nahezu identische Werte aufweisen.
- Die Qualitätssicherung von Schienenfahrzeugen wird oft durch Facharbeiter verschiedener Berufsgruppen vorgenommen. Die Erfahrung im Umgang mit statistischen Informationen kann in diesem Zusammenhang nicht zwingend vorausgesetzt werden.
- Durch eine korrekte Koordinatentransformation direkt am Beginn der Messung kann das Messpersonal unterstützt werden. Im Rahmen tabellarisch abzuarbeitender Arbeitsschritte kann dadurch die Position einer Messstelle geprüft (Soll-Ist-Vergleich) oder vor der Messung durch den Instrumentenlaser signalisiert werden (Rücktransformation der Solldaten in das Instrumentensystem).
- Die Qualitätssicherung ist in enge Prozessketten eingebettet und die eventuell zeitaufwendige Interpretation von statistischen Ergebnissen ist im Zeitbudget oft nicht vorgesehen.

Die weiteren Kapitel der Arbeit befassen sich aus den genannten Gründen mit der Identifizierung von Punktmessungen. Die Identifizierung soll frühzeitig, möglichst direkt im Anschluss an die jeweilige Bezugspunkt- oder Verknüpfungspunktmessung erfolgen, damit nach der vollständigen Erfassung aller Punkte sicher auf die korrekten Transformationsparameter geschlossen werden kann.

3 Untersuchungen zu Systemeigenschaften

Industrietachymeter oder Lasertracker verfügen im Allgemeinen nicht über die Fähigkeit, signalisierte Zielzeichen zu identifizieren. Für Instrumente mit integrierter Kamertechnik oder aktiven Prismenadaptern wurden Lösungsansätze und die limitierenden Faktoren für das Anwendungsfeld des Maschinen- und Anlagenbaus im Kapitel 1 angeführt. Das folgende Kapitel beschreibt die verwendeten Systeme zur Umsetzung alternativer Identifizierungsmöglichkeiten. Die relevanten Instrumenten- und Messparameter zur Identifizierung werden angegeben und anhand von Versuchsdurchführungen genauer betrachtet. In Abhängigkeit zum eingesetzten System werden die daraus abgeleiteten Strategien zur Punktidentifizierung in direkte und indirekte Verfahren untergliedert (Abb. 3.1).

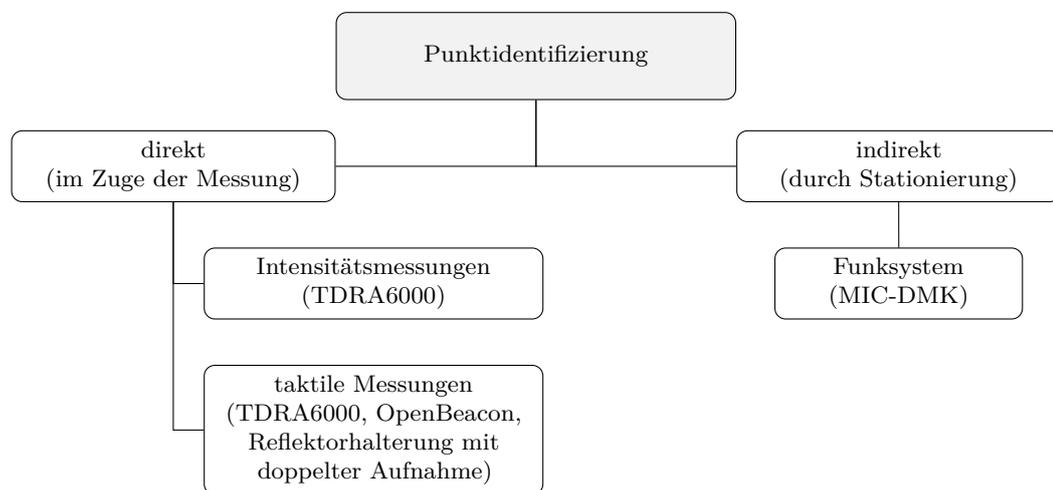


Abb. 3.1: Strategien zur Punktidentifizierung

Bei allen Verfahren besteht grundsätzlich das Ziel, die Kennung (ID) eines Messpunktes direkt an der Messstelle zu erfassen, damit die gemessene Koordinate eindeutig einem Punktcode zugeordnet werden kann. Speziell im Fall regelmäßig angeordneter Verknüpfung- oder Bezugspunkte soll damit eine zusätzliche Kontrollierbarkeit geschaffen und das Risiko von Punktverwechslungen verringert werden. Bei der Automatisierung von Messabläufen stellt diese Kontrollierbarkeit eine wesentliche Voraussetzung zur korrekten Durchführung der weiteren Arbeitsschritte dar.

Für das direkte Identifizierungsverfahren wird die gemessene Signalintensität ausgewertet, welche mithilfe eines Industrietachymeters Leica TDRA6000 aufgezeichnet wird. Aufgrund unterschiedlicher Gerätegenerationen und enthaltener Subsysteme kann jedoch kein allgemeingültiges Gesamtkonzept entworfen werden. Unabhängige Sensoren schließen diese Lücke, indem sie in Kombination mit dem Industrietachymeter eingesetzt werden. Für die direkten Identifizierungsmöglichkeiten wird diese Aufgabe durch das OpenBeacon-System übernommen. Bei indirekten Verfahren wird ein distanzmessendes Funksystem MIC-DMK der Firma Metirionic zur Stationierung des Tachymeters eingesetzt. Mit dieser Vorinformation wird die anschließende Punktidentifizierung vollzogen.

3.1 Industrietachymeter Leica TDRA6000

Das Leica TDRA6000 ist ein Industrietachymeter, welches vom Hersteller auch als Laserstation oder „Low Cost Lasertracker“ bezeichnet wird. Die verschiedenen Subsysteme und Baugruppen des Instruments (Hennes und Krickel 2000, Stempfhuber 2004) vereinen die elektrooptische Distanz- und elektronische Winkelmessung zu einer Polarkoordinate, die in industriellen Softwareanwendungen sofort in eine kartesische Koordinate überführt wird. Die Grundlage bildet im Maschinen- und Anlagenbau dabei meist ein rechtshändiges Koordinatensystem, welches auch in den weiteren Ausführungen zur Anwendung kommen soll. Teilkreisablesungen werden beim TDRA6000 an codierten Glaskreisen mittels eines Vierfachabgriffs vorgenommen. Durch die resultierende Genauigkeit in Kombination mit einer Motorisierung auf Basis von Piezo-Technologie können sehr kleine Schrittgrößen ermöglicht werden. Das Instrument und die technischen Gerätespezifikationen werden in Abbildung 3.2 bzw. Tabelle 3.1 dargestellt.



Spezifikation	Herstellerangabe
Maximale Messdistanz	600 m
Minimale Messdistanz	2 m (Prismen) 5 m (Reflexfolie) 2 m (reflektorlos)
Genauigkeit Distanzmessung	0,50 mm (Prismen) 1,00 mm (Reflexfolie) 2,00 mm (reflektorlos)
Genauigkeit Winkelmessung	0,15 mgon
Digitale Winkelauflösung	0,01 mgon
Fernrohrvergrößerung	30-fach
Schnittstelle	RS232, Bluetooth
Gewicht	7,8 kg

Abb. 3.2 und Tab. 3.1: Industrietachymeter Leica TDRA6000 (Leica 2013b)

Die Distanzmess- und Auswertetechnologie beruht auf dem sogenannten System Analyser. Neben den getrennt voneinander angewendeten Verfahren der Impuls- und Phasenmessung werden die Vorteile beider Verfahren zusammengeführt. Der TDRA6000 nutzt die höhere Genauigkeit des Phasenvergleichsverfahrens und die Geschwindigkeit des Impulsverfahrens in Kombination. Dabei wird eine große Anzahl kontinuierlich ausgesendeter elektrooptischer Wellen (100 MHz) sowie ultrakurze Laserpulse im Nanosekundenbereich zur Erlangung einer hohen Distanzgenauigkeit und eines sehr guten Auflösungsvermögens genutzt. Die Anzahl der Frequenzmodulationen ist dabei Abhängig vom reflektierten Signal und liegt in der Regel zwischen Vier und Zehn. Die Informationen aller Signale werden zusammen mit einer internen Distanzkalibrierung, welche den Einfluss atmosphärischer Einflüsse verringert, durch eine Merit-Funktion analysiert. Die Ergebnisse der Auswertung stellen die gesuchte Distanz zwischen dem Instrument und Reflektor dar (Bayoud 2006).

Mit der GeoCOM-Schnittstelle können alle Messdaten effektiv erfasst und in frei gestaltbaren Softwareanwendungen verarbeitet werden. Dazu zählt auch die gemessene Signalintensität, welche hinsichtlich des TDRA6000 Werte von 0 % bis 100 % annehmen kann und den Grundbaustein für die intensitätsbasierende Punktidentifizierung bildet.

3.1.1 Vorbetrachtung zur intensitätsbasierenden Punktidentifizierung

Zum besseren Verständnis des Umfangs und Vorgehens bei der Geräteuntersuchung des Leica TDRA6000 soll im Vorhinein kurz auf das Prinzip der tachymetrischen Punktidentifizierung eingegangen werden. Die detaillierten Ausführungen werden in Kapitel 4 im Rahmen der Darstellung direkter Identifizierungsverfahren vorgenommen. Hinsichtlich der Zielzeichengestaltung können Konzepte photogrammetrischer Codierungsprinzipien aufgegriffen werden, wobei besonders sektor- und ringförmige Codierungen einen guten Ausgangspunkt darstellen (Abb. 3.3). In diesem Zusammenhang sind Anforderungen wie die genaue Bestimmung des Messpunktes, eine minimale Zielmarkenfläche und die Robustheit der Decodierung zu berücksichtigen.

Die Identifizierung der Zielmarken beruht im Wesentlichen auf der Auswertung von Signalintensitäten. Ist die messbare Signalintensität für verschieden stark reflektierende Flächen bekannt, kann eine Codebasis zur Generierung einer ID geschaffen werden. In Anlehnung an photogrammetrische Zielmarken, bei welchen eine möglichst gute Segmentierung der Codebereiche durch schwarze und weiße Codeflächen erreicht wird, müssen die Codebereiche auch bei Intensitätsmessungen deutlich abgrenzbar sein; dies ist sowohl von Instrumentenparametern als auch vom Material des Zielzeichens abhängig. Die maximalen Intensitätswerte I werden bei Messungen auf retroreflektierende Folien erreicht. Schwarz beschichtete Flächen liefern hingegen Werte nahe $I = 0\%$. Aufgrund dieser Reflexionseigenschaften wird ein Codebereich entweder schwarz beschichtet oder mit Retroelementen versehen. In Korrespondenz zum Intensitätswert bzw. der vorliegenden Reflexionsfläche kann zusätzlich eine Bitwertigkeit a zugeordnet werden, welche zur Generierung der ID dient. In diesem Zusammenhang wird auch der Begriff des Codebits verwendet. Die Aneinanderreihung von n Codebits stellt den resultierenden Punktcode in Form einer Dualzahl $[a_n \dots a_1]_2$ dar. Dabei entspricht $a = 0$ einer schwarzen Fläche sowie $a = 1$ retroreflektierenden Bereichen.

Für ringförmig codierte Zielmarken sind die Codebits als konzentrische Ringe um den zentralen Messbereich angeordnet, für die sektorförmige Variante hingegen als Kreissektoren. Bei der letzteren Gestaltungsform ist zusätzlich ein Startbit vorzusehen, das den Ausgangspunkt der Codeauswertung vorgibt. Generell bestehen damit zwei Möglichkeiten zur Erfassung der Codebereiche. Das Instrument kann entweder in eine gleichförmige Bewegung versetzt werden, wobei kontinuierlich Intensitätswerte aufgezeichnet werden, oder die Intensitätsmessung erfolgt auf Basis eines Zielmarkenmusters (Template), dessen genau definierte Punkte angesteuert werden. Die Si-

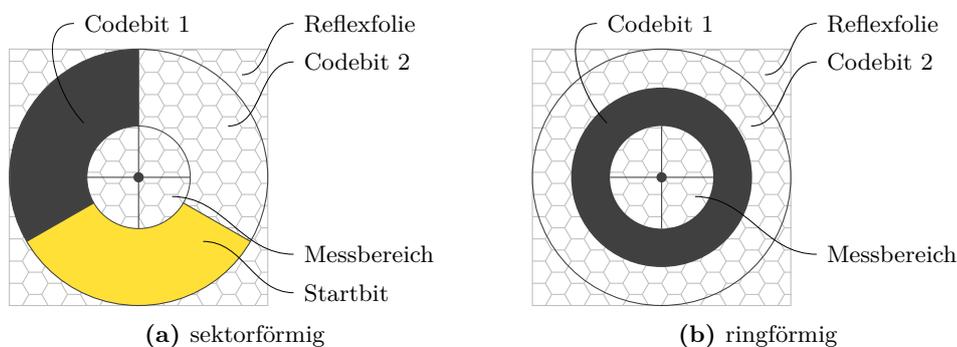


Abb. 3.3: Zielmarken zur intensitätsbasierenden Punktidentifizierung

gnalintensität wird im letzten Fall punktuell gemessen. Anhand der gemessenen Signalintensitäten werden die Codebits segmentiert, eine Bitwertigkeit zugeordnet und ID bestimmt.

Damit die Codeerfassung und -auswertung korrekte Ergebnisse liefert, muss die Dimensionierung der Zielmarkenbereiche auf verschiedene Parameter des Messinstruments abgestimmt werden. Das sich daraus ergebende Ziel der Geräteuntersuchung ist die Evaluierung einer anzuwendenden Codebitfläche, damit schwarze und retroreflektierende Bereiche anhand der Intensitätsmessungen voneinander trennbar sind. Da der gemessene Intensitätswert keine punktuelle Angabe darstellt, sondern aus der Analyse der gesamten Laserspotfläche herrührt, ist besonders die distanzabhängige Spotgröße zu bestimmen. Für die kontinuierliche Abtastung des Zielmarkenbereichs bei ringförmigen Zielmarken ist neben der Spotgröße zusätzlich die ausgeführte Winkelgeschwindigkeit zu berücksichtigen. Durch kleine Geschwindigkeiten in Kombination mit einer hohen Intensitätsmessrate sind geringe Codeflächen zu erzielen.

3.1.2 Fernrohrdesign

Das grundlegende Design des Leica TDRA6000 Fernrohrs basiert auf Leica TPS Systemen. Laut Auskunft von Leica Geosystems ist die Hardware nahezu identisch zur Leica TS30 Serie. Lediglich die Auswertung der Messinformationen wurde firmwareseitig modifiziert und die Interaktion mit industriellen Messapplikationen erweitert. Zur Durchführung einer Distanzmessung wird das Messsignal von einer Laserdiode erzeugt. Der Laserstrahl wird kollimiert und über ein Spiegelsystem auf das Revolverrad gelenkt (Abb. 3.4a). In Abhängigkeit zum ausgewählten Messmodus kann das Revolverrad, welches separat in Abbildung 3.4b dargestellt wird, drei Positionen einnehmen. Diese Positionen werden als Kalibrier-, Reflektor- und Mittelposition bezeichnet. In der Kalibrierposition wird der Laserstrahl am Revolverrad reflektiert und in den internen Strahlengang umgelenkt. Der zurückgelegte interne Strahlenweg ist herstellenseitig bekannt und dient zur Kalibrierung der Distanzmessung. Infolge einer Drehung ist das Revolverrad in der Reflektorposition derart

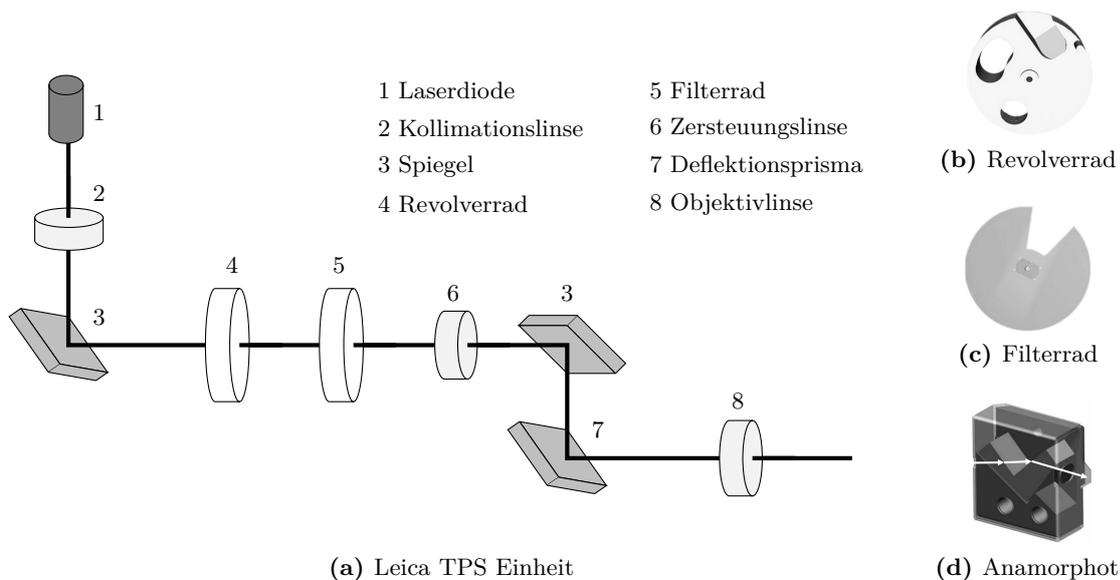


Abb. 3.4: Optische Komponenten eines Leica Fernrohrs: (a) Strahlengang innerhalb der Leica TPS Einheit (Bayoud 2006), (b–d) Detaildarstellung von Baugruppen

ausgerichtet, dass nach dem ungehinderten Strahlendurchgang eine Zerstreungslinse passiert werden muss. Der Laserstrahl wird in der Folge für Reflektormessungen aufgeweitet. Befindet sich das Revolverrad in der Mittelposition, wird der Laserstrahl für reflektorlose Messungen durch die im Revolverrad befindliche Öffnung und über weitere optische Bauelemente aus dem Fernrohr geleitet. Das reflektierte Signal wird am Filterrad (Abb. 3.4c) hinsichtlich der ermittelten Signalintensität sowie aufgrund der Stellung des Revolverrades bewertet und gegebenenfalls modifiziert. In Analogie zum Revolverrad können dabei unterschiedliche Filterradpositionen zugrunde liegen (Richter und Juretzko 2007). Die Signalanalyse wird abschließend durch den System Analyser vorgenommen.

Neben den genannten optischen Baugruppen werden beim Leica TDRA6000 weitere Optimierungen hinsichtlich der Laserstrahlcharakteristik vorgenommen. Eine zusätzliche Blende entfernt die inhomogenen und peripheren Anteile des Laserlichtes. Durch den Einbau eines Anamorphoten (Abb. 3.4d) wird die Asymmetrie des Laserspots korrigiert, wodurch der Querschnitt des Laserspots zunehmend kreisförmiger ausgebildet wird und kleinere Spotgrößen erreicht werden können (Leica 2009b, Lienhart u. a. 2009). Für die unterschiedlichen Revolverradpositionen (Messmodi) sind bei gleicher Distanz jedoch differierende Spotgrößen zu erwarten. Es kann im Allgemeinen zwischen dem reflektorlosen Modus (RL-Modus) und der Voreinstellung zur Reflektornutzung (IR-Modus) unterschieden werden. Da der Laser im RL-Modus kollimiert ist, kann die Signalintensität des reflektierten Laserstrahls für kleinere Reflexionsflächen ermittelt werden. Zudem wird aus Tabelle 3.2 ersichtlich, dass die Sendeleistung für reflektorlose Messungen im Vergleich zum IR-Modus wesentlich größer ist. Insbesondere für stark geneigte Oberflächen sind dadurch höhere Empfangsleistungen und Signalintensitäten zu erwarten. Aus den genannten Gründen ist für die intensitätsbasierende Punktidentifizierung der RL-Modus zu bevorzugen.

Tab. 3.2: Leica TDRA6000 Laserparameter (Leica 2009a)

Laser	Leistung	Impulsdauer	Frequenz	Wellenlänge
IR-Modus	0,33 mW	800 ps	100 MHz bis 150 MHz	650 nm bis 690 nm
RL-Modus	5 mW	800 ps	100 MHz bis 150 MHz	650 nm bis 690 nm
Automatic Target Recognition (ATR)	10 mW	11 ms	37 Hz	785 nm
Power Search (PS)	11 mW	20 ns, 40 ns	24,4 kHz	850 nm

3.1.3 Spotgrößen

Um die bestmögliche Kollimation des Laserspots zu erreichen, muss das Distanzmodul vor jeder Intensitätsmessung kalibriert werden. Dazu wird der Intensitätsmessmodus (IMM) gestartet, damit fortlaufend Intensitätswerte am Instrument abgreifbar sind. Der resultierende Signalintensitätswert ist jedoch vom Reflexionsgrad der Oberfläche abhängig. Für weniger gut reflektierende Oberflächen wird der Laserstrahl leicht aufgeweitet, sodass dennoch Intensitätswerte nahe dem Maximum ausgegeben werden. Der Kalibrierstatus des Distanzmoduls ist in diesem Zusammenhang auf die reflektierende Oberfläche abgestimmt und bleibt solange erhalten, wie der IMM aktiv ist und keine Änderungen des Reflexionsgrades auftreten. Im Umkehrschluss wird der Kalibrierstatus nur dann angepasst, wenn eine stärker reflektierende Oberfläche in das Messsignal tritt, welcher dann der maximale Intensitätswert von 100 % zugeordnet wird. Dies hat zur Folge, dass sich alle Intensitätswerte auf einen definierten Kalibrierstatus bzw. auf das Material

der Reflexionsfläche beziehen. Der maximale Reflexionsgrad kann im Allgemeinen durch die Verwendung von retroreflektierenden Folien erreicht werden. Um eine konstante Ausgangsbasis zur Bewertung der Intensitätswerte herzustellen, sollte das Distanzmodul folglich immer anhand retroreflektierender Flächen kalibriert werden. In den weiteren Ausführungen wird dieser Vorgang als Intensitätskalibrierung bezeichnet.

Aufgrund des Einflusses der optischen Bauelemente ist die Spotbreite und -höhe nach der Intensitätskalibrierung nicht identisch und der Intensitätsverlauf im Spot inhomogen. Da diese Parameter entscheidend für die Gestaltung intensitätsbasierender Codierungen sind, wurden die Spotdimensionen hinsichtlich verschiedener Distanzbereiche untersucht. Für Messdistanzen D zwischen 5 m und 90 m wurde der sichtbare Laserspot auf eine halbtransparente Messtafel abgebildet und die Spotdimensionen erfasst (Abb. 3.5 und 3.6).

Im Gegensatz zum Anwendungsbereich der Punktidentifizierung wurde der Untersuchungsraum erweitert, um Hebelpunkte bei der Regression zur Distanz-Spot-Funktion zu vermeiden. Das Gerät befand sich während den Messungen im RL-Modus und wurde so ausgerichtet, dass der Normalenvektor der Projektionsfläche mit der Zielachse des Instruments übereinstimmt. Vor der Bestimmung der Spotgrößen wurde die Intensitätskalibrierung durchgeführt. Dazu diente eine retroreflektierende Folie, welche kurzzeitig vor die Messtafel geschoben wurde. Nach dem Entfernen der Reflexfolie wird die minimal mögliche Spotgröße für den jeweiligen Distanzbereich auf der Leinwand abgebildet. Die Aufnahme des Laserspots erfolgte mit einer digitalen

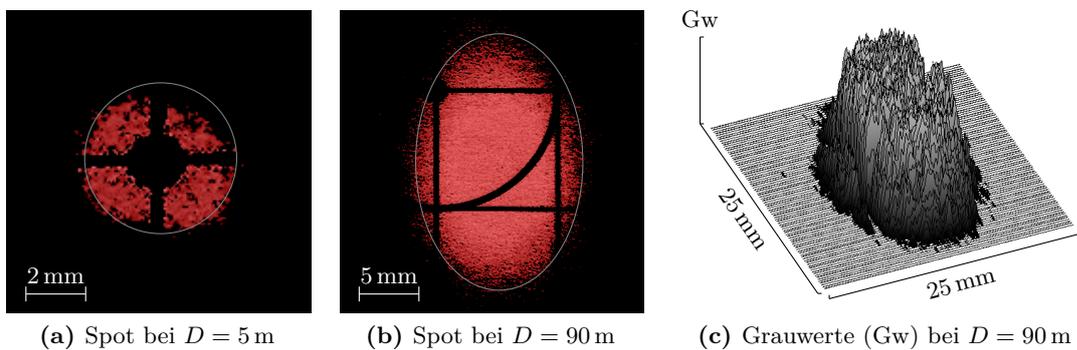


Abb. 3.5: Spotgrößen und Grauwertverteilung im RL-Modus

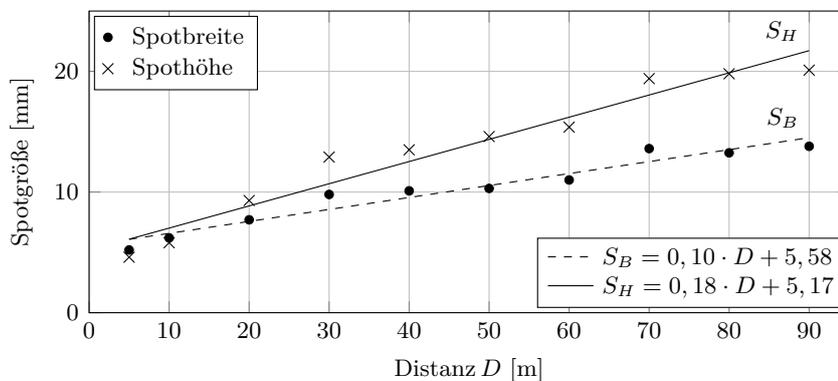


Abb. 3.6: Spotdimensionen in Abhängigkeit zur Distanz (RL-Modus)

Spiegelreflexkamera im unbeleuchteten Messfeld von der rückwärtigen Messtafelseite aus. Eine zusätzlich aufgebrachte Transparentfolie mit Millimeterskala ermöglicht die Bestimmung der Spotgröße aus den Bildkoordinaten. In Abbildung 3.5 werden die Kamerabilder exemplarisch für Distanzen von 5 m und 90 m dargestellt. Zudem wird der Lichtfleck im Kamerabild durch eine Ellipse hervorgehoben, welche rechentechnisch anhand der Grauwertgradienten ermittelt wurde. Die Ellipsenachsen können dadurch als Spotdimensionen der Höhe S_H und Breite S_B interpretiert werden. Als zusätzliche Information ist die Grauwertverteilung des Spots bei $D = 90$ m aufgezeigt.

Neben einem deutlich ausgeprägtem Hauptspot sind vor allem periphere Lichterscheinungen zu erkennen, welche auch in der Grauwertverteilung festzustellen sind. Auf die Intensitätsmessungen hat das Streulicht jedoch keinen ausgeprägten Einfluss, da es vom System Analyser bei der Signalauswertung nur zum Teil berücksichtigt wird. Ein Einfluss der Intensitätsverteilung im Laserspot ist hingegen vorhanden. Die Intensitätswerte sind nicht normalverteilt, wodurch maximale Intensitäten tendenziell nicht im Spotzentrum zu erwarten sind. Des Weiteren ist für größer werdende Distanzen außer der steigenden Spotgröße auch eine Zunahme der elliptischen Form festzustellen. Dies spiegelt sich vor allem in den getrennt von einander aufgetragenen Spothöhen und -breiten aus Abbildung 3.6 wider. Zwischen der Distanz und beiden Spotdimensionen sind nahezu lineare Zusammenhänge gegeben. Aus diesem Grund wurde jeweils für S_B und S_H eine Regressionsgerade in der Darstellung ergänzt. Die interpolierten Spotdimensionen können dadurch für jede Distanz D innerhalb des Regressionsbereichs mit den Gleichungen

$$\begin{aligned} S_B [\text{mm}] &= 0,10 \cdot D [\text{m}] + 5,58 , \\ S_H [\text{mm}] &= 0,18 \cdot D [\text{m}] + 5,17 \end{aligned} \quad (3.1)$$

bestimmt werden. Die enthaltenen Konstanten wurden empirisch bestimmt. Im Vergleich zu den Größenangaben anderer Hersteller nach Tabelle 3.3 stellt sich die distanzabhängige Zunahme der Spotgröße äußerst gering dar. Zugleich ist die elliptische Spotform weniger stark ausgeprägt. Beides ist auf die hohe Qualität der optischen Bauelemente zurückzuführen.

Tab. 3.3: Spotgrößen unterschiedlicher Messsysteme

Messsystem	Spotgrößen (Breite×Höhe) [mm ²]					
	5 m	10 m	35 m	40 m	50 m	55 m
Leica TPS1200 Serie(Bayoud 2006)	7×4	–	16×13	–	–	12×15
Leica Nova Serie(Leica 2013a)	–	–	–	–	8×20	–
Sokkia SX Serie (Topcon 2012)	–	9×7	–	14×14	–	–
Trimble S8 (Trimble 2013b)	2×4	4×8	14×28	16×32	–	22×44
Trimble S3 (Trimble 2013a)	2×2	4×4	14×14	16×16	–	22×22

3.1.4 Signalintensitätsmessungen

Wie im vorhergehenden Kapitel bereits erwähnt wurde, stellt die Intensitätskalibrierung den Ausgangspunkt sämtlicher Intensitätsmessungen dar. Bei den bisherigen Erläuterungen wurde die Zielzeichenneigung noch nicht genauer in Betracht gezogen. Generell können beliebige Ausrichtungen bzgl. des Instruments auftreten, welche in Abbildung 3.7a durch die Neigungswinkel

θ und ψ ausgedrückt werden. Für $\theta = \psi = 0^\circ$ fällt die Flächennormale mit der Zielachsrichtung des Instruments zusammen. Diese Konstellation wird im Folgenden als Nulllage der Zielmarke bezeichnet. Positive Winkelwerte θ werden für Verkippungen erreicht, bei welchen die Distanz vom Instrument zur Zielmarkenoberkante größer als die Distanz zu M ist. Eine Verschwenkung aus der Nulllage im Uhrzeigersinn führt für ψ zu positiven Winkelwerten.

Zum Nachweis der zwingend nötigen Intensitätskalibrierung wurde das Distanzmodul in Nulllage auf eine Reflexfolie (Avery T-6500) kalibriert und die Neigungen unter Beibehaltung des Kalibrierstatus schrittweise verändert. Damit der Laserspot für den gesamten Untersuchungsbereich (5 m bis 50 m) vollständig auf der Reflexfolie abgebildet wird, wurde eine quadratische Grundfläche von 10 cm \times 10 cm gewählt. Die Ergebnisse der Untersuchung werden in Abbildung 3.7b exemplarisch für eine Distanz von 15 m und der Modifikation des Neigungswinkels ψ dargestellt.

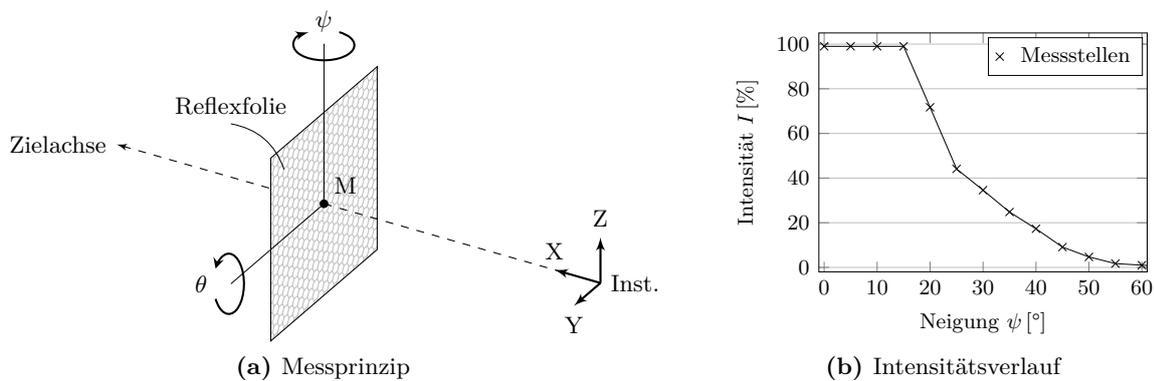
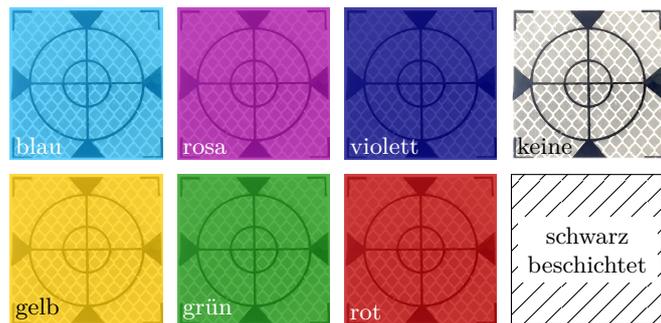


Abb. 3.7: Signalintensität in Abhängigkeit zur Zielzeichenneigung

Es wird deutlich ersichtlich, dass die gemessene Intensität ab einer Neigung von 15° abnimmt. Die Intensitätskalibrierung ist folglich nicht nur aufgrund des reflektierenden Materials, sondern auch bedingt durch die Zielzeichenneigung erforderlich.

Zur Anwendung intensitätsbasierender Codierungen muss die sichere Trennbarkeit von schwarzen und retroreflektierenden Bereichen gewährleistet sein. Die zu messenden Intensitätswerte sollten unabhängig von der Zielzeichenneigung möglichst weit auseinander liegen. Die genaue Spezifizierung der Intensitätsdifferenz wurde hinsichtlich des bereits genannten Untersuchungsbereichs durch weitere Untersuchungen vorgenommen. Jeweils für Distanzen von rund 5 m, 15 m und 50 m wurde die Zielzeichenneigung zwischen $\theta = \psi \pm 60^\circ$ in Schritten zu 5° variiert. Der Neigungsbereich wurde in Anlehnung an den maximalen Akzeptanzwinkel kugelförmiger Reflektoren nach Tabelle 2.1 gewählt. Bei jedem Distanz- und Neigungswert erfolgte eine Intensitätskalibrierung und Signalintensitätsmessung. Unter Beibehaltung des Kalibrierstatus wurde in der weiteren Ausführung eine schwarz beschichtete Fläche vor die Reflexfolie geschoben und die resultierende Intensität dokumentiert. Sowohl für schwarze als auch für retroreflektierende Flächen wurde der Intensitätsmittelwert \bar{I} und die Standardabweichungen der Messreihen s_I gebildet (Abb. 3.8 und Tab. 3.4).

Unter der Voraussetzung, dass der gesamte Laserspot auf der Reflexionsfläche abgebildet wird, sind beide Bereiche deutlich anhand der Intensitätswerte voneinander abgrenzbar. Insbesondere die geringen Standardabweichungen von weniger als 0,4% verdeutlichen die Reproduzierbarkeit der Intensitätsmessungen für verschiedene Neigungs- und Distanzbereiche. Der Ansatz einer binären Codierung von Zielzeichen kann folglich weiter verfolgt werden.



Folienfarbe	\bar{I} [%]	s_I [%]
Retro (keine)	99,00	0,21
Retro (schwarz)	0,40	0,36
Retro (gelb)	42,83	5,09
Retro (grün)	0,30	0,23
Retro (rot)	54,33	8,54
Retro (blau)	0,05	0,05
Retro (rosa)	92,47	6,37
Retro (violett)	24,37	3,39

Abb. 3.8 und Tab. 3.4: Retrozielmarken mit Filterfolien

Die Binärcodierung findet einerseits bei ringförmig und andererseits bei sektorförmig codierten Zielzeichen eine Anwendung. Für die Sektorcodierung muss zusätzlich ein Startbit vorgesehen werden, welches den Startpunkt der Codeauswertung aufzeigt. Bezüglich einer Intensitätsmessung sollte sich das Startbit zwischen den Werten schwarzer und retroreflektierender Bereiche einordnen. Eine Signalintensität von 50 % ist anzustreben. Generell ließe sich die Minderung der messbaren Intensität durch eine Aufrasterung oder Überdeckung der Reflexfolie erreichen. Da die Rasterweite im engen Zusammenhang mit der Spotgröße ermittelt werden müsste, wird im Folgenden der Ansatz einer Überdeckung mit Farbfolien verfolgt.

Als Ausgangsmaterial dienen die in Abbildung 3.8 dargestellten Folien, welche als Filter für Blitzgeräte verfügbar sind. Diese ermöglichen die Anpassung der Farbtemperatur des Blitzlichtes auf verschiedene Umgebungsbedingungen. Im Allgemeinen wird dadurch die Helligkeit des Blitzes abgeschwächt und es ist davon auszugehen, dass auch die Intensität eines reflektierten Signals gemindert wird.

Die messtechnische Validierung der These wurde in die bereits beschriebenen Versuchsdurchführungen eingebunden. Im Anschluss an die Intensitätskalibrierung wurden die Filterfolien einzeln vor die Reflexfolie geschoben und die Intensitäten bestimmt. Der Intensitätsmittelwert der jeweiligen Farbfolie und die zugehörige Standardabweichung werden in Tabelle 3.4 aufgeführt. Hinsichtlich der Verwendung als Startbit liegen die Intensitätsmittelwert bei roten und gelben Filterfolien im Zielbereich von 50 %. Obwohl die Standardabweichungen im Vergleich zu schwarzen und retroreflektierenden Flächen deutlich größer ausfallen, sind die Intensitäten signifikant abgrenzbar. Eine weitere Steigerung der Auflösung ist in Anbetracht der eingesetzten Folien und resultierenden Standardabweichungen jedoch nicht möglich. Der Einsatz als identifizierbares Startbit konnte im Rahmen der Untersuchungsbedingungen nachgewiesen werden. Aufgrund der geringeren Standardabweichung wird für die weiteren Betrachtungen der Fokus auf gelbe Filterfolien gelegt.

Während bei der Sektorcodierung Intensitätswerte punktuell auf dem Code- oder Startbit gemessen werden, nutzen ringförmige Codierungsverfahren gleichförmige Instrumentenbewegungen zur kontinuierlichen Intensitätsaufzeichnung. Dabei erfolgt die Intensitätskalibrierung im inneren Messbereich und das Zielkreuz des Instruments bewegt sich bei einer bildlichen Betrachtung über die Codebereiche nach außen. Der Kalibrierstatus bleibt bei der Bewegung erhalten. Dementsprechend kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Laserspot zu jeder Zeit vollständig auf einem Codebit abgebildet wird. Zur Segmentierung der Bereiche muss der Intensitätsverlauf

in erster Linie beim Übergang zwischen verschiedenen codierten Bits bekannt sein. Der genaue Intensitätsverlauf soll deshalb experimentell bestimmt werden.

Als Messaufbau wurde eine retroreflektierende Folie auf einem schwarz beschichteten Untergrund aufgebracht. Die Folie ist derart dimensioniert, dass der Laserspot vollständig für Distanzen bis 50 m auf die Reflexfolie projiziert werden kann (Abb. 3.9). Zusätzlich wurden Millimeterskalen vorgesehen, welche ausgehend von der horizontalen ($\Delta h = 0$ mm) und vertikalen Reflexfolienkante ($\Delta v = 0$ mm) über beide Oberflächen verlaufen. Der gesamte Skalenbereich erstreckte sich von -25 mm bis 5 mm, wobei negative Werte per Definition außerhalb der Reflexfolie liegen.

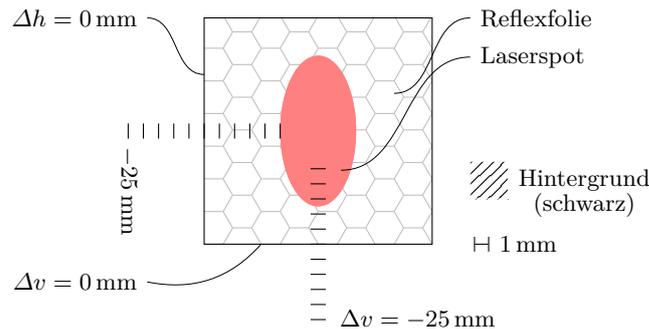


Abb. 3.9: Intensitätsmessungen beim Übergang zwischen verschiedenwertigen Codebits

Für insgesamt sechs Distanzen wurde die Intensitätskalibrierung in der Zielmarkenmitte und unter Beachtung der Nulllage vorgenommen. An jeder Skalenteilung Δh und Δv wurden die Intensitätswerte messtechnisch bestimmt. Die Ergebnisse der Messungen werden in Abbildung 3.10 dargestellt, wobei die angegebenen Distanzen zur Erlangung einer höheren Genauigkeit im IR-Modus erfasst wurden.

Sowohl für den horizontalen als auch für den vertikalen Verlauf ist zu erkennen, dass die Signalintensitäten bereits maximale Werte annehmen, bevor der Laserspot vollständig auf der Reflexfolienfläche abgebildet wird. Um diesen Zusammenhang deutlicher herauszustellen wird die gemessene Intensität in Abbildung 3.10 zusätzlich über die auf der Reflexfolie wirkende Spotfläche aufgetragen. Die Flächen der Laserspots, abgeleitet aus den großen und kleinen Ellipsendurchmessern, wurden für die jeweilige Messdistanz anhand der Gleichungen 3.1 ermittelt. Im Idealfall einer Gauß-Verteilung sollte die Signalintensität für Spotüberdeckungen von 50 % in einem Wert von $I = 50\%$ münden. Das Intensitätsmaximum ($I = 100\%$) sollte zugleich erst bei vollständiger Spotüberdeckung zu erreichen sein. Im Kontrast zur Idealvorstellung wird das Intensitätsmaximum bereits bei Spotüberdeckungen zwischen 60 % und 80 % erreicht. Vergleichbare Untersuchungsergebnisse wurden bei Richter und Juretzko (2007) vorgestellt. Auch die Erkenntnis, dass der Intensitätswert $I = 50\%$ nicht gleichbedeutend mit einer Überdeckung von 50 % aufzufassen ist, stellt für die Auswertung von ringförmig codierten Zielmarken eine zentrale Rolle dar. Sinnbildlich befindet sich das Instrumentenzielkreuz bei $I = 50\%$ nicht genau auf der Grenze zwischen beiden Codebits, sondern zum größeren Teil auf der schwarz beschichteten Fläche. Des Weiteren ist für Spotüberdeckungen von rund 20 % bis 60 % ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Intensität und Spotflächenüberdeckung ersichtlich.

Die minimale Codebitfläche muss im Allgemeinen groß genug dimensioniert werden, damit hinsichtlich einer definierten Spotüberdeckung das Intensitätsmaximum erreicht werden kann. Wie beschrieben wurde, wird das Intensitätsmaximum spätestens im Falle einer wirkenden Spotfläche

von 80 % erreicht. Zur Beurteilung des Materialaufwands wird in diesem Zusammenhang die korrespondierende Skalierungskonstante

$$c_w = 0,8 \quad (3.2)$$

eingeführt, welche die Relation der benötigten retroreflektierenden Codebitfläche bzgl. der gesamten Spotfläche ausdrückt. Durch die elliptische Form des Laserspots könnte die benötigte Codebitfläche anhand eines Rechtecks beschrieben werden. Zur vereinfachten Darstellung wird für die weiteren Ausführungen lediglich die maximale Spotausdehnung S_H in Betracht gezogen. Damit kann die benötigte Codebitfläche anhand eines Quadrats beschrieben werden. Die Feldgröße l bezeichnet in diesem Zusammenhang die Kantenlänge eines quadratischen Bereichs, welcher vollkommen aus retroreflektierender Folie besteht und bei Signalintensitätsmessungen Werte nahe des Intensitätsmaximums liefert. Mit den Gleichungen 3.1 und 3.2 ergibt sich die distanzabhängige Feldgröße demnach zu:

$$l [\text{mm}] = c_w \cdot (0,18 \cdot D [\text{m}] + 5,17) \quad (3.3)$$

Für maximale Distanzen von 50 m sollte die Feldgröße somit mindestens 11,3 mm betragen. Streng genommen sind die Untersuchungsergebnisse und abgeleitete Größen vorerst nur für

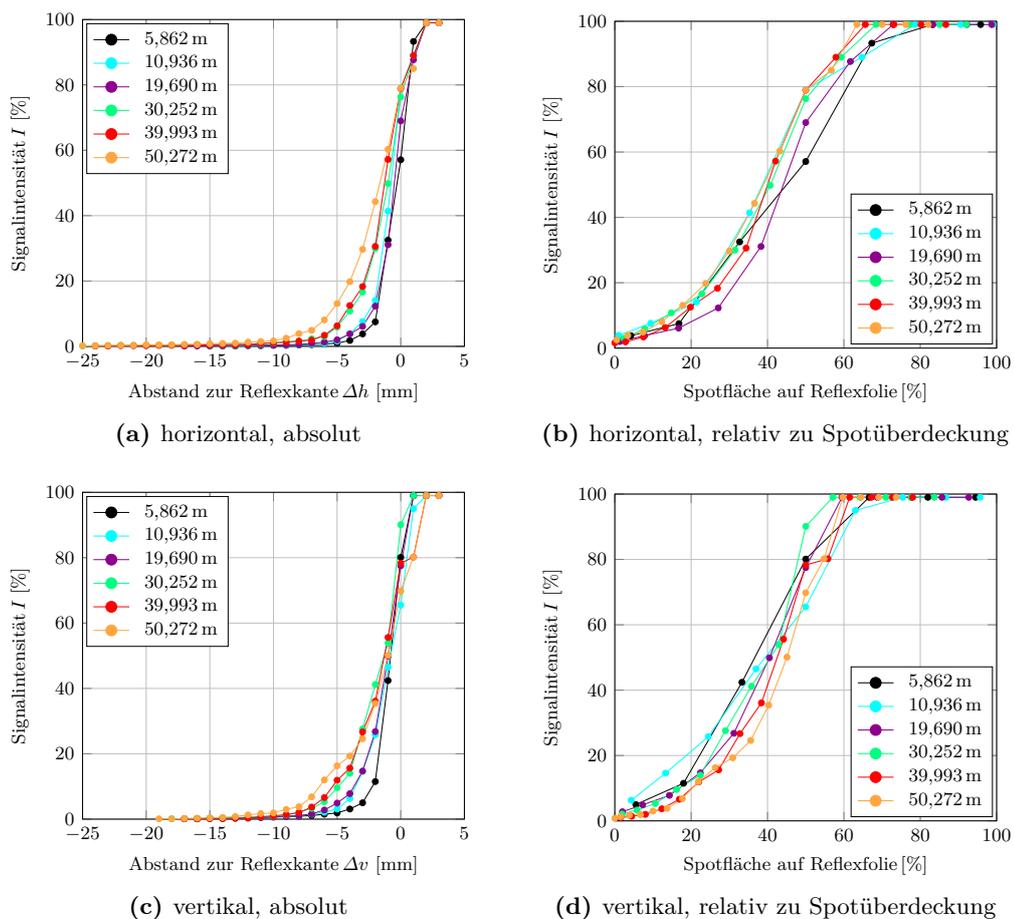


Abb. 3.10: Intensitäten beim Übergang zwischen schwarzen und retroreflektierenden Flächen

Zielmarken in Nulllage gültig. Schräganzielungen führen im Allgemeinen zu Deformationen des Laserspots hinsichtlich der Spotbreite und -höhe. Besonders zur Angabe einer allgemeingültigen Feldgröße müssen diese Messkonstellationen berücksichtigt werden.

3.1.5 Messungen zu geneigten Zieltafeln

Die Genauigkeit elektrooptischer Distanzmessungen ist für Messungen auf retroreflektierende Folien oder natürliche Oberflächen neben den Materialeigenschaften von der Oberflächenneigung abhängig. In der Literatur finden sich dazu zahlreiche Ausarbeitungen, welche zusätzlich die distanzabhängigen Laserspotgrößen betrachten (Runne 1993, Kern 2001, Kuhlmann 2002, Lang 2012).

Für codierte Zielmarken zur tachymetrischen Punktidentifizierung ist sowohl die Distanzgenauigkeit als auch die Laserspotgröße für differierende Neigungen von Bedeutung. Der innen liegende Messbereich wird zur Koordinatenbestimmung verwendet und sollte möglichst genau gemessen werden. Als Messmodus kommt aus diesem Grund der IR-Modus mit der Einstellung Reflexfolie zum Einsatz. Des Weiteren müssen die Laserspotgrößen des RL-Modus auch für den geneigten Anwendungsfall bekannt sein. In Analogie zum Kapitel 3.1.4 ist die benötigte Feldgröße daraus ableitbar. Beide Geräteparameter sollen im Folgenden genauer für Distanzen bis 50 m und dem Neigungsbereich $\theta = \pm 60^\circ$ betrachtet werden. Der Neigungswinkel θ wurde aufgrund des ellipsenförmigen Laserspots mit einer größeren Spothöhe für die Untersuchungen gewählt. Verschmutzungen, Unebenheiten sowie Unstetigkeiten des Reflexmaterials werden bei den Untersuchungen nicht berücksichtigt.

Als Ausgangssituation für die Betrachtung der Distanzgenauigkeit befindet sich eine mit retroreflektierender Folie bestückte Zieltafel in Nulllage. Ein Zielkreuz auf der Folie kennzeichnet die Kippachse der Tafel, wobei die mechanische Konstruktion derart konzipiert ist, dass für verschiedene Zielzeichenneigungen und unendlich kleine Laserspots theoretisch stets gleiche Distanzen beim Anzielen der Zielkreuzmitte erzielt werden. Zusätzlich wurde der Messaufbau so gewählt, dass der vom Instrument gemessene Zenitwinkel 100 gon beträgt und die Zielachse durch den Zielkreuzmittelpunkt der Zieltafel verläuft. Ausgehend von $\theta = 0^\circ$ wurde die Zielzeichenneigung in Schritten zu 5° erhöht bzw. gemindert bis der angegebene Neigungsbereich vollständig erfasst

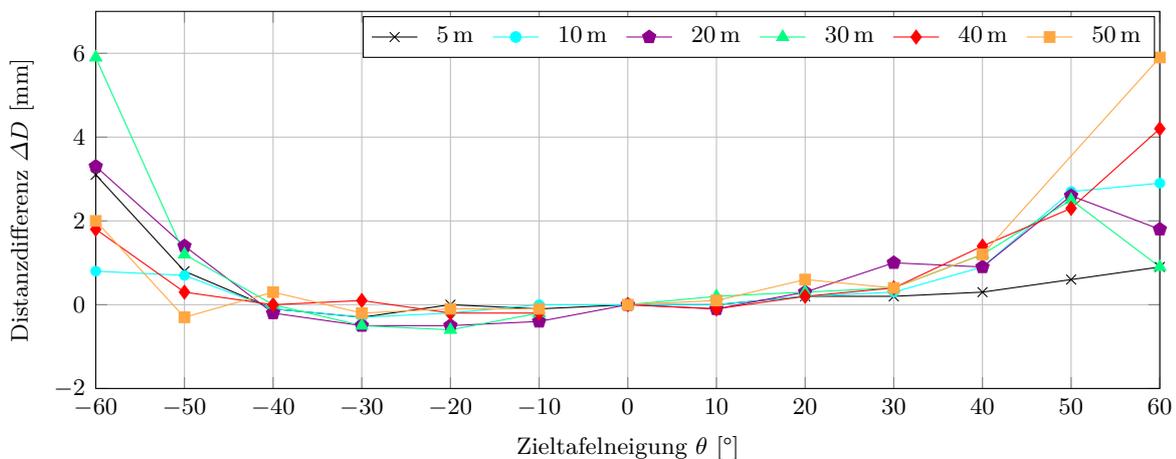


Abb. 3.11: Distanzergebnisse verschiedener Zieltafelneigungen (IR-Modus)

wurde. Bei jedem Neigungswert wurde zudem eine Distanz D_i erfasst. Um die Abhängigkeit der Distanzmessung zur Zieltafelneigung deutlicher hervorzuheben wurden die Distanzen um D_0 , der Distanz bei $\theta = 0^\circ$, reduziert. In Abbildung 3.11 auf der vorherigen Seite werden aus diesem Grund lediglich die Distanzdifferenzen $\Delta D = D_i - D_0$ aller Entfernungsbereiche dargestellt.

Für kleine Neigungswinkel bis $\pm 30^\circ$ sind Distanzdifferenzen von weniger als 1 mm feststellbar. Größere Auslenkungen führen im IR-Modus zu Extrema von rund 6 mm, wobei als verallgemeinerte Aussage $D_i > D_0$ angenommen werden kann. Diese Feststellung steht im Kontrast zu den Ausführungen von Joeckel u. a. (2008), dessen Untersuchungsergebnisse allerdings auf Messungen natürlicher Oberflächen im RL-Modus basieren. In Anlehnung an die Ausführungen aus Kapitel 2.1 teilt die Kippachse der Zieltafel den Laserspot in der Mitte in einem näheren (d_{31}) und weiter entfernten Bereich d_{32} . Wird davon ausgegangen, dass die Distanzmessachse des TDRA6000 mit der optischen Zielachse zusammenfällt, ist in d_{32} die Lichtenergie weniger stark konzentriert als in d_{31} . In Anbetracht der Untersuchungsergebnisse lässt sich jedoch schließen, dass bei der Signalauswertung von Reflexfolienmessungen beide Bereiche zumindest gleich gewichtet werden und die größere Spotfläche in d_{32} zur längeren Distanzmessung führt. Besonders für starke Neigungen wird der Effekt deutlich; ein entsprechendes Distanzverhalten wurde auch bei Schwarz (2013) für einen Tachymeter Leica TCR305 nachgewiesen.

In Abbildung 3.12 werden beide Teilbereiche des Laserspots durch die Strecken $\overline{MN_1}$ und $\overline{MN_2}$ dargestellt, wobei $\overline{MN_2}$ näher zum Instrument I gelegen ist. Des Weiteren wird die resultierende Spothöhe S'_H hinsichtlich der Zielzeichenneigung θ , Laserstrahldivergenz ν und Messdistanz D_i aufgezeigt. Für Messungen im RL-Modus wird der Divergenzwinkel anhand der Spothöhe S_H in Nulllage, welche aus den Gleichungen 3.1 interpoliert wird, und der gemessenen Distanz ermittelt. In der Abbildung 3.12 werden hierbei die rechtwinkligen Dreiecke $\triangle IO_2M$ sowie $\triangle IMO_1$ verwendet.

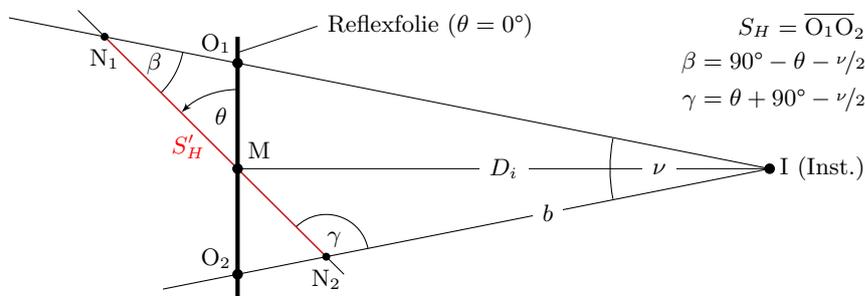


Abb. 3.12: Geometrische Konstellationen im Neigungsfall

Zudem lässt sich durch Trigonometrie in den Dreiecken $\triangle IMN_1$ und $\triangle IN_2M$ nachweisen, dass die Spotausdehnung im weiter entfernten Bereich $\overline{MN_1}$ einen größeren Betrag an der Spothöhe S'_H aufweist. Um weitere Aussagen über die Feldgröße der Codebereiche treffen zu können, wird die Spothöhe

$$S'_H = \frac{\sin \nu}{\sin \beta} b = \frac{2 \sin \nu \cos \theta}{\cos \nu + \cos (2\theta)} D_i \quad \text{mit} \quad b = \frac{\cos \theta}{\sin \gamma} D_i \quad (3.4)$$

aus Dreiecksbeziehungen der Abbildung 3.12 ermittelt. Dabei werden vordergründig Strecken- und Winkelbeziehungen in den Dreiecken $\triangle IN_2N_1$ und $\triangle IN_2M$ verwendet. Für nicht geneigte Zieltafeln wurde in Kapitel 3.1.4 eine minimale Feldgröße von mindestens 11,3 mm veranschlagt.

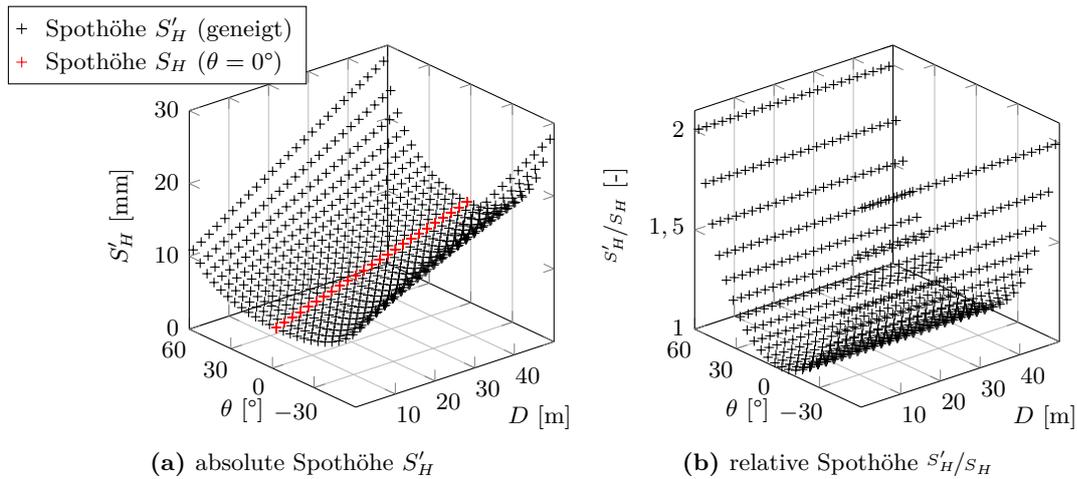


Abb. 3.13: Spotgröße unter Beachtung der Zieltafelneigung und Messdistanz (RL-Modus)

Der Zuwachs der Feldgröße aufgrund der Neigung kann im Anschluss an die Interpolation der Laserstrahldivergenz aus Gleichung 3.4 bestimmt werden. Für Messdistanzen bis 50 m und Zieltafelneigungen im Bereich von $\theta = \pm 60^\circ$ werden die resultierenden S'_H in den Abbildungen 3.13 aufgetragen. Insbesondere für große Messdistanzen ist ein wesentlicher Anteil der gesamten Spothöhe durch die Zielzeichenneigung bedingt. Spothöhen von rund 30 mm werden im Maximum erreicht. Zur Ermittlung einer angepassten Feldgröße ist die Relationen S'_H/S_H zwischen der Spothöhe im geneigten Fall und der Nulllage ausschlaggebend (Abb. 3.13b). Da im Allgemeinen von einer unbekanntenen Neigung auszugehen ist, muss $|\theta| = 60^\circ$ genauer betrachtet werden. Für diese maximale Neigungen ist S'_H konstant um den Faktor

$$c_n = 2 \tag{3.5}$$

größer als S_H . Im entsprechenden Maße sollte auch die Feldgröße bemessen werden. Gleichung 3.3 ist in diesem Zusammenhang um den Neigungsfaktor c_n zu erweitern:

$$l [\text{mm}] = c_n \cdot c_w \cdot (0,18 \cdot D [\text{m}] + 5,17) \tag{3.6}$$

Mit $D_i = 50$ m entspricht die Feldgröße somit $l = 22,7$ mm. Für die praktische Anwendung wird ein gerundeter Wert von 23 mm verwendet. Die Feldgröße deckt unter dieser Voraussetzung den gesamten Messbereich von 50 m mit Zielzeichenneigungen bis 60° ab und liefert bei zentrischer Anzielung maximale Intensitätswerte.

3.1.6 Abtastgeschwindigkeit

Ringförmig codierte Zielmarken nutzen eine gleichförmige Instrumentenbewegung zur kontinuierlichen Erfassung von Intensitätswerten. Das Instrument muss dazu in den Kinematikmodus versetzt werden, dessen Verhalten mit den Parametern der horizontalen und vertikalen Winkelgeschwindigkeit gesteuert werden kann. Schnittstellenseitig muss eine Winkelgeschwindigkeit in der Einheit $[\text{rad s}^{-1}]$ übergeben werden. Aufgrund dieser Tatsache werden die Ergebnisse der folgenden Ausführungen in der gleichen Einheit angegeben.

Damit die Codebereiche zuverlässig abgetastet werden können, müssen sehr kleine Winkelgeschwindigkeiten realisiert werden. Dies gilt insbesondere für den maximalen Distanzbereich und große Zielzeicheneigungen. Zudem sollten die Intensitätswerte möglichst mit einer hohen Messrate aufgezeichnet werden. Nur durch beide Voraussetzungen können kleine Feldgrößen gewährleistet werden. Die GeoCOM-Schnittstelle des TDRA6000 liefert drei Intensitätswerte pro Sekunde, wobei der gerundete Zahlenwert empirisch aus den Intensitätsmessungen von Kapitel 3.1.4 ermittelt wurde. Soll mindestens eine dieser drei Intensitätsmessungen nahe der Mitte eines Codebereichs liegen, muss die Winkelgeschwindigkeit so klein gewählt werden, dass in einer Sekunde kein größerer Bereich als die Feldgröße l abgetastet wird. Als Rechenbeispiel für $D = 50$ m und $l = 23$ mm entspräche dies einer maximal zulässigen Winkelgeschwindigkeit von rund $0,46 \text{ mrad s}^{-1}$. In diesem Zusammenhang könnte die Feldgröße nach Gleichung 3.6 zur Anwendung kommen. Die technisch umsetzbare Winkelgeschwindigkeit soll darum am Beispiel des Horizontalantriebs näher betrachtet werden.

Zur groben Eingrenzung des Bereichs der minimal möglichen Winkelgeschwindigkeit ω_{min} wurden der Schnittstellenmethode Winkelgeschwindigkeiten ω zwischen $0,5 \text{ mrad s}^{-1}$ und $0,1 \text{ mrad s}^{-1}$ übergeben. Beginnend beim größten Wert wurde die Winkelgeschwindigkeit in Schritten zu $0,01 \text{ mrad s}^{-1}$ verringert. Die Bewegung des Instruments wurde jeweils für $t = 5$ s im Uhrzeigersinn beibehalten, wobei die Horizontalrichtung jeweils vor und nach der Bewegung abgegriffen wurde. Die Differenz zwischen beiden Richtungen wird dabei mit Δr_m bezeichnet. Darüber hinaus kann der Sollwert $\Delta r_s = \omega t$ für die gegebene Winkelgeschwindigkeit und Bewegungsdauer berechnet werden. Die Winkeldifferenz

$$\Delta hz = \Delta r_s - \Delta r_m \quad (3.7)$$

gibt dann Aufschluss darüber, ob eine Bewegung ausgeführt wurde. Rotiert das Instrument mit der vorgegebenen Winkelgeschwindigkeit um die Stehachse, müssen die Werte Δhz im Rahmen der Winkelmessgenauigkeit nahe Null liegen. Im umgekehrten Fall sollte $\Delta hz \approx \Delta r_s$ gelten. Aufgrund dieses Zusammenhangs konnte ω_{min} auf einen Bereich zwischen $0,16 \text{ mrad s}^{-1}$ und $0,19 \text{ mrad s}^{-1}$ eingegrenzt werden (Abb. 3.14).

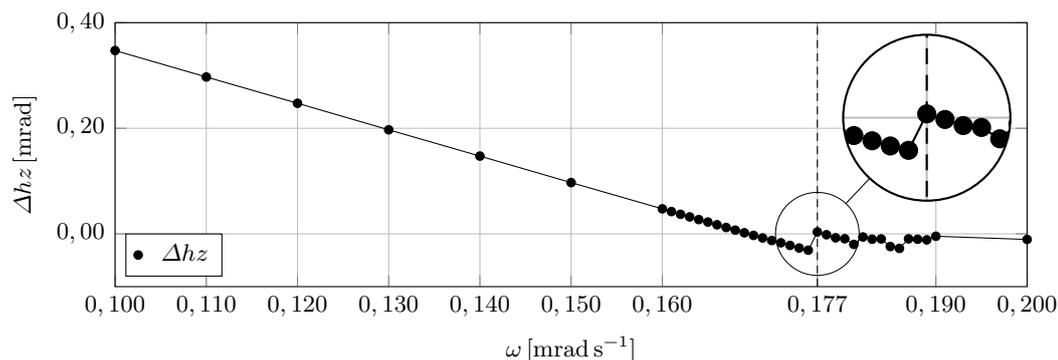


Abb. 3.14: Minimale Winkelgeschwindigkeit des horizontalen Instrumentenantriebs

In einem zweiten Durchlauf wurden die Messungen im eingegrenzten Bereich mit Feinintervallen von $0,001 \text{ mrad s}^{-1}$ wiederholt. Nach Abbildung 3.14 besteht dabei von $0,1 \text{ mrad s}^{-1}$ bis $0,177 \text{ mrad s}^{-1}$ ein linearer Zusammenhang zwischen Δhz und ω . Durch die Beträge der Winkeldifferenzen kann davon ausgegangen werden, dass keine Bewegung stattgefunden hat. Für Winkelgeschwindigkeiten größer als $0,177 \text{ mrad s}^{-1}$ ist aus den Messdaten hingegen eine aktive

Instrumentenbewegung ablesbar. Die Winkelgeschwindigkeit $\omega_{min} = 0,177 \text{ mrad s}^{-1}$ stellt abschließend diejenige Geschwindigkeit dar, welche vom Messsystem als Minimum realisierbar ist. Folglich ist eine wesentlich kleinere Winkelgeschwindigkeit umsetzbar, als am Rechenbeispiel demonstriert. Es besteht somit kein direkter Einfluss auf die Feldgröße eines Codebereichs.

Zur Abschätzung der Einsatzfähigkeit im minimalen Winkelgeschwindigkeitsbereich wurden weitere Versuchsserien durchgeführt, bei welchen Winkelgeschwindigkeiten im unteren Grenzbereich für jeweils $t = 10 \text{ s}$ beibehalten wurden. Das Untersuchungsziel bestand in der Überprüfung einer möglichen Differenz zwischen der schnittstellenseitig übergebenen und tatsächlich ausgeführten Winkelgeschwindigkeit. Wie bei den bereits beschriebenen Untersuchungen wurden vor und nach der Instrumentenbewegung Horizontalrichtungen erfasst und Δr_m berechnet. Angesichts der bekannten Bewegungsdauer t kann damit die Differenz der Winkelgeschwindigkeit

$$\Delta\omega = \frac{\Delta r_m}{t} - \omega_I \quad (3.8)$$

zum Eingabewerte der Schnittstellenmethode ω_I berechnet werden. Zur Vermeidung von Schwingungserscheinungen wurden zwischen den einzelnen Bewegungsepochen zudem Zeitspannen von zehn Sekunden vorgesehen. Die daraus resultierenden $\Delta\omega$ werden in Abbildung 3.15 über die Horizontalrichtung vor dem Start der zehnsekündigen Bewegung aufgetragen.

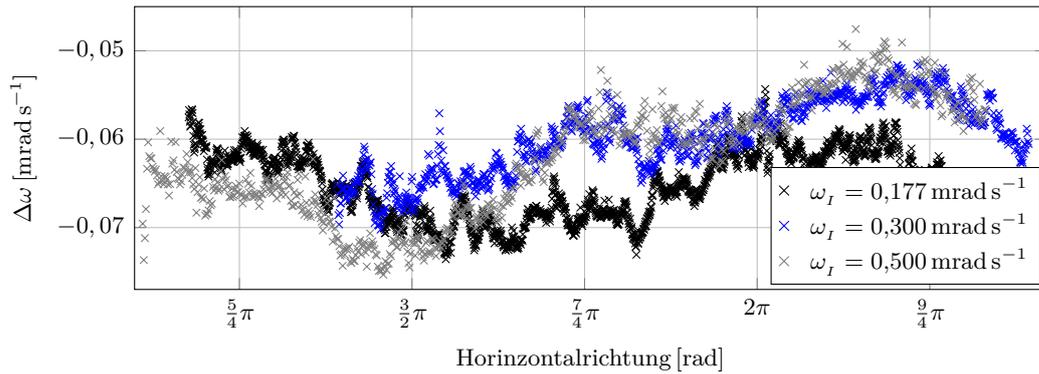


Abb. 3.15: Differenzen zwischen Winkelgeschwindigkeiten

Für die dargestellten Messreihen wird ersichtlich, dass das Instrument durchgängig eine geringere Winkelgeschwindigkeit ausführt als in der Schnittstellenmethode verwendet wird. Für ω_{min} ist der Mittelwert der Messreihe um $0,065 \text{ mrad s}^{-1}$, das Minimum sogar um $\Delta\omega_{min} = 0,074 \text{ mrad s}^{-1}$ kleiner als der Vorgabewert. Die Differenzen der Messreihen für $\omega_I = 0,300 \text{ mrad s}^{-1}$ und $\omega_I = 0,500 \text{ mrad s}^{-1}$ sind in der gleichen Größenordnung anzusiedeln. Zur Fixierung der Relation zwischen der verwendeten und tatsächlichen Winkelgeschwindigkeit wird der Skalierungsfaktor

$$m_\omega = \frac{\omega_{min}}{\omega_{min} - \Delta\omega_{min}} \quad (3.9)$$

eingeführt. Speziell zur Abschätzung der maximalen Bewegungsdauer zur Codeerfassung muss dieser Skalierungsfaktor berücksichtigt werden. Zu kurze Aufzeichnungszeiten können z. B. zur unvollständigen Erfassung des Punktcodes führen. Aus diesem Grund wurde im Nenner von Gleichung 3.9 das Minimum $\Delta\omega_{min}$ vorgesehen, sodass auch im Falle der kleinsten Winkelgeschwindigkeit vollständige Codeerfassungen realisierbar sind. Entsprechende Ausführungen erfolgen in Kapitel 4.1 bei den Erläuterungen zu ringförmigen Codierungsvarianten.

3.2 Funksystem Metirionic MIC-DMK

Das MIC-DMK der Firma Metirionic ist ein System, welches für Funkdistanzmessung konzipiert wurde. In der Anwendung verfügt das System über zwei Sensortypen. Zum einen ein Gateway, welches die Datenschnittstelle zum Computer realisiert und zum anderen Sensorknoten, welche die Distanzmessungen ausführen (Abb. 3.16). Bei den Sensorknoten erfolgt eine weitere Unterscheidung in fest installierte Ankerknoten und dem beliebig positionierbaren mobilen Knoten. Hardwareseitig sind beide Sensorknoten identisch. Der funktionale Unterschied wird durch die Parametrisierung der Firmware gesteuert. Das Gateway wird mit einem USB-Adapter (Universal Serial Bus, USB) am Computer angeschlossen und realisiert neben der Datenakquise auch die Parametrisierung der Sensoren. Generell besteht die Möglichkeit der firmwareseitigen Datenfilterung, welche durch Subapplikationen konfiguriert werden kann.

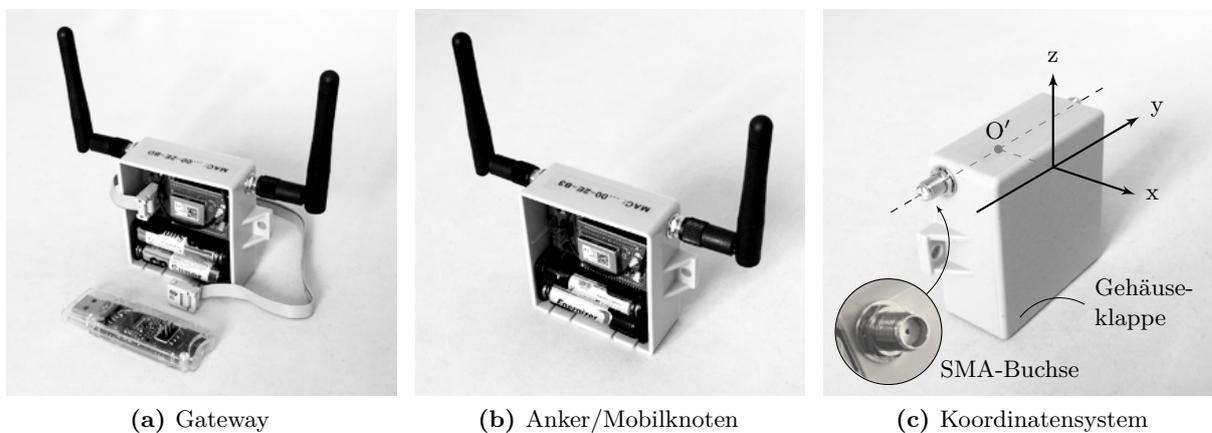


Abb. 3.16: Metirionic MIC-DMK

Für die Untersuchungen wurde der Datenfilter deaktiviert, damit auf ungefilterte Funkdistanzen zugegriffen werden kann. Als Kommunikationsgrundlage der Funkdistanzmessung verwendet das Metirionic MIC-DMK ein Übertragungsprotokoll des Standards IEEE 802.15.4 für WPAN-Netzwerke. Das Protokoll wurde vom Hersteller durch Distanzmessparameter ergänzt und die Funktionalität unter Verwendung des ZigBee-Frameworks erweitert. Die Kenngrößen des Systems sind Tabelle 3.5 zu entnehmen.

Tab. 3.5: Herstellerangaben Metirionic MIC-DMK (Metirionic 2014)

Spezifikation	Herstellerangabe
Maximale Messdistanz	500 m
Genauigkeit der Distanzmessung	0,50 m (außen)/1,00 m (innen)
Digitale Auflösung	1,0 cm
Basisfrequenz (ISM-Band)	2,4 GHz
Schnittstelle	USB/seriell
Abmessung Gateway, Anker und Mobilknoten (L × B × H)	27 × 60 × 65 mm ³

Da herstellereitig keine Angaben zum Ursprung der Distanzmessungen vorgenommen werden, wird der Distanznullpunkt auf Grundlage eines kartesischen Koordinatensystems nach Abbildung 3.16c definiert. Das rechtshändige Koordinatensystem findet sowohl bei den Ankerknoten als

auch beim Mobilknoten Anwendung. Als Ausgangspunkt liegt die y - z -Ebene des Systems in der Ebene der Gehäuseklappe. Zusätzlich ist die x - y -Ebene so ausgerichtet, dass die Mittelpunkte beider SMA-Buchsen (Sub-Miniature-A, SMA) enthalten sind. Die Verbindungslinie zwischen den SMA-Buchsen, welche zur Antennenbefestigung dienen, wird in Abbildung 3.16c gerissen dargestellt. Die positive x -Achse des Koordinatensystems verläuft sowohl durch den Punkt O' , welcher auf der Verbindungslinie liegt und zu den Hülsenenden beider SMA-Buchsen den gleichen Abstand aufweist, als auch in Richtung der Gehäuseklappe des Sensorknotens.

Laut Herstellerinformation beruht das Distanzmessprinzip auf dem frequenzmodulierten Dauerstrichverfahren. Während der Distanzmessung wird die Basisfrequenz der Sendeeinheit im Mobilknoten periodisch moduliert. Das kontinuierlich ausgesendete Signal besitzt dann eine Wellenlänge im Bereich von 13 cm bis 15 cm. Bezogen auf die verschiedenen Module des Systems agiert der mobile Knoten als aktiver Sensor, welcher die Messung zu n im Raum verteilten Anker initiiert (Abb. 3.17). Die Distanzmessung wird zyklisch nacheinander zu jedem Anker durchgeführt, wobei eine Einzelmessung rund 0,3s in Anspruch nimmt. Zum Zeitpunkt der Distanzmessung übernimmt der jeweilige Anker eine passive Rolle, vergleichbar mit der eines Reflektors. Dabei wird ein im Anker generiertes Signal mit dem Empfangenen synchronisiert und an den Mobilknoten zurückgesendet. Nachdem das Signal den mobilen Knoten erreicht hat, wird ein Mischsignal aus der Kombination des empfangenen und gesendeten Signals erzeugt, welches in Abhängigkeit zum Modulationsmuster Frequenzdifferenzen liefert und daraus die gesuchte Distanz ermittelt. Genauere Details zum verwendeten Modulationsmuster werden vom Hersteller nicht bekannt gegeben. Allerdings haben sägezahnförmige Modulationsmuster eine weite Verbreitung.

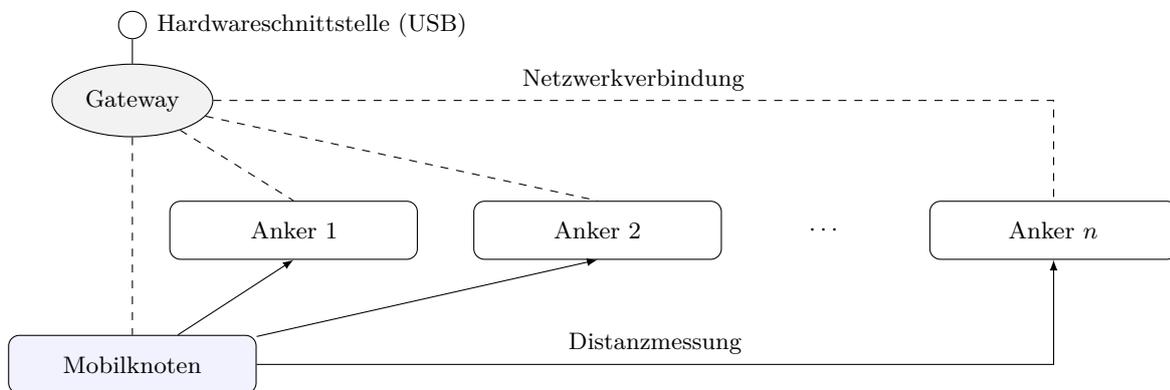


Abb. 3.17: Mess- und Kommunikationsschema des MIC-DMK

Für den Informationsaustausch zwischen dem Computer und der Sensorik werden am Gateway alle Distanzinformationen gesammelt und mit der jeweiligen Anker-ID versehen. Die Übermittlung der Daten erfolgt über die Hardwarechnittstelle. Anhand eines Treibers werden die Daten des USB-Ports in einer virtuellen seriellen Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Die Steuerung und Konfiguration des Systems kann dann z. B. durch Terminalanwendungen erfolgen. Entsprechende ASCII-Befehle (American Standard Code for Information Interchange, ASCII) sind bei Metirionic (2014) zusammengestellt.

Da die Distanzdaten als ungeordnete Textteile keines Standardformats übertragen werden, wurde eine Klassenbibliothek erstellt, welche die ASCII-Befehle aufgreift und dadurch eine Systemsteuerung sowie Datenformatierung ermöglicht.

3.2.1 Zielpunktkorrektur

Aufgrund der Definitionen des vorangegangenen Kapitels wird das Ergebnis der Funkdistanzmessung zwischen einem Anker- und Mobilknoten hinsichtlich der Koordinatenursprünge angegeben. Zur Bewertung der Funkdistanzen werden in den folgenden Kapiteln Messungen des TDRA6000 herangezogen. Da der Sensorknotenursprung nicht direkt messbar ist, wurden auf den Gehäuseklappen der Sensorknoten retroreflektierende Zielmarken aufgeklebt. Dabei wird angenommen, dass die vertikale Linie des Zielkreuzes in der x - z -Ebene des Sensorknotensystems liegt und die Dicke der Zielmarke zu vernachlässigen ist.

Des Weiteren werden die Sensorknoten bei Messungen derart positioniert, dass die x - y -Ebene möglichst parallel zum Horizont des Instruments verläuft. Die Distanz D und der Zenitwinkel ξ einer Tachymetermessung zur Zielkreuzmitte (Zielpunkt) können unter diesen Voraussetzungen hinsichtlich des Koordinatenursprungs eines Sensorknotens korrigiert werden (Abb. 3.18). Die korrigierten Daten werden mit D_P bzw. ξ_P bezeichnet und können anhand der Gleichungen 3.10 ermittelt werden.

$$\begin{aligned} D_P &= \sqrt{D_{hz}^2 + (Z_T + \Delta Z)^2} \\ \xi_P &= \arctan\left(\frac{D_{hz}}{Z_T + \Delta Z}\right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Weiterhin enthaltene Parameter der Gleichungen 3.10 bezeichnen die Horizontalstrecke D_{hz} , die Zielpunkthöhe Z_T und das Zielpunktoffset ΔZ . Letzteres beschreibt den absoluten Betrag der Differenz in z -Richtung zwischen dem Zielpunkt und Koordinatenursprung im Koordinatensystem des Sensorknotens.

Die Bestimmung von ΔZ erfolgte durch photogrammetrische Auswertungen. Als Grundlage diente jeweils ein Kamerabild der Gehäuseklappe mit enthaltenen SMA-Buchsen, welches mit einer Spiegelreflexkamera aufgenommen wurde. Der äußere Zielmarkenkreis mit einem Radius von 21 mm diente in der Folge einerseits zur Entzerrung des Bildes und andererseits zur Bestimmung des Maßstabes für die Überführung von Bildkoordinatendifferenzen in metrische Werte. Anhand von Bildmessungen wurde zuerst die Verbindungslinie zwischen den SMA-Buchsen hergestellt und anschließend der rechtwinklige Abstand zum Zielpunkt (in Pixeln) ermittelt. Nachdem die Maßstabsanpassung auf den Abstand angewendet wurde, entspricht der resultierende Wert dem Zielpunktoffset. Für die sieben zur Verfügung stehenden Sensorknoten wurden Werte für ΔZ zwischen 25 mm und 27 mm festgehalten.

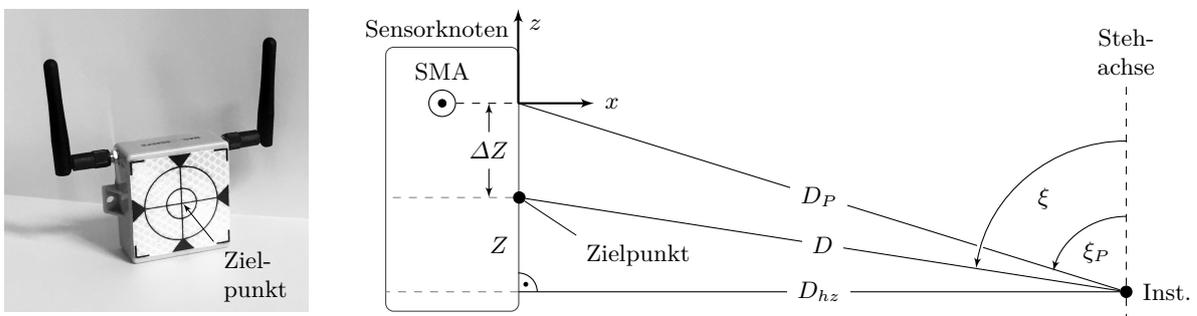


Abb. 3.18: Zielpunktkorrektur: (links) Sensorknoten mit Zielmarke, (rechts) Korrekturskizze

3.2.2 Genauigkeitsbetrachtungen und Systemeigenschaften

Die Feststellung der Systemgenauigkeit und -eigenschaften soll Aufschluss über die Einsatzfähigkeit des Funksystems hinsichtlich einer Innenraumpositionierung geben. Die grundlegenden Parameter werden zunächst im Freifeld untersucht, d. h. die ungestörte Wellenausbreitung zwischen dem mobilen Knoten (MK) und einem Ankerknoten (AK) soll vorausgesetzt werden. Zur Abschätzung des benötigten Freifeldes wurde die Fresnel-Zone in Kapitel 2.3.4 beschrieben. Der Radius r des Fresnel-Ellipsoides kann nach Gleichung 2.17 berechnet werden und gibt den minimalen Abstand der Sensor-knoten zum Boden an. Bei Funkdistanzen von 60 m muss für das MIC-DMK eine Radius von $r = 1,5$ m berücksichtigt werden. Im Versuchsaufbau nach Abbildung 3.19 werden der MK und AK entsprechend auf einem Stativ mit einer Höhe $h > r$ gelagert. Zudem sind die Sensor-knoten so ausgerichtet, dass die positiven x -Achsen beider Koordinatensysteme zueinander zeigen und die x - y -Ebenen in genäherter Betrachtung parallel verlaufen bzw. identisch sind.

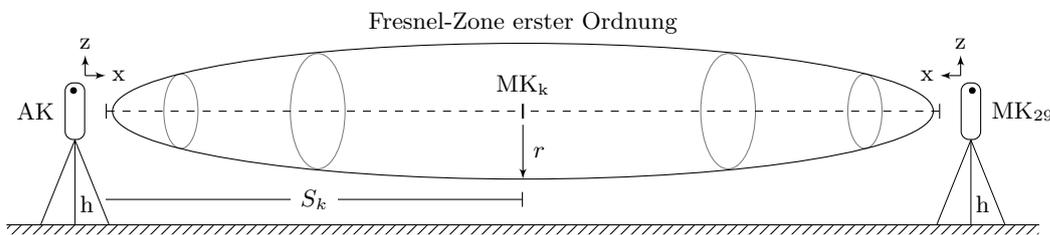


Abb. 3.19: Funkmessungen im Freifeld

Der maximale Abstand zwischen dem MK und AK betrug rund 57 m. Dazwischen wurden insgesamt 28 weitere Mobilknotenaufstellungen vorgenommen, wobei die beschriebene Ausrichtung der Sensor-knoten beachtet wurde. Bei jeder Aufstellung wurden die Koordinaten des MK und AK mit dem Tachymeter gemessen. Im Anschluss an die erfolgte Zielpunktkorrektur wurde die Strecke S zwischen den Sensor-knoten berechnet. Diese wird als Bezugsgröße für die Bewertung der Funkdistanzen verwendet. In den weiteren Ausführungen soll anhand der Daten auf

- das Einlaufverhalten des Funksystems,
- die Distanzgenauigkeit und Präzision,
- eine minimale Anzahl an nötigen Messungen zur Erlangung der Genauigkeit sowie
- auf eine Möglichkeit der Datenfilterung

geschlossen werden. Weiterhin soll eine eindeutige Abgrenzung der Funkdistanzen von Tachymeterdistanzen D gewährleisten werden, indem in den folgenden Kapiteln die Notation F für Funkdistanzen verwendet wird. Dabei symbolisiert F_{ij} die i -te Funkdistanzmessung vom Mobilknoten zum Anker j (AK _{j}). In gemeinsamer Betrachtung mehrerer Mobilknotenpositionen wird zusätzlich der Index k ergänzt. Dementsprechend werden die Funkdistanzen mit F_{ijk} und der mobile Knoten mit MK _{k} bezeichnet; zudem wird die aus den Tachymeterdaten abgeleitete Strecke als S_{jk} gekennzeichnet. Im konkreten Untersuchungsbeispiel aus Abbildung 3.19 werden die Funkdistanzen lediglich zu einem einzigen Anker gemessen. Nur in diesem Fall kann der Index j aufgrund der eindeutigen Zuordnung entfallen.

Um möglichst genaue Messergebnisse zu erzielen, ist u. a. das Verhalten des Sensors direkt nach der Inbetriebnahme zu beachten. Erwärmungseffekte der Sensorelektronik können Ursachen für ein stark ausgeprägtes Messrauschen sein. Systemabhängig stabilisieren sich die Messwerte nach einer bestimmten Zeit auf ein Niveau, was der Genauigkeitsklasse des Systems entspricht. Dieser Effekt wird unter konstanten Umgebungsbedingungen als Einlaufverhalten bezeichnet. Im Allgemeinen sind die Auswirkungen des Einlaufverhaltens nach dem Anschalten des Systems am deutlichsten im Datenmaterial zu beobachten.

Hinsichtlich der Bestimmung für das MIC-DMK wurde der MK auf vier gleichmäßig im Untersuchungsbereich verteilten Positionen aufgestellt und jeweils nach dem Kaltstart eine zweistündige Dauermessung zu einem Anker initiiert. Standpunktweise wurde aus der jeweiligen Messreihe das arithmetische Mittel \bar{F}_k und im Anschluss die Differenz

$$\Delta F_{ik} = F_{ik} - \bar{F}_k \quad (3.11)$$

gebildet. Die resultierenden Daten werden exemplarisch für zwei Entfernungsbereiche sowie zehntausend Messungen (Beobachtungszeit etwa 50 min) in Abbildung 3.20a dargestellt. Für die weiteren MK-Positionen konnten identische Messergebnisse festgehalten werden. Generell ist ein Einlaufverhalten für das MIC-DMK nicht nachweisbar. Falls Effekte vorhanden sind, werden sie durch das Messrauschen des Funksystems überdeckt. Die Sensorik ist damit in kürzester Zeit einsatzfähig.

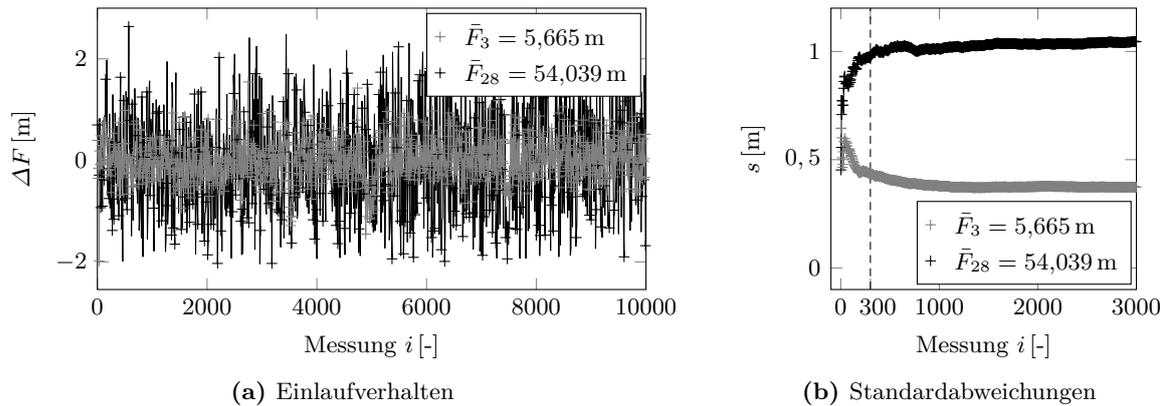


Abb. 3.20: Ergebnisse der Dauermessung

Aus den dargestellten Funkdistanzdifferenzen geht zudem die starke Streuung der Messwerte hervor, wobei im höheren Entfernungsbereich größere Streuungen zu beobachten sind. Dieser Sachverhalt soll anhand der beiden Beispielmessungen weiter verdeutlicht werden. Dazu werden die empirischen Standardabweichungen der Einzelmessungen s_k in Abbildung 3.20b aufgezeigt. Die Standardabweichung wird jeweils für die auf der Abszissenachse angegebene Anzahl von Einzelmessungen berechnet. Zwischen beiden MK-Aufstellungen sind dadurch Differenzen der s_k ersichtlich, welche Distanzabhängigkeiten bzgl. der Beobachtungsgenauigkeit vermuten lassen. Differenzen im Bereich von 60 cm werden deutlich. Darüber hinaus beginnen die Standardabweichungen ab einem Umfang von ca. 300 Einzelmessungen (90 s Beobachtungsdauer) einen nahezu konstanten Betrag anzunehmen. Diese Zahlenangabe kann als Richtwert für die minimale Anzahl an nötigen Messungen herangezogen werden. Für nahezu konstante Standardabweichungen kann davon ausgegangen werden, dass das Messrauschen des Sensors vollständig durch die

Einzelmessungen abgebildet wird und im Idealfall eine Normalverteilung der Messdaten für die Freifeldanwendung vorliegt.

Zur Betrachtung der erreichbaren Funkdistanzgenauigkeit und Präzision wurde der mobile Knoten nach Abbildung 3.19 auf insgesamt 29 verschiedenen Positionen an einem Stativ angebracht ($k = 1 \dots 29$). Die Entfernung zwischen den Standpunkten betrug zwei bis vier Meter, wobei jeweils 300 Messungen aufgezeichnet wurden. Zusätzlich wurden die Strecken S_k aus den Koordinaten der Sensorknoten ermittelt. Für jede Mobilknotenposition wird die Standardabweichung s_k berechnet und in der Abbildung 3.21 über die S_k aufgetragen. Darüber hinaus wurde das Datenmaterial jeder Messposition k einem Ausreißertest nach Baarda (1968) unterzogen. Als Kriterium für die Ausreißeridentifizierung wurde die normierte Verbesserung $NV > 4$ gewählt, welche z. B. von Lehmann (2010) vorgeschlagen wird. Zudem gilt als a priori Standardabweichung σ_0 die Genauigkeitsangabe des Herstellers für Messungen im Außenbereich (Tab. 3.5). Nachdem die Ausreißer der jeweiligen Messreihe entfernt wurden, wird die empirische Standardabweichung erneut berechnet. Diese wird in Abbildung 3.21 mit s'_k angeführt.

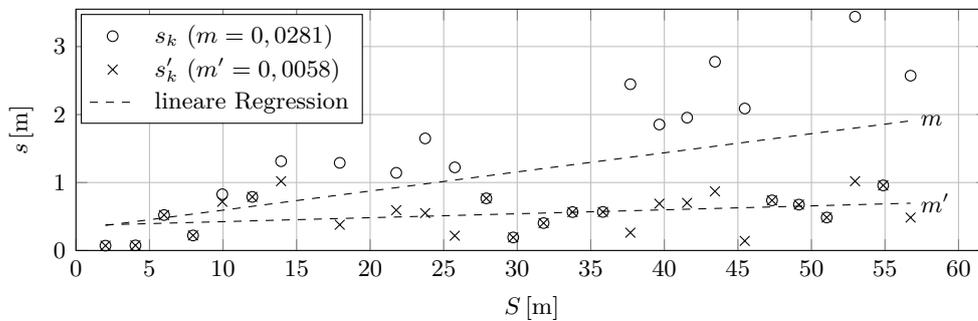


Abb. 3.21: Standardabweichungen der Funkdistanzen

Die Zunahme der Standardabweichungen für größer werdende Distanzen wird besonders am Anstieg m der linearen Regression unfilterter Funkdaten deutlich. Als Maximum ist eine Standardabweichung $s_{27} > 3$ m feststellbar. Zugleich treten z. T. starke Differenzen zwischen den s_k räumlich nahe beieinander liegender MK-Positionen auf. Im Bereich von 45 m bis 55 m betragen die Differenzen über einen Meter. Allerdings ist keine Systematik bzgl. der Funkdistanz oder eines Vielfachen der Wellenlänge ableitbar, welche einen Korrekturansatz rechtfertigt.

Durch die Eliminierung der Ausreißer können die starken Differenzen bzgl. der s_k reduziert werden. Im Vergleich zum Anstieg der Regression unfilterter Daten wird ein um den Faktor fünf kleinerer Anstieg m' erzielt. Insbesondere im maximalen Distanzbereich des Untersuchungsraums werden dadurch wesentlich kleinere Standardabweichungen erreicht. Das Genauigkeitsniveau ist in diesem Zusammenhang jedoch nicht gleichbedeutend mit der Distanzgenauigkeit. Vielmehr kann es als empirische evaluierte Präzision des Messsystems interpretiert werden, wobei ein konstanter und distanzabhängiger Anteil unterschieden werden kann. Der konstante Anteil entspricht dem Nullpunktoffset n' der Regressionsgeraden und der systematische Anteil dem Anstieg m' . Daraus ergibt sich für das Messsystem eine Präzision von

$$PCS = 0,367 \text{ m} + 6 \text{ mm m}^{-1} \quad (3.12)$$

unter der Voraussetzung ungestörter Signalausbreitungen und eliminierter Ausreißer. Unter den selben Voraussetzungen lässt sich die Distanzgenauigkeit des Systems betrachten. Im Allgemeinen

kann die Distanzgenauigkeit als Differenz der Funkdistanzen zum wahren Wert ausgedrückt werden. Als gute Näherung für die wahren Werte werden die Strecken S_k verwendet. Im Anschluss an den Ausreißertest steht für jede MK-Aufstellung eine Messreihe mit mehreren Einzelmessungen zur Verfügung. Jede Messreihe soll anhand eines Filters prozessiert werden, sodass der Strecke S_k genau ein repräsentatives F_k gegenübergestellt werden kann. Dazu wird in den Gleichungen 3.13 neben den Standardverfahren zusätzlich die ModeAEO-Methode angeführt, welche im Folgenden kurz erläutert wird.

$$F_{jk} = \begin{cases} \text{med}\{F_{ijk}\}, & \text{für: Median} \\ \text{mean}\{F_{ijk}\}, & \text{für: arithmetisches Mittel} \\ \text{min}\{F_{ijk}\}, & \text{für: Minimumbildung} \\ \text{mode}\{F_{ijk}\}, & \text{für: häufigster Wert einer Messreihe} \\ \text{modeAEO}\{F_{ijk}\}, & \text{für: arithmetisches Mittel der am häufigsten aufeinander} \\ & \text{folgenden Werte innerhalb einer definierten Toleranz} \end{cases} \quad (3.13)$$

Bei der ModeAEO-Methode werden alle F_{ik} chronologisch durchlaufen und die Differenzen zu den jeweils angrenzenden Funkdistanzen $F_{(i+1)k}$ und $F_{(i-1)k}$ gebildet, falls diese vorhanden sind. Liegt der absolute Betrag der Differenz innerhalb einer vorgegebenen Toleranz, erfolgt eine indexbasierende Verknüpfung der Werte und der Vorgang wird für $i \pm 2$ wiederholt. Entsprechend wird für $|i| > 2$ vorgegangen bis die definierte Toleranz überschritten wird. Für die konkrete Anwendung mit dem MIC-DMK wird als Toleranz der distanzabhängige Präzisionswert verwendet. Es wird folglich ein Band nacheinander aufgezeichneter Messwerte aus der Datenreihe extrahiert, welches mit der Präzision des Systems vereinbart werden kann. Wurden alle F_{ik} mit Verknüpfungen versehen, ist die Verknüpfungsanzahl zur weiteren Prozessierung ausschlaggebend. Zuerst wird diejenige F_{ik} mit der größten Verknüpfungsanzahl ausgewählt und anschließend der Funkdistanzmittelwert sämtlicher verknüpfter Distanzen gebildet. Dieser Mittelwert bildet als Abschluss die F_k der ModeAEO-Methode.

Beim weiteren Vorgehen werden die F_k aus den verbleibenden Verarbeitungsmethoden der Gleichungen 3.13 ermittelt, wobei der Index j aufgrund der eindeutigen Ankerzuordnung entfällt. Mittels der berechneten Werte sind die Differenzen

$$\Delta S_k = F_k - S_k \quad (3.14)$$

zu den Tachymetermessungen separat für jeden Filter bestimmbar. In Abbildung 3.22 werden sie als Visualisierung über die S_k aufgetragen. Darüber hinaus werden die Berechnungsergebnisse in Tabelle 3.6 aufbereitet. Die Beurteilung des jeweiligen Filters erfolgt anhand der arithmetischen und quadratischen Mittel ($\Delta \bar{S}$, $RMS_{\Delta S}$) aller ΔS_k eines Filters sowie der zugehörigen Standardabweichung $s_{\Delta S}$.

Abgesehen vom Minimum-Filter liegen die Ergebnisse der ΔS_k verschiedener Filter dicht beieinander. Die besten Resultate bzgl. der Standardabweichungen und des quadratischen Mittels liefert der ModeAEO-Filter. Zur Genauigkeitssteigerung werden im Allgemeinen verschiedene Ausgleichungsansätze verwendet, welche konstante, zyklische und aperiodische Differenzen zum Sollwert oder einem Vielfachen der Wellenlänge funktionell beschreiben. Aus dem Verlauf der ΔS_k in Abbildung 3.22 lässt sich jedoch keinerlei Regelmäßigkeit erkennen, welche durch eine Kalibrierfunktion schlüssig beschrieben werden könnte. Anhand der Werte für $\Delta \bar{S}$ erscheint eine

Nullpunktkorrektur ebenso wenig sinnvoll. Wird die empirische Standardabweichung $s_{\Delta S}$ des ModeAEO-Filters als Bewertungskriterium für die Genauigkeit des Messsystems interpretiert, kann eine Funkdistanzgenauigkeit von 0,798 m als Mittel für den Untersuchungsbereich festgehalten werden. Damit spiegelt das Ergebnis eine geringere Genauigkeit als die Herstellerangabe in Tabelle 3.5 wider. In Anbetracht der idealisierten Messbedingungen kommen jedoch auch der Median und das arithmetische Mittel zur Bestimmung der F_k in Frage. Beide Filter weisen nur geringfügige Abweichungen hinsichtlich der Standardabweichung und Distanzdifferenzmittel auf. Die Betrachtung des Systems entsprechend nicht idealer Messbedingungen wird in Kapitel 3.2.4 vorgenommen.

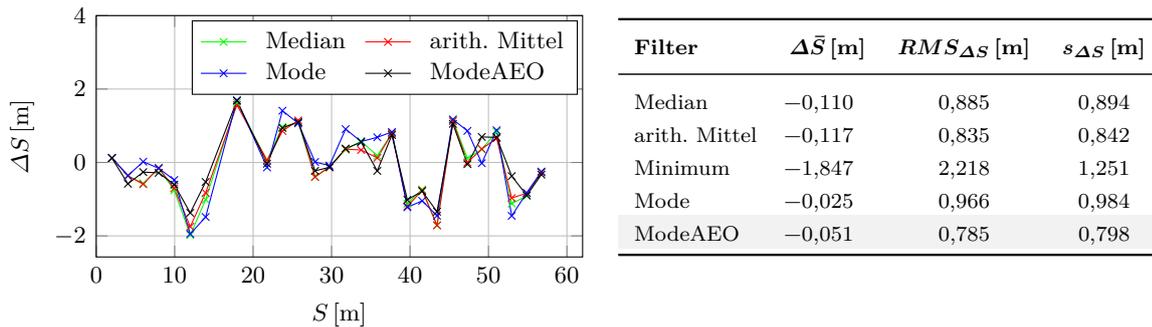


Abb. 3.22 und Tab. 3.6: Ergebnisse der Funkdistanzfilterung im Freifeld

3.2.3 Einfluss der Antennenausrichtung

Das MIC-DMK verwendet zwei omnidirektionale Antennen pro Sensorknoten um eine sogenannte Antennendiversität zu erzeugen. Das Konzept dient der Verbesserung der Systemgenauigkeit, wobei im Allgemeinen Störeinflüsse in den Messdaten aufgedeckt werden sollen. Da der Abstand zwischen beiden Antennen sehr klein ist (kleiner als die Messwellenlänge) wird auch von Mikrodiversität gesprochen (Höher 2013). Durch die räumliche Trennung der Antennen wird darüber hinaus von nicht korrelierten Empfangssignalen ausgegangen. Störeffekte wie Reflexionen, Brechungen oder Auslöschungen schlagen sich in diesem Zusammenhang unterschiedlich in der Signalqualität nieder und können durch einen intelligenten Auswertalgorithmus aufgedeckt werden (Narayan 2007). Dazu kommen verschiedene Techniken zum Einsatz, welche z. B. Empfangssignale kombinieren, das Signal-Rausch-Verhältnis auswerten oder die Analyse des stärksten Signals vornehmen (Beaulieu 2003).

Die Ausrichtung zwischen einem mobilen Knoten und dem Anker könnte demnach einen Einfluss auf die Funkdistanzmessung nehmen. Bei den bereits beschriebenen Untersuchungen wurde stets von einer definierten Ausrichtung ausgegangen. Für praxisnahe Anwendung sind jedoch Abweichungen von diesem Idealfall zu erwarten. Aus diesem Grund wurden verschiedene Messkonstellationen in den folgenden Untersuchungen nachgestellt.

Der grundlegende Versuchsaufbau entspricht der Abbildung 3.19, wobei zwischen dem MK und AK eine Strecke von $S \approx 32$ m zugrunde lag. Im Hinblick auf die Anwendung des Systems in Kapitel 5 soll lediglich von einer Rotation des MK um die z -Achse ausgegangen werden. Die x - y -Ebenen beider Sensorknoten sollen in guter Näherung parallel verlaufen (Abb. 3.23). In der Ausgangsposition liegen die x - z -Ebenen beider Knoten in einer Vertikalebene. Die Rotation

zwischen den Sensorknoten beträgt dabei $\alpha = 0^\circ$. Bei der Versuchsdurchführung wurde der Rotationswinkel α in Schritten zu je $4,5^\circ$ erhöht und die Funkdistanzen F_{ik} gemessen. In diesem Zusammenhang stellt k den Index des zugehörigen Rotationsschritts dar ($k = 1$ für $\alpha = 0^\circ$). Die 300 Einzelmessungen des jeweiligen Rotationsschritts wurden einem Ausreißertest unterzogen, die resultierende Standardabweichung s'_k berechnet und das repräsentative F_k anhand des ModeAEO-Filters bestimmt (Index j entfällt aufgrund der eindeutigen Ankerzuordnung). Die ΔS_k wurden zudem mit der Gleichung 3.14 ermittelt, wobei das in die Gleichung einzusetzende S_k für alle Rotationsschritte konstant bleibt ($S_k = S$).

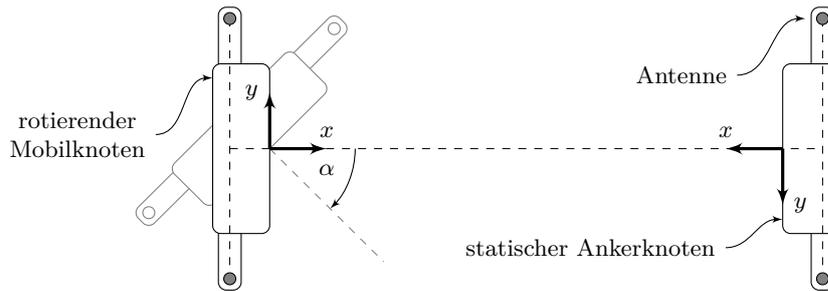


Abb. 3.23: Versuchsaufbau zur Analyse des Einflusses der Antennenausrichtung

Da die Rotationsachse mit der z -Achse des Mobilknoten zusammenfällt, sollten die ΔS_k und s'_k im Rahmen des Systemrauschens konstant bleiben. Eine Abhängigkeit zur Antennenausrichtung kann jedoch hinsichtlich der Abbildung 3.24 nicht ausgeschlossen werden. Insbesondere für Antennenkonstellationen, deren Rotationswinkel α in den Bereichen von 45° bis 90° oder 225° bis 270° liegen, sind Extrema in den Daten festzustellen. In ebener Betrachtungsweise nähert sich die y -Achse des MK bei diesen Konstellationen zunehmend der orthogonalen Ausrichtung zur y -Achse des AK. Zum einen weist der deutliche Anstieg der Standardabweichungen auf die geometrisch ungünstige Antennenkonstellation hin, welche die Distanzanalysen des Systems beeinflussen, zum anderen wird sowohl die minimale als auch die maximale Differenz zur Strecke S erreicht. Eine der Antennen scheint folglich bei ungünstigen Konstellationen ein stärkeres Gewicht zum Distanzwert beizutragen. Ohne genauere Angaben zum Distanzanalysemuster des Herstellers sind weitere Aussagen nicht stichhaltig begründbar. Trotzdem kann die Kernaussage getroffen werden, dass zur Akquise von Funkdaten mit nahezu konstanten Standardabweichungen die genannten Rotationsbereiche möglichst vermieden werden sollten.

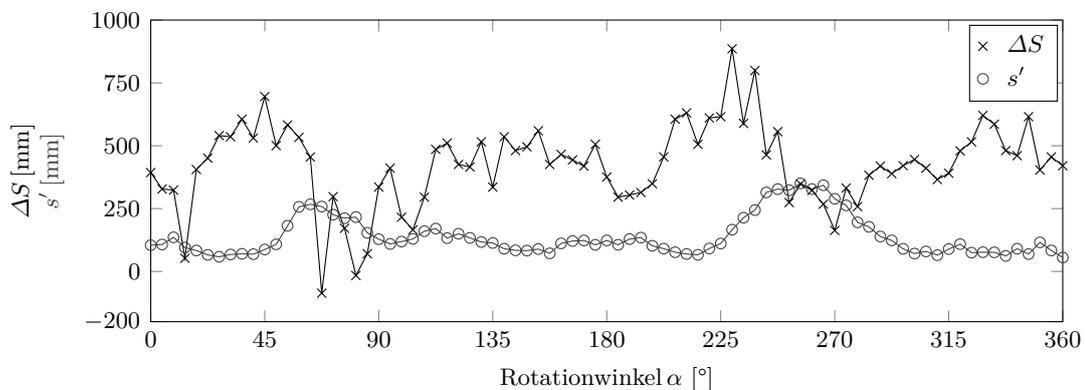


Abb. 3.24: Einfluss der Antennenausrichtung auf die Funkmessungen

3.2.4 Distanzfilterung für die Innenraumanwendung

Für die bisherigen Betrachtungen wurde das Funksystem bei nahezu idealen Messbedingungen eingesetzt. Besonders in Messumgebungen des Maschinen- und Anlagenbaus können diese Voraussetzungen nicht eingehalten werden. Die Sichten zwischen den Sensorknoten können z. B. durch Hindernisse beeinträchtigt oder die Funksignale durch massive Stahlkonstrukte beeinflusst werden. Darüber hinaus können Personen- oder Materialdurchgänge während der Funkmessung nicht ausgeschlossen werden. Da diese Störeinflüsse und auch beliebige Antennenkonstellation nicht modellierbar sind, werden die Funkdistanzen unabhängig von jeglichen Vorinformationen betrachtet, um so eine allgemeingültigere Strategie zur Datenfilterung für die Innenraumanwendung ableiten zu können. Die Untersuchungen werden innerhalb eines Versuchsfeldes vorgenommen, welches durch die örtlichen Gegebenheiten der Qualitätskontrolle schienengebundener Fahrzeuge gekennzeichnet ist und auch in Kapitel 5.1.2 zur Anwendung kommt. Die Montagegestellen der Anker und insgesamt 86 MK-Positionen werden in Abbildung 3.25 dargestellt, wobei lediglich auf die Parallelität der x - y -Ebenen beider Sensorknotentypen geachtet wurde.

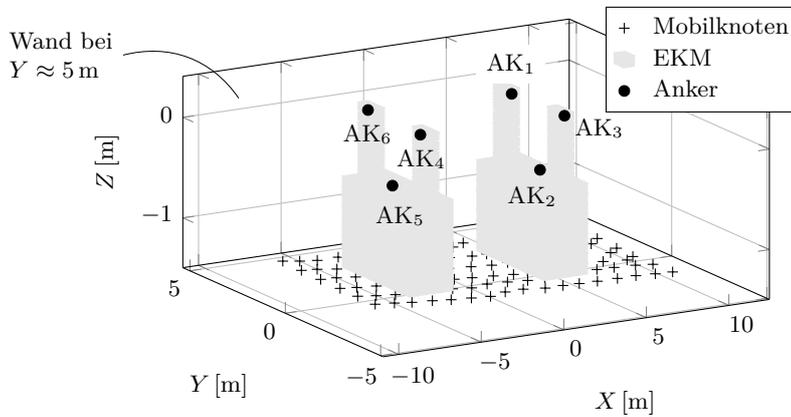


Abb. 3.25: Versuchsfeld für die Innenraumanwendung

Auf jeder MK-Positionen wurden die Funkdistanzen F_{ijk} und korrespondierende Strecken S_{jk} zu den Ankern bestimmt. In Abhängigkeit zur jeweiligen MK-Position sind freie Sichten zwischen den Sensorknoten nicht immer zu gewährleisten und die Antennenkonstellation unterliegt keinen Zwängen. Des Weiteren wurden für jedes k im Hinblick auf die praxisnahe Anwendung kurze Messzeiten von 30 s durchgeführt. Die aufgezeichneten Funkdaten wurden von Ausreißern befreit und die repräsentativen F_{jk} mit den Gleichungen 3.13 bestimmt. Weiterhin wurden die Differenzen

$$\Delta S_{jk} = F_{jk} - S_{jk} \quad (k = 1 \dots 86, j = 1 \dots 6) \quad (3.15)$$

zu den Vergleichsstrecken gebildet. Dementsprechend stehen insgesamt 516 Differenzen zur weiteren Analyse bereit, welche in Analogie zur Freifeldanwendung anhand des $\Delta \bar{S}$, $RMS_{\Delta S}$ sowie der $s_{\Delta S}$ genauer betrachtet werden. Zusätzlich wird in Tabelle 3.7 die minimale und maximale Streckendifferenz ($MIN_{\Delta S}$, $MAX_{\Delta S}$) angegeben. Die Berechnungsergebnisse enthalten damit sowohl standpunktabhängige Einflüsse, welche sich auf alle Funkmessungen auswirken, als auch einzelne ankerbezogene Messabweichungen, die z. B. durch die Sichtbedingungen verursacht werden. Dieser Sachverhalt wird besonders dadurch hervorgehoben, dass der Minimum-Filter im Mittel die geringsten Differenzen zu den Vergleichsstrecken aufweist sowie die kleinsten

Standardabweichungen generiert. Zudem ist die Spannweite zwischen den Extrema $MIN_{\Delta S}$ und $MAX_{\Delta S}$ am geringsten.

Grundsätzlich lässt sich dadurch auf eine Systematik schließen, welche durch zu lange Funkdistanzen gekennzeichnet ist. Besonders in den Außenbereichen des Testfeldes, wo freie Sichten zwischen den Sensorknoten teilweise nicht möglich sind, erreichen die Funksignale nur auf indirektem Weg die Anker. Vor allem Brechungen oder Reflexionen an der EKM und massiven Wand (vgl. Abb. 3.25) führen dann zu größeren Funkdistanzen. Wie beschrieben wurde, liefert der Minimum-Filter in diesem Zusammenhang zwar die geeignetsten Lösungen, aber als allgemeine Filtermethode ist das Verfahren kritisch zu betrachten. Trotz der Ausreißereliminierung sind die zufälligen Messabweichungen bei der Minimumbildung gänzlich enthalten. Robuste Schätzverfahren wie der Median reduzieren hingegen die zufälligen Anteile. Für die Funkdistanzfilterung soll aus diesem Grund ein robusterer Ansatz gewählt werden, welcher die Eigenschaften der Funkdistanzmessungen im Versuchsfeld berücksichtigt und allgemeingültiger anwendbar ist.

Tab. 3.7: Ergebnisse der Funkdistanzfilterung im Innenraum

Filter	$\Delta\bar{S}$ [m]	$RMS_{\Delta S}$ [m]	$s_{\Delta S}$ [m]	$MIN_{\Delta S}$ [m]	$MAX_{\Delta S}$ [m]
Median	0,717	1,175	0,932	-1,64	5,37
arith. Mittel	0,718	1,128	0,871	-1,43	5,14
Minimum	-0,033	0,735	0,735	-2,85	3,29
Mode	0,442	0,963	0,856	-1,98	5,05
ModeAEO	0,730	1,226	0,986	-2,33	5,33
Quantil	0,301	0,843	0,788	-2,85	3,60

Um einen visuellen Eindruck zur Verteilung der Streckendifferenzen zu erlangen, wird die Häufigkeit der ΔS für verschiedene Filterverfahren in den Histogrammen in Abbildung 3.26 aufgezeigt. Dabei wurden Streckendifferenzen mit Intervallen von 0,1 m zur Bildung einer Klasse zusammengefasst. Als Gegenüberstellung zum Minimum-Filter wird der Median mit einem Buchpunkt von 50 % als robuster Schätzer gewählt (Caspary 2013). Im Allgemeinen wird aus den Teilabbildungen deutlich, dass es sich um nicht normalverteilte Messungen handelt. Zudem wird besonders beim Median die geschilderte Systematik in den Funkdistanzen sichtbar. Die

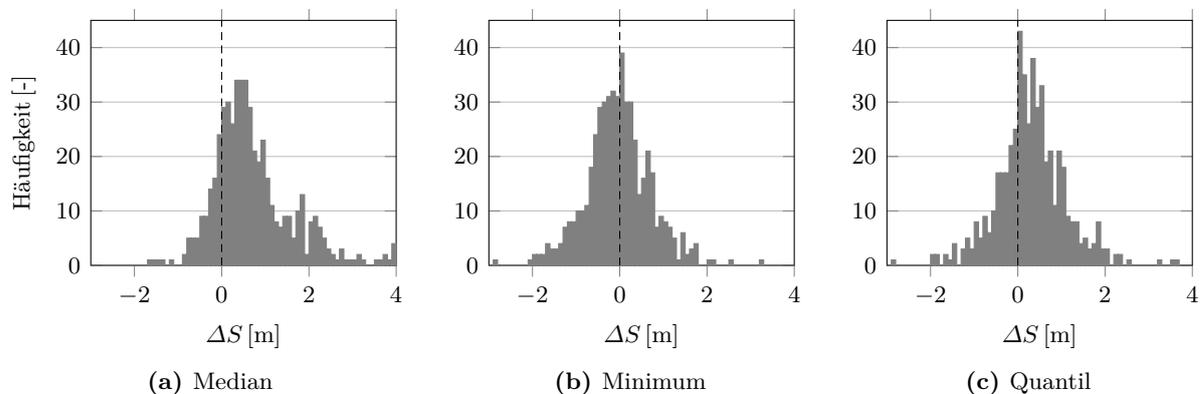


Abb. 3.26: Histogramme nach der Distanzfilterung: die Beschriftung der Ordinate entspricht für alle Teilabbildung derjenigen aus Abbildung 3.26a

Streckendifferenzen liegen mit einer größeren Häufung im positiven Bereich der Abszisse. Das Histogramm zum Minimum-Filter zeigt deutlich zentriertere Daten um $\Delta S = 0$ m, wobei im negativen Bereich der Abszisse eine größere Anzahl an Differenzen feststellbar ist. Die Kombination beider Filter vereinheitlicht im Idealfall die robuste Datenfilterung und die Zentrierung der Messdaten.

Anstelle der Minimumbildung kann in diesem Zusammenhang ein niedriges p -Quantil ($0 \leq p \leq 1$) zum Einsatz kommen. Generell wird dabei der Ansatz verfolgt, dass bei einer Messreihe mit n Elementen $100p$ Prozent der Daten links vom resultierenden Wert liegen, bzw. $100(1 - p)$ Prozent rechts davon (Müller und Denecke 2013). Die Elemente der Messreihe müssen dazu in aufsteigender Reihenfolge geordnet werden, wodurch mit $p_{med} = 0,5$ der Median beschrieben werden kann. Bezüglich der Filterung von Funkdistanzen F_{ijk} kann das repräsentative F_{jk} mit dem p -Quantil wie folgt berechnet werden:

$$F_{jk} = \begin{cases} F_{\lceil np \rceil jk} & \text{für: } np \text{ nicht ganzzahlig} \\ \frac{1}{2} (F_{(np)jk} + F_{(np+1)jk}) & \text{für: } np \text{ ganzzahlig} \end{cases} \quad (3.16)$$

Der Klammerausdruck des Index np im nicht ganzzahligen Fall symbolisiert dabei das Aufrunden zum nächstgrößeren ganzzahligen i . Zur Bestimmung eines geeigneten p -Quantils werden die Standardabweichungen s_{jk} separat für jeden Anker der entsprechenden MK-Position berechnet. Zusätzlich wird die Präzision ankerweise nach Gleichung 3.12 bestimmt, wobei als Näherung für die benötigte Distanz der Median der F_{ijk} zur Anwendung kommt. Wird von freien Sichten zwischen den Sensorknoten ausgegangen, ist die Präzision des Messsystems theoretisch erreichbar ($s_{jk} \leq PCS$). Dementsprechend sollte nach Kapitel 3.2.2 der ModeAEO-Filter angewendet werden. Da trotz der errechneten Standardabweichungen nicht von idealisierten Messbedingungen ausgegangen werden kann und die Ergebnisse des Medians nahe am ModeAEO-Filter liegen, wird der Median an dieser Stelle bevorzugt. Für Standardabweichungen $s_{jk} > PCS$ wird ein niedrigeres p -Quantil ($p < p_{med}$) verwendet. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass die Beobachtungen durch Reflexionen, Beugungen oder Brechungen beeinflusst werden und resultierende Funkdistanzen tendenziell zu lang sind. Die ankerspezifische Standardabweichung wird aus diesem Grund in Relation zur berechneten Präzision gesetzt (Gl. 3.17).

$$p = \begin{cases} p_{med} & \text{für: } s_{jk} \leq PCS \\ \frac{PCS}{s_{jk}} p_{med} & \text{für: } s_{jk} > PCS \end{cases} \quad (3.17)$$

Für $s_{jk} > PCS$ und großen Differenzen zwischen beiden Werten wird das Ergebnis des p -Quantils zunehmend in Richtung des Minimums verschoben. Dabei wird durch den Faktor p_{med} eine Skalierung zwischen $0 < p < p_{med}$ erreicht, wodurch das Minimum und der Median jedoch nicht erreicht werden können. Das aus Gleichung 3.17 bestimmte p wird zur Berechnung des F_{jk} in Gleichung 3.16 eingesetzt. Zur besseren Vergleichbarkeit gegenüber allen weiteren Filtermethoden wurden die Ergebnisse bereits in Tabelle 3.7 und Abbildung 3.26 aufgeführt.

Aus Tabelle 3.7 wird ersichtlich, dass die Standardabweichung $s_{\Delta S}$ und die Spannweite zwischen der minimalen und maximalen Streckendifferenz mit dem Minimum-Filter zu vergleichen ist. Gegenüber den verbleibenden Filtern können durchweg bessere Ergebnisse erzielt werden. Zudem geht im Vergleich zum Median eine stärkere Zentrierung der Streckendifferenzen um $\Delta S = 0$ m aus der Abbildung 3.26c hervor. Darüber hinaus wird bei diesem Wert auch die größte Häufigkeit

erreicht. Bei der Verwendung des p -Quantils liegen die Streckendifferenzen trotzdem mit einer größeren Häufung im positiven Bereich. Generell könnte diese Asymmetrie durch eine empirisch ermittelte Konstante anstelle von p_{med} in Gleichung 3.17 korrigiert werden, welche dann einen Kennwert für die jeweilige Messumgebung symbolisiert. Als Anwendung auf die Versuchsfelddaten entspräche dies einem kleineren Zahlenwert als p_{med} .

Für die Anwendung der Datenfilterung soll jedoch von diesem Vorgehen abgesehen werden, um eine allgemeingültigere Betrachtungsweise zu gewährleisten. Die Verwendung des p -Quantils wird aus Gründen der Robustheit gegenüber dem Minimum-Filter bevorzugt und in den weiteren Untersuchungen zur Datenfilterung für den Innenraum verwendet.

3.3 Funksystem OpenBeacon

Das OpenBeacon-System nutzt aktive RFID-Sensoren zum Datenaustausch zwischen den Netzwerkknoten, welche in Abbildung 3.27 dargestellt werden. Dabei arbeitet das System im ISM-Band mit einer Frequenz von 2,45 GHz. Als wesentlicher Unterschied zu passiven Sensoren sind die weit aus größeren Reichweiten (BNA 2015) und das verwendete Frequenzband zu sehen. Ein Mobilknoten (OpenBeacon-Reader) kann laut Herstellerangaben einen Bereich von ca. 8000 m² abdecken. Passive RFID-Systeme nutzen in der Regel LF- oder HF-Frequenzbereiche (Hightower u. a. 2000, Ni u. a. 2004, Yamashita u. a. 2008) und sind meist auf einem Empfangsbereich von 15 m begrenzt (Finkenzeller 2015).

Bedingt durch die größere Betriebsfrequenz müssen die aktiven Sensorknoten jedoch durch zusätzliche Stromquellen betrieben werden (Menz 2005). Für das OpenBeacon-System werden die Ankerknoten durch eine Knopfzelle CR2032 mit Strom versorgt und der mobile Knoten durch den USB-Port gespeist. In der Grundausführung kann eine beliebig große Anzahl von Ankerknoten in Kombination mit mindestens einem Mobilknoten eingesetzt werden.

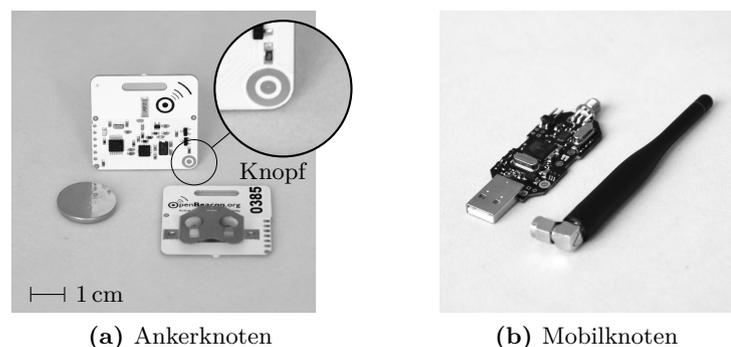


Abb. 3.27: Sensorknoten des OpenBeacon-Systems

Im Gegensatz zu vielen kommerziellen Systemen auf Basis von RFID sind sämtliche Ressourcen des OpenBeacon-Projekts quelloffen (Open Source). Dies beinhaltet die Software, Firmware sowie die Stücklisten und Schaltpläne, welche unter einer freien Lizenz (General Public License, GPL) zugänglich sind. Durch diesen Umstand können je nach Anwendungsfall Speziallösungen aus dem Basispaket entwickelt und die Sensorknoten um zusätzliche Komponenten erweitert werden. Als Beispiel hierfür kann das Projekt Sputnik angeführt werden, auf dessen Basis das Bewegungsverhalten von Personen analysiert wurde (Rybak 2007, Wickström 2013). Neben den aktiven

Ankerknoten kommt für die direkten Identifizierungsverfahren der in Abbildung 3.27b dargestellte Mobilknoten zum Einsatz. Mithilfe eines Treibers werden die empfangenen Daten durch eine virtuelle serielle Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Die schnittstellenseitige Parametrisierung des Systems ist hingegen nicht vorgesehen. Alle nötigen Modifikationen der Standarddatenausgabe müssen in der Firmware berücksichtigt werden. Dazu ist der Flash-Speicher des Mobilknotens neu zu beschreiben.

Bei der Datenübertragung empfängt der Mobilknoten die von den Ankerknoten ausgesendete Trägerwelle, auf welcher zusätzliche Messinformationen aufmoduliert werden. Die übertragenen Messinformationen enthalten sowohl eine eindeutige Anker-ID als auch die gesendete Signalstärke. Darüber hinaus kann ein zusätzlicher Statusparameter (Flag) beim Auslösen eines Knopfdrucks am Anker (Abb. 3.27a) übermittelt werden. Das Netzwerkkonzept wird für eine Anzahl von n Anker schematisch in Abbildung 3.28 dargestellt.

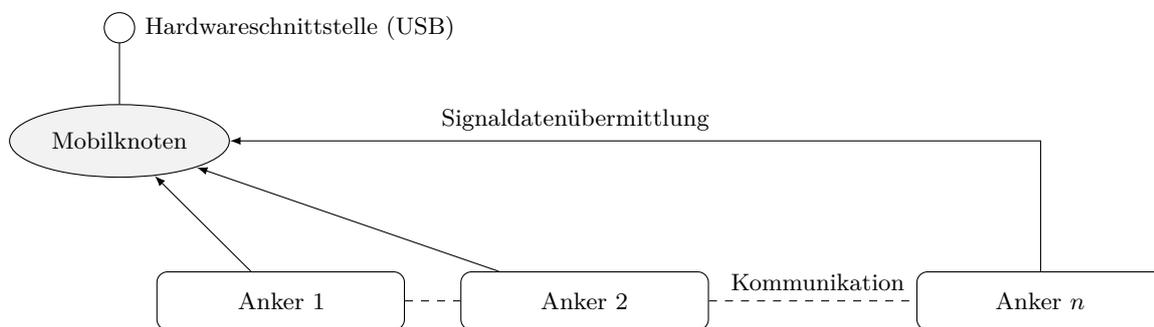


Abb. 3.28: Netzwerkkonzept des OpenBeacon-Systems

Während der Datenübertragung zwischen dem Mobilknoten und einem Anker wird die Sendeleistung der Ankerantenne zyklisch variiert und das Datenpaket mit einem ganzzahligen Signalstärkeindikator versehen. Der Indikator wird am Mobilknoten empfangen und kann im umgekehrten Sinne einer Antennenleistung zugeordnet werden. In Abhängigkeit zum Abstand zwischen den Sensorknoten können bedingt durch eine zu niedrige Sendeleistung folglich Paketfehlraten auftreten, welche Rückschlüsse auf die entsprechende Distanz zulassen (Goldberg 2014).

Für die Anwendung des Systems in Kapitel 4.3.1 sind vor allem die eindeutige Identifizierung der Anker und die Möglichkeit zur Übermittlung eines Statusparameters von Bedeutung. Neben dem Signalstärkeindikator ist der Statusparameter des Knopfdrucks in jedem Datenpaket enthalten.

4 Direkte Punktidentifizierung

Im Folgenden sollen die in Kapitel 3 beschriebenen Systemparameter zur direkten Identifizierung von Messpunkten verwendet werden. Bei der indirekten Identifizierungsvariante erfolgt eine weitere Unterscheidung in intensitätsbasierende Verfahren und taktile Messungen codierter Reflektorhalterungen. Bei beiden Anwendungen kommt das Leica TDRA6000 zum Einsatz, wobei im Fall der taktile Messung als zusätzliche Sensorik das OpenBeacon-System verwendet wird.

Besonders bei der intensitätsbasierenden Punktidentifizierung sind die Parameter und Eigenschaften des eingesetzten Messsystems von Bedeutung. Die offene Instrumentenschnittstelle und der Abgriff von Signalintensitäten bildet einen Grundstein für die Identifizierung. Zudem beeinflussen Instrumenteneigenschaften wie die distanzabhängige Laserspotgröße das Gestaltungskonzept codierter Zielmarken. Im Rahmen der Vorbetrachtungen wurde der Einfluss mehrerer Systemparameter im Kontext zweier Codierungsvarianten untersucht. In der Folge konnte veranschaulicht werden, dass die Codierung von Messstellen durch verschieden stark reflektierende Codebereiche umsetzbar ist. Die zugrunde liegenden Parameter und Verfügungen hinsichtlich der Untersuchungsergebnisse werden in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tab. 4.1: Ausgangsparameter zur intensitätsbasierenden Punktidentifizierung

Parameter	Bereich/Wert
Maximaler Untersuchungs-/Neigungsbereich	$D \leq 50 \text{ m}, \theta = \psi = \pm 60^\circ$
Minimale Winkelgeschwindigkeit	$\omega_{min} = 0,177 \text{ mrad s}^{-1}$
Skalierungsfaktor für die Winkelgeschwindigkeit	$m_\omega > 1$
Spothöhe S_H und Spotbreite S_B	Interpolierbar aus den Gleichungen 3.1
Feldgröße für den maximalen Untersuchungsbereich	$l \approx 23 \text{ mm}$

Im selben Kapitel wurden auch die Begriffe der Intensitätskalibrierung, Feldgröße und des Codebits erläutert. Zudem erfolgte die Definition der Nulllagenposition einer Zielmarke. Im Rahmen der weiteren Ausführungen zu sektorförmig und ringförmig codierten Zielmarken werden diese Begriffe übernommen. Beide Codierungsvarianten werden anhand einer 2-Bit-Codierung behandelt. Als Wertebereich des Codes stehen somit vier Punktkennungen zur Verfügung. Dieser Wertebereich ist ausreichend, wenn zu den identifizierten Messpunkten korrespondierende Koordinaten eines Bezugssystems zuordenbar sind. Mit einer vermittelnden Ausgleichung können dann z. B. die Parameter einer Helmert-Transformation bestimmt werden und alle Folgemessungen, so sie direkt zu identifizieren sind, als einfacher Ist-Soll-Vergleich mit einer ID verknüpft werden. Dabei werden zumindest teilautomatisierte Messabläufe vorausgesetzt.

4.1 Punktcodeermittlung für ringförmig codierte Zielmarken

Wird das photogrammetrische Codierungsprinzip aufgegriffen und mit Signalintensitätsmessungen kombiniert, versprechen besonders ringförmige Codierungstechniken einen guten Ausgangspunkt

(Ullrich und Möser 2016). Durch die konzentrische Anordnung der Coderinge kann eine allgemeine Decodierungsstrategie unabhängig von der Zielzeichenneigung oder eines genau definierten Startbits entwickelt werden. Die Anordnung der Coderinge erfolgt um einen zentralen Messbereich, welcher zur Bestimmung der Punktkoordinate und zur Intensitätskalibrierung dient (Abb. 4.1). Dabei wird der zentrale Messpunkt mit M bezeichnet und die Ausdehnung des Bereichs durch den Radius r_m gekennzeichnet. Je nachdem welche Kennung zu realisieren ist, werden die jeweiligen Coderinge C_k ($k = 0 \dots 2$) schwarz beschichtet oder sind als retroreflektierende Flächen ausgebildet. Die Ringbreiten eines korrespondierenden Coderinges werden in diesem Zusammenhang mit b_k bezeichnet. Lediglich der innerste Ring C_0 stellt eine Ausnahme dar. Er ist stets schwarz beschichtet und wird deshalb auch als Prüfring verwendet. Bei den übrigen Coderinge symbolisiert der Ring C_1 das Least Significant Bit (LSB) und der äußere Ring C_2 das Most Significant Bit (MSB).

Die Dimensionierung des Messbereichs sowie der Coderinge muss im Hinblick auf die Signalintensitätsmessungen so gewählt werden, dass im Zielmarkenzentrum die Intensitätskalibrierung vollzogen werden kann und die Coderinge selbst im Fall einer starken Zielmarkenneigung anhand der Intensitäten voneinander abgrenzbar sind. Anhand der Feldgröße l sind diese Bedingungen für $r_m = l/2$ und $b_k = l$ erfüllt. Da die Coderinge in theoretischer Betrachtung identisch dimensioniert sind, wird für die Breitenangabe in abstrahierter Form $b = l$ verwendet.

Zu Beginn des Messprozesses wird der Punkt M angezielt und die Koordinate im IR-Modus bestimmt. Die zugehörige Distanz wird mit D angeführt. Für die darauf folgende Intensitätskalibrierung wird der RL-Modus gewählt und die Intensität kalibriert. Synchron zur kontinuierlich ausgeführten Intensitätsmessung wird das Instrument in eine gleichförmige Bewegung versetzt. Dabei wird der Zahlenwert einer definierten Winkelgeschwindigkeit ω_I über die GeoCOM-Schnittstelle an das Instrument übermittelt. Infolge der Codeausbildung in Ringform besteht indes keinerlei Anforderung an die Abtastrichtung. Sowohl der horizontale als auch der vertikale Piezomotor könnte zur Bewegungssteuerung eingesetzt werden. Für die noch folgenden Untersuchungen wird eine gleichförmige Bewegung am Horizontalantrieb initiiert, welche in Abbildung 4.1 rot hervorgehoben wird. Bei dieser Bewegung gleitet das Zielkreuz des Messinstruments als bildliche Vorstellung beginnend bei M über die Coderinge und bestimmt die Wertigkeit jedes einzelnen Bits durch die Abtastung der Intensität. Der Aufzeichnungsprozess und auch die Instrumentenbewegung endet am äußeren Rand des MSB nach einer Zeit t_{max} .

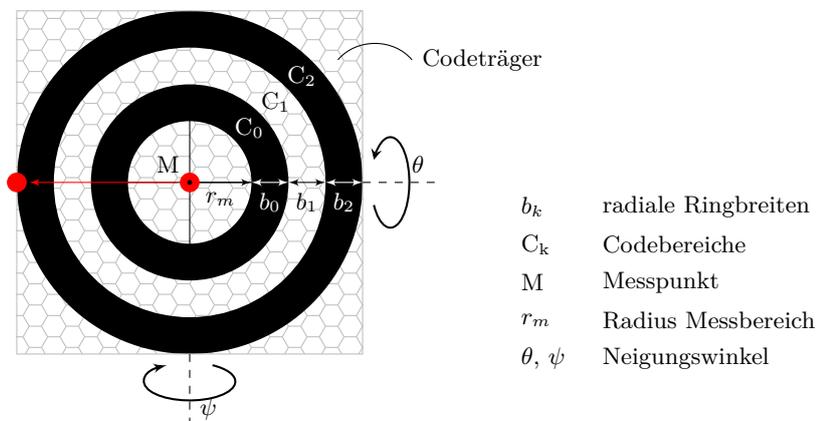


Abb. 4.1: Codierung in Ringform mit Prüfring

Als Steuergrößen des beschriebenen Messablaufes müssen die Parameter ω_I und t_{max} vor dem Beginn der Intensitätsaufzeichnung bestimmt werden. Die Winkelgeschwindigkeit wird durch die Forderung einer vollständigen Codeerfassung bestimmt. In Analogie zu den grundlegenden Betrachtungen der Abtastgeschwindigkeit soll in einer Sekunde kein größerer Bereich als die Feldgröße l bzw. die Ringbreite b abgetastet werden. Für Zielmarken in Nulllage liegt dadurch mindestens eine Intensitätsmessung nahe der Mitte des Coderings und der Winkel, welcher in einer Sekunde durch das Instrumentenzielkreuz überschritten werden darf, ergibt sich aus dem Arkustangens des Quotienten zwischen b und D .

Für die geneigte Zielmarke müssen beide Einflussgrößen jedoch differenzierter betrachtet werden. Die Feldgröße wurde für den maximalen Neigungsfall empirisch ermittelt, wodurch in Abhängigkeit zur Codierung maximale oder minimale Signalintensitäten messbar sind. Besteht das Ziel, auch für Maximalneigungen mindestens eine Intensitätsmessung nahe der Mitte des Coderings zu erfassen, muss die Winkelgeschwindigkeit für die ungünstigste Messkonstellation, also dem maximalen Neigungsfall, berechnet werden. Anhand einer Orthogonalprojektion der geneigten Zielmarke in die Nulllagenebene lässt sich ein Skalierungsfaktor $\cos(60^\circ) = 0,5$ ermitteln, welcher die projektive Stauchung der Ringbreiten aufgrund der Neigung ausdrückt. Der vom Instrument abzutastende Winkel zur Erfassung eines Codebits ist entsprechend kleiner. Für die daraus resultierende maximal zulässige Winkelgeschwindigkeit

$$\omega_I [\text{rad/s}] = \begin{cases} \omega_{min} & \text{für: } \omega < \omega_{min} \\ \omega & \text{für: } \omega \geq \omega_{min} \end{cases} \quad \text{mit} \quad \omega [\text{rad/s}] = \arctan\left(\frac{b}{2D}\right) \cdot [1/s] \quad (4.1)$$

wurde der Skalierungsfaktor im Term des Arkustangens berücksichtigt. Darüber hinaus wurde ω_{min} in Gleichung 4.1 als Grenzwert für das kleinstmögliche Berechnungsergebnis vorgesehen. Die berechnete Winkelgeschwindigkeit dient im Folgenden zur Bestimmung der maximalen Abtastzeit

$$t_{max} = \arctan\left(\frac{r_m + \sum b_k}{D}\right) \cdot \frac{m_\omega}{\omega_I}, \quad (4.2)$$

welche bei einer Zielmarke in Nulllage erreicht wird. Da die instrumentell ausgeführte Winkelgeschwindigkeit stets kleiner als das an die Instrumentenschnittstelle übermittelte ω_I ist, wurde der Skalierungsfaktor m_ω in die Gleichung eingeführt. Unvollständige Codeerfassungen sollen dadurch vermieden werden.

Nachdem die Steuergrößen berechnet und für die Codeaufzeichnung verwendet wurden, stehen die Intensitätswerte I_i und schnittstellenseitig zugewiesene Zeitstempel $t_i \leq t_{max}$ zur weiteren Analyse zur Verfügung. Befände sich die Zielmarke in Nulllage, könnte die Segmentierung der Coderinge anhand der bekannten Zielzeichendimensionen und Winkelgeschwindigkeit erfolgen. Im geneigten Fall ist der exakte Zusammenhang zwischen den Zeitstempeln und dem Durchstoßpunkt der Zielachse auf der Zielmarkenebene jedoch nicht mehr gegeben. Eine beliebige Zielzeichenneigung führt zur maßstäblichen Stauchung der einzelnen Coderinge (Orthogonalprojektion in die Nulllage). Im Vergleich zur Nulllage werden die Coderinge sinnbildlich bei gleichen Winkelgeschwindigkeiten in kürzerer Zeit überschritten und somit auch das Quantum an Intensitätswerten reduziert. Eine zeitstempelbasierende Segmentierung würde die errechneten Codebereichsgrenzen in diesem Fall überlagernd auf mehrere Coderinge der realen Zielmarke verteilen. Als weitere Folge kann auch das Ende der Intensitätsaufzeichnung nicht klar definiert werden.

Die Relation zwischen der Nulllage und einem geneigten Zustand kann durch die Winkel α und α' beschrieben werden (Abb. 4.2). Unter Anwendung einer Maßstabsmultiplikation kann der Winkel α derart gestaucht oder gestreckt werden, dass der resultierende Winkel α' dem korrespondierenden Zielpunkt für ein geneigtes Zielzeichen entspricht. Mathematisch lässt sich diese Relation durch Trigonometrie mit den Zusammenhängen

$$\Delta D = \sin \theta \cdot c \quad , \quad c'' = \sqrt{c^2 - \Delta D^2} \quad , \quad \frac{c'}{c''} = \frac{D}{D + \Delta D} \quad \text{und} \quad \frac{\alpha}{\alpha'} = \frac{c}{c'} \quad (4.3)$$

herleiten. Der Parameter c entspricht dabei der Strecke zwischen M und dem Ende des Codierings C_2 . Die abgeleiteten Strecken c' und c'' ergeben sich aus dem Zielstrahl zum geneigten Zielzeichen, welcher mit der Zielmarke in Nulllage geschnitten wird (graue Linie in Abb. 4.2). Darüber hinaus wird mit ΔD die erweiterte Horizontalstrecke aufgrund der Zielzeichenneigung bezeichnet. Der skalierte Anzielwinkel α' kann dann durch Einsetzen und Umstellen der Gleichungen 4.3 wie folgt ausgedrückt werden:

$$\alpha' = \frac{D \cdot c''}{c \cdot (D + \Delta D)} \cdot \alpha = \underbrace{\frac{D \cdot \cos \theta}{D + c \cdot \sin \theta}}_m \cdot \alpha \quad (4.4)$$

Der Maßstab m berücksichtigt in diesem Zusammenhang die Distanz, Neigung und die Größe eines Codierungsbereichs. Für maximale Neigungen und Distanzen entspricht $m \approx 0,5$, wobei die Größe des Codebereichs aufgrund der erheblich größeren Distanz kaum ein Gewicht zum Maßstab beiträgt. Ist m bekannt oder durch die Zeitreihenauswertung der Intensitätsdaten extrahierbar, können die gemessenen Intensitätswerte einem Codering zugewiesen und somit ausgewertet werden. Für die Bestimmung des Maßstabes und zur Segmentierung der Coderinge werden in den weiteren Ausführungen zwei Möglichkeiten genauer erläutert. Zum einen die Methode der Korrelation von Referenzsignalen und zum anderen die Prüfringsegmentierung.

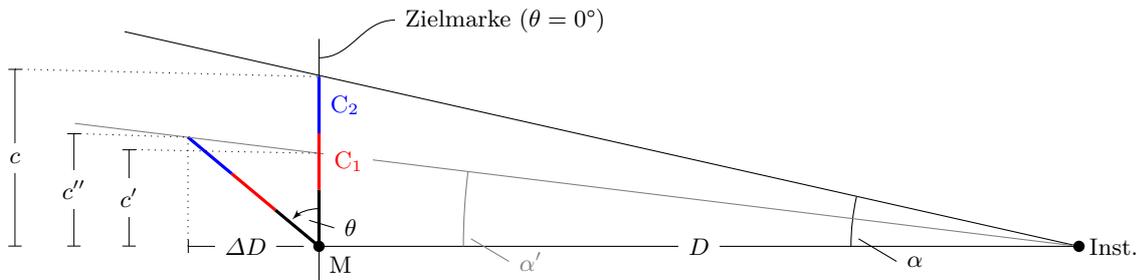


Abb. 4.2: Relationen zwischen der Zielmarke in Nulllage und einem geneigten Zustand

4.1.1 Prüfringsegmentierung

Der Prüfring codierter Zielmarken grenzt direkt an den Messbereich und wird mit C_0 bezeichnet. Die korrespondierende Ringbreite wird mit b_0 angeführt. Mittels dieses invarianten Codebereichs (schwarz) soll ein signifikanter Rückgang der Intensitätswerte direkt im Anschluss an die Punktmessung und des Starts der Intensitätsaufzeichnung bewirkt werden; damit dient er in aller

erster Linie zur Bestimmung des Maßstabes m . Nach der erfolgten Datenerfassung steht eine Intensitätszeitreihe bis zur Zeit t_{max} zur Verfügung, welche in der Analysesoftware verarbeitet wird. Dem Umstand geschuldet, dass die Zielzeichenneigung vor der Messung unbekannt ist, kann der Analyseprozess nach Abbildung 4.3 in drei Phasen gegliedert werden: die Bestimmung des Maßstabes, Segmentierung der Coderinge und Ermittlung der ID.

Die Intensitätswerte im Messbereich um M sind aufgrund der Kalibrierung bei $I = 100\%$ anzusiedeln. Im Prüfring hingegen sollten bei größtmöglicher Spotüberdeckung hinsichtlich der theoretischen Grundlagen Intensitätswerte von 0% erreicht werden. Des Weiteren sind für 40% -ige Messbereichsüberdeckungen im Mittel Signalintensitäten von 50% prognostizierbar (Kap. 3.1.4). Dieser Intensitätswert wird im Folgenden als Prüflintensität I_p des Prüfrings bezeichnet. Zur Extraktion des Prüfrings aus der Messreihe werden die einzelnen Intensitätswerte I_i der Reihe nach auf Gleichheit zu I_p geprüft. Der erstmalig auftretende Intensitätswert $I_i \leq I_p$ ist im Allgemeinen jedoch nicht identisch zu I_p . Auf Grund dessen wird zwischen I_i und I_{i-1} mit dem Zielwert I_p interpoliert und der zugehörige Zeitstempel t_p berechnet. Als bildliche Betrachtung befindet sich das Strichkreuz des Tachymeters zu diesem Zeitpunkt kurz nach der Grenze zwischen dem Mess- und Prüfringbereich. Die Spotüberdeckung beträgt die genannten 40% , bzw. 60% des Laserspots werden auf dem schwarzen Prüfring abgebildet. Der geometrische Fehlbetrag

$$\Delta r = 0,1 \cdot \frac{S_B}{2} \tag{4.5}$$

lässt sich demnach als ein Anteil der interpolierten Ellipsenhalbachse des Laserspots für die gemessene Distanz verstehen, welcher den Abstand zur Grenze zwischen C_0 und C_1 beschreibt. In diesem Zusammenhang wurde die Spotbreite S_B aufgrund der horizontalen Bewegung um die Stehachse des Instruments gewählt. Für andere Anwendungen ist die Verwendung von S_H in gleicher Weise möglich. Anhand dieser Betrachtungsweise kann der Maßstab

$$m = \frac{t_p}{r_m + \Delta r} \tag{4.6}$$

als Segmentierungsgrundlage und zur Berücksichtigung der Zielmarkenneigung hergeleitet werden. Der Skalierungsfaktor m symbolisiert damit ein Maß dafür, welche Zeitspanne messtechnisch

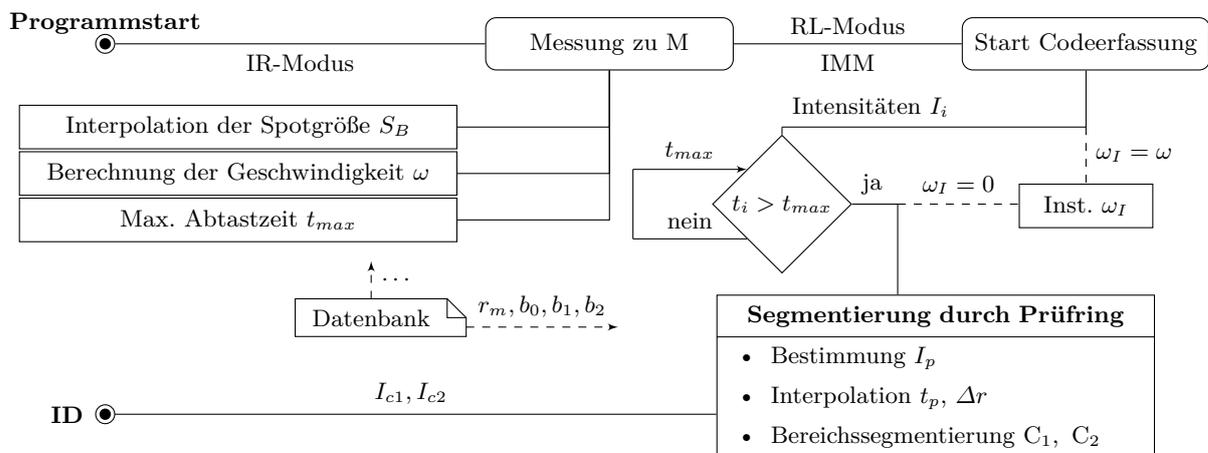


Abb. 4.3: Mess- und Auswerteschema ringförmiger Zielmarken mit Prüflring

erfasst wurde, um eine definierte Strecke des Zielzeichens mit einer gegebenen Winkelgeschwindigkeit zurückzulegen. Da t_{max} vor der Messung lediglich geschätzt wurde, kann ein verbesserter Wert direkt nach der Prüfringfassung ermittelt werden:

$$t_{max} = m \cdot \left(r_m + \sum b_k \right) . \quad (4.7)$$

In Analogie zu diesem Vorgehen lassen sich die Zeitintervalle für die Codierung C_k im Postprocessing anhand der formalen Zusammenhänge aus Gleichungskomplex 4.8 ermitteln. Der enthaltene Index $k = 0$ symbolisiert dabei den Prüfring und die übrigen Indizes den korrespondierenden Codierung.

$$C_k \begin{cases} k = 0, & \text{für } t_p \leq t_i < t_{c0} = m \cdot (r_m + b_0) \\ k = 1, & \text{für } t_{c0} \leq t_i < t_{c1} = m \cdot (r_m + b_0 + b_1) \\ k = 2, & \text{für } t_{c1} \leq t_i < t_{c2} = m \cdot (r_m + b_0 + b_1 + b_2) \end{cases} \quad (4.8)$$

Darüber hinaus werden die Codierungen für unbekannte Zielzeichenneigungen mit einer unterschiedlich großen Anzahl an Intensitätsmessungen abgedeckt. Zur Extraktion des Punktcodes aus C_1 und C_2 sind für jeden Bereich indikative Intensitätswerte I_{c1} und I_{c2} zu bestimmen. Dabei wird von der Vorstellung ausgegangen, dass die maximale Spotüberdeckung in der geometrischen Mitte jedes C_k erreicht wird. Dementsprechend sind diejenigen Intensitätswerte ausschlaggebend, welche als Zeitstempel den Mittelpunkt des Intervalls aufweisen. Der genaue Zeitstempel ist auch in diesem Fall messtechnisch oft nicht erfasst. Als Folge kommen lineare Interpolationen zum Einsatz, die I_{c1} und I_{c2} für die Zeitstempel

$$t_{c0} + \frac{1}{2}(t_{c1} - t_{c0}) \quad \text{und} \quad t_{c1} + \frac{1}{2}(t_{c2} - t_{c1}) \quad (4.9)$$

ermitteln. Durch die Verwendung eines Schwellwertes werden den Intensitäten eindeutige Bitwertigkeiten a_1 für I_{c1} und a_2 für I_{c2} zugeordnet. Ist der jeweilige indikative Intensitätswert kleiner als 50 %, wird die Wertigkeit $a = 0$ zugeordnet. Es liegt eine schwarze Fläche vor. Im umgekehrten Fall, der Messung auf Reflexfolie, beträgt $a = 1$. Die gesuchte Kennung ergibt sich abschließend durch die Bildung der Dualzahl

$$ID = [a_2 a_1]_2 . \quad (4.10)$$

Das beschriebene Mess- und Auswerteverfahren lässt sich beliebig auf einen größeren Wertebereich erweitern. Die Validierung der Verfahrensweise wird für eine 2-Bit-Codierung im Zusammenhang mit den im Folgenden vorgestellten Methoden der Segmentierung durch Referenzsignale im Kapitel 4.1.3 vorgenommen.

4.1.2 Segmentierung durch Referenzsignale

Zur Reduzierung der Zielmarkendimensionen wird im Folgenden ein Ansatz verfolgt, welcher die Ermittlung der Zielmarken-ID ohne Prüfring ermöglicht. Der benötigte Maßstab zur Decodierung kann in diesem Zusammenhang nicht messtechnisch erfasst werden. Aus diesem Grund wird eine mathematische Bestimmung anhand von Korrelationsanalysen verfolgt. Die Ausgangsdaten entsprechen dem Verfahren der Prüfringmethode, d. h. die Koordinate von Messpunkt M

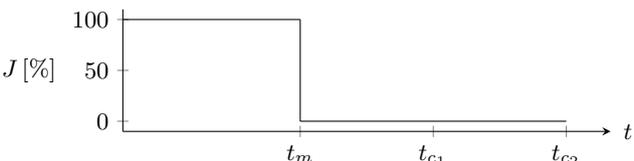
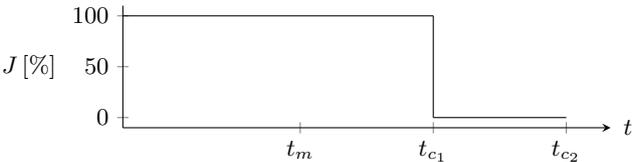
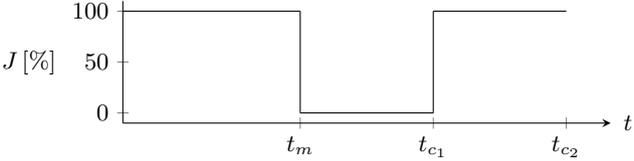
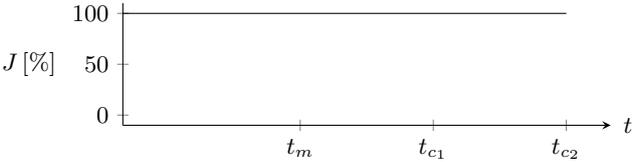
wurde erfasst, die zugehörige Distanz D ist bekannt und die maximale Abtastzeit t_{max} sowie die Winkelgeschwindigkeit ω_I wurden ermittelt. Darüber hinaus entspricht das Verfahren der Intensitätsmessungen ebenfalls den Ausführungen nach Kapitel 4.1.1:

- Intensitätskalibrierung im Messbereich,
- Steuerung des Horizontalantriebs mit ω_I ,
- kontinuierliche Aufzeichnung der Intensitäten I_i mit den Zeitstempeln t_i sowie
- Stopp der Messung bei t_{max} (Gl. 4.2 für $k = 1, 2$).

Zugleich lassen sich aus den Ausgangsdaten und der Intensitätsmessrate $f \approx 3$ Hz synthetische Intensitätsdaten generieren. Für die 2-Bit-Codierung werden die möglichen Varianten in Tabelle 4.2 zusammengestellt, wobei zunächst von Zielmarken in Nulllage ausgegangen wird. Die Signale werden im Folgenden als Referenzsignale bezeichnet und durch die Zeitstempel t_i und deren zugehörige Signalintensitäten J_i für eine Anzahl von n Messwerten realisiert. Die verstrichene Zeit bis zur vollständigen Abtastung des Messbereichs wird in Tabelle 4.2 mit t_m bezeichnet und das Ende der Codebereiche durch die Zeitstempel t_{c1} sowie $t_{c2} = t_{max}$ symbolisiert. Die enthaltenen Indizes der Signalbezeichner entsprechen der ID in Darstellung als Dualzahl. Schwarz beschichtete Coderinge erhalten die Intensität $J_i = 0\%$ und retroreflektierende Codebereiche den Maximalwert von $J_i = 100\%$. Die Generierung der vier Referenzsignale erfolgt nach der Koordinatenerfassung und in Abhängigkeit zur berechneten Zeit t_{max} .

Zur Bestimmung der Zielzeichenkennung werden die synthetischen Daten mit der Intensitätsmessreihe verglichen. Aus der Ähnlichkeit zwischen je einem Referenzsignal und den Intensitätsdaten

Tab. 4.2: Referenzsignale für ringförmig codierte Zielmarken in Nulllage

Beschreibung	Referenzsignal
Rechtecksignal R ₀₀ : Die Signalintensitäten entsprechen für den Messbereich dem Maximalwert und für die Ringelemente einer Intensität $J = 0\%$. Beide Ringelemente sind entsprechend schwarz codiert. Die ableitbare Zielzeichen-ID beträgt $[00]_2$ (dezimal: ID = 0).	
Rechtecksignal R ₀₁ : Die Signalintensitäten entsprechen für den Messbereich dem Maximalwert. Das erste Ringelement wird durch Reflexfolie realisiert ($J = 100\%$) und das zweite Element ist schwarz beschichtet ($J = 0\%$). Als Zielzeichen-ID ergibt sich $[01]_2$ (dezimal: ID = 1).	
Rechtecksignal R ₁₀ : Die Signalintensitäten entsprechen für den Messbereich dem Maximalwert. Das erste Ringelement ist schwarz beschichtet ($J = 0\%$) und das zweite Element liefert die Maximalintensität ($J = 100\%$). Als Zielzeichen-ID ergibt sich damit $[10]_2$ (dezimal: ID = 2).	
Lineares Referenzsignal R ₁₁ : Die Signalintensitäten entsprechen sowohl für die Coderinge als auch für die Reflexionsfläche in der Mitte der Zielmarke einem Wert von $J = 100\%$. Es handelt sich folglich um eine unbearbeitete Reflexfolie ohne schwarze Ringelemente. Die ableitbare Zielzeichen-ID beträgt $[11]_2$ (dezimal: ID = 3).	

lässt sich eine gegenseitige Abhängigkeit ableiten. Im Allgemeinen kann als Maß für die stochastische Abhängigkeit zweier Zufallsvariablen der Korrelationskoeffizient ρ herangezogen werden. Für Werte $\rho \rightarrow 0$ ist von nicht korrelierten Eingangsdaten auszugehen und es besteht keine Abhängigkeit zwischen den Daten. Dementsprechend wird für $\rho \rightarrow \pm 1$ von einer starken bis sehr starken Korrelation ausgegangen, wobei für negative Werte ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang besteht (Niemeier 2008). Zur Berechnung der Korrelation zwischen den Intensitätsdaten der Referenzsignale J_i und den Messdaten I_i wird der empirische Korrelationskoeffizient

$$\rho_{IJ} = \frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})(J_i - \bar{J})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2 (J_i - \bar{J})^2}} \quad \text{mit} \quad \bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad , \quad \bar{J} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J_i \quad (4.11)$$

nach Möser (2012) in modifizierter Form hinsichtlich der Eingangsparameter verwendet. Die Notation mit dem griechischen Symbol ρ anstelle des meist üblichen R wird an dieser Stelle vorgezogen, um die Unterscheidung zur Bezeichnung der Referenzsignale kenntlich zu machen. In der Anwendung wird für jedes Referenzsignal ein Korrelationskoeffizient in Kombination mit der Intensitätsmessreihe bestimmt. Der maximale Korrelationskoeffizient $\rho_{IJ} \rightarrow +1$ hebt ein Referenzsignal aus den vier Möglichkeiten hervor und führt somit zur zugehörigen ID des Messpunktes.

Dieser grundlegende Ansatz setzt allerdings voraus, dass die Intensitäten I_i und J_i korrespondieren, d. h. zum identischen Zeitpunkt t_i erfasst/berechnet wurden und unter gleichen Messbedingungen zur Verfügung stehen. Insbesondere die unbekannte Zielzeichenneigung widerspricht der letztgenannten Voraussetzung. Zudem werden die Referenzsignale für Zielmarken in Nulllage generiert, wodurch die J_i per Definition immer im Zielmarkenbereich liegen. Im Gegensatz dazu kann ein Teil der Intensitäten I_i außerhalb der Zielmarke liegen, da die Zeit t_{max} in Relation zur Nulllagenposition berechnet wird und ohne Prüfkreis während der Messung nicht präzisiert werden kann. Zugleich wird die Anzahl an Intensitätswerten je Codering für starke Neigungen reduziert. Die Korrelation beider Signale liefert in dieser Konstellation keine verlässlichen Ergebnisse.

Zur Lösung der Problemstellung werden zunächst die Wertepaare (I_i, J_i) gebildet. Dazu sind alle Referenzsignale mit einer Länge von t_{max} zu generieren. Da zum selben Zeitpunkt t_{max} auch die Intensitätsaufzeichnung beendet wird, weisen beide Messreihen das selbe Zeitintervall auf. Die Intensitäten J_i können somit direkt an den schnittstellenseitig zur Verfügung gestellten Zeitstempeln t_i abgegriffen werden, bzw. werden anhand der jeweiligen Modellfunktion aus Tabelle 4.2 zum Zeitpunkt t_i interpoliert. Der Korrelationskoeffizient kann unmittelbar berechnet werden. Um die Zielzeichenneigung und gegebenenfalls abweichende Winkelgeschwindigkeiten zu berücksichtigen, wird die Korrelation für verschiedene Referenzsignallängen wiederholt. Dazu wird das gesamte Signal mit einer reduzierten Länge

$$t_{max_j} = t_{max} - j \cdot 1/f \quad (4.12)$$

erneut generiert. Da der Vorgang in mehreren Durchläufen wiederholt wird, beschreibt j den jeweiligen Iterationsschritt. Der Reduzierungsbetrag wurde zusätzlich an die Intensitätsmessrate gekoppelt. Die Reduzierung der Referenzsignallänge führt folglich nicht zum Verlust von Referenzdaten, sondern bewirkt lediglich eine Stauchung des Signals entlang der Zeitachse. In bildlicher Betrachtungsweise überlagern die Referenzsignale je nach Iterationsstufe nur denjenigen Teil der Intensitätszeitreihe des Zeitintervalls $[t = 0; t_{max_j}]$. In gleicher Weise wie beim bereits

beschriebenen Vorgehen werden die J_i an den Zeitstempeln t_i bis zur Zeit t_{max_j} interpoliert. Intensitäten eines Zeitstempels $t_i > t_{max_j}$ entfallen bei der Auswertung. Des Weiteren erfolgt für jedes j die Neuberechnung von ρ_{IJ_j} . Der iterative Prozess wird solange wiederholt wie der in Gleichung 4.13 angegebene Maßstab Beträge $m_j \geq 0,5$ liefert.

$$m_j = \frac{t_{max_j}}{t_{max}} = 1 - \frac{j}{f \cdot t_{max}} \quad (4.13)$$

Der untere Grenzwert des Maßstabes wurde wie bei der Prüfringmethode als maximale Skalierung einer Ringbreite aufgrund der größtmöglichen Neigung angenommen. Darüber hinaus liefert die Betrachtung der Winkelmessung nach Gleichung 4.4 entsprechende Ergebnisse für maximale Neigungen und Distanzen. Abschließend wird separat für jedes Referenzsignal das Maximum der Korrelationskoeffizienten

$$\rho_{ID} = \max \{ \rho_{IJ_j} \} \quad (4.14)$$

aus der Liste aller ρ_{IJ_j} ermittelt. Insgesamt stehen deshalb vier Korrelationskoeffizienten ρ_{00} , ρ_{01} , ρ_{10} und ρ_{11} zur Festlegung der ID zur Verfügung. Die Indizes der Koeffizienten korrespondieren zu den Kennungen der Referenzsignale. Die gesuchte

$$ID = \text{idx} \{ \max \{ \rho_{ID} \} \} \quad (4.15)$$

wird abschließend anhand des Index der maximalen Korrelation aller Referenzsignale zugewiesen. In gleicher Weise wie bei der Prüfringmethode ist das Verfahren für einen größeren Wertebereich an Codierungen beliebig erweiterbar.

4.1.3 Validierung der Konzepte

Zur Validierung der Mess- und Auswertekonzepte ringförmig codierter Zielmarken wurden die entwickelten Zielmarken im Distanzbereich von $D \approx 50$ m untersucht. Dabei wurden verschiedene Neigungswerte durch einen horizontal und vertikal justierbaren Drehtisch mit Winkelabgriffen eingestellt. Der Messaufbau ist am Beispiel eines Zielzeichens mit Prüfring in Abbildung 4.4 dargestellt. Ausgehend von der Nulllage wurden die Methoden der Punktidentifizierung für Neigungswinkel von 0° , 45° und 60° durchgeführt. Die Neigungswinkel wurden sowohl separat für θ und ψ eingestellt als auch durch alle Permutationen beider Neigungswinkel repräsentiert. Aus allen Versuchsreihen wird im Folgenden auf die Extrema eingegangen, d. h. einer Zielmarke in Nulllage und der maximalen Neigung für θ und ψ .

Zielmarke mit Prüfring

Als Ausgangspunkte für die Punktidentifizierung mit Prüfring wurde die Spotbreite und der geometrische Fehlbetrag anhand der gemessenen Punktkoordinate von M und den bekannten Zielmarkendimensionen ermittelt. Zur Auslotung der Grenzen des Verfahrens und unter Berücksichtigung der Intensitätsverteilung im Spot wurden für die Codierbreiten ein halb bis ein drittel geringere Dimensionen angesetzt als durch die Feldgröße l veranschlagt. Die Mess- und Berechnungsdaten werden in Tabelle 4.3a zusammengefasst. Aufgrund der geringen Prüfringbreite geht aus Gleichung 4.1 die minimale Winkelgeschwindigkeit ω_{min} hervor. Diese wurde in weiterer

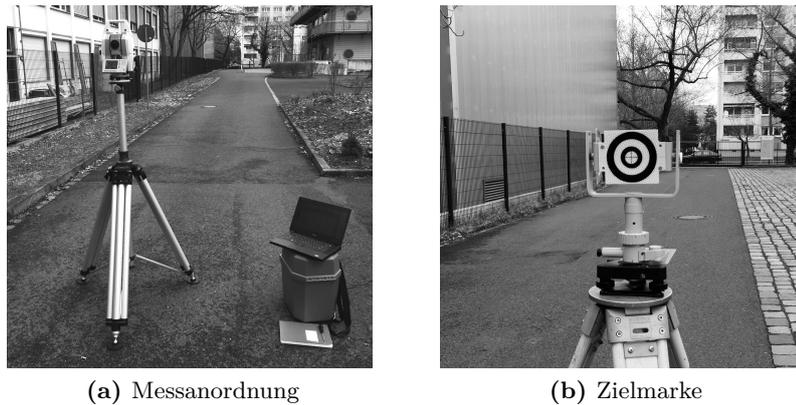


Abb. 4.4: Versuchsaufbau zur tachymetrischen Punktidentifizierung

Verwendung zur initialen Bestimmung von t_{max} herangezogen. Zur besseren Vergleichbarkeit der betrachteten Messreihen wurden die Intensitätsmessungen jedoch für beide Neigungsvarianten über t_{max} hinaus fortgesetzt. Durch den folgenden Analyseprozess konnten die Coderinge aus den Daten der Intensitätszeitreihen extrahiert werden. Die berechneten Zeitintervalle für die Messung der einzelnen Coderinge werden in Tabelle 4.3b aufgeführt. Darüber hinaus erfolgt die Angabe der indikativen Intensitätswerte I_{c1} und I_{c2} . In bildlicher Darstellung werden die Coderinge in Abbildung 4.5 auf Seite 88 farblich voneinander abgegrenzt. Die indikativen Intensitätswerte werden dabei rot hervorgehoben.

Tab. 4.3: Untersuchung ringförmig codierter Zielzeichen mit Prüfring

Parameter	Wert	Parameter	$\theta = \psi = 0^\circ$	$\theta = \psi = 60^\circ$
Messbereichradius r_m	12 mm	C_0	$2,9 \text{ s} \leq t_i < 4,6 \text{ s}$	$1,2 \text{ s} \leq t_i < 2,0 \text{ s}$
Prüfringbreite b_0	8 mm	C_1	$4,6 \text{ s} \leq t_i < 7,5 \text{ s}$	$2,0 \text{ s} \leq t_i < 3,2 \text{ s}$
Codebreite b_1 und b_2	13 mm	C_2	$7,5 \text{ s} \leq t_i < 10,5 \text{ s}$	$3,2 \text{ s} \leq t_i < 4,5 \text{ s}$
Messdistanz D	50,998 m	I_{c1}	99,0 %	72,3 %
Spotgröße S_B	10,7 mm	I_{c2}	11,2 %	31,1 %
Fehlbetrag Δr	0,5 mm			

(a) Mess- und Berechnungsdaten

(b) Segmentierungsdaten

Bei beiden Versuchsdurchführungen konnte mithilfe der Segmentierungsdaten auf die korrekte Punktcodierung $ID = [01]_2$ geschlossen werden. Hinsichtlich des Schwellwertes von 50 % kann dieser Sachverhalt anhand der indikativen Intensitäten aus Tabelle 4.3b nachvollzogen werden. Beim gegenüberstellenden Betrachten beider Untersuchungen werden besonders die wesentlich kürzeren Zeitintervalle der Coderinge für das geneigte Zielzeichen ersichtlich. Im Vergleich zur Nulllage sind für jeden Codebereich weniger als die Hälfte der Intensitätswerte auswertbar. Durch den stetigeren Verlauf der Intensitätszeitreihe in Nulllage und die deutlichere Differenz der Intensitätsextrema kann rein visuell auf die richtige Punkt-ID geschlossen werden. Infolge der gewählten Zielmarkendimensionen ist dies im geneigten Falle nicht gegeben. Die Ausdehnung des Laserspots übersteigt die Grenzen der Coderinge, wodurch die indikativen Intensitäten nicht die maximal bzw. minimal möglichen Werte erreichen. Unabhängig davon liegen die

interpolierten I_c ca. 20% über und unter dem Schwellwert und können somit sicher einer Bitwertigkeit zugeordnet werden. In Anbetracht der Tatsache, dass das Untersuchungsergebnis mit kleineren Coderringbreiten als theoretisch veranschlagt erreicht wurde, können für die Verwendung von Ringbreiten $b_k = l$ noch deutlichere Ergebnisse prognostiziert werden. Der Kurvenverlauf und insbesondere die Extremwerte der Intensitäten werden sich merklich dem Verlauf nicht geneigter Zielmarken annähern.

Zielmarke ohne Prüfring

Für die Untersuchung ringförmig codierter Zielmarken ohne Prüfring liegen die identischen Versuchsparemeter wie bei der Prüfringmethode hinsichtlich der Messdistanz, Spotbreite und verwendeten Zielzeihenrichtungen vor und können deshalb der Tabelle 4.3a entnommen werden. Der Radius des Messbereiches beträgt im Gegensatz dazu $r_m = 20$ mm und die Coderinge weisen Breiten von $b_1 = b_2 = 15$ mm auf. Aufgrund der Berechnungsergebnisse aus der Messdistanz und Ringbreitendimensionierung wurde zur Erfassung der Intensitätswerte die minimale Winkelgeschwindigkeit ω_{min} verwendet und die maximale Abtastzeit zu $t_{max} = 9,5$ s berechnet. Für $\theta = \psi = 0^\circ$ und $\theta = \psi = 60^\circ$ werden die Zeitreihen in Abbildung 4.6 dargestellt. Neben den Intensitätsdaten sind die skalierten Referenzsignale des maximalen Korrelationskoeffizienten ρ_{IJ_j} aufgetragen. Zur besseren visuellen Trennbarkeit zwischen den Referenzsignalen wurden die J_i mit einem konstanten Intensitätsoffset versehen, welches im Legendenbereich angegeben wird. Für die untersuchte Zielmarke entspricht die korrekte Codierung dem Referenzsignal R_{10} , dessen Rechtecksignal in Abbildung 4.6 blau eingefärbt ist.

Wie in Kapitel 4.1.2 geschildert wurde, entspricht der Index desjenigen Referenzsignals der gesuchten Punkt-ID, welches den maximalen Korrelationskoeffizienten ρ_{ID} hinsichtlich der Coderinge aufweist. Für den gesamten Umfang an Validierungsmessungen konnte durch die Analyse der Teilbereiche auf die korrekte ID geschlossen werden. Die Berechnungsergebnisse werden separat für jedes Referenzsignal in Tabelle 4.4 aufgeschlüsselt.

Tab. 4.4: Identifizierungsdaten für ringförmig codierte Zielmarken ohne Prüfring

Referenz- signal	$\theta = \psi = 0^\circ$		$\theta = \psi = 60^\circ$	
	m [-]	ρ [-]	m [-]	ρ [-]
R ₁₀	0,97	0,98	0,52	0,91
R ₀₁	0,59	0,97	0,83	0,79
R ₁₁	0,97	0,00	0,62	0,00
R ₀₀	0,73	0,75	0,59	0,66

Beim Vergleich der Berechnungsergebnisse sind besonders die Korrelationskoeffizienten der Referenzsignale R_{10} und R_{01} zu betrachten. Wird für den geneigten Anwendungsfall noch eine eindeutige Differenz zwischen den Koeffizienten erreicht, ist die Differenz für die Nullagenposition lediglich in der zweiten Dezimalstelle des ρ_{ID} ersichtlich. Die Zuordnung führt in diesem Fall zwar zur korrekten Identifizierung, könnte für geringfügig differierende Messdaten jedoch auch zur Fehlidentifizierung führen. Ursächlich für die starke Ähnlichkeit der Koeffizienten ist die extreme Skalierung des Signals R_{01} . Im Gegensatz zu R_{10} wird bei R_{01} nur ein Bruchteil der realen Zielmarkencoderinge abgedeckt. Der Codering C_1 des Referenzsignals wird im Messbereich der Zielzeichenfläche abgebildet. Im gleichen Maße wird C_2 dem ersten Codering C_1 der

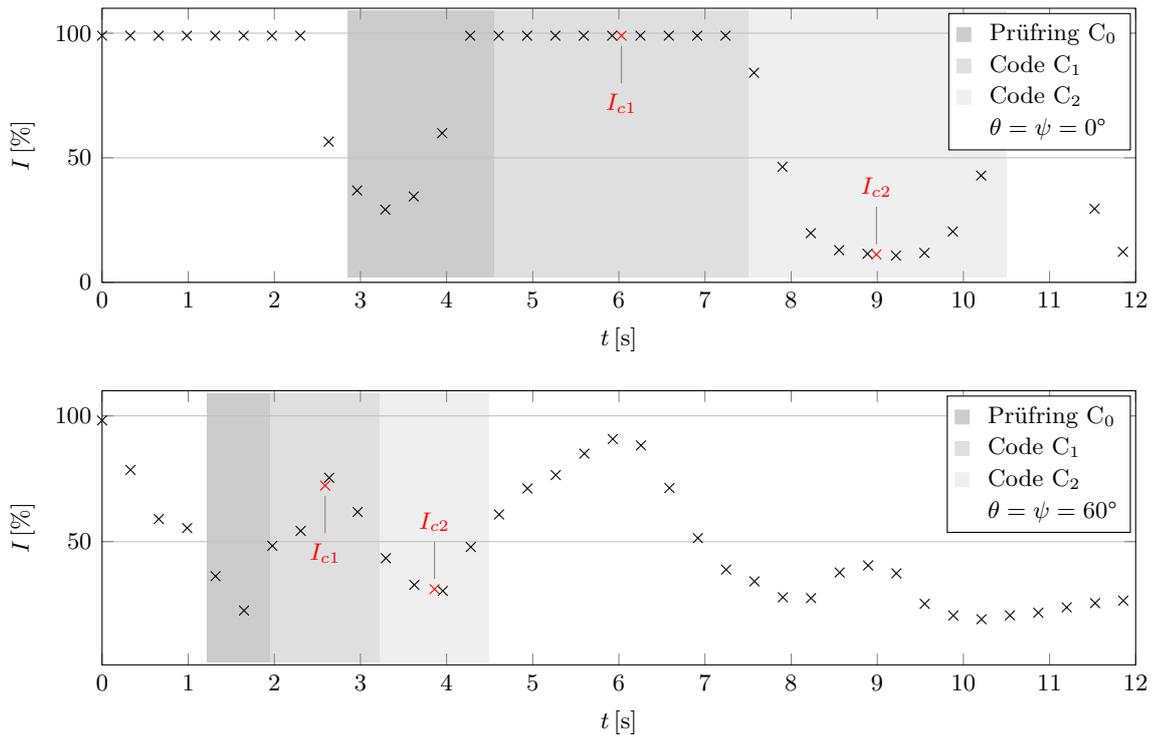


Abb. 4.5: Intensitätsmessungen bei ringförmig codierten Zielmarken mit Prüfiring

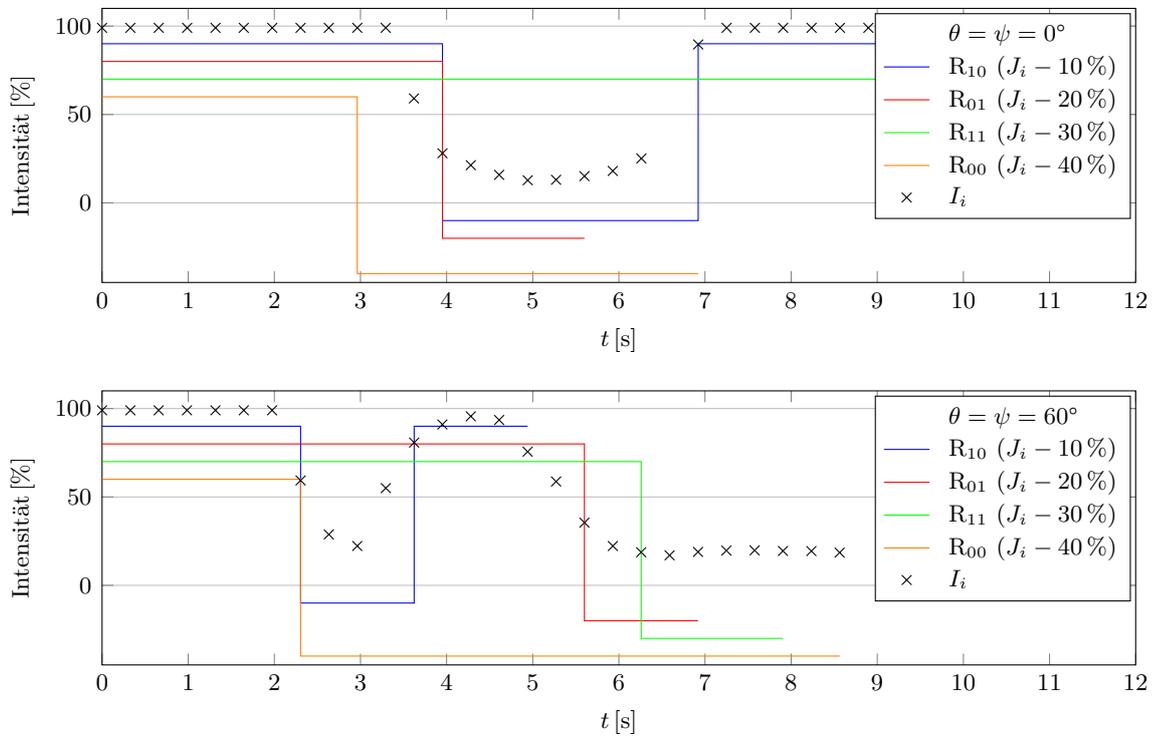


Abb. 4.6: Intensitätsmessungen bei ringförmig codierten Zielmarken ohne Prüfiring

Zielmarke zugeordnet. Aufgrund der Maßstabsbeschränkung $m \geq 0,5$ ist diese Konstellation für zunehmende Zielmarkenneigungen auswertetechnisch nicht realisierbar. Die Differenzen zwischen den Korrelationskoeffizienten fallen aus diesem Grund wesentlich größer aus.

Zur deutlicheren Heraushebung der Korrelationsdifferenzen in Nulllage ist die Kombination mit der Prüfringmethode denkbar. Mit einem Prüfring kann eine Eingrenzung des Maßstabes erfolgen, welche in der Nulllagenposition zur Vermeidung maximaler Skalierungen führt. Die Korrelationskoeffizienten werden sich dementsprechend stark voneinander unterscheiden, wobei lediglich die Referenzsignale aufgrund des zusätzlichen Prüfrings zu modifizieren sind. Darüber hinaus kann die unabhängige Ermittlung der Punkt-ID mit beiden Verfahren zur Sicherheit der Punktidentifizierung beitragen.

4.2 Punktcodeermittlung für sektorförmig codierte Zielmarken

Neben der ringförmigen Codierungsvariante kann die intensitätsbasierende Punktidentifizierung auch anhand sektorförmiger Codierungen erfolgen. Die 2-Bit-Ausführung einer solchen Zielmarke wird in Abbildung 4.7 dargestellt. Insgesamt sind drei Codebereiche C_k verfügbar ($k = 0 \dots 2$). Der Codebereich C_0 symbolisiert das Startbit und ist invariant in Form einer gelben Filterfolie codiert. Die Codebereiche C_1 und C_2 dienen zur Ermittlung der Punkt-ID und sind dementsprechend schwarz beschichtet oder als retroreflektierende Fläche ausgebildet. Im Unterschied zu ringförmig codierten Zielmarken entspricht jeder Codebereich einem Kreissektor, welcher jeweils einen Winkel von $\gamma_c = 120^\circ$ aufspannt. Zur Intensitätskalibrierung und Punktmessung ist im Zentrum der Zielmarke ein Messbereich mit dem Radius r_m vorgesehen, der ebenfalls aus Reflexfolie besteht. Der Zielpunkt zur Koordinatenbestimmung wird dabei mit M bezeichnet. Aufgrund der zentrischen Überlagerung des Messbereichs liegen alle Codebereiche in einem Kreisring mit der radialen Ringbreite b . Die Dimensionierung der Ringbreite ist in Analogie zur ringförmigen Codierung mit $b = l$ zu wählen und der Messbereich in entsprechender Weise durch $r_m = l/2$ definiert. Gemeinsam mit den grundlegenden Zielmarkenelementen wird in Abbildung 4.7 das zielmarkeneigene Koordinatensystem angegeben. Es wird als rechtshändiges Koordinatensystem definiert, dessen y - z -Ebene durch die Zielmarkenfläche realisiert wird. Die z -Achse verläuft

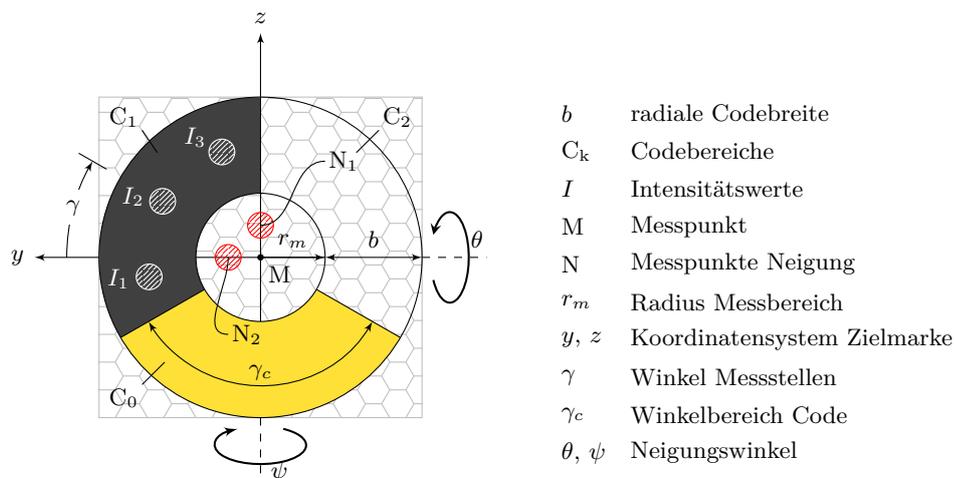


Abb. 4.7: Zielmarke mit Codierung in Sektorform

ausgehend von M zur oberen Zielmarkenkante und steht senkrecht auf der durch die Oberkante definierten Linie. In gleicher Weise verläuft die y -Achse mit dem Ursprung in M zur linken Zielmarkenkante bzgl. der Darstellung in Abbildung 4.7. Die Orthogonalität zur Linie der Zielmarkenkante ist in diesem Fall ebenfalls gegeben. Zur vollständigen Beschreibung des Systems verläuft die x -Achse beginnend im Ursprung in Richtung der rückwärtigen Zielmarkenfläche.

Die Definition des Zielmarkenkoordinatensystems ist hinsichtlich des Prozesses der Codeerfassung notwendig. Im Gegensatz zur ringförmigen Codierung werden die Intensitäten I_i aufgrund des Zielzeichenlayouts punktuell an vorgegebenen Messstellen (Abtastpositionen) bestimmt. Je Codebereich werden drei Messstellen definiert, die für eine 2-Bit-Codierung insgesamt $n = 9$ Intensitätsmessungen zur Folge haben. Alle Abtastpositionen weisen den gleichen Abstand

$$r = r_m + \frac{b}{2} = l \quad (4.16)$$

zu M in der y - z -Ebene des Zielmarkensystems auf und sind gleichmäßig mit Winkeldifferenzen $\Delta\gamma = 40^\circ$ über die Codebereiche verteilt. Die Winkelmessung beginnt an der y -Achse und verläuft im Uhrzeigersinn in Richtung der z -Achse. Im Falle einer Zielzeichenverdrehung (Rotation um die x -Achse) wird durch die gewählten Anzahl an Messstellen sichergestellt, dass mindestens zwei Intensitätsmesswerte eindeutig auf einem Kreissektor liegen. Die übrige Intensitätsmessstelle könnte unter diesen Umständen auf der Grenze zwischen zwei Codebereichen liegen und eine Mischintensität aus möglicherweise verschiedenen codierten Bits liefern. Aufgrund dieser Festlegungen können die Abtastpositionen

$$\mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ r \cdot \cos \gamma_i \\ r \cdot \sin \gamma_i \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad \gamma_i = (i - 1) \cdot \Delta\gamma - \gamma_o \quad , \quad i = 1 \dots n \quad (4.17)$$

im Zielmarkenkoordinatensystem als kartesische Koordinaten definiert werden. Die in der Gleichung enthaltene Konstante $\gamma_o = 10^\circ$ dient lediglich als Offset, welches die visuelle Übereinstimmung zu Abbildung 4.7 herstellt. Für Messungen bei beliebigen Zielmarkenrotationen kann das Offset entfallen.

Nachdem die Abtastpositionen bzgl. der Zielmarkendimensionierung berechnet wurden, beginnt der primäre Mess- und Auswerteprozess mit der Messung von Punkt M im IR-Modus. Die zugehörige Koordinate im Koordinatensystem des Tachymeters wird mit \mathbf{X}_M bezeichnet. Als Konvention werden die Koordinaten des Tachymetersystems bei den weiteren Ausführungen immer groß gedruckt und durch \mathbf{X} oder (X, Y, Z) mit entsprechenden Indexierungen repräsentiert. Für die darauf folgende Intensitätskalibrierung wird der RL-Modus gewählt und die Intensität kalibriert. Im einfachsten Fall einer Zielmarke in Nulllage ist die Ausrichtung der Koordinatensysteme von Instrument und Zielmarke identisch. Beide Systeme können durch eine Translation in X -Richtung zur Deckung gebracht werden, welche dem Wert der Distanzmessung entspricht. In diesem idealisierten Fall ergeben sich die Abtastpositionen zu:

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{X}_M + \mathbf{x}_i \quad . \quad (4.18)$$

Die Koordinaten werden nacheinander an die GeoCOM-Schnittstelle übergeben und automatisiert durch das Instrument angezielt. Während der einzelnen Anzielungen bleibt die Intensitätskali-

brierung erhalten, sodass die I_i der Abtastpositionen in Relation zur retroreflektierenden Fläche des Messbereichs bestimmt werden. Damit die Messstellen auch im geneigten Anwendungsfall automatisch angezielt werden können, müssen die Neigungswinkel θ und ψ bekannt sein. Der messtechnische Ablauf zur Neigungsbestimmung wird gesondert in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Für die weiteren Ausführungen werden die Neigungswinkel als gegeben betrachtet. Da die Neigungswinkel einen Teil der Relation zwischen dem Zielmarkensystem \mathbf{x} und dem Instrumentenkoordinatensystem \mathbf{X} liefern, kann der mathematische Zusammenhang mit einer Helmert-Transformation beschrieben werden. Die Rotationsmatrix

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_x \cdot \mathbf{R}_y \cdot \mathbf{R}_z = \mathbf{I} \cdot \mathbf{R}_\theta \cdot \mathbf{R}_\psi \quad (4.19)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

wird aufgrund der bekannten Neigungen gebildet, wobei Rotationen um die x -Achse beim Identifizierungsprozess berücksichtigt werden und für die Zielmarkenabtastung irrelevant sind. In entsprechender Weise wurde die Teilrotation \mathbf{R}_x durch die Identitätsmatrix \mathbf{I} ersetzt. Die Translationen zwischen beiden Koordinatensystemen repräsentiert der Koordinatenvektor \mathbf{X}_M . Zudem wird davon ausgegangen, dass zwischen den Koordinatensystemen keine Maßstabsanpassung benötigt wird ($m = 1$). Unter diesen Maßgaben dient die Transformationsvorschrift

$$\mathbf{x} = \mathbf{R} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_M) \quad (4.20)$$

zur Überführung einer Instrumentenkoordinate in das System der Zielmarke. In der Transformationsvorschrift wurde zudem berücksichtigt, dass die Translationen anhand der Messdaten des Instruments erhoben wurden. Demzufolge erfolgt die Reduktion der zu transformierenden Koordinaten um \mathbf{X}_M vor der eigentlichen Rotation. Der mathematische Zusammenhang kann damit als eine Verschiebung des Instruments zum Zielmarkenmesspunkt M mit anschließenden Rotationen aufgefasst werden. Ausgedrückt als Rücktransformation

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{X}_M \quad (4.21)$$

können die Abtastpositionen nach Gleichung 4.17 in das Instrumentensystem transformiert werden und somit auch im Falle einer Zielmarkenneigung automatisiert angezielt werden. Für sektorförmige Codierungen erfolgt dieser Berechnungsprozess direkt im Anschluss an die Punktmessung, Neigungsbestimmung und Intensitätskalibrierung. Entsprechend des Vorgehens bei der Nulllagenposition wird nach jeder Anzielung die Intensität I_i gemessen und steht zur Punktcodeermittlung zur Verfügung. Die detaillierte Beschreibung der Punkt- bzw. Sektoridentifizierung sowie der Neigungsbestimmung wird in den folgenden Kapiteln vorgenommen.

4.2.1 Neigungsbestimmung

Unter beliebigen Messkonstellationen weicht die Ausrichtung der Zielmarke von der Nulllagenposition ab. Im Allgemeinen bestehen Translationen und Rotationen zwischen den Koordinatensystemen der Zielmarke und des Instruments. Der mathematischer Zusammenhang beider Systeme wurde in Gleichung 4.21 angegeben, wobei die Rotationsmatrizen \mathbf{R}_θ und \mathbf{R}_ψ noch

genauer zu betrachten sind. Die Bildung der Matrizen wird durch die messtechnische Erfassung der Neigungswinkel θ und ψ realisiert. Da die Kenntnis über die Neigungswinkel für die Codeerfassung unabdingbar ist, müssen die Winkelwerte vor dem Beginn der Codeerfassung bestimmt werden. Unter Beachtung des bereits vorgestellten Zielmarkendesigns wird die Kombination aus zwei Verfahren zur Neigungsbestimmung genauer erläutert.

Dreipunktverfahren

Beim Dreipunktverfahren nach Abbildung 4.8 werden die Neigungswinkel mit zusätzlichen Punktmessungen ermittelt. Aufgrund der Definition des Zielmarkenkoordinatensystems ist der Ausgangswert für die Neigungsbestimmung durch den Koordinatenvektor \mathbf{X}_M gegeben. Die Messstellen zur Neigungsbestimmung werden mit N_1 und N_2 bezeichnet sowie im Zielmarkensystem durch die Koordinaten

$$\mathbf{x}_{N1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_m/2 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{x}_{N2} = \begin{bmatrix} 0 \\ r_m/2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

festgelegt. Die Messstellen befinden sich demnach auf der y - bzw. z -Achse des Zielmarkensystems und sind durch ein konstantes Offset zu M gekennzeichnet. Aufgrund der noch unbekanntenen Zielmarkenneigung soll durch die Verwendung von $r_m/2$ gewährleistet werden, dass ein großer Teil des Laserspots bei der Messung zu N_1 oder N_2 im Messbereich liegt. Da die Neigungspunkte automatisiert angezielt werden, bleibt das Offset unabhängig von der Neigung konstant und im Falle einer maximalen Neigung liegt das Zielkreuz auf der Grenze zwischen dem Mess- und Codebereich; diese Relation kann anhand von Gleichung 4.4 nachvollzogen werden. Für die automatisierte Anzielung werden die Koordinaten

$$\mathbf{X}_{N1} = \mathbf{X}_M + \mathbf{x}_{N1} \quad , \quad \mathbf{X}_{N2} = \mathbf{X}_M + \mathbf{x}_{N2} \quad (4.23)$$

an die GeoCOM-Schnittstelle übermittelt und die Direktantriebe entsprechend gesteuert. Die jeweilige Punktmessung im IR-Modus erfolgt direkt im Anschluss an die Anzielung. Damit die Anzielpunkte durch einfache Koordinatenzuschläge zu \mathbf{X}_M ausgedrückt werden können, muss die

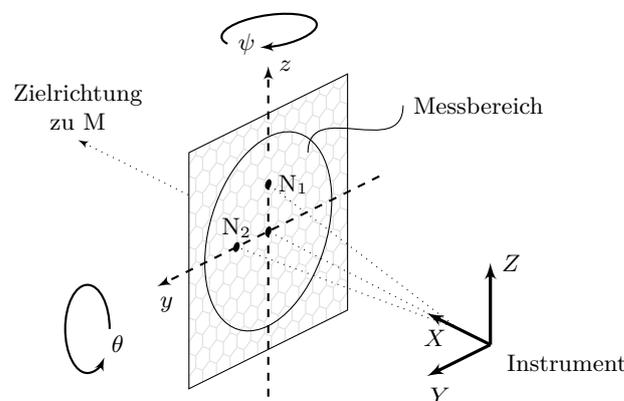


Abb. 4.8: Dreipunktverfahren zur Bestimmung der Zielmarkenneigung

X -Achse des Instruments in einer Vertikalebene durch M liegen. Für den Anwendungsfall wird dazu eine GeoCOM-Methode genutzt. Nachdem M angezielt wurde und vor dem Start der Messung wird die Horizontalrichtung auf den Wert Null gesetzt. Dies entspricht einer Rotation um die Z -Achse, sodass die Messkonstellation nach Abbildung 4.8 Gültigkeit besitzt. Als mathematische Herangehensweise kann die Rotation aufgrund der gemessenen Horizontalrichtung zu M bestimmt werden und in der weiteren Anwendung zur Transformation des Koordinatenzuschlags dienen.

Für das Leica TDRA6000 nimmt die automatisierte Messung der Neigungspunkte nur wenige Sekunden in Anspruch. Da die gemessenen Werte aufgrund der Neigung nicht den Sollpositionen der Gleichungen 4.23 entsprechen, werden die resultierenden Koordinaten mit \mathbf{X}'_{N1} und \mathbf{X}'_{N2} bezeichnet. Die Neigungswinkel

$$\theta = \arctan \left(\frac{(\mathbf{X}'_{N1} - \mathbf{X}_M) \cdot \mathbf{e}_x}{(\mathbf{X}'_{N1} - \mathbf{X}_M) \cdot \mathbf{e}_z} \right) \quad \text{und} \quad \psi = \arctan \left(\frac{(\mathbf{X}'_{N2} - \mathbf{X}_M) \cdot \mathbf{e}_x}{(\mathbf{X}'_{N2} - \mathbf{X}_M) \cdot \mathbf{e}_y} \right) \quad (4.24)$$

werden im Anschluss aus den Koordinatendifferenzen zwischen M und N_1 sowie N_2 bestimmt. Dabei sind \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y und \mathbf{e}_z die kanonischen Einheitsvektoren in der jeweils indextierten Koordinatenrichtung. Entsprechend der Untersuchungen zur Distanzmessung auf geneigte Zielmarken nach Kapitel 3.1.5 sind für diesen Ansatz bei kleinen Neigungswinkeln gute Ergebnisse zu erwarten. Große Neigungswinkel verursachen diesbezüglich Abweichungen hinsichtlich der Distanzmessung. Für große Zielmarkenneigungen wird das Dreipunktverfahren deshalb um eine Prüfringmethodik erweitert.

Prüfringmethodik

Das Ziel des Prüfringverfahrens besteht darin, die nicht hinreichende Distanzgenauigkeit für kleine Anziendifferenzen und große Zielzeichenneigungen durch genauere Winkelmessungen zu ersetzen. Wie bei ringförmig codierten Zielmarken wird die Zielmarke deshalb um einen Prüfring nach Abbildung 4.9a erweitert. Der Prüfring grenzt direkt an den Messbereich und sollte mit der Ringbreite l bemessen werden, die Dimensionierung der Kreis-sektoren bleiben dabei erhalten. Anhand der geometrischen Betrachtung aus Abbildung 4.9b lässt sich der Neigungswinkel aus der Innenwinkelsumme des Dreiecks $\triangle PMQ$ ermitteln. Die Winkel α bzw. α' entsprechen den eingeschlossenen Winkeln zwischen der Anzielung zu M und der Grenze zwischen dem Mess- und Prüfringbereich für den geneigten und nicht geneigten Fall. In Abhängigkeit zum zu bestimmenden

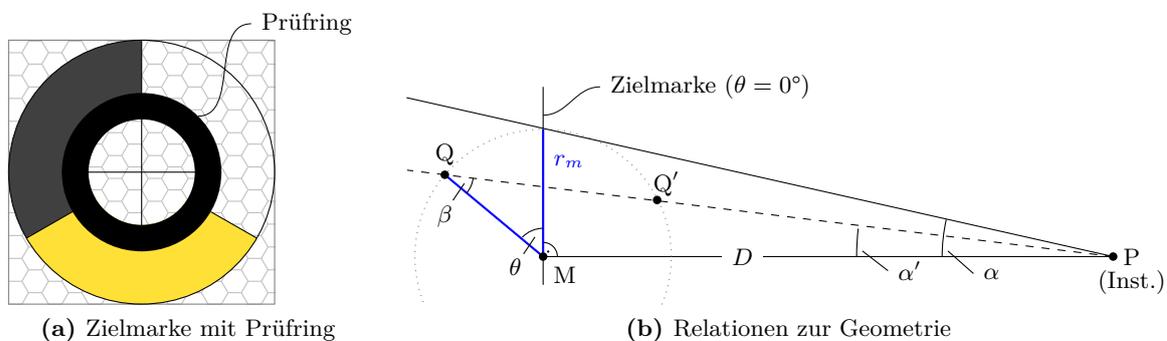


Abb. 4.9: Zielmarke und Messsituation beim Prüfringverfahren mit sektorförmiger Codierung

Neigungswinkel können α und α' aus den Differenzen der Zenitwinkel oder Horizontalrichtungen ermittelt werden. Im dargestellten Beispiel wird

$$\theta = 90^\circ - \alpha' - \arcsin\left(\frac{\alpha'}{\alpha} \cdot \cos \alpha'\right) \quad \text{mit} \quad \alpha = \arctan\left(\frac{r_m}{D}\right) \quad (4.25)$$

unter Verwendung der Zenitwinkeldifferenz α' und der gemessenen Distanz D zum Zielmarkenmittelpunkt berechnet. Da der Winkel α bzgl. der Nulllagenposition zu bestimmen ist, die im Messprozess nicht nachgestellt werden kann, wird eine Näherung aufgrund der gemessenen Distanz und des Messbereichradius gebildet. Die Ergebnisse der Distanzmessung werden jedoch von der vorliegenden Neigungen beeinflusst. In Kapitel 3.1.5 konnten Distanzdifferenzen ΔD im Vergleich zur Nulllagenposition von bis zu 6 mm festgestellt werden. Für große Distanzen kann die resultierende Winkeldifferenz aufgrund der ΔD vernachlässigt werden. Bei $D = 50$ m ist der Einfluss erst in der sechsten Nachkommastelle des Winkels in der Einheit Grad ersichtlich. Geringere Distanzbereiche und kleinere Neigungswinkel führen hingegen zu niedrigeren ΔD , wodurch auch in diesen Fällen die beschriebene Näherung angewendet werden kann.

Die Erfassung der Winkeldifferenzen wird durch kontinuierliche Intensitätsaufzeichnungen bis zum Übergang zwischen dem Messbereich und Prüfring realisiert. Dazu wird die während des Dreipunktverfahrens gemessene Koordinate \mathbf{X}_M erneut angezielt, in den RL-Modus gewechselt und die Intensitätskalibrierung durchgeführt. In der Folge wird ein Instrumentenmotor in Bewegung gesetzt und die Intensitäten kontinuierlich erfasst. Im vorliegenden Fall wird jedoch kein Zeitkriterium zum Abbruch der Intensitätsaufzeichnung definiert. Die Instrumentenbewegung stoppt bei der Unterschreitung des Grenzwertes $I = 50\%$, damit der Winkel α' anhand der Teilkreisablesung ermittelt werden kann. Ausgehend von M wird dieser Prozess sowohl für den horizontalen als auch für den vertikalen Direktantrieb durchgeführt, wobei beim zweiten Durchgang auf die Intensitätskalibrierung verzichtet werden kann. Die zugrunde liegende Winkelgeschwindigkeit wird zur möglichst punktgenauen Erreichung des Grenzwertes mit ω_{min} angegeben.

In einer Idealvorstellung befindet sich das Zielkreuz des Instruments nach dem Stopp der Bewegung genau auf dem Übergang zwischen dem Mess- und Prüfringbereich. Infolge des ermittelten Intensitätsverhaltens aus Kapitel 3.1.4 und dem Zeitoffset bei der schnittstellenseitigen Übermittlung des Stopp-Befehls wird das Zielkreuz jedoch auf dem Prüfring liegen. Als geometrischer Versatz Δr wird in diesem Zusammenhang der auf einem Zielmarkenradius befindliche Abstand zwischen der Zielkreuzposition und der Grenze zwischen dem Mess- und Prüfringbereich definiert. Der Versatz muss für beide Neigungswinkel separat bestimmt werden und ergibt sich aus den finalen Intensitätsmessungen der horizontalen und vertikalen Abtastung I_{hz} sowie I_v . Als mathematische Relationen gelten:

$$\Delta r_{hz} = S_B \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{I_{hz} - n_B}{100 m_B}\right) \quad , \quad \Delta r_v = S_H \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{I_v - n_H}{100 m_H}\right) \quad (4.26)$$

Die enthaltenen empirischen Konstanten m_B , m_H und n_B , n_H beschreiben die Anstiege sowie die Nullpunktoffsets zweier Regressionsgeraden. Die Parameter der Regressionsgeraden werden anhand der Messergebnisse aus den Abbildungen 3.10b und 3.10d für Intensitätsintervalle zwischen 30 % und 80 % gewonnen; im gewählten Intervall besteht ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen den Messgrößen. Für die Regressionen werden die Intensitäten aller Distanzen berücksichtigt. Die konkreten Zahlenwerte werden gemeinsam mit den Messergebnissen zur Validierung des Verfahrens in der Tabelle 4.5 aufgeführt. Darüber hinaus wird anhand der Terme $(I-n)/m$

(Indexierung ausgespart) die prozentuale Spotüberdeckung im Messbereich beschrieben, welche im Anwendungsfall stets kleiner als 50 % sein sollte. Der geometrische Versatz stellt damit eine Größe dar, welche den Abstand der Zielkreuzposition zur inneren Prüfringgrenze anhand der interpolierten Spotbreite und -höhe modelliert. Die Versatzparameter werden anschließend bei der Winkelberechnung von

$$\alpha = \arctan\left(\frac{r_m + \Delta r_{hz}}{D}\right) \quad \text{bzw.} \quad \alpha = \arctan\left(\frac{r_m + \Delta r_v}{D}\right) \quad (4.27)$$

berücksichtigt und das Ergebnis in Gleichung 4.25 eingesetzt. Lediglich das Vorzeichen des jeweiligen Neigungswinkels muss noch aus den Distanzdaten ermittelt werden. In Abbildung 4.9b wird davon ausgegangen, dass die Zielmarkenaußenkante eine größere Distanz zum Instrument aufweist als der Mittelpunkt M. Für den gleichen Winkel α' ist generell auch die Zielmarkenausrichtung zu Q' möglich. Die Distanzdaten der Neigungspunkte werden aus diesem Grund mit \mathbf{X}_M verglichen, der jeweilige Neigungswinkel aus Gleichung 4.25 berechnet und folgende Vorzeichendefinitionen angewendet:

$$\theta = \begin{cases} \theta, & \text{für: } |\mathbf{X}'_{N1}| \geq |\mathbf{X}_M| \\ -\theta, & \text{sonst} \end{cases}, \quad \psi = \begin{cases} \psi, & \text{für: } |\mathbf{X}'_{N2}| \geq |\mathbf{X}_M| \\ -\psi, & \text{sonst} \end{cases} . \quad (4.28)$$

Nachdem die Neigungswinkel berechnet wurden, können die Transformationsparameter zwischen dem Instrument und der Zielmarke vollständig angegeben werden. Die definierten Intensitätsmessstellen werden nacheinander angezielt und die Intensitätswerte I_i messtechnisch erfasst.

4.2.2 Sektoridentifizierung

Bevor die gesuchte Punkt-ID nach dem Schema in Abbildung 4.10 extrahiert werden kann, müssen die einzelnen Codebereiche anhand der I_i voneinander getrennt werden. Da das Startbit als Ausgangspunkt zur Bildung der ID dient, wird C_0 im ersten Extraktionsschritt identifiziert. Der Reflexfolienbereich des Startbits wird durch eine gelbe Filterfolie überdeckt, wodurch die messtechnisch zu erfassenden Intensitäten in einer Größenordnung von 50 % anzusiedeln sind. Dieser Intensitätswert soll als Startbitintensität I_{SB} bezeichnet werden. Im Allgemeinen weichen die gemessenen Intensitäten von I_{SB} ab, sodass die folgende Forderung aufgestellt werden kann:

$$|I_i - I_{SB}| \rightarrow \min . \quad (4.29)$$

Neben der Intensitätsmessgenauigkeit des Startbits nach Tabelle 3.4 bestimmt vor allem die Genauigkeit der Anzielung sowie die Rotation der Zielmarke um die x -Achse die Intensität. Der Laserspot kann in diesem Zusammenhang theoretisch zwei Codebits überlagern, was zu Mischintensitäten führt. Diese Mischintensitäten können ebenfalls Werte von 50 % aufweisen, bzw. die Forderung 4.29 erfüllen. Aus diesem Grund werden zunächst alle Messwerte in einem Intensitätsintervall

$$\Gamma = \{I_i \mid 30\% \leq I_i \leq 70\%\} \quad (4.30)$$

als mögliche I_{SB} behandelt und im Folgenden als Startbitkandidaten bezeichnet. Liegt lediglich ein I_i innerhalb des Intervalls, dient dieser Intensitätswert als Ausgangspunkt für die Startbitidentifizierung. In allen anderen Fällen werden die geometrisch benachbarten Intensitäten I_{i-1}

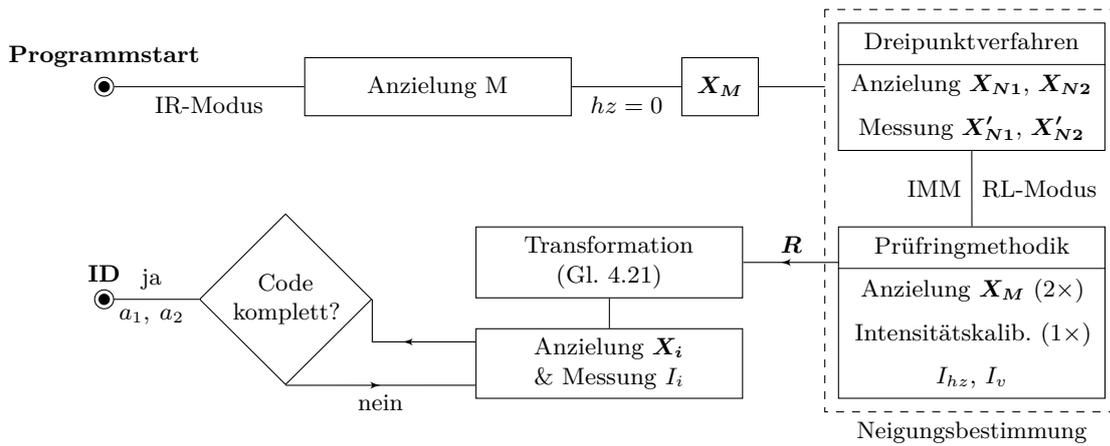


Abb. 4.10: Mess- und Analyseablauf für sektorförmig codierte Zielmarken

und I_{i+1} analysiert. Wird der Indexbereich ($1 \leq i \leq n$) bei der In- bzw. Dekrementierung nicht eingehalten, erfolgt die Zuweisung von $i = 1$ oder $i = n$ in Abhängigkeit von der Über- oder Unterschreitung. Beim Vergleich der geometrisch benachbarten Messstellen wird zudem davon ausgegangen, dass die Intensitätsdifferenz zwischen dem Startbitkandidaten und einem Intensitätswert, welcher ebenfalls auf dem Startbit liegt, die geringste Differenz aufweist. Die Intensität der geometrisch benachbarten Messstelle muss zudem ebenfalls im angegebenen Intensitätsintervall liegen. Die Differenzbildung zu benachbarten Intensitäten wird für alle Startbitkandidaten wiederholt und derjenige Kandidat ausgewählt, dessen Intensitätsdifferenz minimal wird. In Gleichung 4.31 wird der Index des gewählten Kandidaten und die zugehörige Nachbarmessstelle als Indexmenge j zusammengestellt.

$$j = \begin{cases} \{i; i + 1\} & \text{für: } |I_i - I_{i+1}| \rightarrow \min \\ \{i; i - 1\} & \text{für: } |I_i - I_{i-1}| \rightarrow \min \end{cases} \quad (4.31)$$

Folglich stehen zwei Intensitäten $I_j \in \Gamma$ zur Verfügung, welche zum Codebereich C_0 zugeordnet sind. Aufgrund des definierten Messprozesses wird jeder Codebereich durch drei Abtastpositionen erfasst. Die Zuordnung der letzten Intensitätsmessstelle zum Startbit erfolgt mit einer wiederholten Intensitätsdifferenzbildung hinsichtlich der geometrisch benachbarten Intensitäten zu den Messstellen I_j . Die Indizes der zu verwendenden Intensitätswerte werden in Gleichung 4.32 durch u ausgedrückt.

$$u = \begin{cases} \{i - 1; i + 2\} & \text{für: } j = \{i; i + 1\} \\ \{i - 2; i + 1\} & \text{für: } j = \{i; i - 1\} \end{cases} \quad (4.32)$$

Liegen die ausgewählten Intensitäten im vorgegebenen Intervall ($I_u \in \Gamma$), wird dasjenige I_u verwendet, welches die Forderung

$$|I_i - I_u| \rightarrow \min \quad (4.33)$$

erfüllt. Der zugehörige Index u stellt als Vereinigung mit der Menge j den Indexbereich der Startbitintensitäten I_v dar ($v = j \cup u$). Im Falle das lediglich ein I_i im Intervall Γ liegt, erfolgt die Zuordnung der weiteren Intensitäten ebenso anhand der Gleichungen 4.31 und 4.32, jedoch

ohne die Anwendung des Intensitätsintervalls. Damit sind alle Messstellen des Startbits erfasst und die zur Punktidentifizierung notwendige Ermittlung der ID kann vollzogen werden.

Zunächst werden die verbleibenden Intensitätswerte den Codebereichen C_1 und C_2 zugewiesen. Ausgehend vom Startbit werden jeweils drei Intensitätswerte gebündelt. Da der Vorgang im Uhrzeigersinn durchgeführt wird, entspricht das erste Tripel den Intensitäten von C_1 . Beide Tripel werden separat voneinander betrachtet. Da mindestens zwei Abtastpunkte auf dem Codebereich liegen, dient die mittlere Intensitätsmessstelle hinsichtlich des Laufindex als Ausgangspunkt für die weitere Analyse. In gleicher Weise wie bei der Startbitidentifizierung werden die Intensitätsdifferenzen zu den beiden benachbarten Messstellen gebildet und anhand des Minimums über die Verwendung einer der beiden Intensitäten entschieden. Wird die mittlere Intensitätsmessstelle mit I_i bezeichnet, gehen die Indizes der zu verwendenden Intensitäten I_j aus Gleichung 4.31 hervor, wobei in diesem Fall alle möglichen Intensitätswerte zulässig sind ($0\% \leq I_j \leq 100\%$).

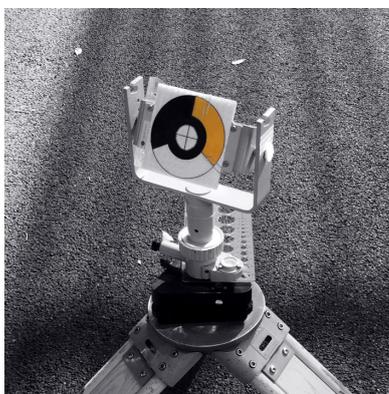
Der den Codebereich repräsentierende Intensitätswert ergibt sich abschließend aus dem Mittelwert der I_j . In gleicher Weise wie bei ringförmig codierten Zielmarken, wird jeder Intensitätsmittelwert durch eine entsprechende Bitwertigkeit

$$a = \begin{cases} 0 & \text{für: } \frac{1}{2} \sum I_j \leq 50\% \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.34)$$

repräsentiert. In indexierter Form steht a_1 für C_1 und a_2 für C_2 , wodurch die Punkt-ID als Binärzahl nach Gleichung 4.10 gebildet werden kann. In Abbildung 4.7 wird dadurch eine $ID = [10]_2$ realisiert. Das Messkonzept zur Punktidentifizierung wird in Abbildung 4.10 zusammengefasst.

4.2.3 Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchungen zu sektorförmig codierten Zielmarken erfolgen unter Anwendung der gleichen Kriterien wie für die ringförmige Variante. Korrekte Punktkennungen sollen innerhalb des gewählten Distanzbereichs und für maximale Neigungen bestimmt werden. Die Darstellung der Zielmarke sowie grundlegender Mess- und Berechnungsdaten erfolgt in Abbildung 4.11 und Tabelle 4.5. Bei der Versuchsdurchführung wurden verschiedene Neigungswinkel mithilfe eines



Parameter	Wert
Radius Messbereich r_m	12 mm
Radius Codebereich b	20 mm
Radius Prüfring	10 mm
Messdistanz D	46,062 m
Spotbreite S_B	10,2 mm
Spothöhe S_H	13,5 mm
Anstieg m_B der Regression zur Spotbreite	2,30
Anstieg m_H der Regression zur Spothöhe	2,64
Nullpunktoffset n_B der Regression zur Spotbreite	-43,38 %
Nullpunktoffset n_H der Regression zur Spothöhe	-58,96 %

Abb. 4.11 und Tab. 4.5: Darstellung sowie grundlegende Mess- und Berechnungsdaten der Untersuchung zu sektorförmig codierten Zielmarken

Drehtisches im Intervall zwischen 0° und 60° eingestellt. Die Neigungsschritte betragen 15° und wurden sowohl für θ und ψ separat als auch in Kombination beider Neigungskomponenten realisiert. Bei der Einstellung $\theta = \psi = 0^\circ$ kann als gute Näherung von der Nulllagenposition ausgegangen werden. Von dem beschriebenen Mess- und Auswerteprozess der sektorförmigen Codierung soll zunächst auf den Teil der Neigungsbestimmung für ausgewählte Zielmarkenausrichtungen eingegangen werden. Die grundlegenden Berechnungsergebnisse der Neigungen werden in Tabelle 4.6 getrennt nach den Dreipunkt- und Prüfringverfahren zusammengestellt. Darüber hinaus wird die Standardabweichung

$$s_{3D} = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2} \quad (4.35)$$

angegeben, welche die Genauigkeit einer Anzielung repräsentiert. Die Genauigkeitsangabe ergibt sich aus der Koordinatendifferenz zwischen den Intensitätsmessstellen \mathbf{X}_i , welche aus den messtechnisch ermittelten Neigungen erzeugt werden, und den \mathbf{X}'_i , welche mit den Sollneigungen ebenso anhand von Gleichung 4.21 generiert werden können. Aus diesen Anziendifferenzen

$$\Delta \mathbf{X}_i = \mathbf{X}'_i - \mathbf{X}_i \quad (4.36)$$

werden separat für jede Koordinatenkomponente die Standardabweichungen s_x , s_y sowie s_z ermittelt und in Gleichung 4.35 eingesetzt. Bei genauerer Betrachtung der Berechnungsergebnisse steigen die Standardabweichungen mit zunehmenden Neigungswinkeln für beide Verfahren. Lediglich die Standardabweichung der Prüfringmethodik ist für den maximalen Neigungsfall geringfügig kleiner als der Wert der nächstkleineren Neigungseinstellung. Zwischen beiden Verfahren sind zudem starke Genauigkeitsunterschiede festzustellen. So wird die maximale Standardabweichung der Prüfringmethode ($s_{3D} = 7,3 \text{ mm}$) beim Dreipunktverfahren bereits bei 30° Neigung ($s_{3D} = 9,5 \text{ mm}$) überschritten. Der Einfluss der Distanzmessung auf geneigte Zielmarken wird deutlich ersichtlich. Unabhängig davon ist die Distanzinformation zur Vorzeichenbestimmung für die Neigungswinkel der Prüfringmethode nötig. In Tabelle 4.6 wird lediglich das Vorzeichen für $\psi = 0^\circ$ falsch ermittelt, da die Distanz zum Punkt N_1 wenige Zehntel geringer ausfällt als zu M. Aufgrund der sehr genauen Neigungswinkelbestimmung für die Nulllage hat dieser Vorzeichenfehler jedoch keinen Einfluss. Generell kann anhand der Daten festgestellt werden, dass das Dreipunktverfahren in alleiniger Anwendung nicht zur korrekten Punktidentifizierung führen würde.

Tab. 4.6: Ergebnisse der Neigungsbestimmung für das Dreipunkt- und Prüfringverfahren

Sollneigung	Dreipunktverfahren			Prüfringverfahren		
	θ [°]	ψ [°]	s_{3D} [mm]	θ [°]	ψ [°]	s_{3D} [mm]
$\theta = \psi = 0^\circ$	0,0	-2,9	1,3	0,0	0,0	0,0
$\theta = \psi = 30^\circ$	13,9	18,3	9,5	35,0	37,7	4,4
$\theta = \psi = 45^\circ$	19,5	48,9	14,5	55,5	54,1	7,3
$\theta = \psi = 60^\circ$	88,0	88,8	70,2	69,2	50,6	6,9

Die finalen Intensitätsmessungen I_{hz} und I_v der Prüfringmethodik lagen bei der Betrachtung aller Neigungsvarianten in einem Bereich zwischen $30,7\%$ und $48,3\%$, was zu geometrischen Versätzen von $1,8 \text{ mm}$ bis $0,8 \text{ mm}$ führt. Die dadurch berechneten Neigungswinkel führen im schlechtesten Fall zu einer Standardabweichung von $s_{3D} = 7,3 \text{ mm}$. Im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen konnte die Differenz zur wahren Anzielposition für Neigungen bis 45°

durch die Zielmarkendimensionierung kompensiert werden. Größere Neigungswinkel bedingen Anzielpositionen, die sehr nahe am Messbereich oder der Zielmarkenbegrenzung liegen. In diesem Zusammenhang sind besonders die Intensitätswerte des Startbits nicht eindeutig aus der Menge aller I_i extrahierbar. Die Dimensionierung des Mess-, Prüf- und Codebereichs ist darum für maximale Neigungen hinsichtlich der Anzielgenauigkeit zu erweitern. Da das grundlegende Messverfahren unter Anwendung einer geänderten Zielmarkendimensionierung zum geschilderten Vorgehen identisch ist, sollen die Identifizierungsergebnisse im Folgenden anhand einer maximalen Neigung von 45° und der Nulllagenposition für das beschriebene Layout dargestellt werden.

Mittels der gemessenen Neigungswinkel wurde die Rotationsmatrix \mathbf{R} gebildet, alle \mathbf{X}_i nacheinander angezielt und die zugehörigen Intensitäten I_i dokumentiert. Die Anzielpositionen werden gemeinsam mit den I_i in Abbildung 4.12 und Tabelle 4.7 für die Nulllagenmessung zusammengestellt. Bei der bildlichen Darstellung werden die Anzielpositionen als Projektion in die y - z -Ebene des Zielmarkensystems dargestellt und an der jeweiligen Messstelle die ermittelte Intensität aufgetragen. Die resultierende Zuordnung zum Codebereich wird mit einer farbigen Markierung kenntlich gemacht. Eine zur Abbildung korrespondierende Farbgebung wurde für Tabelle 4.7 übernommen.

Wegen der genauen Neigungsergebnisse liegen die Intensitätsmessstellen zentral im Codebereich, sodass die Sektoren C_1 und C_2 deutlich anhand der Intensitäten voneinander separierbar sind. Lediglich die gemessenen Intensitätswerte des Startbits weisen größere Differenzen zur definierten Startbitintensität von 50 % auf. Im Rahmen der Sektoridentifizierung spielen diese Differenzen jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Zum einen sind die Intensitätsdifferenzen zu den Codebereichen C_1 und C_2 hinreichend groß und zum anderen befindet sich lediglich I_3 , welches in Tabelle 4.7 stark gedruckt wird, im Intensitätsintervall Γ . Die geometrisch benachbarten Messstellen I_4 und I_5 lassen sich anhand der Intensitätsdifferenzen eindeutig zu diesem Ausgangswert zuordnen. Die angewendete Extraktion der Codebereiche führt zu einem Intensitätsmittelwert von 99,0 % für C_1 und beträgt 7,0 % für C_2 , wobei die Intensitätspaare (I_1, I_9) sowie (I_6, I_7) zur Mittelbildung ausgewählt wurden. Die korrekte ID = $[01]_2$ lässt sich dadurch sicher ermitteln.

Infolge der messtechnisch bedingten Differenzen zwischen den Sollneigungen und Berechnungsergebnissen liegen die Intensitätsmessstellen für Neigungswinkel von 45° nicht zentral auf den Codesektoren. Die Intensitätswerte und Zuordnungsergebnisse fallen weniger deutlich aus als in der Nulllagenposition und können anhand von Abbildung 4.13 und Tabelle 4.8 nachvollzogen

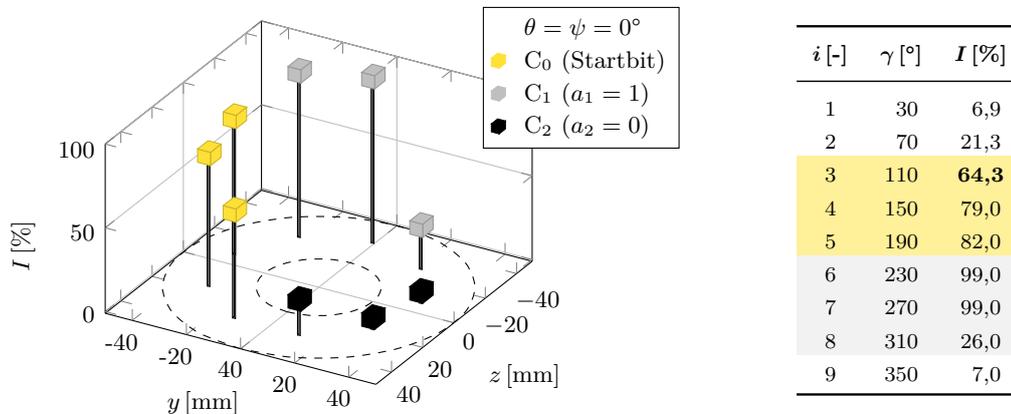


Abb. 4.12 und Tab. 4.7: Abtastpositionen und Intensitäten einer Sektorzielmarke in Nulllage

werden. Für die Sektoridentifizierung stehen in diesem Zusammenhang mehrere Startbitkandidaten zur Verfügung. Hinsichtlich der Eingrenzung durch das Intensitätsintervall I weist die Intensitätsmessung I_4 die geringste Differenz zu der geometrisch benachbarten Messung I_3 auf, die ebenfalls in I liegt. Für die Zuordnung der letzten Intensität werden I_2 und I_5 betrachtet. Die Intensitätsdifferenz zwischen I_4 und I_2 weist zwar einen kleineren Betrag auf als die Differenz zu I_5 , da I_2 aber nicht in I liegt, vervollständigt I_5 das Startbit. Die Zuordnungen entsprechen der korrekten Startbitposition auf der Zielmarke. Die Intensitätsmittelwerte der Codebereiche C_1 und C_2 entsprechen 79,4% sowie 19,5% und führen ebenfalls zur Generierung der korrekten Punkt-ID. Die zugrunde liegenden Intensitätsdifferenzen zur Startbitidentifizierung sind jedoch denkbar gering. Für geringfügig differierende Werte kann so z. B. der Intensitätswert I_2 zur Vervollständigung des Startbits herangezogen werden. Da die Evaluierung der Punkt-ID lediglich aus den Mittelwerten zweier Intensitäten erfolgt, ergäbe sich auch in diesem Fall die richtige Kennung anhand der Intensitätsmittel 58,1% und 26,1%.

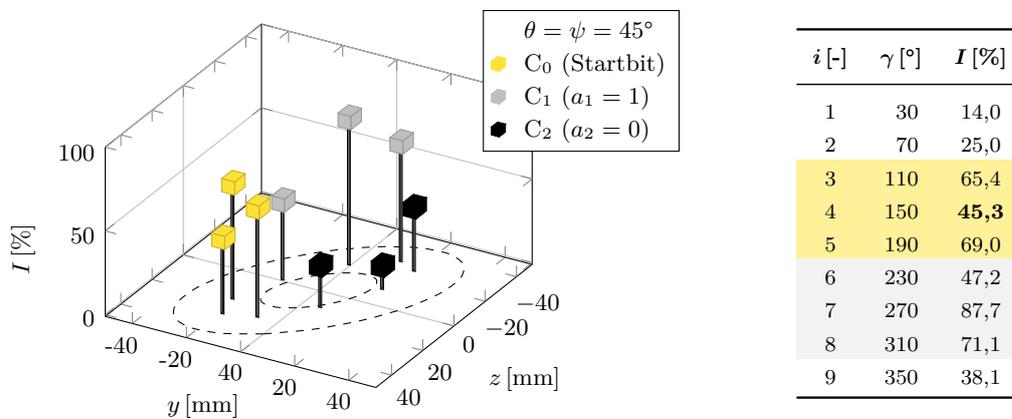


Abb. 4.13 und Tab. 4.8: Abtastpositionen und Intensitäten einer geeigneten Sektorzielmarke

Durch die dargestellten Versuchsreihen konnte die Punktidentifizierung mit sektorförmig codierten Zielmarken nachgewiesen werden. Außer der initialen Punktmessung zu M erfolgt die Neigungsbestimmung und Codeermittlung automatisiert. Im Vergleich zur ringförmigen Codierungsvariante ist das Verfahren aus mess- und regelungstechnischer Sicht als deutlich aufwendiger einzustufen. Die Ergebnisse der Punktidentifizierung sind zudem an die Genauigkeit der Neigungswinkelbestimmung geknüpft. Messabweichungen in den Neigungswinkeln haben direkten Einfluss auf die Anzielpositionen und somit auch auf die Intensitätsmessungen. Zur Steigerung der Genauigkeit und zur besseren Kontrolle der Ergebnisse müssten redundante Messungen durchgeführt werden. Diese erhöhen jedoch den Verfahrensaufwand zusätzlich. Darüber hinaus muss die Zielmarkendimensionierung für die Fälle maximaler Neigungen erweitert werden, um die Anzielgenauigkeit zu kompensieren. Zur schnelleren und sichereren Punktidentifizierung einer 2-Bit-Zielmarke sind folglich ringförmige Codierungen vorzuziehen.

4.3 Punktidentifizierung mit kugelförmigen Reflektoren

Hinsichtlich der Genauigkeit wird in der Praxis meist von der Verwendung retroreflektierender Zielmarken abgesehen. Präzise Koordinatenbestimmungen erfolgen in der Regel mit SMR, welche durch verschiedene Reflektorhalterungen aufgenommen werden können. Die Bauform der

Reflektorhalterungen ist derart gestaltet, dass der SMR exakt eingebettet werden kann. Unter stabilen Umgebungsbedingungen soll dadurch eine hohe Reproduzierbarkeit bzw. Wiederholungsgenauigkeit gewährleistet werden. In diesem Zusammenhang ist besonders die Anwendung als Verknüpfungspunkt zu nennen. Aufgrund der Bauform des SMR muss die Identifizierung der Messpunkte in Kombination mit der Reflektorhalterung erfolgen. Die entsprechende Punkt-ID ist folglich mit der Reflektorhalterung zu verknüpfen. Die folgenden Kapitel stellen zwei Varianten punktidentifizierender Reflektorhalterungen dar.

4.3.1 Reflektorhalterungen mit Tastschalter

Die Geometrie der Reflektorhalterung als solche kann als Ausgangspunkt für eine punktidentifizierende Reflektoraufnahmen dienen. Der SMR wird im Allgemeinen durch eine Dreipunktauflage oder präzise bearbeitete Fläche aufgenommen. Beim Betrachten der Grundfläche befinden sich diese Auflagen in den Randbereichen, sodass das Zentrum keinerlei Stützfunktion übernimmt. Zumeist sind im zentralen Bereich Aussparungen für die Montage oder Magneten zum stabileren Sitz des SMR vorgesehen. Konzeptionell ist dadurch die Kombination der Halterung mit einem Tastschalter denkbar, welcher im zentralen Bereich verbaut und beim Kontakt zum SMR ausgelöst wird. Ein grundlegendes Funktionsmodell wird in Abbildung 4.14 dargestellt.

Moderne Tastschalter sind derart miniaturisiert, dass sie problemlos in eine Vielzahl von Reflektorhalterungen integriert werden können. Die Dimensionierung und der Widerstand des Tastschalters ist dabei so zu wählen, dass die sichere Auflage des SMR auf der Halterung gewährleistet wird und der Schaltkontakt des Tasters auslösbar bleibt. Darüber hinaus muss in der Reflektorhalterung eine Elektronik vorgesehen werden, welche das Schaltsignal registriert, mit einer ID verknüpft und an einen Auswerterechner überträgt. Eine kabellose Übertragung ist in diesem Zusammenhang sinnvoll, was in Abbildung 4.14 durch die Patch-Antenne angedeutet werden soll.

Patch-Antennen bieten den Vorteil einer äußerst geringen Baugröße und verfügen durch das chip-ähnliche Design über keinerlei abstehende Element, welche anfällig für Beschädigungen wären. Als Beispiel ist die Antenne des OpenBeacon-Systems zu nennen. Aufgrund der freien Zugänglichkeit zu allen Ressourcen, kann auch die Elektronik des System für die prototypische Konzeption der punktidentifizierenden Reflektorhalterungen genutzt werden. Jedem Anker kann firmwareseitig eine eindeutige ID zugewiesen werden, welche durch den Mobilknoten empfangen wird. Damit

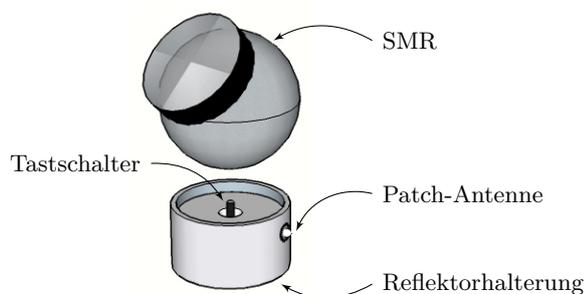


Abb. 4.14: Modell einer Reflektorhalterung mit Tastschalter

stellt das OpenBeacon-System bereits ein komplettes Funknetzwerk auf Basis von RFID zur Verfügung. Zugleich besteht die Möglichkeit, dass durch den quelloffenen Programmiercode und der frei verfügbaren Bestückungspläne zusätzliche Bauelemente auf den Platinen der Anker integriert werden können. Im vorliegenden Anwendungsfall ist der Tastschalter hinzuzufügen.

Eine technisch einfachere Lösung ist die Ausnutzung des bereits vorhandenen Knopfes auf der Ankeroberfläche. Vom Hersteller wurde hardwareseitig eine kapazitiv arbeitende Knopffläche vorgesehen. Dabei sind zwei ringförmige Kontaktflächen durch eine Isolierschicht getrennt. Das Kurzschließen beider Kontaktflächen führt in der Elektronik zum Aussenden eines Statusparameters, welcher mit der Anker-ID verknüpft ist.

Die Kontaktflächen wurden mit den Leiterenden eines Miniaturtastschalters der Firma Siemens verlötet ohne die Isolierschicht zu überbrücken. Erst im Falle einer Betätigung des Tastschalters werden die Kontaktflächen kurzgeschlossen und die ID des Ankers kann am Steuerrechner erfasst werden. Steuertechnisch sind damit die Grundvoraussetzungen für die Punktidentifizierung gegeben.

Der mechanische Aufbau nach Abbildung 4.15 wurde auf Basis einer Standardmagnethalterung der Firma Leica vollzogen. Die Reflektoraufnahme ist für SMR mit einem Radius von 19,05 mm vorgesehen. Im Zentrum der Halterung wurde eine Bohrung mit dem Durchmesser von 3 mm eingebracht, um den Taststift des Tastschalters durch den Magneten zu führen. Durch die verwendete Magnetvariante wird zudem sichergestellt, dass der Widerstand des Schalters in jedem Fall geringer ist als die vom Magneten ausgeübte Anziehungskraft hinsichtlich des SMR. Um die feste Verbindung zwischen der Reflektorhalterung und dem Tastschalter zu gewährleisten, wurde die Kombination aus Schalter und Halterung auf einem zylindrisch ausgefrästem Grundkörper montiert, welcher auf der Unterseite mit einer Kabeldurchführung versehen wurde.

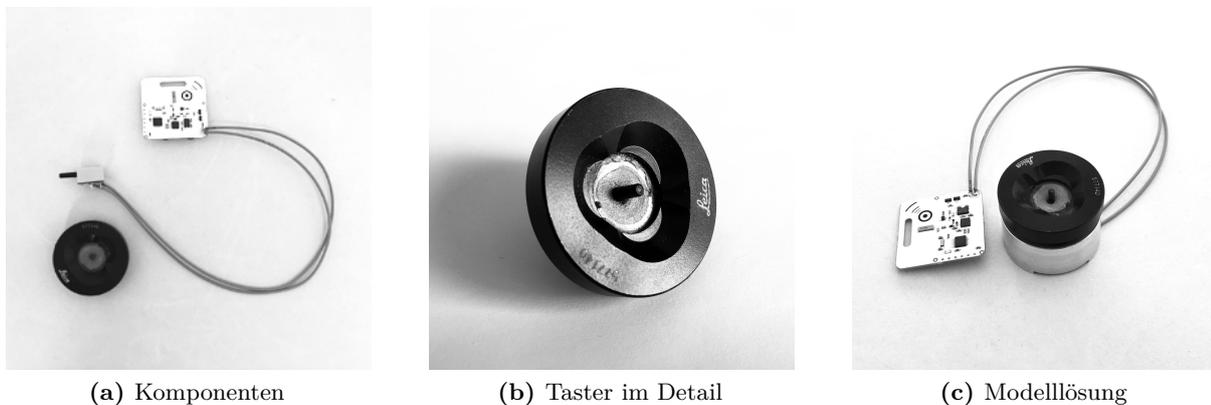


Abb. 4.15: Reflektorhalterung mit Tastschalter

Bei der Erfassung der Funksignale werden allein diejenigen Datenpakete berücksichtigt, welche den Statusparameter eines Knopfdrucks enthalten. In entsprechender Weise lässt sich die ID eventbasiert aufgrund einer Statusänderung in der zentralen Analyseapplikation erfassen. Die Anwendung bezieht zugleich die Messdaten des Instruments bei der Auswertung ein. Erst nachdem die Koordinate erfasst wurde, wird die mit dem Statusparameter gekennzeichnete ID des Ankerknotens zur Koordinate zugewiesen und ist eindeutig identifiziert. Neben der Verwendung zur Identifizierung von Verknüpfungspunkten werden weitere Anwendungen in Kapitel 4.4 beschrieben.

4.3.2 Reflektorhalterungen mit doppelter Aufnahme

Ohne den Einsatz zusätzlicher Sensoren kann die Punktidentifizierung durch relative Messungen erfolgen. Die Identifizierung der Messstellen wird in diesem Fall durch eine geeignete Messkonstellation und einer modifizierten Reflektorhalterung realisiert. Wie in Abbildung 4.16 dargestellt wird, besteht die Halterung aus zwei Aufnahmen für kugelförmige Reflektoren. Die Reflektorzentren werden in der Darstellung mit P_1 und P_2 angeführt. Als konstruktive Vorgabe ist die Strecke p zwischen den Reflektorzentren in der Ebene der Reflektorhalterung bekannt. Hinsichtlich der zu erzielenden Punktcodierung wird eine Anzahl von n Codeblöcken mit einer zu definierenden Höhe Δh als Unterbau für die zweite Reflektorposition verwendet. Die Reflektorzentren sind in entsprechender Weise um einen auf der Ebene der Reflektorhalterung senkrecht stehenden Vektor mit der Länge $n \cdot \Delta h$ versetzt. Die der Reflektorhalterung zuzuordnende Punktcoordinate ist abhängig vom Verwendungszweck. Für Verknüpfungspunkte kann z. B. das Mittel der Koordinaten von P_1 und P_2 verwendet werden. Dient die Coordinate einer der beiden Punkte als direkte Bezugsgröße, muss die Reihenfolge der Punktmessung auf der Reflektorhalterung kenntlich gemacht und im Auswerteprozess einbezogen werden. Farbige Markierungen oder Bezifferungen sind denkbar.

Als Ziel der Identifizierung besteht die Ermittlung der Codeblockanzahl, welche zur Evaluierung der ID dient. Dazu werden die Koordinaten \mathbf{X}_1 und \mathbf{X}_2 der Reflektorzentren P_1 sowie P_2 nacheinander bestimmt. Die Strecke q zwischen den Punkten kann dann zum einen aus den Koordinaten und zum anderen aus den konstruktiven Vorgaben ermittelt werden. Die zugrunde liegenden Berechnungen werden in den Gleichungen 4.37 und 4.38 aufgeführt, wobei die messtechnisch ermittelte Strecke zur besseren Unterscheidung mit q_m bezeichnet wird.

$$q_m = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (4.37)$$

$$q = \sqrt{(n \cdot \Delta h)^2 + p^2} \quad (4.38)$$

Soll die Anzahl der Codeblöcke aus den Messungen \mathbf{X}_1 und \mathbf{X}_2 bestimmt werden, ist Gleichung 4.38 nach n umzustellen und die aus den Punktmessungen berechnete Strecke q_m einzusetzen. Die resultierende Codeblockanzahl

$$n = \frac{\sqrt{q_m^2 - p^2}}{\Delta h} \quad (4.39)$$

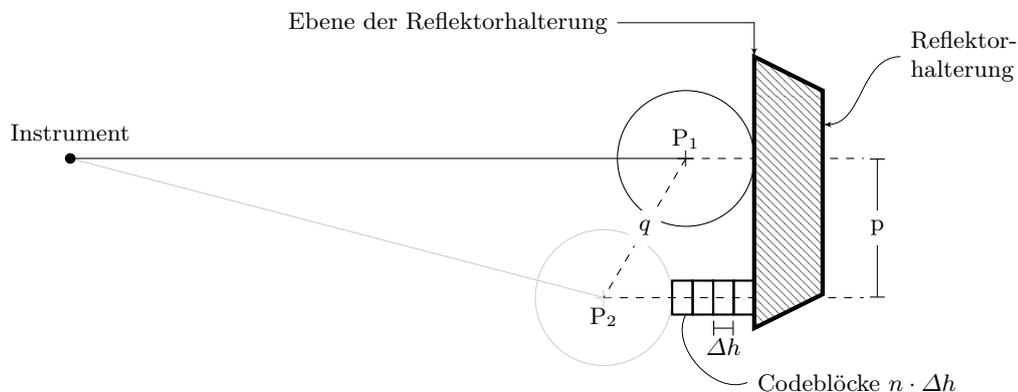


Abb. 4.16: Konzept einer Reflektorhalterung mit doppelter Aufnahme

stellt sich dann unter Umständen als gebrochene Zahl dar. Zur Generierung einer eindeutigen Punktidentifizierung wird n auf die nächstgelegene ganze Zahl gerundet:

$$\text{ID} = \lfloor n \rfloor \quad , \quad \text{ID} \in \mathbb{Z} \quad . \quad (4.40)$$

Ist kein Codeblock aufgebracht ($\text{ID} = 0$), besteht zudem die Möglichkeit, dass der Term unter der Wurzel ein negatives Ergebnis liefert und somit zu einer komplexen Zahl führt. In diesem Fall wird der Realteil des Berechnungswerts zur weiteren Verarbeitung verwendet. Darüber hinaus kann ein Offset $\Delta h'$ zwischen den beiden Reflektoraufnahmen, welches nicht durch die Codeblöcke bedingt ist und orthogonal zur Ebene der Reflektorhalterung verläuft, im Lösungsausdruck wie folgt berücksichtigt werden:

$$n = \frac{\sqrt{q_m^2 - p^2} - \Delta h'}{\Delta h} \quad . \quad (4.41)$$

Das Offset kann z. B. nach der Fertigung kalibriert werden, wodurch der Anspruch an die Fertigungsgenauigkeit herabgesetzt wird. Als weiterer konstruktiver Einflussfaktor auf die Punktidentifizierung ist Δh zu nennen. Die minimale Höhe der Codeblöcke ist in Abhängigkeit zur Messgenauigkeit des Instruments zu wählen. Die resultierende Genauigkeit der Bestimmung von Δh kann durch das Varianzfortpflanzungsgesetz (VfG) bestimmt werden. Dazu wird Gleichung 4.39 für $n = 1$ nach Δh aufgelöst und q_m aus Gleichung 4.37 eingesetzt. Der resultierende funktionale Zusammenhang

$$\begin{aligned} \Delta h &= f(X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2, p) \\ &= \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2 - p^2} \end{aligned} \quad (4.42)$$

muss zur Anwendung des VfG linearisiert werden, indem die partiellen Ableitungen hinsichtlich der Einflussgrößen gebildet werden. Als Ergebnis kann die Varianz

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta h}^2 &= \left(\frac{X_1 - X_2}{\Delta h} \right)^2 \sigma_{X_1}^2 + \left(\frac{X_2 - X_1}{\Delta h} \right)^2 \sigma_{X_2}^2 + \left(\frac{Y_1 - Y_2}{\Delta h} \right)^2 \sigma_{Y_1}^2 \\ &\quad + \left(\frac{Y_2 - Y_1}{\Delta h} \right)^2 \sigma_{Y_2}^2 + \left(\frac{Z_1 - Z_2}{\Delta h} \right)^2 \sigma_{Z_1}^2 + \left(\frac{Z_2 - Z_1}{\Delta h} \right)^2 \sigma_{Z_2}^2 + \left(\frac{-p}{\Delta h} \right)^2 \sigma_p^2 \end{aligned} \quad (4.43)$$

der Codeblockhöhe durch eine Wurzeloperation in die Standardabweichung $\sigma_{\Delta h}$ überführt werden. Für synthetisch generierte Daten mit $p = 40$ mm, einer Distanz $D = 50$ m und den herstellerseitig angegebenen Standardabweichungen des Leica TDRA6000

$$\sigma_{50\text{m}} = \sigma_{X_1} = \sigma_{X_2} = \sigma_{Y_1} = \sigma_{Y_2} = \sigma_{Z_1} = \sigma_{Z_2} = 0,55 \text{ mm} \quad (4.44)$$

ergibt sich eine theoretische Standardabweichung $\sigma_{\Delta h} = 3,99$ mm. Die angenommene Fertigungsgenauigkeit beträgt in diesem Zusammenhang $\sigma_p = 0,1$ mm sowie die Codeblockhöhe $\Delta h = 8,00$ mm. Da die Herstellerangaben der Standardabweichung als maximaler Wert einer Messabweichung spezifiziert sind (Maximum Permissible Error, MPE), kann der Punktcode durch die angegebene Blockhöhe auch im Falle einer maximalen Messabweichung korrekt zugeordnet werden ($\sigma_{\Delta h} < \Delta h/2$).

Die Größenordnung der Standardabweichung $\sigma_{\Delta h}$ ist im wesentlichen auf die Genauigkeit der Streckenbestimmung von q_m zurückzuführen. Für kleine Codeblockhöhen differiert die Strecke

für verschiedene Punktcodierungen nur minimal, d.h. die zugrunde liegenden Messunsicherheiten wirken sich in einem großen Maße auf die Genauigkeit der Codeblockhöhenbestimmung und somit der Punktidentifizierung aus.

Die Validierung der theoretischen Grundlagen wurde anhand einer Reflektorhalterung aus Aluminium und einer auf einem Basiskörper ergänzten Dreipunktauflage aus identischen Stahlkugeln durchgeführt. Neben der Reflektorhalterung zur Versuchsdurchführung wird in Abbildung 4.17 eine prototypische Ausführung für die praktische Anwendung dargestellt. Die Aluminiumhalterung wurde zentrisch um einen M5-Gewindebolzen ergänzt. Da es sich um ein metrisches ISO-Gewinde (International Organization for Standardization, ISO) handelt, kann die Gewindesteigung für eine volle Umdrehung $g = 0,8 \text{ mm}$ der einschlägigen Norm DIN 13-1 : 1999 entnommen werden. Die maximal nutzbare Länge des Gewindebolzens beträgt 25 mm oder umgerechnet 31 volle Umdrehungen.

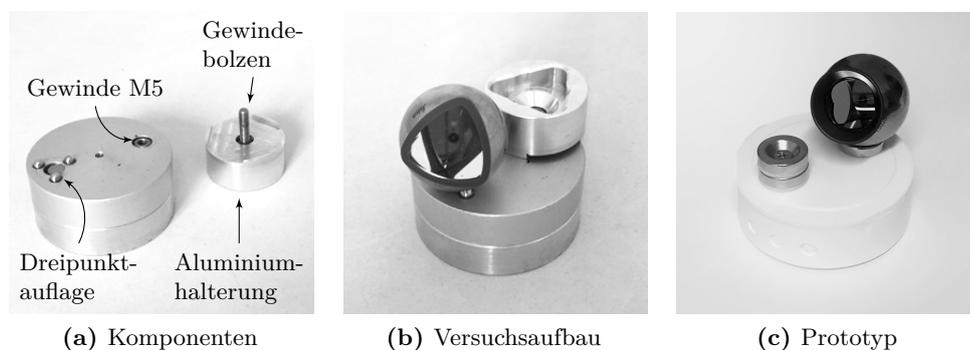


Abb. 4.17: Reflektorhalterung mit doppelter Aufnahme

Aufgrund des justierbaren orthogonalen Abstands zur Ebene der Reflektorhalterung kann die Bestimmung der gesuchten Punkt-ID in mehreren Untersuchungsintervallen erfolgen. Die zur Punktcodeermittlung benötigten Geometriedaten von $p = 42,936 \text{ mm}$ und $\Delta h' = 20,500 \text{ mm}$ wurden mit einem Portalmessgerät Zeiss Contura taktil bestimmt. Da die Messunsicherheit der Länge nach Herstellerangaben $3,1 \mu\text{m}$ beträgt (Zeiss 2012), können die ermittelten Abstände für die Untersuchung als kalibriert erachtet werden.

Bei der Versuchsdurchführung wurde zunächst Punkt P_1 mit dem Leica TDRA6000 gemessen ($D \approx 50 \text{ m}$), wobei die Reflektorhalterung derart fixiert wurde, dass die Stabilität während des gesamten Messablaufs als gewährleistet erachtet werden kann. Das SMR wurde in der Folge auf die Messposition P_2 verlagert und die Koordinate \mathbf{X}_2 bestimmt. Unter Verwendung des Gewindebolzens wurden danach mehrere Codeblockhöhen in einem iterativen Vorgang nachgestellt. Dazu wurde der Gewindebolzen jeweils um eine volle Umdrehung gegen den Uhrzeigersinn bewegt und die zugehörige Koordinate \mathbf{X}_2 erneut dokumentiert bis die maximal nutzbare Länge des Gewindebolzens ausgeschöpft war. Für jeden Iterationsschritt wurde aus den Koordinaten \mathbf{X}_1 und \mathbf{X}_2 die nicht gerundete Codeblockanzahl nach Gleichung 4.41 bestimmt. Darüber hinaus werden die resultierenden Punktkennungen aus Gleichung 4.40 ermittelt. Die Ergebnisse beider Berechnungen werden in Abbildung 4.18 zusammengestellt.

Als vertikale, gerissene Linien sind in der Abbildung zudem die Positionen $1 \cdot \Delta h$, $2 \cdot \Delta h$ und $3 \cdot \Delta h$ aufgetragen. Diese, im Folgenden als Sollpositionen bezeichnete Werte, entsprechen den aus dem VfG ermittelten Codeblockhöhen, welche für eine Codierung vorzusehen sind. Bei einer korrekten

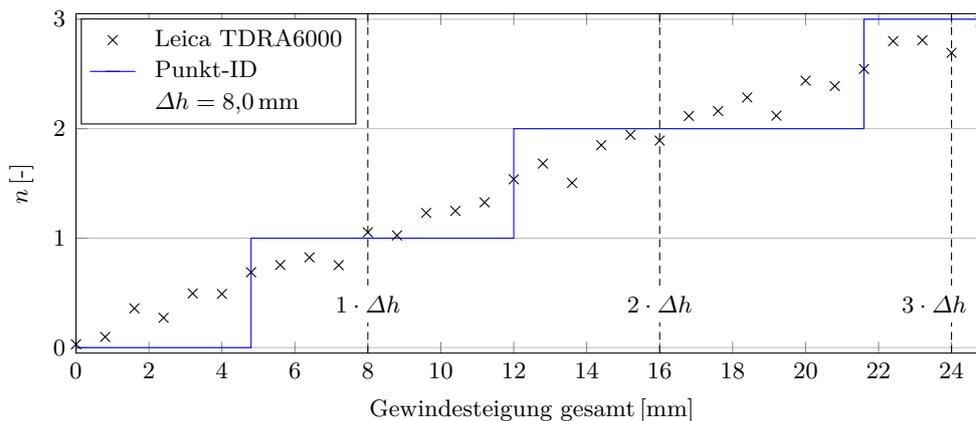


Abb. 4.18: Ergebnisse der Punkt-ID für justierbare Codeblockhöhen

Identifizierung muss die messtechnisch ermittelte Punkt-ID an den Sollpositionen mit der Anzahl an theoretisch verwendeten Codeblöcken übereinstimmen. Für die Untersuchungsergebnisse wird diese Forderung für alle Punktkennungen erfüllt. Da die Punkt-ID als blaues Stufendiagramm in Abbildung 4.18 kenntlich gemacht ist, kann ein Bereich um die Sollpositionen festgestellt werden, der ebenfalls zur Ermittlung der korrekten Punktkennungen führt. Hinsichtlich der Gewindesteigung erstreckt sich der Bereich im schlechtesten Fall zwischen $ID \cdot \Delta h \pm 2 \text{ mm}$. Da die Gewindesteigung in den Bereichen variiert, kann die Konstanz der Punkt-ID als Robustheit gegen zusätzliche Mess- und Fertigungsabweichungen interpretiert werden. Darüber hinaus lässt sich auf eine geringere Messunsicherheit des Instruments schließen als in der Vorbetrachtung veranschlagt. Als typische Werte für das TDRA6000 wird bei Leica (2013b) der halbe MPE angegeben. Diesbezüglich könnte die veranschlagte Codeblockhöhe von 8 mm reduziert werden. Aufgrund der Robustheit sollte von der Reduzierung jedoch abgesehen werden.

Ein Vorteil der punktidentifizierenden Halterung ist die Invarianz gegenüber räumlicher Rotationen. Da die Ermittlung der Punkt-ID lediglich auf einer Relativmessung beruht, ist die Montageausrichtung beliebig wählbar. Für sehr große Punktcodewertebereiche stößt der Ansatz aufgrund der aufeinander aufbauenden Codeblöcke aus rein praktischer Sicht jedoch an seine Grenzen. Für drei Codeblöcke entspricht die Ausdehnung in der Höhe etwa 24 mm und ist bedenkenlos anzuwenden. Die damit erreichbare 2-Bit-Codierung ist für den praktischen Einsatz vollkommen ausreichend. Aufgrund der gegebenen Messkonstellation bietet sich die Anwendung der Halterung besonders für die Codierung von Verknüpfungspunkten an. Die Reihenfolge der Punktmessungen zu P_1 und P_2 , welche gegebenenfalls Punktverwechslungen beinhaltet, kann in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden.

4.4 Anwendungen beim Schienenfahrzeugbau

Bei der Qualitätssicherung schienengebundener Fahrzeuge ist aus geodätischer Sicht vor allem die Richtigkeit zugrunde liegender Koordinatentransformationen zu gewährleisten. Ist die Korrektheit der Transformationen sichergestellt, kann die Kontrolle weiterer Punktmessungen im Rahmen eines vollautomatisierten Messablaufs in Echtzeit erfolgen. Die weiteren Voraussetzungen für die Automatisierung werden in Kapitel 2.4 erläutert. In den folgenden Kapiteln wird in diesem Zusammenhang auf die direkte Identifizierung von Bezugspunkten zur genäherten

Instrumentenstationierung eingegangen. Darüber hinaus wird die Anwendung identifizierbarer Verknüpfungspunkte bei der messtechnischen Erfassung des Schienenfahrzeugs geschildert. Beide Anwendungen werden im Zusammenspiel mit der Rollbockvariante einer Eckkraftmesseinrichtung (EKM) beschrieben.

4.4.1 Näherungslösung für die Instrumentenstationierung

Beim Einsatz der EKM als Rollbockvariante sitzen die Laufräder auf einem Messgleis auf. Die Differenz zwischen den Höhen und der parallelen Ausrichtung beider Schienenstränge beträgt in den meisten Fällen weniger als 0,5 mm. Durch das konische Radprofil der Laufräder nach DIN EN 13715 : 2015 sitzen die Radkränze einer Achsverbindung derart auf dem Messgleis auf, dass die Verbindungslinie der Aufstandspunkte in guter Näherung orthogonal zu den Schienensträngen ausgerichtet ist. Die Gleismittelenachse steht senkrecht auf der Verbindungslinie und beschreibt zu den Innenkanten der Schienenköpfe einen Abstand von jeweils 717,5 mm, wenn von der deutschen Normalspur ausgegangen wird. Zudem kann die Gleismittelenachse während des Prüfablaufes als gute Näherung für die Wagenlängsachse angenommen werden. Aufgrund des Radprofils und der damit definierten Lage und Ausrichtung der Rollböcke kann dieser Zusammenhang auch auf die EKM übertragen werden. Entsprechende Bezugspunkte, welche die Gleismittelenachse realisieren bzw. eine Vertikalebene durch die Wagenlängsachse definieren (Wagenlängsebene), sind an der EKM vorzusehen.

Um die Sichtbarkeit der Bezugspunkte in Abhängigkeit zum Instrumentenstandpunkt zu gewährleisten, müssen je Rollbock zwei und somit insgesamt vier Bezugspunkte geschaffen werden. Bezüglich der EKM-Konstruktion und aufgrund der Eigenschaften des Radprofils entspricht die geometrische Mitte zwischen den Laufradebenen der Wagenlängsebene. Darüber hinaus kann eine Achse zwischen den Laufrädern anhand des Zentrums der Laufradbuchsen (Abb. 4.19b) messtechnisch bestimmt werden. In Abbildung 4.19a wird diese Achse gelb hervorgehoben.

Zur Bestimmung der Bezugspunktpositionen wurden zunächst die Parameter der Laufradebenen anhand taktiler Messungen mit einem Lasertracker Leica AT402 bestimmt. Die Laufradachse wurde durch zwei Punktmessungen mit einem selbstzentrierenden Adapter an den Laufradbuchsen

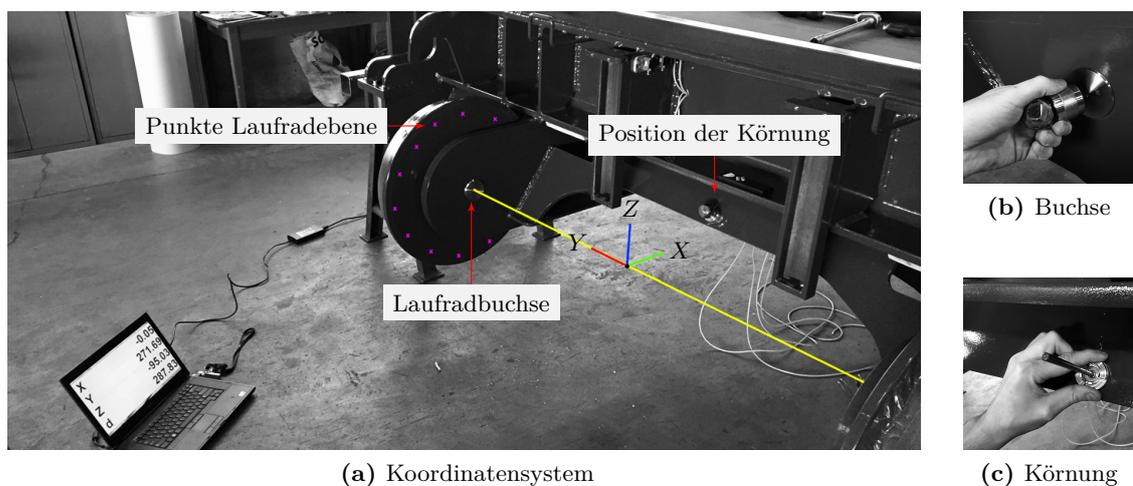


Abb. 4.19: Vorbereitung der Eckkraftmesseinrichtung

hergestellt. Aus dem Schnitt der Laufradachse mit den Laufradebenen konnten darauf folgend zwei Punkte berechnet werden, deren arithmetisches Mittel \mathbf{X}_0 in der Wagenlängsebene liegt. In Abbildung 4.19a wird dieser Punkt als Ursprung eines temporären Koordinatensystems repräsentiert. Die Transformation der AT402-Koordinaten hinsichtlich des dargestellten Systems erfolgt anhand dreier Translationen und einer Rotation um die Z -Achse. Der Translationsvektor ist identisch zu \mathbf{X}_0 , wobei die X - Y -Ebene aufgrund der Neigungskompensation des Instruments eine Horizontalebene darstellt. In Analogie zur Gleichung 4.20 werden die translatorischen Zuschläge vor der Rotation an die Instrumentenkoordinate angebracht. Aus diesem Grund ergibt sich die Rotation zwischen beiden Systemen aus dem in der Horizontalebene liegenden Winkel zwischen der Y -Achse des Instrumentensystems und der Vertikalebene entlang der Laufradachse.

Mit den transformierten Koordinaten wird die Position des Bezugspunkts auf dem Traversenblech der EKM angeköhrt. Dazu wurde eine Reflektorhalterung (Punching-Tool) genutzt, welche den SMR magnetisch mit der Halterung verbindet und im Zentrum eine Öffnung zum Einführen eines Körners vorsieht (Abb. 4.19c). Die Körnung wurde auf dem Traversenblech derart angebracht, dass der resultierende Bezugspunkt in der X - Z -Ebene des in Abbildung 4.19a dargestellten Systems liegt und zur Unterkante des Bleches ein Höhenoffset von 25 mm aufweist. Dieses Vorgehen wird für alle Bezugspunkte wiederholt, wobei die Körnungen lediglich zur Herstellung der korrespondierenden Bohrungen dienen, welche die Bezugspunkte dauerhaft am Rollbock kennzeichnen. Darüber hinaus ist der Abstand zwischen der Laufradachse und den Kraftaufnehmeroberkanten konstruktiv bekannt, sodass ein Offset in Z vom jeweiligen Bezugspunkt bis zur horizontalen Ebene der Kraftaufnehmeroberkanten bestimmt werden kann. Das Offset wird mit ΔZ_F bezeichnet und soll als Vereinfachung für die weiteren Betrachtungen bei allen Bezugspunkten gleich sein.

Während der Vermessung ist das Schienenfahrzeug auf den Kraftaufnehmern aufgesetzt (Vierpunktaufgabe). Bezüglich des Fahrzeugkoordinatensystems sind die absoluten Beträge der X -, Y - und Z -Werte jedes Kraftübertragungspunkts identisch, d. h. der Koordinatenursprung liegt im Schwerpunkt der vier Koordinaten. Ein initialer Schritt der Fahrzeugvermessung ist die Herstellung einer horizontalen Lage. Dazu sind die Höhendifferenzen zwischen den vier Kraftübertragungspunkten zu bestimmen, wodurch sich der erste Instrumentenstandpunkt meist zwischen den Rollböcken der EKM befindet und aufgrund der Punktsichtbarkeit tief zu wählen ist. In Abbildung 4.20a wird diesbezüglich ein Bodenstativ verwendet. Aufgrund der Instrumentenposition sind die zum Ursprung des Fahrzeugsystems zeigenden Bezugspunktbohrungen der EKM messbar. Als bildliche Betrachtung wird durch die Messung beider Punkte eine Linie aufgespannt, die als gute

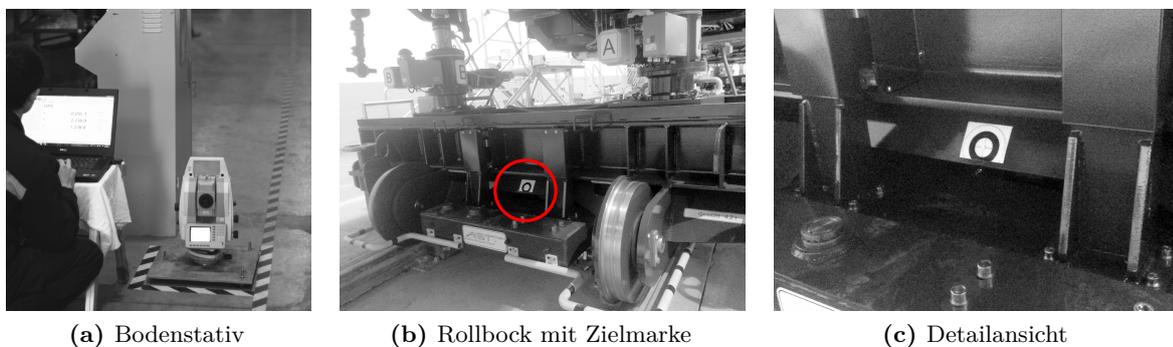


Abb. 4.20: Messsituation beim Einsatz codierter Zielmarken mit einer EKM

Näherung in der Wagenlängsebene liegt. Das arithmetische Mittel aus den Punktmessungen stellt mit dem Koordinatenzuschlag ΔZ_F den Translationsvektor zwischen dem Instrumenten- und Fahrzeugsystem dar. In ähnlicher Weise wie beim Vorgehen zur Bezugspunktkörnung, erfolgt die Translation zuerst. Die Rotation um die Z -Achse wird aufgrund des Horizontalwinkels zwischen der X -Achse des Instrumentensystems und des Vektors vom Fahrzeugursprung zum Bezugspunkt des WE1 gebildet. Durch die Näherung der Instrumentenstationierung kann der Messprozess automatisiert werden und punktbezogene Echtzeitkontrollen durchgeführt werden.

Um sicherzustellen, dass die positive X -Achse nach der Transformation zum WE1 zeigt, werden die Punktkennung der an der EKM befindlichen Bezugspunkte durch direkte Identifizierungsverfahren ermittelt. In Abbildung 4.20 wird dazu beispielhaft eine ringförmig codierte Zielmarke vorgesehen, deren Zielmarkenmittelpunkt M durch einen rückseitig angebrachten Bolzen im Bezugspunkt zentriert wird. Die ID der Zielmarke wird somit genau einem Rollbock zugeordnet, dessen Position hinsichtlich der Kraftübertragungspunkte am WE1 oder WE2 bekannt ist. Die Kraftaufnehmer können in diesem Zusammenhang mit speziellen Adaptierungen versehen sein, die lediglich zu einem der beiden Wagenenden passen.

Die beschriebene Verfahrensweise zur Identifizierung eines Wagenendes kann darüber hinaus anhand von kugelförmigen Reflektoren umgesetzt werden. Bei der Verwendung einer Reflektorhalterung mit Tastschalter kann der Schalter direkt an der innen liegenden Traversenseite der EKM montiert werden, sodass der Taststift sowohl durch die Bohrung als auch durch die modifizierte Reflektorhalterung tritt. In gleicher Weise wie die Zielmarke ist die Reflektorhalterung an der Vorderseite des jeweiligen EKM-Traversenblechs sichtbar, wodurch die Punktidentifizierung und somit auch die sichere Ausrichtung des Koordinatensystems vollzogen werden kann. Neben der höheren Messgenauigkeit aufgrund der SMR-Verwendung kann die automatisierte Zielerfassung (ATR) zum Einsatz kommen. Dies gilt ebenfalls für die Verwendung von Reflektorhalterungen mit doppelter Aufnahme, bei welchen jedoch einer der Messpunkte P_1 oder P_2 durch den Bezugspunkt der EKM repräsentiert werden muss. Aufgrund der Verwechslungsgefahr ist in diesem Zusammenhang die Zielmarkencodierung oder die Reflektorhalterung mit einem Tastschalter vorzuziehen.

4.4.2 Standpunktverknüpfung

Zur vollständigen Erfassung der Fahrzeuggeometrie sind in der Regel mehrere Instrumentenstandpunkte nötig. Die Standpunktverknüpfung erfolgt durch die Messung identischer Punkte einer jeden Instrumentenaufstellung. Die zugrunde liegenden Koordinatentransformationen sind Kapitel 2.4.2 zu entnehmen. Da die EKM als Rollbockvariante in verschiedenen Arbeitsumgebungen eingesetzt wird, werden die Reflektorhalterungen der Verknüpfungspunkte fest auf der EKM angebracht. In den Blechen zur Führung der Feinhubeinrichtungen sind entsprechende Bohrungen vorgesehen, damit die Reflektorhalterungen mit Schraubenverbindungen an den Rollböcken fixiert werden können. In der Regel werden vier Halterungen angebracht, die in der Grundrissbetrachtung ein Rechteck aufspannen. Um die Gefahr der Punktverwechslung ausschließen zu können, werden die Reflektorhalterungen der Verknüpfungspunkte durch Halterungen mit Tastschalter oder einer doppelten Aufnahme ersetzt (Abb. 4.21).

Da neben der Stabilität keine weiteren Anforderungen an die Verknüpfungspunkte gestellt werden, entspricht das Vorgehen bei der Messung dem Messprozess unter Verwendung nicht codierter Reflektorhalterungen. Für Halterungen mit einem Tastschalter wird die ID des Verknüpfungspunktes

nach der Messung direkt mit der Koordinate verknüpft. Die Koordinaten der Verknüpfungspunkte des ersten Instrumentenstandpunkts werden in der Praxis oft als Referenz verwendet. Mit Helmert-Transformationen werden die Instrumentensysteme der Standpunkte aufgrund korrespondierender Koordinatenkennungen zur Deckung gebracht. Lediglich die spezifischen Messunsicherheiten und zufällige Messabweichungen müssen im Ergebnis der Transformation interpretiert werden.

In gleicher Weise können Reflektorhalterungen mit einer Doppelaufnahme zum Einsatz kommen. Die Punktkennung wird hingegen aus den Messpunkten P_1 und P_2 gewonnen. Als Koordinate des Verknüpfungspunkts kann entweder das Mittel aus beiden Punktmessungen gebildet werden oder beide Messstellen werden direkt als Verknüpfungspunkte behandelt. Die letztere Variante bietet den Vorteil, dass neben der Punktidentifizierung die regelmäßige Verteilung der Verknüpfungspunkte gelockert wird. Die direkte Identifizierung und eine Identifizierung aufgrund der Netzgeometrie können folglich in Kombination erfolgen.

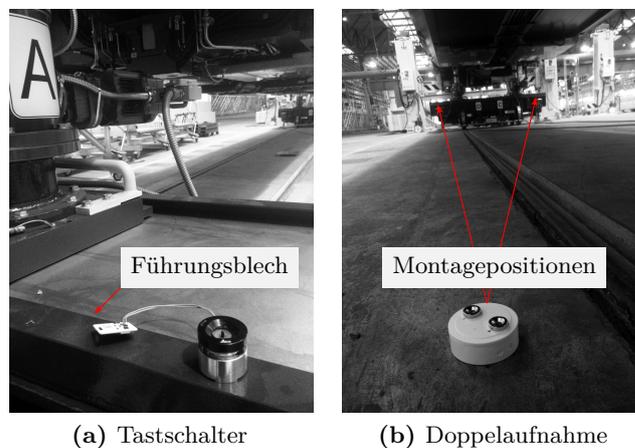


Abb. 4.21: Verknüpfungspunkte an der Eckkraftmesseinrichtung

Generell ist die vollständige Codierung aller Verknüpfungspunkte nicht nötig. Können mindestens zwei Punktkoordinaten eindeutig zu einer ID zugewiesen werden, kann die weitere Identifizierung auch im Falle einer regelmäßigen Verknüpfungspunktverteilung anhand der inneren Netzgeometrie erfolgen. Die Auswahl der zu codierenden Verknüpfungspunkte ist aufgrund der Sichtbarkeit auf den Instrumentenstandpunkten zu wählen; in diesem Zusammenhang kann auch eine größere Anzahl an codierten Punkten nötig sein.

Für die Qualitätssicherung schienenengebundener Fahrzeuge kann hinsichtlich der beschriebenen Konzepte auf eine sichere Standpunktverknüpfung geschlossen werden. In Kombination mit dem Verfahren zur genäherten Instrumentenstationierung lässt sich der Messprozess bereits nach zwei Punktmessungen vollständig automatisieren. Die dadurch realisierbaren Kontrollmechanismen sichern sowohl die vollständige Erfassung aller Messstellen als auch die Richtigkeit einer jeden Messposition. Der vermessungstechnische Prüfablauf kann damit zeiteffizient in den Qualitätssicherungsprozess eingegliedert zu werden.

5 Indirekte Punktidentifizierung

Die indirekte Punktidentifizierung nutzt Zusatzinformationen eines Funksystems zur Stationierung polarer Messsysteme. Der mobile Knoten wird dazu direkt am Tachymeter montiert und durch Bogenschnittverfahren in einem Bezugssystem positioniert. Über die Vorinformation der Stationierung wird die Identifizierung von Bezugspunkten ermöglicht, welche durch das Tachymeter messtechnisch erfasst werden. Besonders hinsichtlich regelmäßiger Bezugspunktverteilungen soll damit eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit geschaffen werden, damit die tachymetrisch bestimmten Koordinaten sicher in das Bezugssystem transformiert werden können. Die zugrunde liegenden Ausgleichs- und Identifizierungsverfahren werden im Folgenden beschrieben und anhand einer praxisnahen Anwendung verdeutlicht. Bei den Ausführungen wird die Notation von Messdaten und Koordinatensystemen gemäß Kapitel 3 vollzogen. Koordinaten des polaren Messsystems werden mit \mathbf{X}_T bezeichnet und zugehörige Distanzen mit D angeführt. Bezüglich des Funksystems werden Koordinaten \mathbf{x} und die Funkdistanzen F verwendet.

5.1 Kombination des Tachymeters mit einem Funksystem

Für die indirekte Punktidentifizierung kommt das Industrietachymeter Leica TDRA6000 in Kombination mit dem Funksystem Metirionic MIC-DMK zum Einsatz. Sollen tachymetrisch gemessene Distanzen mit den Messergebnissen des Funksystems verknüpft werden, muss eine räumliche Korrespondenz zwischen beiden Systemen hergestellt werden. Zweckdienlich wird der mobile Knoten MK direkt am Tachymeter angebracht, was im vorliegenden Fall durch die Anbringung am Tragegriff realisiert wurde (Abb. 5.1). Unter diesen Bedingungen ist die Bedienung des Instruments uneingeschränkt möglich und der erforderliche Platzbedarf gering. Die verwendete Krallenbefestigung ist mechanisch mit dem Mobilknoten verbunden und auf den Durchmesser des Tragegriffholms angepasst. In dieser Montageanordnung befindet sich der Distanznullpunkt des Funksystems stets exzentrisch zur Stehachse des Tachymeters. Im

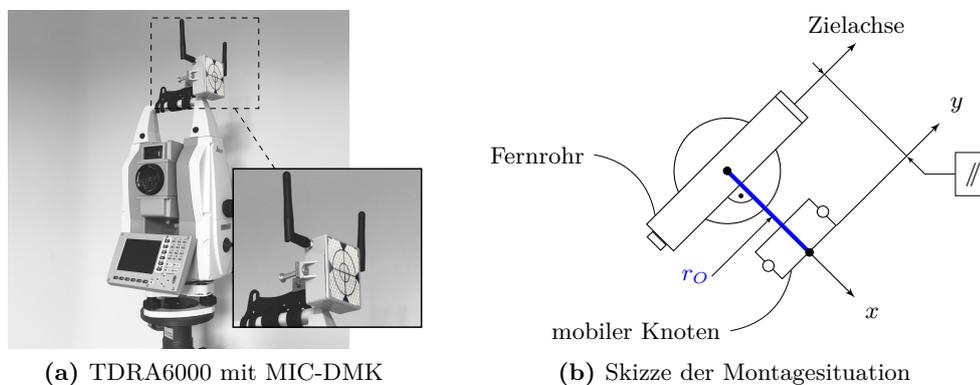


Abb. 5.1: Kombination des Tachymeters mit einem Funksystem

Zusammenhang mit der ebenen Betrachtungsweise aus Abbildung 5.1b wird davon ausgegangen, dass durch die Montageanordnung eine Parallelität zwischen der Zielachse des Instruments und der y -Achse des mobilen Knotens gegeben ist. Das zugrunde liegende Koordinatensystem des Mobilknotens wurde im Kapitel 3.2 definiert.

5.1.1 Antennenoffset und Homogenisierung

Infolge der Tragegriffbefestigung kann kein konstantes Offset hinsichtlich des Tachymeterkoordinatensystems angegeben werden. Die Relation zum Tachymeterursprung wird deshalb als Lageoffset, dem in der X_T - Y_T -Ebene liegenden Radius r_O , und dem Höhenoffset h_O ausgedrückt (vgl. Abb. 5.1b). In gemeinsamer Betrachtung werden beide Komponenten als Antennenoffset bezeichnet.

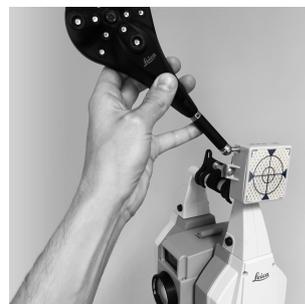
Die messtechnische Bestimmung des Antennenoffsets erfolgte mit einem Lasertracker Leica AT402 in Kombination mit B-Probe-Messungen (Abb. 5.2). Bei dem am TDRA6000 montierten Mobilknoten wurden die Hülsen beider SMA-Buchsen und die Gehäuseabdeckung mit der B-Probe angetastet. Aus den Punktmessungen der Gehäuseabdeckung wurde eine vermittelnde Vertikalenebene E berechnet. Darüber hinaus wurde der Mittelpunkt O' zwischen den SMA-Buchsen aus den Messungen der Hülsen gebildet. Der Fußpunkt des Normalenvektors auf E , welcher durch O' verläuft, wird abschließend um das Zielpunktoffset ΔZ aus Kapitel 3.2.1 reduziert. Die resultierende Koordinate stellt den Koordinatenursprung des mobilen Knotens im Koordinatensystem des AT402 dar. Um aus dieser Koordinate das Antennenoffset ableiten zu können, wurden sowohl mit dem TDRA6000 als auch unter Verwendung des AT402 Verknüpfungspunkte aufgemessen. Mit einer Helmert-Transformation können beide Koordinatensysteme zur Deckung gebracht werden und so die Koordinate des MK-Koordinatenursprungs vom AT402-System in das System des TDRA6000 überführt werden. Der Z_T -Wert der transformierten Koordinate entspricht dem Höhenoffset und die Wurzel aus der Quadratsumme von X_T und Y_T dem Lageoffset. Für den Versuchsaufbau aus Abbildung 5.2 wurden als Messergebnisse

$$r_O = 101,7 \text{ mm} \quad \text{und} \quad h_O = 144,0 \text{ mm} \quad (5.1)$$

bestimmt. Anhand des bekannten Antennenoffsets sollen die Messergebnisse des Tachymeters in Bezug auf das MK-Koordinatensystem betrachtet werden. Dieser Vorgang wird in den weiteren Ausführungen als Homogenisierung bezeichnet und basiert auf einer Einzelmessung zu einem



(a) Messaufbau



(b) B-Probe-Messung

Abb. 5.2: Bestimmung des Antennenoffsets

Punkt P, dessen Zenitwinkel mit ξ bezeichnet wird. Das konkrete Ziel der Homogenisierung ist die Korrektur der tachymetrisch erfassten Distanz D hinsichtlich des Funkdistanznullpunkts am Mobilknoten. In Abbildung 5.3a wird die homogenisierte Distanz mit D' angeführt. Insgesamt zwei Faktoren müssen zur Homogenisierung berücksichtigt werden: Zum einen das Antennenoffset und zum anderen die Zielpunktkorrektur, sofern die retroreflektierende Zielmarke eines Ankerknotens als Zielpunkt dient.

Falls ein Ankerknoten als Zielpunkt dient, wird zunächst die Zielpunktkorrektur mit den Gleichungen 3.10 durchgeführt. Abweichungen der korrigierten Daten aufgrund der Ankerneigung sollen in dieser Betrachtungsweise vernachlässigt werden. Die korrigierten Daten der Distanz D_P und des Zenitwinkels ξ_P werden im Weiteren zur Berücksichtigung des Antennenoffsets verwendet. Die resultierende homogenisierte Distanz

$$D' = \sqrt{r_O^2 + h_O^2 + D_P^2 - 2D_P h_O \cos \xi_P} \quad (5.2)$$

verläuft von P bis zum Ursprung der Funkdistanzmessung am mobilen Knoten. Bei der in Gleichung 5.2 ausgewiesenen Relation ist besonders die Orthogonalität zwischen der x -Achse des Mobilknotens und derjenigen Vertikalebene, welche die Zielachse beinhaltet, vorauszusetzen. Im Falle, dass der Zielpunkt keinen Ankerknoten darstellt, ist in Gleichung 5.2 die Distanz D anstelle von D_P und ξ anstelle von ξ_P zu verwenden. Die Homogenisierung in der dargestellten Form kann jedoch nur angewendet werden, wenn die Funkdistanzmessung während der Punktmessung durchgeführt wurde, bzw. die Horizontalrichtung hz auch bei der Bestimmung von F vorliegt. In einer verallgemeinerten Betrachtungsweise besteht die Möglichkeit, dass die Funkdistanzen unter einer beliebigen Horizontalrichtung hz' ermittelt wurden. Die gleichzeitige Erfassung von hz' und F ist problemlos möglich, sodass der Horizontalwinkel

$$\Delta hz = hz - hz' \quad (5.3)$$

als gegeben gilt. Die Distanzmessung des Tachymeters muss folglich auf die geometrische Konstellation zwischen P und MK' zum Zeitpunkt der Funkdatenerfassung zurückgeführt werden. Wie aus Abbildung 5.3b ersichtlich wird, kann diese Zurückführung als eine ebene Translation des Instruments in oder entgegen der Richtung des Zielpunktes P interpretiert werden. Auf der

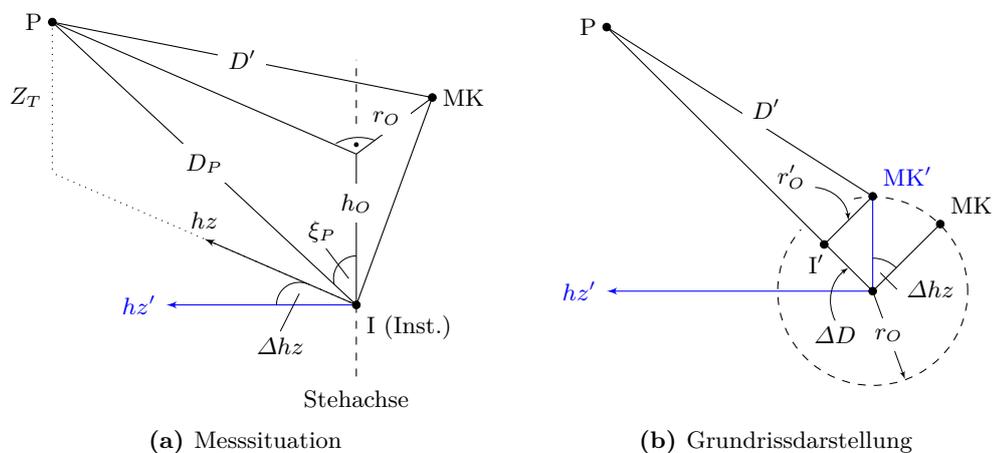


Abb. 5.3: Reduzierung der Tachymeterdaten auf den Antennenursprung

virtuellen Instrumentenposition I' muss dann ein reduziertes Antennenoffset

$$r'_O = r_O \cos \Delta hz \quad (5.4)$$

eingeführt und die Distanz D_P aufgrund der Translation modifiziert werden. Die dadurch resultierende Distanz

$$D'_P = \sqrt{(Z_T + \Delta Z)^2 + (D_{P_{hz}} - \Delta D)^2} \quad \text{mit} \quad \Delta D = r_O \sin \Delta hz \quad (5.5)$$

wird mittels der Horizontalstrecke $D_{P_{hz}}$, Punkthöhe Z_T sowie der ebenen Translation ΔD bestimmt. Damit können die Dreiecke $\triangle MKIP$ und $\triangle MK'I'P$ äquivalent betrachtet sowie Ausgangsgleichung 5.2 auf die korrigierten Parameter angewendet werden. Durch das Einsetzen der Parameter r'_O , D'_P und

$$\xi'_P = \arctan \left(\frac{D_{P_{hz}} - \Delta D}{Z_T + \Delta Z} \right) \quad (5.6)$$

anstelle der ursprünglichen Parametrisierung mit r_O , D_P und ξ_P kann Gleichung 5.2 durch Umformen wie folgt dargestellt werden:

$$D' = \sqrt{r_O^2 + h_O^2 + D_P^2 - 2 D_{P_{hz}} r_O \sin \Delta hz - 2 h_O (Z_T + \Delta Z)} . \quad (5.7)$$

Für den Fall einer nicht benötigten Zielpunktkorrektur gilt darüber hinaus:

$$D_P = D \quad , \quad D_{P_{hz}} = D_{hz} \quad \text{und} \quad \Delta Z = 0 . \quad (5.8)$$

5.1.2 Beschreibung des Versuchsfeldes

Bei der Vermessung eines Bauteils oder einer Baugruppe ist in vielen Fällen eine definierte Messlage einzuhalten, welche entweder dem zukünftigen Einsatzzweck (idealisiert) verkörpert oder zusätzliche Randbedingungen erfüllt. Als Bedingungen sind z. B. torsionsarme Zustände, Lagebeziehungen zwischen Bauteilkomponenten und verschiedene Kräftebilanzen einzuhalten. Um entsprechende Kriterien für die Bauteilvermessung zu erfüllen, kommen spezielle Bauteil- bzw. Messaufnahmen zur Anwendung. In Abbildung 5.4 wird eine Auswahl verschiedener Ausführungen für die Automobil-, Luftfahrt- und Bahnindustrie dargestellt.



(a) Automotiv (VW 2015)



(b) Flugzeugbau (Aerotec 2016)



(c) Bahnindustrie (Ullrich 2015)

Abb. 5.4: Bauteil- und Messaufnahmen (farblich hervorgehoben)

Für die indirekte Punktidentifizierung wird in den weiteren Erläuterungen auf den Einsatz des Funksystems im Rahmen der Produktion schienengebundener Fahrzeuge eingegangen. Aufgrund der Verwendung von Bauteilaufnahmen werden die Ankerknoten nicht am Fahrzeug, sondern an der EKM angebracht. Bei einer Serie von Messungen bietet dies den Vorteil, dass die Demontage der Sensorknoten beim Austausch des Fahrzeugs entfällt. Die Ankerknoten werden wie in Abbildung 5.5 dargestellt an den Feinhubgetrieben und zwischen den Führungsblechen der Feinhubgetriebe montiert. Die Anker sind so ausgerichtet, dass die x -Achse des Koordinatensystems parallel zur X -Achse des Fahrzeugkoordinatensystems verläuft und in Näherung eine Parallelität zwischen den horizontalen Ebenen der Koordinatensysteme besteht. Das Fahrzeugkoordinatensystem stellt in den folgenden Kapiteln das Bezugssystem dar, wobei zugehörige Koordinaten mit \mathbf{X} angeführt werden.

Während der Untersuchungen befand sich der Rohbaukörper eines Schienenfahrzeugs auf den vier Kraftaufnehmern der EKM. Die Messsituation kann durch Abbildung 5.4c repräsentiert werden. Zudem sind die Positionen der Auflagepunkte herstellerseitig im Bezugssystem definiert und dienen zur Realisierung des Bezugssystems. Die Koordinaten der Ankerknoten \mathbf{X}_{A_j} ($j=1 \dots 6$) wurden während einer Fahrzeugvermessung tachymetrisch bestimmt und sind somit ebenfalls im Bezugssystem gegeben. Die Koordinaten des Ursprungs der Ankersysteme sind jeweils durch das Zielpunktoffset ermittelbar. Generell kann dadurch für jeden Ankerknoten ein Offset bzgl. der Auflagepunkte definiert werden, damit die Ankerkoordinaten in Abhängigkeit zum Fahrzeug und dessen Auflagepunktpositionen vor der Messung berechnet werden können.

Hinsichtlich der zu erzielenden Automatisierung des Messprozesses sollte die Instrumentenposition bzgl. des Bezugssystems möglichst frühzeitig ermittelt werden. Der erste Instrumentenstandpunkt bei der Fahrzeugvermessung ist im Allgemeinen so zu wählen, dass alle Auflagepunkte messtechnisch erfassbar sind. Wie in Kapitel 4.4.1 bereits angeführt wurde, sind dazu niedrige Instrumentenaufstellungen nötig. Das verwendete Bodenstativ wird aufgrund dessen auch für die indirekte Punktidentifizierung eingesetzt. Die auf dem Bodenstativ befestigte Kombination aus dem Tachymeter und Mobilknoten wurde im Umfeld der EKM auf insgesamt 86 Messpositionen aufgestellt ($k = 1 \dots 86$). Auf jeder Position wurden die Funkdistanzen $F_{i,j,k}$ zwischen dem Mobilknoten und sämtlichen Ankern bestimmt. Um die mögliche Einbettung in einem realen Messablauf nachzustellen, wurden je Standpunkt kurze Messzeiten von rund 30 s vorgesehen. Die Funkdistanzen wurden nach Kapitel 3.2.4 gefiltert, sodass die repräsentativen $F_{j,k}$ für die weitere Prozessierung zur Verfügung stehen.

Darüber hinaus wurden die Zielmarken der Ankerknoten für jeden Standpunkt mit dem Leica TDRA6000 aufgemessen. Unter Verwendung einer Helmert-Transformation konnten dadurch

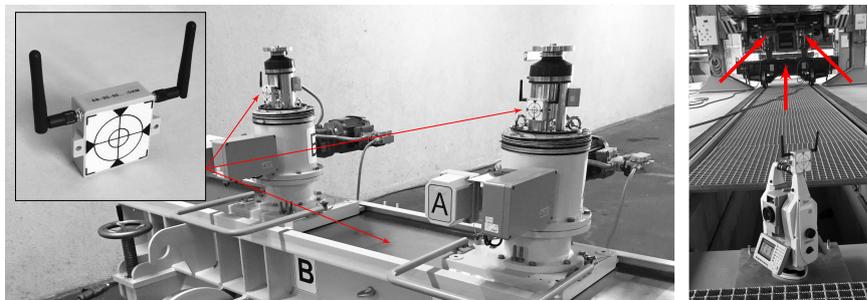


Abb. 5.5: Ankerknoten am Rollbock der EKM

zunächst die Koordinaten der Standpunkte ermittelt werden und mit dem Antennenoffset auf die MK-Positionen geschlossen werden. In Abbildung 5.6 werden die errechneten MK-Positionen gemeinsam mit den Ankerknoten im Bezugssystem dargestellt. Der gesamte Messraum wird zudem in drei Bereiche eingeteilt, die als Innenbereich und Außenbereiche angeführt werden.

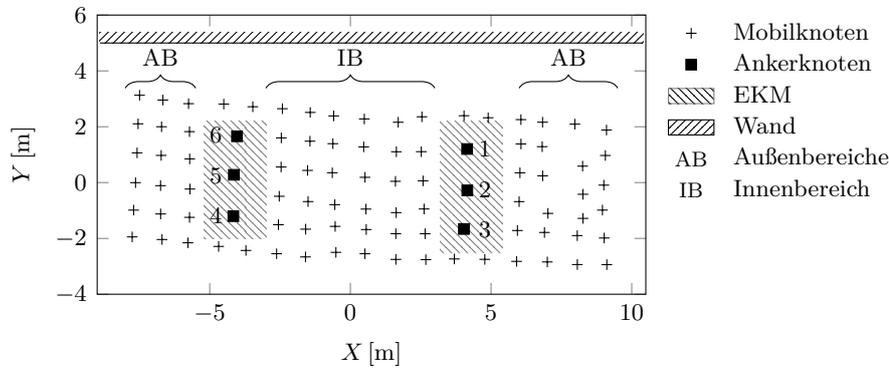


Abb. 5.6: Übersicht des Versuchsfeldes

Neben den Sichtverhältnissen zwischen dem Mobilknoten und den Ankern beeinflussen besonders Personen- und Materialdurchgänge die Funkdistanzmessungen. Darüber hinaus wird die Messumgebung auf einer Seite des Messgleises durch eine massive Wand begrenzt. Mehrwegeeffekte sind in diesen Zusammenhängen nicht auszuschließen.

5.2 Grundlegende Positionierung

Die Verfahren zur Positionierung eines mobilen Knotens nutzen u. a. Distanz- oder Winkelmessungen. Aufgrund der elektronischen Komponenten des eingesetzten Funksystems sind Angulatonstechniken nicht anwendbar. Vielmehr können Laterationsprinzipien zur Anwendung kommen. Beim Schnitt mehrerer Hyperbeln oder Hyperboloiden werden Distanzdifferenzen bzgl. eines Masterknotens bestimmt. Aufgrund der Funkdistanzgenauigkeit sind in diesem Zusammenhang keine zufriedenstellenden Ergebnisse und aus mathematischer Sicht weniger gute Konvergenzverhalten zu erwarten. Der Fokus der weiteren Ausführungen wird deshalb auf die Kreis- bzw. Bogenschnittverfahren gelegt. Da die formalen Zusammenhänge der Bogenschnittverfahren als nichtlineare Problemstellungen klassifiziert werden können, ist eine Linearisierung des funktionalen Modells nötig. In Folge der Linearisierung sind Näherungen der unbekannt Parameter erforderlich, welche dann mit einer vermittelnden Ausgleichung zur Ermittlung der Mobilknotenposition dienen. Die detaillierte Beschreibung des Vorgehens im Rahmen der indirekten Punktidentifizierung erfolgt in den nächsten Kapiteln.

5.2.1 Näherungskordinaten

Zur Bestimmung der Näherungslösung eines Bogenschnitts können im Allgemeinen direkte Lösungsverfahren zum Einsatz kommen. Realisierungen sind z. B. bei Grafarend u. a. (1989), Singer u. a. (1993), Lichtenegger (1995) und Norrdine (2008) beschrieben, wobei die Positionslösungen vornehmlich durch Verfahren der linearen Algebra ermittelt werden. In den folgenden Ausführungen wird der Lösungsansatz nach Singer u. a. (1993) aufgegriffen. Die Berechnungsergebnisse

dienen in den weiteren Anwendungen als Näherungslösungen der Mobilknotenpositionen und sollen aus diesem Grund genauer beschrieben werden. Die Erläuterungen werden dabei hinsichtlich des Anwendungszwecks konkretisiert.

Der direkte Lösungsansatz nach Singer u. a. (1993) basiert auf den Funkdistanzen zwischen einem mobilen Knoten und drei fest installierten Ankerknoten. Die kartesischen Koordinaten der Anker $\mathbf{X}_{A1}, \mathbf{X}_{A2}, \mathbf{X}_{A3}$ sind im Bezugssystem gegeben und spannen unter Hinzunahme der Mobilknotenposition \mathbf{X}^0 einen Tetraeder auf. Die Notation \mathbf{X}^0 wurde im Hinblick auf die weitere Verwendung als Näherungslösung gewählt. Darüber hinaus können die Seitenlängen des in Abbildung 5.7 dargestellten Tetraeders durch die Funkdistanzen F und die berechenbaren Strecken S zwischen den jeweiligen Ankerknoten beschrieben werden. Anhand des Volumens

$$V^2 = \frac{1}{288} \begin{vmatrix} 0 & S_{12}^2 & S_{13}^2 & F_1^2 & 1 \\ S_{12}^2 & 0 & S_{23}^2 & F_2^2 & 1 \\ S_{13}^2 & S_{23}^2 & 0 & F_3^2 & 1 \\ F_1^2 & F_2^2 & F_3^2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad (5.9)$$

und der HERON'schen Formel kann daraufhin die Grundfläche des Tetraeders bestimmt werden. In Abbildung 5.7 entspricht die Grundfläche dem Flächeninhalt des durch die Ankerknoten aufgespannten Dreiecks und ergibt sich zu:

$$G = \sqrt{s \cdot (s - S_{23}) \cdot (s - S_{13}) \cdot (s - S_{12})} \quad \text{mit} \quad s = \frac{1}{2}(S_{23} + S_{13} + S_{12}) . \quad (5.10)$$

Der Abstand von der Grundfläche entlang der Flächennormalen zum mobilen Knoten beschreibt die Höhe des Tetraeders $h = 3V/G$ und definiert den in der Grundfläche liegenden Lotfußpunkt L. Ausgehend vom Lotfußpunkt werden die Strecken

$$s_1 = \sqrt{F_1^2 - h^2} \quad , \quad s_2 = \sqrt{F_2^2 - h^2} \quad \text{und} \quad s_3 = \sqrt{F_3^2 - h^2} \quad (5.11)$$

zu den Ankerknoten bestimmt. Die Ermittlung der gesuchten MK-Position wird durch die Definition eines lokalen $\{u, v\}$ -Koordinatensystems mit dem Ursprung in AK_1 realisiert. Die u -Achse verläuft durch AK_1 und AK_2 . Als v -Achse wird die Vervollständigung des rechtwinkligen Koordinatensystem in der Grundfläche des Tetraeders definiert. Infolge dieser Konventionen

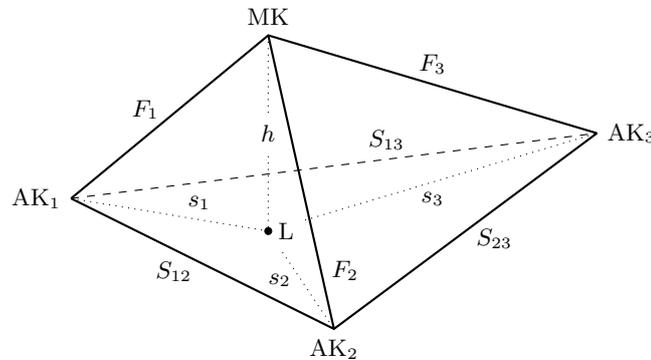


Abb. 5.7: Tetraeder der Ankerknoten und des Mobilknotens

ergeben sich die lokalen Koordinaten von L und AK_3 zu:

$$\begin{bmatrix} u_L \\ v_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{S_{12}^2 + s_1^2 - s_2^2}{2S_{12}} \\ \pm \sqrt{s_1^2 - u_L^2} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u_{A_3} \\ v_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{S_{12}^2 + S_{13}^2 - S_{23}^2}{2S_{12}} \\ \sqrt{S_{13}^2 - u_{A_3}^2} \end{bmatrix}. \quad (5.12)$$

Da der Lotfußpunkt innerhalb oder außerhalb des Grundflächendreiecks liegen kann, sind verschiedene Vorzeichen für v_L möglich. In den Gleichungen 5.12 wird der Term aus diesem Grund mit einem Plusminuszeichen angeführt. Das zu verwendende Vorzeichen ergibt sich aus dem Streckenvergleich zwischen s_3 und

$$\overline{LAK}_3 = \sqrt{(u_L - u_{A_3})^2 + (v_L - v_{A_3})^2}. \quad (5.13)$$

Liegt L innerhalb der Grundfläche, entspricht $s_3 = \overline{LAK}_3$ und v_L ist positiv zu wählen. In allen anderen Fällen ist das negative Vorzeichen zu verwenden. Anhand der beiden Richtungsvektoren

$$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{X}_{A_2} - \mathbf{X}_{A_1}}{S_{12}} \quad \text{und} \quad \mathbf{q} = \frac{\mathbf{X}_{A_1} - \mathbf{X}_{A_3}}{S_{13}} \quad (5.14)$$

lassen sich der Normalenvektor der Tetraedergrundfläche \mathbf{n} sowie der sowohl orthogonal zu \mathbf{n} als auch zu \mathbf{r} stehende Einheitsvektor \mathbf{t} wie folgt ableiten:

$$\mathbf{n} = -\frac{\mathbf{r} \times \mathbf{q}}{|\mathbf{r} \times \mathbf{q}|}, \quad \mathbf{t} = \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{r}}{|\mathbf{n} \times \mathbf{r}|}. \quad (5.15)$$

Die abschließenden Positionslösungen nach Gleichung 5.16 sind u. a. abhängig von der Höhe h , welche aus dem Tetraedervolumen berechnet wird. Da das Volumen aus Gleichung 5.9 sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann, wurde in Gleichung 5.16 eine entsprechende Faktorisierung der Höhe h vorgenommen. Die direkte Lösung des räumlichen Bogenschnitts führt deshalb zu zwei Ergebnissen.

$$\mathbf{X}^0 = \mathbf{X}_{A_1} + \mathbf{u}_L \mathbf{r} + \mathbf{v}_L \mathbf{t} \pm h \mathbf{n} \quad (5.16)$$

Es können jedoch auch mehr als drei Ankerknoten und zugehörige Funkdistanzen zur Verfügung stehen. Für das beschriebene Netz wurde die Gesamtanzahl an Ankern mit $J = 6$ angegeben.

Der beschriebene Lösungsansatz ist demzufolge mehrfach anzuwenden, indem verschiedene Ankerkombinationen zur Berechnung verwendet werden. Weil jeweils drei Anker die Basis der Berechnung bilden, besteht in mengentheoretischer Betrachtungsweise ein Auswahlproblem ohne zulässige Wiederholungen, das

$$m = \binom{J}{3} \quad (J \text{ über Drei}) \quad (5.17)$$

Teilmengen liefert. Das Verfahren nach Singer u. a. (1993) bringt in diesem Zusammenhang $2m$ Lösungen des Bogenschnitts hervor. Als Auswahlkriterium der geeignetsten Lösung kommt in Anbetracht der Funkdistanzgenauigkeit vor allem ein robustes Schätzverfahren in Frage. Das von Rousseeuw und Leroy (2003) erläuterte Verfahren des Least Median Square (LMS), welches bei Blankenbach und Willert (2009) auf den räumlichen Bogenschnitt angewendet wird, eignet sich

in diesem Zusammenhang besonders durch den hohen Bruchpunkt von 50 % (Hekimoglu und Koch 1999). In der Verfahrensanwendung werden sämtliche F_j , unabhängig von der verwendeten Teilmenge, zur Beurteilung der jeweiligen Positionslösung verwendet. Zunächst werden die Strecken S_j^0 ausgehend von der errechneten Position \mathbf{X}_i^0 ($i = 1 \dots 2m$) zu den Ankern AK_j bestimmt und die Verbesserungen

$$v_j = F_j - S_j^0 \quad (5.18)$$

ermittelt. Als Bewertungskriterium der Positionslösungen wird jeweils der Median der Verbesserungsquadrate zugewiesen. Diejenige Lösung \mathbf{X}_i^0 mit dem minimalen Median

$$\text{med} \{v_j^2\}_i \rightarrow \min \quad (5.19)$$

wird als vorläufiges Endergebnis verwendet. Als Erweiterung zu diesem Ansatz werden neben den Raumstrecken S_j^0 zusätzlich die Horizontalstrecken S_{hzj}^0 gebildet. Entsprechend des beschriebenen Vorgehens werden die Horizontalstrecken in Gleichung 5.18 eingesetzt und eine Positionslösung aufgrund der Forderung 5.19 ermittelt. Das Minimum der LMS aus der räumlichen und ebenen Betrachtung stellt die abschließende Näherungslösung zur Verfügung. Als Vereinfachung wird diese Position in der weiteren Anwendung ohne Index mit \mathbf{X}^0 angegeben. Die Erweiterung des Ansatzes auf eine zweidimensionale Betrachtung wurde hinsichtlich der Identifizierungsverfahren eingeführt. Bei der Identifizierung ist in erster Linie die Lage des Mobilknotens entscheidend. Eine Höhenkomponente wird direkt bei der abschließenden Punktidentifizierung bestimmt.

5.2.2 Ausgleichungsmodell

Auf Grundlage der genäherten Position des Mobilknotens kann das funktionale und stochastische Modell zur Positionsbestimmung genauer erläutert werden. In den weiteren Kapiteln erfolgt der Bezug zum folgend beschriebenen Verfahren unter der Verwendung des Begriffs „Basisausgleichung“. Das stochastische Modell wird dabei in erster Linie durch die Kovarianzmatrix der Beobachtungen Σ_{LL} verkörpert, welche als Teil der Gewichtsmatrix $\mathbf{P} = \sigma_0^2 \cdot \Sigma_{LL}^{-1}$ an der Ausgleichung teilnimmt. Die gemessenen Funkdistanzen stellen in diesem Zusammenhang nicht korrelierte, gleichgenaue Beobachtungen desselben Typs dar. Nach Niemeier (2008) ist es deshalb hinreichend die Gewichtsmatrix als Einheitsmatrix \mathbf{I} zu definieren. Die Beobachtungsgenauigkeiten können dann im Zuge der Ausgleichung durch die a posteriori Standardabweichung beurteilt werden. Für die weiteren Anwendungen gilt deshalb als Ausgangspunkt $\mathbf{P} = \mathbf{I}$.

Die Netzkonfiguration ist besonders durch die geringen Höhendifferenzen zwischen den Ankerknoten gekennzeichnet. In Kombination mit der geringen Funkdistanzgenauigkeit führt diese geometrische Konstellation im Rahmen einer vermittelnden Ausgleichung zur Instabilität des Gleichungssystems; Singularitäten oder sehr langsame Konvergenzen sind zu erwarten. Darüber hinaus wirkt sich die Funkdistanzgenauigkeit bei der genannten Netzkonfiguration besonders auf die Höhenkomponente der zu schätzenden Position aus. Aus diesen Gründen erfolgt die Ausgleichung zunächst für den zweidimensionalen Fall und in der Beobachtungs- bzw. Verbesserungsgleichung

$$F_j + v_j = f_j(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}) = \sqrt{(X_{Aj} - \hat{X})^2 + (Y_{Aj} - \hat{Y})^2 + (Z_{Aj} - \hat{Z})^2} \quad (5.20)$$

des räumlichen Bogenschnitts sind die grau eingefärbten Terme zu vernachlässigen. Auf die vollständige Gleichung wird im Kapitel 5.2.3 zurückgegriffen. Für den zweidimensionalen Fall

wird die zu schätzende Position des mobilen Knotens mit (\hat{X}, \hat{Y}) angegeben. Der Index j signalisiert die gefilterte Funkdistanz F_j zwischen dem Mobilknoten und einem Anker AK_j mit den Koordinaten (X_{Aj}, Y_{Aj}) . Die partiellen Ableitungen von f_j nach den unbekanntem Parametern werden mithilfe der Näherungslösung linearisiert und bilden die Designmatrix \mathbf{A} . Aufgrund des funktionalen Modells werden jedoch nur die Lagekomponenten von \mathbf{X}^0 verwendet. Anhand des gekürzten Beobachtungsvektors \mathbf{l} kann das allgemeine Modell der vermittelnden Ausgleichung vollständig beschrieben werden und die Parameterschätzung kann erfolgen. Das beschriebene Vorgehen kann in Form eines Rechenschemas in Tabelle 2.4 nachvollzogen werden.

In Anbetracht der Funkdistanzgenauigkeit stellt die in einem einzigen Berechnungsdurchgang ermittelte Positionslösung ebenfalls nur eine Näherung dar. Die Ausgleichung ist aufgrund dessen mehrfach iterativ zu wiederholen, wobei in jeder Iteration lediglich die Koordinatenzuschläge $\hat{\mathbf{x}}$ zu einer Näherung \mathbf{X}^0 bestimmt werden. Die Näherungslösung wird nach jedem Iterationsschritt i durch die Koordinatenzuschläge aktualisiert und dient somit selbst als neue Parameterschätzung.

Als direkte Folge aus dem iterativen Vorgehen muss mindestens ein Konvergenzkriterium eingeführt werden, welches den Abschluss des Ausgleichungsverfahrens bewirkt. Besonders für nicht konvergierende Prozesse wird eine Obergrenze maximaler Iterationen η_{max} festgelegt. Für alle weiteren Fälle werden Grenzwerte ϵ definiert, deren Unterschreitung den Abbruch der Berechnung zur Folge hat. Als Testgröße wird z. B. der Quotient aus den gewichteten Verbesserungsquadratsummen aufeinander folgender Iterationsschritte nach Gleichung 5.21 oder der Betrag der Koordinatenzuschläge nach Gleichung 5.22 gewählt.

$$\left| \frac{(\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v})_i}{(\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v})_{i-1}} - 1 \right| < \epsilon_v \tag{5.21}$$

$$|\hat{\mathbf{x}}| < \epsilon_{\hat{\mathbf{x}}} \tag{5.22}$$

Unter der Voraussetzung guter Näherungen konvergiert der beschriebene Ansatz bereits nach wenigen Durchläufen. Aufgrund der Messumgebung und der grundlegenden Funkdistanzgenauigkeit kann von dieser Voraussetzung jedoch nicht zwingend ausgegangen werden. Vielmehr werden die Näherungen vom Instrumentenstandpunkt und den damit verbundenen Einflussfaktoren abhängig sein. Die allgemeine Konvergenz und auch die Konvergenzgeschwindigkeit sind demzufolge standpunktabhängig.

Einleitend wurde in diesem Zusammenhang von gleichgenauen Beobachtungen ausgegangen. Einflussfaktoren wirken sich jedoch auf die tatsächlich zu erreichende Messgenauigkeit aus. Dies kann prinzipiell für alle oder nur einzelne Funkdistanzmessungen der jeweiligen Instrumentenaufstellung zutreffen. Beobachtungen mit großen Messabweichungen würden während der Ausgleichung in gleicher Weise wie genauere Beobachtungen behandelt werden. Die Parameterschätzung wird in diesem Zusammenhang zumindest negativ beeinflusst.

In der Literatur, z. B. bei Kraus (1996) oder Caspary (2013), werden trotz theoretisch gleichgenauer Beobachtungen diesbezüglich robuste Verfahren vorgeschlagen, die individuelle Gewichte in die Ausgleichung einführen. Als Gewichtsfunktionen werden häufig Exponentialfunktionen mit verschiedenen Parametrisierungen eingesetzt. Die Berechnung der Gewichte orientiert sich vielfach an der Annahme normalverteilter Beobachtungsdaten. Für die Funkmessungen kann davon jedoch nicht ausgegangen werden.

Zur Reduzierung der Wertigkeit von Beobachtungen mit großen Residuen führen Gargula und Krupinski (2007) sowie Gargula (2009) den Begriff der Dämpfungsfunktion ein. In einem konkreten Anwendungsfall wird auf die Verwendung einer elliptischen Funktion eingegangen, welche als Resultat die Gewichte p_{jj} im Intervall $[0; 1]$ liefert (Abb. 5.8). Die Ausgangsgleichung der Ellipse

$$\frac{\bar{v}^2}{a^2} + \frac{f(\bar{v})^2}{b^2} = 1 \quad (5.23)$$

wurde als Dämpfungsfunktion mit den Werten $a = \tau$ und $b = 1$ parametrisiert, wobei a und b die Halbachsen der Ellipse darstellen. Die kleine Halbachse stellt demnach die größtmögliche Gewichtung dar und τ beschreibt das Intervall maximaler homogenisierter Verbesserungen

$$\bar{v}_j = \frac{v_j}{\sqrt{(\mathbf{Q}_{vv})_{jj}}} \quad \text{mit} \quad \mathbf{Q}_{vv} = \mathbf{P}^{-1} - \mathbf{A} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{A}^T, \quad \mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}, \quad (5.24)$$

für welche eine Gewichtung zum Tragen kommt. Dabei werden mit \mathbf{Q}_{xx} und \mathbf{Q}_{vv} die Kofaktormatrizen der Unbekannten bzw. Verbesserungen angeführt. Durch das Umstellen von Gleichung 5.23 nach dem Funktionswert $f(\bar{v})$ wird das abschließende Gewichtungsschema

$$p_{jj} = \begin{cases} f(\bar{v}) = \sqrt{1 - \frac{\bar{v}_j^2}{\tau^2}}, & \text{für: } |\bar{v}_j| \leq \tau \\ 0, & \text{für: } |\bar{v}_j| > \tau \end{cases} \quad (5.25)$$

eines jeweiligen Iterationsschritts gebildet. Bei Gargula und Krupinski (2007) werden die ermittelten p_{jj} zusätzlich mit den a priori festgelegten Gewichtungen multipliziert. Aufgrund der einleitend begründeten Gewichtung $\mathbf{P} = \mathbf{I}$ kann der konstante Gewichtungsfaktor im vorliegenden Anwendungsfall entfallen, bzw. ergibt sich zu Eins. Dieser Sachverhalt wurde ebenfalls in der Achsenbeschriftung von Abbildung 5.8 berücksichtigt.

Das beschriebene Vorgehen umfasst somit alle nötigen Bestandteile zur numerischen Lösung der Ausgleichungsaufgabe. Damit der Ansatz flexibler hinsichtlich der Messbedingungen gestaltet wird, erfolgt die Anwendung jedoch als gestufter Ausgleichungsprozess in drei Phasen.

Erste Phase: Die vermittelnde Ausgleichung wird mit den Näherungskordinaten aus Kapitel 5.2.1 initiiert und die Koordinatenzuschläge werden geschätzt. Die Dämpfungsfunktion ist inaktiv, d. h. die Gewichtsmatrix entspricht konstant $\mathbf{P} = \mathbf{I}$. Für gute Näherungen und genaue Beobachtungen konvergiert die Ausgleichung schnell nach Ungleichung 5.22. Es kann von nahezu idealen Messbedingungen ausgegangen werden.

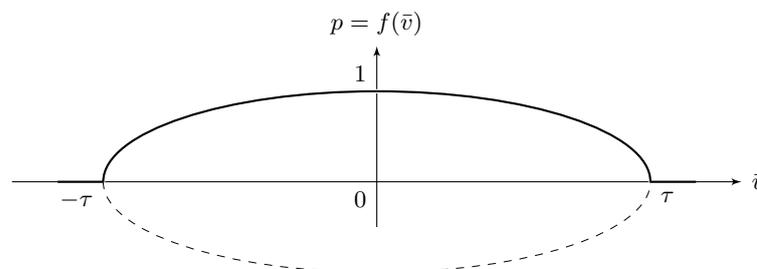


Abb. 5.8: Dämpfungsfunktion (Gargula und Krupinski 2007)

Zweite Phase: Erzielt die Ausgleichung nach einem definierten Iterationsschritt η keine Konvergenz, wird die Gewichtsfunktion 5.25 zugeschaltet. Die Vermutung besteht, dass zumindest ein Teil der Beobachtungen durch die Umgebungsbedingungen beeinflusst wird und dadurch große Residuen aufweist. Der Einfluss solcher Beobachtungen wird aufgrund der Gewichtung in den folgenden Iterationen reduziert. Die Konvergenz der Berechnung wird anhand von Ungleichung 5.22 bewertet.

Dritte Phase: Folgt aus $i > 2\eta$ Iterationen keine Konvergenz nach Ungleichung 5.22, ist davon auszugehen, dass die Datenqualität ungenügend ist, sodass im Sinne der MkQ keine optimale Lösung erzielt werden kann. Im schlechtesten Fall oszilliert die Ausgleichung und endet in der dritten Phase erst nach der definierten maximalen Iterationsanzahl. Um das letztgenannte Szenario möglichst auszuschließen, wird zusätzlich das Abbruchkriterium nach Ungleichung 5.21 aktiviert.

Während die Parameterschätzung $\hat{\mathbf{X}}_i$ bei der ersten Phase als Endergebnis verwendet wird, ist dies bei den verbleibenden Phasen nicht der Fall. Es wird von einer Inkonsistenz des Beobachtungsmaterials ausgegangen, wodurch die geeignetste Positionslösung nicht zwangsläufig mit der Minimierung der Verbesserungsquadratsumme zu vereinbaren ist. Als Folge dessen wird ein Teil des Konzepts zur Näherungsbestimmung aufgegriffen. Ausgehend von $\hat{\mathbf{X}}_i$ werden bei jedem Iterationsschritt die Horizontalstrecken S_{hzj} zu den Ankerknoten AK_j berechnet. Mit den gemessenen Funkdistanzen F_j werden die Verbesserungen v_j analog zu Gleichung 5.18 gebildet. Als Bewertungskriterium wird mit jedem Iterationsschritt die Quadratsumme der Verbesserungen dokumentiert. Für die zweite und dritte Ausgleichungsphase wird diejenige Positionslösung als Endergebnis verwendet, für die gilt:

$$\left(\mathbf{v}_j^T \mathbf{v}_j \right)_i \rightarrow \min . \quad (5.26)$$

Der Ausgleichungsprozess wird gemeinsam mit den erweiterten Modellen des folgenden Kapitels in Abbildung 5.9 auf Seite 124 schematisch dargestellt. Zudem werden die Ergebnisse des gestuften Ausgleichungsansatzes in Kapitel 5.4 anhand der Netzmessung demonstriert und die abschließende Punktidentifizierung durchgeführt.

5.2.3 Erweiterte Modellbildung

Das grundlegende Ausgleichungsmodell in der dargelegten Form berücksichtigt ausschließlich Beobachtungsdaten des Funksystems. Für die Anwendung im Rahmen der Punktidentifizierung liegt jedoch ein fester Verbund zwischen dem Tachymeter und Funkdistanzmesser vor, welcher durch das Antennenoffset beschrieben werden kann. In der erweiterten Modellbildung wird eine präzise Tachymetermessung bei der Ausgleichung berücksichtigt. Die im Folgenden als Zusatzmessung bezeichnete Beobachtung erfolgt zu einem eindeutig identifizierbaren Punkt mit der Koordinate \mathbf{X}_Z im Bezugssystem. Die gemessene Koordinate im System des Tachymeters wird mit \mathbf{X}_{TZ} angeführt und die zugehörige homogenisierte Distanzmessung durch D'_Z angegeben. Die Identifizierung der Zusatzmessung kann z. B. mit den direkten Verfahren erfolgen.

Anhand der Verbesserungsgleichung 5.20 erschließt sich, dass in erster Betrachtung lediglich die Distanzmessungen des Funksystems zur Anwendung kommen. Im Vergleich zur Funkdistanzmessung ist D'_Z durch ein deutlich übergeordnetes Genauigkeitsniveau gekennzeichnet. Bei tachymetrisch bestimmten Distanzen ist von einer Standardabweichung auszugehen, welche um

den Faktor 10^{-3} bis 10^{-4} kleiner ist, als diejenige der Funkmessung. Sinnvollerweise sollten die Daten der Zusatzmessung aufgrund dessen im Zuge der Ausgleichung nicht mit Verbesserungen behaftet und als fester Zwang eingeführt werden.

Darüber hinaus wird mit der Zusatzmessung der Übergang von einer Ausgleichung als Lagenetz zu einer dreidimensionalen Betrachtungsweise ermöglicht, welcher allerdings an Bedingungen geknüpft ist. Insbesondere auf die Höhenproblematik kann dadurch näher eingegangen werden.

Generell sind zwei Verfahrensweisen zur Berücksichtigung von Bedingungen zwischen den zu schätzenden Parametern umsetzbar. Zum einen besteht die Möglichkeit, das Normalgleichungssystem hinsichtlich der Zusatzmessung zu erweitern und zum anderen die Verwendung einer weiteren Modellmatrix, der sogenannten Bedingungsmatrix \mathbf{B} . Im ersten Fall ist Gleichung 5.20 zu linearisieren und anstelle von F_j die präzise Distanzmessung D'_Z einzusetzen. Zusätzlich ist das korrespondierende Gewicht in \mathbf{P} so zu wählen, dass die Genauigkeitsrelation zwischen der Funk- und Tachymetermessung repräsentiert wird.

Im zweiten Fall, der in den weiteren Ausführungen des Kapitels zur Anwendung kommt, wird \mathbf{B} mit Bedingungsgleichungen gebildet (Jäger u. a. 2005, Niemeier 2008). Die Bedingungsgleichungen werden in Analogie zu den Verbesserungsgleichungen der Beobachtungen an der Stelle \mathbf{X}^0 linearisiert und abschließend als Bedingungsmatrix

$$\mathbf{B} = \left(\frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} \right)^0 \quad (5.27)$$

zusammengestellt. Da infolge der Zusatzmessung eine genaue Stationshöhe berechenbar ist, werden von \mathbf{X}^0 lediglich die Lagekomponenten verwendet und die Höhenkomponente

$$Z^0 = Z_Z - \Delta Z - Z_{TZ} + h_O \quad (5.28)$$

aus der Zusatzmessung abgeleitet. Als Ansatz zur Verknüpfung der Funk- und Tachymeterdistanzen sollte dann die Bedingung

$$f_1(\hat{\mathbf{X}}) = D'_Z - \sqrt{(X_Z - \hat{X})^2 + (Y_Z - \hat{Y})^2 + (Z_Z - \hat{Z})^2} = 0 \quad (5.29)$$

gewählt werden, welche die Distanz zwischen der geschätzten Position $(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z})$ und der Koordinate des Zusatzpunktes entsprechend der homogenisierten Tachymeterdistanz festsetzt. Als geometrische Vorstellung entspricht der Radius des Kreisbogens um \mathbf{X}_Z , auf welchem $\hat{\mathbf{X}}$ liegen muss, genau der homogenisierten Distanzmessung. Zudem lässt sich eine weitere Verfügung über die Positionshöhe im Bezugssystem einführen, welche durch die Bedingung

$$f_2(\hat{\mathbf{X}}) = (Z_Z - \Delta Z - Z_{TZ} + h_O) - \hat{Z} = 0 \quad (5.30)$$

ausgedrückt werden kann. In den Gleichungen 5.28 und 5.30 wurde zusätzlich das Zielpunktoffset ΔZ berücksichtigt. Dieses Offset findet ausschließlich im Falle einer Zusatzmessung zu einem Ankerknoten Anwendung. In allen anderen Szenarien entfällt der Korrekturwert ($\Delta Z = 0$). Die resultierende Bedingungsmatrix wird während der Ausgleichung berücksichtigt, indem das GAUSS-MARKOV-Modell erweitert wird. Die Minimierungsaufgabe

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} + 2\mathbf{k}(\mathbf{B}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{w}) \rightarrow \min , \quad (5.31)$$

welche auch als LAGRANGE'sche Funktion bezeichnet wird, enthält den Vektor der Widersprüche \mathbf{w} sowie die LAGRANGE'schen Multiplikatoren \mathbf{k} . Die Widersprüche werden bei der Anwendung des Minimierungsproblems durch das Einsetzen der Parameterschätzung in die Bedingungsgleichungen gebildet. Im Anwendungsfall entspricht dies den Gleichungen 5.29 und 5.30.

Das Normalgleichungssystem zur Berücksichtigung von Bedingungen zwischen den Unbekannten kann damit wie folgt aufgestellt werden:

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \\ -\mathbf{w} \end{bmatrix}. \quad (5.32)$$

Die Koordinatenzuschläge $\hat{\mathbf{x}}$ werden wie bei der Basisausgleichung in mehreren Iterationen bestimmt und aktualisieren die Parameterschätzung. Der gestufte Ausgleichungsansatz kommt in gleicher Weise zum Einsatz. Aufgrund der Einführung von Bedingungen muss zur Berechnung der statistischen Ausgleichungsergebnisse jedoch der erhöhte Freiheitsgrad berücksichtigt werden. Für die Ausgleichung mit u Unbekannten, n Beobachtungen und b Bedingungen ergeben sich

$$f = n - u + b \quad (5.33)$$

Freiheitsgrade. Unter diesen Maßgaben bringt die Ausgleichung die Position $\hat{\mathbf{X}}$ des Mobilknotens im Bezugssystem hervor. Das schematische Vorgehen wird gemeinsam mit dem grundlegenden Ausgleichungsmodell in Abbildung 5.9 zusammengefasst.

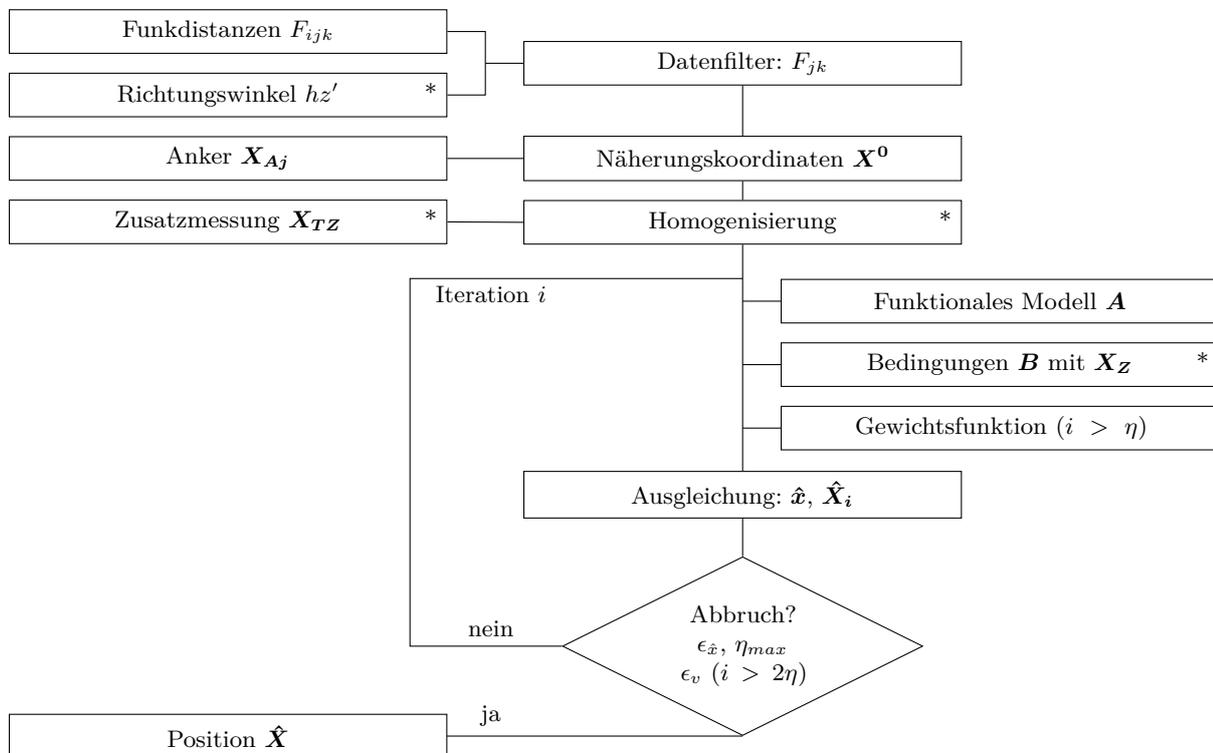


Abb. 5.9: Ausgleichungsverfahren für die Positionsbestimmung: die mit (*) gekennzeichneten Schritte werden nur beim erweiterten Ausgleichungsmodell angewendet

5.3 Funkgestützte Punktidentifizierung

Durch die Anwendung des grundlegenden oder erweiterten Ausgleichungsmodells ist die geschätzte Position des mobilen Knotens im Bezugssystem bekannt. Zur besseren Unterscheidung wird diese initiale Positionslösung in den weiteren Ausführungen mit $\hat{\mathbf{X}}_0$ gekennzeichnet. Die Parameterschätzung wird in diesem Zusammenhang als Vorinformation genutzt, um Bezugspunkte im Anschluss an die tachymetrische Messung zu identifizieren. Da die Identifizierung im Rahmen eines teil- oder vollautomatisierten Messablaufs eingesetzt werden soll, kann die Menge aller bei der Identifizierung in Erwägung zu ziehenden Punkte auf die Bezugspunkte beschränkt werden. Die ausgewählten Bezugspunkte P_j ($j = 1 \dots J$) werden im Folgenden auch als Kandidaten der Identifizierung bezeichnet. Generell können die Kandidaten den Ankerknoten des Versuchsfeldes entsprechen, wodurch $J = 6$ entspräche. Für die Identifizierung ist dieser Sachverhalt allerdings keine Voraussetzung. Lediglich die Koordinaten der Kandidaten \mathbf{X}_{Pj} müssen im Bezugssystem zur Verfügung stehen. Das können hinsichtlich der Schienenfahrzeugvermessung z. B. Punkte eines präzisen Bohrbildes sein, die zu einer Koordinatentransformation herangezogen werden können.

Zu Beginn des Identifizierungsverfahrens wird ein zunächst unbekannter Kandidat mit dem Tachymeter messtechnisch erfasst. Die Messung wird als Identifizierungsmessung bezeichnet und bringt die Koordinate \mathbf{X}_{TI} im Tachymetersystem sowie die homogenisierte Distanz D'_I hervor. Auf Basis dieser Daten wird bei der Beschreibung des Identifizierungskonzepts zwischen einem primären Identifizierungsverfahren und der Identifizierung mit einer präzisen Zusatzmessung unterschieden.

5.3.1 Primäres Identifizierungsverfahren

Angesichts der Mobilknotenposition steht eine Schätzung zur Translation zwischen dem Tachymeter- und Bezugssystem zur Verfügung. Auf die zugrunde liegenden Rotationen zwischen beiden Systemen kann jedoch nicht geschlossen werden. In entsprechender Weise besteht keine Möglichkeit des direkten Vergleiches zwischen (transformierten) Koordinaten des Tachymeters und Bezugssystems. Die Identifizierung muss aufgrund dessen anhand von Distanzdaten erfolgen, wobei insgesamt zwei Filterstufen die Anzahl an Kandidaten sukzessive reduzieren.

Für den ersten Schritt der Vorfilterung wird die zweidimensionale Positionslösung der Basisausgleichung verwendet. Potenzielle Kandidaten der Identifizierung liegen auf einem Kreisbogen um die Positionslösung $\hat{\mathbf{X}}_0$, der durch den Radius der homogenisierten Horizontalstrecke D'_{hzI} aus der Identifizierungsmessung gekennzeichnet ist. Da die Positionslösung aufgrund der Funkdistanzgenauigkeit Abweichungen zur wahren Position $\tilde{\mathbf{X}}$ aufweist, wird ein zusätzlicher Toleranzbereich eingeführt. Geometrisch betrachtet entsteht ein Kreisring um $\hat{\mathbf{X}}_0$, der als bildliche Betrachtung in Abbildung 5.10 nur noch die Punkte P_1 bis P_3 als zulässige Kandidaten hervorbringt. Der Toleranzbereich sollte klein gestaltet werden, damit eine möglichst große Anzahl an Kandidaten gefiltert wird. Trotzdem ist die Dimensionierung so zu wählen, dass der richtige Kandidat in jedem Fall enthalten bleibt.

Die allgemeine Definition eines zulässigen Bereichs wäre nur sinnvoll, wenn für verschiedene Positionslösungen identische Genauigkeiten zu erwarten wären. Das Umfeld der Messungen ist jedoch durch die bereits genannten Einflussfaktoren geprägt, sodass von einer standpunktabhängigen

Genauigkeit ausgegangen wurde. Als Folge dessen wird die Dimensionierung des Toleranzbereichs an die statistischen Ergebnisse der Basisausgleichung geknüpft.

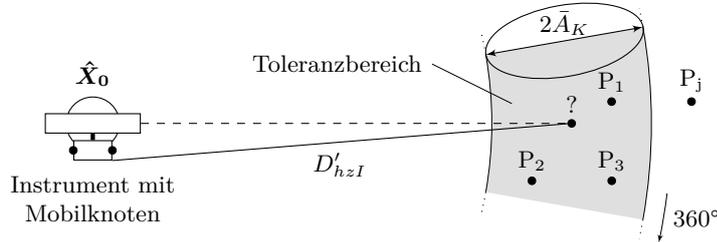


Abb. 5.10: Toleranzbereich zur Vorfilterung

Als Bewertungskriterium für die Qualität der Ausgleichung kann die a posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit \hat{s}_0 herangezogen werden. Zur geometrischen Visualisierung fließt die Genauigkeitsangabe in die Parameter der HELMERT'schen Fehlerellipse ein. Die beiden Halbachsen der Ellipse

$$\begin{aligned} \bar{A}_F^2 &= \frac{1}{2} \hat{s}_0^2 (q_{xx} + q_{yy} + \omega) \quad \text{mit} \quad \omega = \sqrt{(q_{xx} - q_{yy})^2 + 4q_{xy}^2} \quad , \\ \bar{B}_F^2 &= \frac{1}{2} \hat{s}_0^2 (q_{xx} + q_{yy} - \omega) \end{aligned} \quad (5.34)$$

werden mit \hat{s}_0 und den Elementen (q_{xx}, q_{yy}, q_{xy}) der Kofaktormatrix der Unbekannten \mathbf{Q}_{xx} bestimmt. Die Achsen geben jedoch kein statistisches Maß für die Wahrscheinlichkeit wieder, dass sowohl die Position $\hat{\mathbf{X}}_0$ als auch der wahre Wert $\tilde{\mathbf{X}}$ innerhalb der Fehlerellipse liegen. Vielmehr besteht eine Abhängigkeit vom Freiheitsgrad des Netzes (Niemeier 2008). Der Bereich um $\hat{\mathbf{X}}_0$, in welchem $\tilde{\mathbf{X}}$ liegen sollte, kann durch die Achsen der Konfidenzellipse

$$\begin{aligned} \bar{A}_K^2 &= 2 \bar{A}_F^2 \cdot F_{f_1, f_2, 1-\alpha} \quad , \\ \bar{B}_K^2 &= 2 \bar{B}_F^2 \cdot F_{f_1, f_2, 1-\alpha} \end{aligned} \quad (5.35)$$

abgegrenzt werden. Die Achsen der HELMERT'schen Fehlerellipse werden in der dargestellten Form durch das Quantil der F -Verteilung skaliert, wobei $(1 - \alpha)$ die Sicherheitswahrscheinlichkeit darstellt. Die Freiheitsgrade der F -Verteilung entsprechen zudem $f_1 = 2$ für das Lagenetz der Basisausgleichung sowie f_2 dem Wert der zugehörigen Ausgleichsredundanz. Unter diesen Maßgaben wird der Toleranzbereich nach Abbildung 5.10 mit einer Ringbreite von $2\bar{A}_K$ dimensioniert und diejenigen Bezugspunkte als weiterhin zulässige Kandidaten identifiziert, für die gilt:

$$-\bar{A}_K \leq \left| \hat{\mathbf{X}}_0 - \mathbf{X}_{Pj} \right| - D'_{hzi} \leq \bar{A}_K \quad . \quad (5.36)$$

Sollte aus der Anwendung des Toleranzbereichs lediglich ein zulässiger Kandidat hervorgehen, stellt dieser den identifizierten Bezugspunkt dar. Die Anwendung dieser Vorgehensweise unterliegt im Allgemeinen der Voraussetzung normalverteilter Beobachtungsdaten. Unter den vorliegenden Messbedingungen kann diese Forderung nicht zwingend erfüllt werden und es müsste ein empirischer Faktor zur Skalierung der Fehlerellipsen ermittelt werden. Da das Quantil der F -Verteilung sowohl die Netzparameter als auch die Freiheitsgrade der Ausgleichung berücksichtigt, soll die Anwendung dessen ungeachtet im Rahmen der Vorfilterung vollzogen werden. Die

Vorfilterung gründet sich in diesem Zusammenhang auf die ohnehin zur Verfügung stehenden Daten der Basisausgleichung sowie Identifizierungsmessung und zieht lediglich das Quantil als Zusatzinformation hinzu. Aus rechentechnischer Sicht erfolgt die Reduzierung der Kandidaten somit sehr schnell, wodurch der Berechnungsumfang im folgenden Hauptfilter gesenkt wird.

Der Hauptfilter kommt im Falle von mehr als einem verbleibenden Kandidaten zur Anwendung und nutzt das erweiterte Ausgleichsmodell. Von der Identifizierungsmessung wurde bei der Vorfilterung lediglich die Distanzinformation genutzt. Eine Interpretation als Zusatzmessung nach Kapitel 5.2.3 ist darüber hinaus möglich. In diesem Zusammenhang besteht allerdings die Problematik, dass die eindeutige Zuordnung der Identifizierungsmessung zu einem Bezugspunkt nicht gegeben ist. Es besteht lediglich die Information, dass einer der Kandidaten bei der Identifizierungsmessung als Zielpunkt dient. Als Konsequenz wird die Ausgleichung für verschiedene Kandidatenpermutationen berechnet. Die Anzahl der Permutationen richtet sich nach dem Quantum der Kandidaten und gibt damit an, wie oft die Ausgleichung mit differierenden Bedingungen ausgeführt wird.

Zur Anwendung des erweiterten Ausgleichsmodells wird die initiale Positionslösung $\hat{\mathbf{X}}_0$ der Basisausgleichung bei jeder Permutation durch die zugehörige Höhenkomponente

$$Z_0 = Z_{Pj} - \Delta Z_j - Z_{TI} + h_O \quad (5.37)$$

erweitert, wodurch die Position in dreidimensionaler Form zur Verfügung steht. Die Position dient in der Folge als Ausgangswert für die iterative Ausgleichung mit Bedingungen zwischen den Unbekannten. Die zu verwendenden Bedingungen

$$\begin{aligned} f_1(\hat{\mathbf{X}}) &= D'_I - \sqrt{(X_{Pj} - \hat{X}) + (Y_{Pj} - \hat{Y}) + (Z_{Pj} - \hat{Z})} = 0 \quad , \\ f_2(\hat{\mathbf{X}}) &= (Z_{Pj} - \Delta Z_j - Z_{TI} + h_0) - \hat{Z} = 0 \end{aligned} \quad (5.38)$$

sind kandidatenbezogen und bilden die Bedingungsmatrix \mathbf{B} . In den Gleichungen 5.37 und 5.38 wurde zudem das ankerspezifische Zielpunktoffset ΔZ_j berücksichtigt, das nur im Falle eines Ankers als Kandidat anzuwenden ist und sonst entfallen kann. Unter Verwendung des Modells nach Gleichung 5.32 wird die Parameterschätzung durchgeführt und liefert als Endergebnis einen neuen Schätzwert der Position $\hat{\mathbf{X}}_j$. Hinsichtlich der kandidaten-spezifischen Bedingungsgleichungen wird der Index der Positionslösung in korrespondierender Weise gewählt.

Unabhängig davon, ob die Ausgleichung mit dem korrekten oder einem falschen Kandidaten durchgeführt wird, bleibt D'_I in allen Bedingungen gleich. Darüber hinaus werden bei sämtlichen Permutationen die identischen Funkdistanzen verwendet. Damit die Ausgleichungsergebnisse verschiedener Permutationen besser vergleichbar sind, wird jedoch auf eine Gewichtung verzichtet ($\mathbf{P} = \mathbf{I}$). Der übrige Teil der Parameterschätzung erfolgt anhand des beschriebenen Ausgleichungsprozesses in mehreren Stufen.

Neben den Positionslösungen können die Genauigkeitsmaße der Gewichtseinheit oder der Unbekannten aus den Ausgleichungen ermittelt werden. Als Kriterium einer richtigen oder falschen Punktidentifizierung sind sie jedoch nicht dienlich. Aufgrund der Funkdistanzgenauigkeit stehen kleine Standardabweichungen nicht gleichbedeutend für geringe Positionsdifferenzen zum wahren Wert $\tilde{\mathbf{X}}$.

Generell muss für den richtigen Kandidaten gelten, dass $\hat{\mathbf{X}}_j$ innerhalb einer Konfidenzellipse liegt, welche im Zuge der Basisausgleichung bestimmt wurde. Dieser Zusammenhang kann durch

die Wahrscheinlichkeitsbeziehung

$$P = (\hat{\mathbf{X}}_0 - \hat{\mathbf{X}}_j)^T \mathbf{Q}_{xx}^{-1} (\hat{\mathbf{X}}_0 - \hat{\mathbf{X}}_j) \leq 2 \cdot \hat{s}_0^2 \cdot F_{f_1, f_2, 1-\alpha} = 1 - \alpha \quad (5.39)$$

geprüft werden. Der wahre Wert der Position wird dazu in Ungleichung 5.39 durch die initiale Schätzung $\hat{\mathbf{X}}_0$ ersetzt und die korrespondierenden Werte für \hat{s}_0 und \mathbf{Q}_{xx} eingeführt. Aufgrund der Tatsache, dass $\hat{\mathbf{X}}_0$ aus einer Lagenetzausgleichung bestimmt wird, sind lediglich die Lagekomponenten von $\hat{\mathbf{X}}_j$ bei der Überprüfung zu verwenden. Wird die Ungleichung vom enthaltenen Positionspaar erfüllt, liegt $\hat{\mathbf{X}}_j$ mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von $(1 - \alpha)$ innerhalb der Konfidenzellipse der Ausgangsschätzung. In diesem Fall ist P_j weiterhin als Kandidat einzustufen. Anhand von Abbildung 5.11 wird aus diesem Zusammenhang der Ausschluss der Kandidaten P_3 und P_4 erreicht.

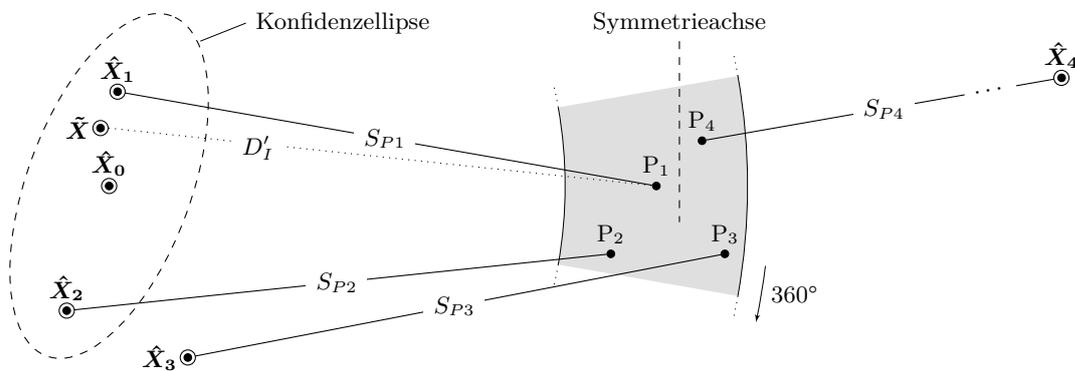


Abb. 5.11: Visualisierung des Hauptfilters

Im Rahmen der Hauptfilterung wird in erster Linie die Wirkung der Restriktionen auf die Ausgleichung forciert. In Abhängigkeit zur verwendeten Kombination wird die Strecke zwischen der Positionslösung und einem Kandidaten durch die Bedingungen fixiert. Während der Ausgleichung kann die zu schätzende Position folglich nur auf einem Kreisbogen um P_j mit dem Radius D'_I liegen. Bei einer gegebenen räumlichen Nähe zwischen Kandidaten können trotzdem mehrere Positionslösungen innerhalb der Konfidenzellipse liegen. Aus diesem Grund lässt sich die Anzahl der möglichen Kandidaten reduzieren, aber als Ergebnis können drei Varianten unterschieden werden:

- Falls die Kandidatenliste aus nur noch einem Element besteht, entspricht dieses Element dem zu identifizierenden Bezugspunkt.
- Werden alle Kandidaten verworfen, wird die Liste auf den Ausgangszustand, d. h. den Stand nach der Vorfilterung, zurückgesetzt.
- Die Anzahl der Kandidaten ist größer als Eins.

Im ersten Fall endet die Identifizierung an dieser Stelle. In den beiden letzten Szenarien wird die abschließende Methode des Hauptfilters auf die übrigen Kandidaten angewendet. Zu diesem Zweck werden die Strecken

$$S_{Pj} = \left| \hat{\mathbf{X}}_j - \mathbf{X}_{Pj} \right| \quad (5.40)$$

vom jeweiligen Kandidaten zur Positionslösung $\hat{\mathbf{X}}_j$ errechnet, welche ebenfalls in Abbildung 5.11 dargestellt werden. Der richtige Kandidat sollte die kleinste Streckendifferenz zur Identifizierungsmessung aufweisen. Als abschließendes Identifizierungsergebnis wird folglich derjenige Kandidat gewählt, für welchen gilt:

$$\left| S_{Pj} - D'_I \right| \rightarrow \min . \quad (5.41)$$

Die Punktidentifizierung liefert damit in jedem Fall genau einen Kandidaten als Endergebnis. Ohne die vorangestellte Anwendung der Wahrscheinlichkeitsbeziehung können Fehlidentifizierungen vor allem bei eng beieinander liegenden Bezugspunkten auftreten, wenn die wahre Mobilknotenposition darüber hinaus ebenfalls dicht am Kandidaten liegt. Die errechneten Strecken S_{Pj} weisen in diesem Zusammenhang kleine Werte auf und können auch für falsche Kandidaten zur minimalen Differenz des Ausdrucks 5.41 führen. Oft ist in der genannten Konstellation eine genäherte Symmetrie zwischen den Positionslösungen zu erkennen. In Abbildung 5.11 wird dieser Sachverhalt schemenhaft für die Schätzungen $\hat{\mathbf{X}}_1$ und $\hat{\mathbf{X}}_4$ dargestellt. Eine gedachte Symmetrieachse verläuft im Beispiel zwischen den Punkten P_1 und P_4 . Die Minimierungsaufgabe könnte folglich zur falschen Identifizierung des Kandidaten P_4 führen. Erst die Berücksichtigung der Konfidenzellipse schafft im Rahmen der beschriebenen Konstellation eine zusätzliche Sicherheit zur Punktidentifizierung. Als zusammenfassendes Schema wird der Identifizierungsprozess gemeinsam mit dem Verfahren des folgenden Kapitels in Abbildung 5.12 auf Seite 131 dargestellt.

5.3.2 Identifizierung mit präzisen Zusatzdaten

In den wesentlichen Punkten unterscheidet sich die Identifizierung unter Verwendung präziser Zusatzdaten kaum vom primären Identifizierungsverfahren. Bevor die Identifizierungsmessung durchgeführt wird, erfolgt die Zusatzmessung \mathbf{X}_{TZ} zu einem identifizierbaren Bezugspunkt \mathbf{X}_Z . Infolge dessen wird die Ausgleichung von vornherein unter Verwendung der erweiterten Modellbildung durchgeführt und setzt somit zwei Restriktionen voraus. Die Höhenkomponente der Näherungslösung wird vor der Parameterschätzung durch das Berechnungsergebnis aus Gleichung 5.28 ersetzt. Als Ausgangspunkt für die Punktidentifizierung steht somit die initiale Positionslösung $\hat{\mathbf{X}}_0$ in dreidimensionaler Form zur Verfügung.

Nachdem die Identifizierungsmessung die Koordinate \mathbf{X}_{TI} hervorgebracht hat, beginnt das Identifizierungsverfahren. Aufgrund der restriktionsbedingten Fixierung der Höhenkomponente wird im Rahmen der Kandidatenvorfilterung ein zusätzliches Höhenkriterium vorangestellt. Ähnlich des Vorgehens bei der Definition des Toleranzbereichs wird eine zulässige Höhendifferenz zwischen dem Mobilknoten und einem Kandidaten eingeführt:

$$-\epsilon_h \leq (Z_{TI} + \Delta Z - h_O) - (Z_{Pj} - \hat{Z}_0) \leq \epsilon_h . \quad (5.42)$$

Im ersten Klammerterm wird die Höhendifferenz aufgrund der Identifizierungsmessung bestimmt. Da die Distanznullpunkte des Tachymeters und der Sensorknoten unterschiedlich sind, müssen die Höhenkomponente des Antennenoffsets und die Zielpunktkorrektur berücksichtigt werden. Falls die Identifizierungsmessung nicht zu einem Ankerknoten vorgenommen wird, entfällt ΔZ . Der zweite Klammerterm bestimmt die Höhendifferenz anhand der initialen Positionslösung und des Z -Wertes der jeweiligen Kandidatenkoordinate. Der zu definierende Toleranzwert ϵ_h ist in Abhängigkeit zur Messunsicherheit des Instruments und des verwendeten Reflektortyps zu wählen. Der Vorfilter enthält durch das Hinzunehmen des Höhenkriteriums somit zwei Filterzyklen.

Hinsichtlich der zweiten Vorfilterstufe, dem Toleranzbereich, könnte in Anbetracht des erweiterten Ausgleichungsmodells ein Fehler- bzw. Konfidenzellipsoid angewendet werden. Die zugrunde liegenden Berechnungen werden z. B. bei Wolf (1997) beschrieben. Aufgrund des vorangestellten Höhenkriteriums ist es jedoch hinreichend, die Lage der Kandidaten zu prüfen. In diesem Zusammenhang werden die Parameter der Konfidenzellipse aus den Gleichungen 5.34 und 5.35 sowie das Ausschlusskriterium nach Gleichung 5.36 verwendet, wobei lediglich die Lagekomponenten der Koordinatenvektoren zur Anwendung kommen.

Die Hauptfilterung wird mit den verbleibenden Kandidaten aus der zweistufigen Vorfilterung vollzogen. Entsprechend des Vorgehens bei der primären Identifizierung werden die Positionslösungen für alle Kandidatenpermutationen unter Verwendung des erweiterten Ausgleichungsmodells berechnet. Die Bedingungsmatrix wird allerdings sowohl auf Grundlage der Zusatzmessung als auch mit der Identifizierungsmessung gebildet. Es ergeben sich somit drei Restriktionen, die in Gleichungskomplex 5.43 zusammengestellt werden.

$$\begin{aligned}
 f_1(\hat{\mathbf{X}}) &= D'_I - \sqrt{(X_{Pj} - \hat{X}) + (Y_{Pj} - \hat{Y}) + (Z_{Pj} - \hat{Z})} = 0 \\
 f_2(\hat{\mathbf{X}}) &= D'_Z - \sqrt{(X_Z - \hat{X}) + (Y_Z - \hat{Y}) + (Z_Z - \hat{Z})} = 0 \\
 f_3(\hat{\mathbf{X}}) &= (Z_Z - \Delta Z - Z_{TZ} + h_0) - \hat{Z} = 0
 \end{aligned} \tag{5.43}$$

Die erste Bedingung ist in der dargestellten Form kandidatenabhängig und wird mittels der im Bezugssystem gegebenen Koordinate \mathbf{X}_{Pj} aufgestellt. Die übrigen Bedingungen bleiben für alle Permutationen identisch. In diesem Zusammenhang muss zudem vorausgesetzt werden, dass die Zusatz- und Identifizierungsmessung zu unterschiedlichen Bezugspunkten ausgeführt werden. Da sämtliche Kandidaten die Berechnung einer Position $\hat{\mathbf{X}}_j$ zur Folge haben, wird jede Lösung in Analogie zum vorangegangenen Kapitel hinsichtlich einer korrekten Punktidentifizierung beurteilt. Die zu verwendenden mathematischen Relationen werden durch die Wahrscheinlichkeitsbeziehung 5.39 sowie die Minimierungsaufgabe 5.41 unter Verwendung von Gleichung 5.40 zur Verfügung gestellt. Für die Wahrscheinlichkeitsbeziehung wird in diesem Zusammenhang der Netzfreiheitsgrad $f_1 = 3$ mit den zugehörigen Vektoren und Matrizen des dreidimensionalen Ausgleichungsfalls verwendet.

Das Ergebnis der Identifizierung mit präzisen Zusatzdaten bringt ebenfalls genau einen Kandidaten hervor. Zusammenfassend wird das geschilderte Vorgehen gemeinsam mit dem primären Identifizierungsverfahren in Abbildung 5.12 aufgezeigt. Darüber hinaus werden die Resultate einer Testfeldanwendung im folgenden Kapitel dargestellt.

5.4 Versuchsfeldanwendung

Angesichts der beschriebenen Identifizierungsstrategien und den dafür notwendigen Festlegungen zum Ausgleichungsmodell soll die praxisnahe Anwendung der Verfahren anhand des in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Versuchsfeldes untersucht werden. Insgesamt werden 86 Instrumentenstandpunkte/Mobilknotenpositionen zur Bewertung herangezogen, auf welchen jeweils sechs Bezugspunkte zu identifizieren sind. Die Bezugspunkte sind in der Versuchsdurchführung identisch zu den sechs Ankerknoten, sodass bei allen Berechnungen die Zielpunktkorrektur bzw. das Zielpunktoffset zu berücksichtigen ist. Für jeden Instrumentenstandpunkt erfolgt die Identifizierung der Anker unabhängig voneinander, d. h. für jede Identifizierungsmessung werden stets alle Anker

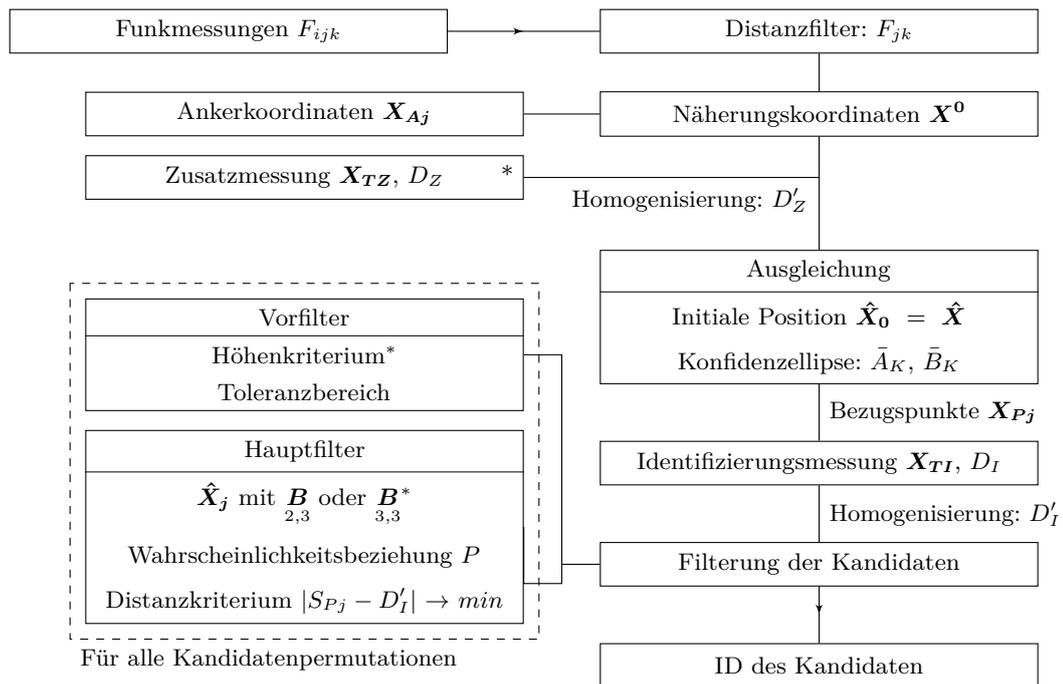


Abb. 5.12: Schematischer Ablauf der indirekten Punktidentifizierung: die mit (*) gekennzeichneten Schritte werden lediglich beim Identifizierungsverfahren mit präzisen Zusatzdaten angewendet

als mögliche Kandidaten in Betracht gezogen. Innerhalb des Versuchsfeldes sind somit in Summe 516 Kandidaten zu identifizieren. Die Resultate der Identifizierung werden sowohl für das primäre Identifizierungsverfahren als auch für die erweiterte Modellbildung unter Verwendung präziser Zusatzdaten dargestellt. Zunächst wird auf die Ergebnisse der Positionierung eingegangen.

5.4.1 Ergebnisse der Positionierung

Als Ausgangspunkt der Punktidentifizierung muss die Position des Mobilknotens im Bezugssystem bekannt sein. Die Positionslösung wird bei den weiteren Ausführungen mit der Basisausgleichung und der erweiterten Modellbildung bestimmt. Die zugrunde liegende Parametrisierung der Ausgleichungsverfahren wird in Tabelle 5.1 angegeben. Das Ergebnis der Positionierung wird separat für jeden Prozessierungsschritt und dem zugehörigen Ausgleichungsmodell in Abbildung 5.13 dargestellt. Aus den Ergebnissen der Ausgleichung wird die Genauigkeit der Positionierung abgeleitet und die Relation zur wahren Mobilknotenposition hergestellt. In diesem Zusammenhang wird bei der bildlichen Darstellung ein Zuweisungsvektor erzeugt, welcher von der funktechnisch ermittelten Mobilknotenposition zum wahren Positionswert zeigt. Als wahre Positionen werden die im Kapitel 5.1.2 beschriebenen und auf Grundlage tachymetrischer Messungen generierten Positionslösungen interpretiert. Im selben Kapitel wird das Versuchsfeld in einem Innenbereich und zwei Außenbereiche untergliedert. Die Bereichseingrenzung wird bei den weiteren Betrachtungen übernommen. Für das erweiterte Ausgleichungsmodell ist zudem eine präzise Zusatzmessung nötig. Im Anwendungsfall wurde diesbezüglich der im Kapitel 4.4.1 beschriebene Bezugspunkt auf dem Traversenblech der EKM verwendet.

Tab. 5.1: Parametrisierung der Ausgleichung

Parameter	Wert
Anzahl an nicht gewichteten Iterationen η	5
Maximale Anzahl an Iterationen η_{max}	300
Grenzwert ϵ_v	0,001
Grenzwert $\epsilon_{\hat{x}}$	0,05 mm
Grenzwert ϵ_h	6 mm

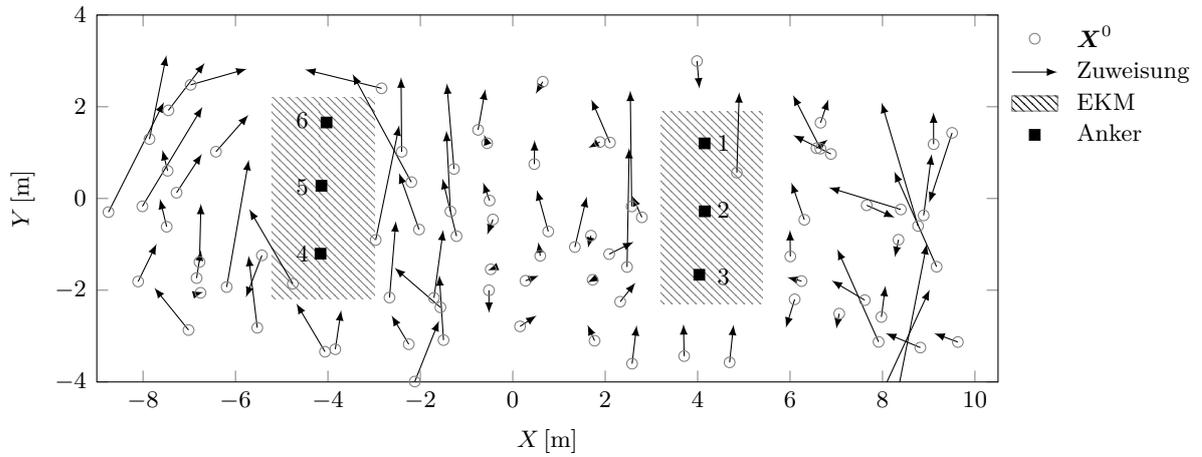
Im Hinblick auf die Zuweisungsvektoren aller Teildarstellungen aus Abbildung 5.13 werden besonders die z. T. erheblichen Positionsabweichungen zu den wahren Positionen ersichtlich. Die Maxima liegen im Bereich von 2,1 m; besonders in den Außenbereichen ist eine Häufung großer Differenzen festzustellen. Zunächst kann dieser Sachverhalt durch die Aufnahmekonfiguration begründet werden. Aufgrund der geringen Standpunkthöhe werden in den Außenbereichen lediglich die Signale der Ankerknoten des nahegelegenen Rollbocks ungehindert empfangen. Die freie Sicht zur weiter entfernten Bauteilaufnahme und den zugehörigen Ankern ist nur in wenigen Fällen gegeben. In diesem Zusammenhang erreichen die Signale der Mobilknoten auf indirektem Wege und werden z. B. durch Reflexionen beeinflusst, die eine größere Funkdistanz zur Folge haben. Besonders hinsichtlich der Systematik der Positionsabweichungen lässt sich eine Reflexion an der angrenzenden Wand vermuten, die in Abbildung 5.6 dargestellt wurde.

Als geometrische Betrachtung ergeben sich dadurch Bogenschnitte, welche mit größer werdenden Funkdistanzen zunehmend in Richtung der negativen Y -Achse verschoben werden. Der Effekt kommt besonders zum Tragen, wenn schlechte Sichten zu einem Teil der Ankerknoten, wie es z. B. in den Außenbereichen der Fall ist, bestehen.

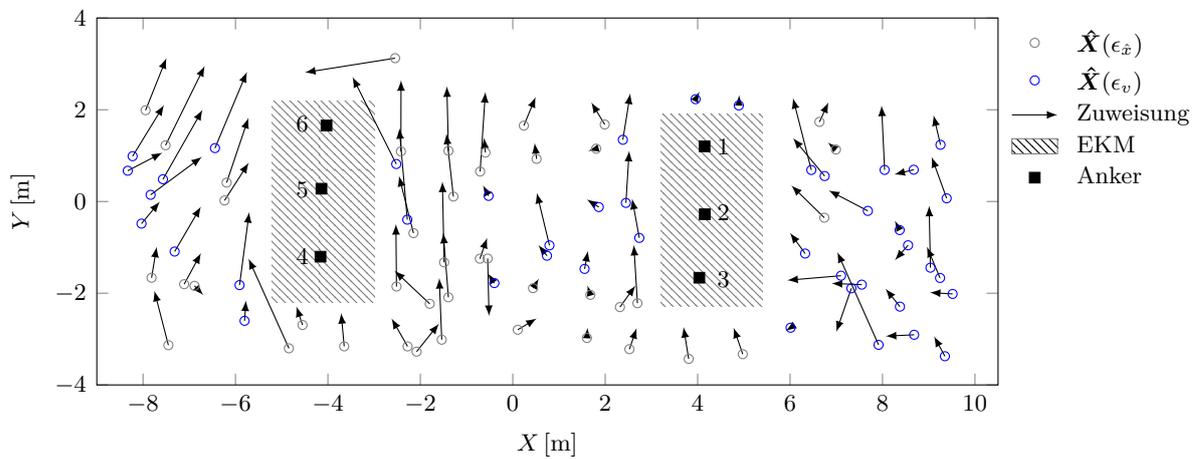
Während die Systematik der Ausrichtung in Y -Richtung für die Näherungslösungen (Abb. 5.13a) tendenziell erkennbar ist, wird der Effekt in der Basisausgleichung (Abb. 5.13b) deutlicher sichtbar. Durch die Verwendung der Restriktionen im erweiterten Ausgleichungsmodell (Abb. 5.13c) wird die Auswirkung weiterhin verstärkt und der radiale Zusammenhang zur Zusatzmessung deutlich.

Als weiterer Aspekt werden die verwendeten Abbruchkriterien $\epsilon_{\hat{x}}$ und ϵ_v an den Mobilknotenpositionen der Abbildungen 5.13b sowie 5.13c farblich unterschieden. Im Allgemeinen kann hinsichtlich des Abbruchkriteriums $\epsilon_{\hat{x}}$ nicht auf ungestörte Signalausbreitungen geschlossen werden. Sowohl im Innenbereich als auch in den Außenbereichen wurde das Abbruchkriterium erreicht. Tendenziell liegen im Innenbereich jedoch geringere Positionsabweichungen zugrunde. Werden eng beieinander liegende Positionslösungen betrachtet, die mit unterschiedlichen Abbruchkriterien berechnet wurden, lassen sich kaum Differenzen in den Längen der Zuweisungsvektoren feststellen. In diesem Zusammenhang kann auf eine Robustheit geschlossen und das gestufte Ausgleichungsmodell gerechtfertigt werden.

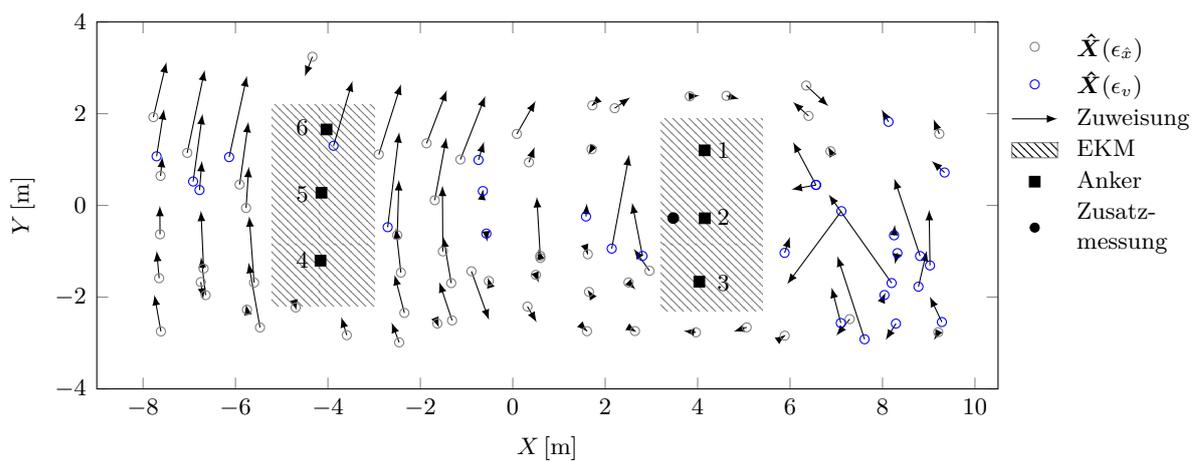
Weitere Aussagen zur Qualität der Positionierung lassen sich aus den Ergebnissen der Ausgleichung ableiten. Neben dem quadratischen Mittel der Positionsabweichungen (RMS_X , RMS_Y) werden in Tabelle 5.2 die Standardabweichungen der ausgeglichenen Unbekannten (\hat{s}_X , \hat{s}_Y) sowie der Gewichtseinheit \hat{s}_0 aufgezeigt. Darüber hinaus werden die genannten Bewertungsparameter getrennt für den Innenbereich und die Außenbereiche aufgeschlüsselt. Die Zahlenwerte stellen in der angeführten Form das arithmetische Mittel aus allen Mobilknotenpositionen dar.



(a) Näherungslösungen



(b) Basisausgleichung



(c) Ausgleichung mit Zusatzmessung

Abb. 5.13: Ergebnisse der Positionierungsverfahren

Tab. 5.2: Positionierungsergebnisse (Mittel aller Mobilknotenpositionen)

Prozessierung	RMS_X [m]	RMS_Y [m]	\hat{s}_0 [m]	\hat{s}_X [m]	\hat{s}_Y [m]
Näherungslösung	0,579	1,324	–	–	–
Basisausgleichung	0,472	0,960	0,540	0,302	0,766
Ausgleichung mit Zusatzmessung	0,308	0,907	0,591	0,438	0,997
Basisausgleichung (Außenbereiche)	0,544	0,970	0,676	0,399	1,195
Basisausgleichung (Innenbereich)	0,194	0,881	0,338	0,157	0,342
Ausgleichung mit Zusatzmessung (Außenbereiche)	0,371	0,972	0,671	0,595	1,316
Ausgleichung mit Zusatzmessung (Innenbereich)	0,210	0,731	0,416	0,205	0,624

Die beschriebene Systematik wird in der Tabelle besonders durch die Standardabweichungen der Unbekannten und den quadratischen Mitteln widerspiegelt. Entsprechend ausgeprägter fallen die Angaben in Y -Richtung aus.

Beim Vergleich des Innenbereichs und der Außenbereiche sind aufgrund der Beobachtungskonstellationen stets bessere Ergebnisse für den Innenbereich erzielt worden. Im Allgemeinen wird jedoch ersichtlich, dass aufgrund geringerer Standardabweichungen nicht auf kleine Differenzen zur wahren Position geschlossen werden kann. In Tabelle 5.2 kann dieser Sachverhalt insbesondere bei der Gegenüberstellung der Basisausgleichung und erweiterten Modellbildung nachvollzogen werden. Obwohl die restriktionsbehaftete Ausgleichung stets größere Standardabweichungen hervorbringt, sind außer einer Ausnahme geringere Positionsdifferenzen festzustellen.

Zur Bewertung der erreichten Funkdistanzgenauigkeit kann z. B. die a posteriori Standardabweichung der ursprünglichen Beobachtungen

$$\hat{s}_{L_j} = \hat{s}_0 \cdot \sqrt{(\mathbf{Q}_{LL})_{jj}} \quad (5.44)$$

herangezogen werden, welche auf Basis der Kofaktormatrix der Beobachtungen \mathbf{Q}_{LL} (Inverse der Gewichtsmatrix) gebildet wird. Bei Parameterschätzungen, die aus dem Abbruchkriterium $\epsilon_{\hat{x}}$ hervorgehen, ist die Gewichtsfunktion inaktiv. Somit sind alle \hat{s}_L gleichgenau und entsprechen der Standardabweichung der Gewichtseinheit.

Für alle verbleibenden Positionslösung ist \hat{s}_L mit der zugehörigen Gewichtsmatrix zu bestimmen. Da im Mittel aller Schätzungen vergleichbare Standardabweichungen zu \hat{s}_0 erreicht werden, kann eine gute Aussage für die a posteriori Standardabweichung der Beobachtung durch \hat{s}_0 getroffen werden. Die aus der Ausgleichung resultierende Genauigkeit der Funkdistanzen ist in diesem Zusammenhang besser als die Angabe in Kapitel 3.2.2. Das Mittel aus den Standardabweichungen der ausgeglichenen Beobachtungen

$$\hat{s}_{\hat{L}_j} = \hat{s}_0 \cdot \sqrt{(\mathbf{Q}_{\hat{L}\hat{L}})_{jj}} \quad \text{mit} \quad \mathbf{Q}_{\hat{L}\hat{L}} = \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{A} \quad (5.45)$$

aller Standpunkt bringt für die Basisausgleichung zudem einen Wert von 0,309 m hervor. Für viele Anwendungsfälle, in denen ausschließlich die Genauigkeit der Positionierung ausschlaggebend ist, werden diese Ergebnisse nicht hinreichend sein. Dies gilt insbesondere für den Außenbereich des Versuchsfeldes. Als Hilfsmittel für die indirekte Punktidentifizierung können die Vorinformationen jedoch verwendet werden.

5.4.2 Ergebnisse der Identifizierung

Im Rahmen der Punktidentifizierung werden die sechs Ankerknoten als Bezugspunkte und somit als Kandidaten der Identifizierung vorausgesetzt. Wie einleitend dargelegt wurde, sollen die Anker unabhängig voneinander identifiziert werden. Als Parametrisierung der Identifizierungsverfahren wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,5\%$ bzw. die daraus abgeleitete Sicherheitswahrscheinlichkeit von $99,5\%$ angenommen, die zur Bildung des Quantils der F -Verteilung benötigt wird. Dadurch soll gewährleistet werden, dass der richtige Kandidat auch im Falle schlechter Beobachtungsgenauigkeiten durch die Filterstufen nicht ausgeschlossen wird. Entsprechend groß fallen die Konfidenzellipsen aus.

Zunächst soll auf das primäre Identifizierungsverfahren eingegangen werden. Zur grundlegenden Bewertung des Identifizierungsverfahrens ist zuallererst die Anzahl richtig identifizierter Kandidaten von Bedeutung. Als Ergebnis werden von den 516 Kandidaten insgesamt 434 korrekt identifiziert. Im Umfang der korrekten Identifizierungen sind 46 Mobilknotenpositionen enthalten, auf welchen alle sechs Anker richtig erkannt wurden. Diese 46 Positionen werden in Abbildung 5.14 aufgezeigt, wobei die wahren Mobilknotenpositionen aufgetragen werden.

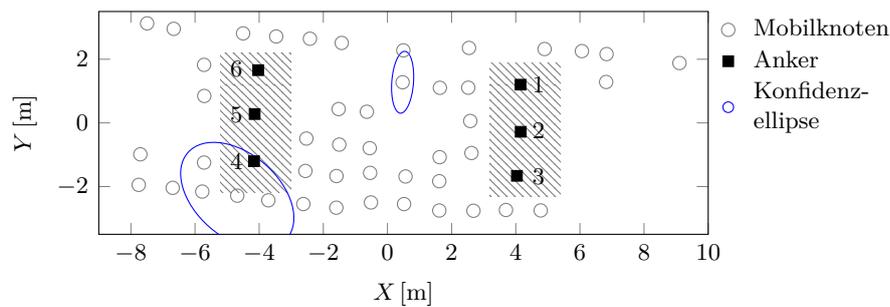


Abb. 5.14: Korrekte Identifizierung aller Kandidaten

Besonders im Innenbereich und linienförmig neben den Rollböcken der EKM werden vollständige Identifizierungen erreicht. Beim Vergleich zu den Ergebnissen der Basisausgleichung nach Abbildung 5.13b erfolgt vor allem auf denjenigen Instrumentenstandpunkten eine vollständige Identifizierung, die geringe Positionsdifferenzen aufzeigen. Die korrekten Identifizierungen der dicht neben der EKM befindlichen Standpunkte (z. B. $Y \approx -2$ m) werden insbesondere durch die geometrischen Konstellationen begünstigt. Die tachymetrisch gemessene Distanz zu einem der drei Anker eines Rollbocks ist in den meisten Fällen wesentlich kürzer als vergleichbare Messungen zu dem weiter entfernten Rollbock. Die Distanzdaten der Identifizierungsmessung bilden aus diesem Grund in Kombination mit der besseren Positionsgenauigkeit eine Einheit, damit insbesondere das abschließende Distanzkriterium des Hauptfilters nach Gleichung 5.41 zum richtigen Resultat führt.

Instrumentenstandpunkte im Innenbereich weisen zwar vergleichbare Distanzen zu den jeweiligen Ankerknoten der beiden Rollböcke auf, aufgrund der ungehinderten Signalausbreitungen zwischen dem Mobilknoten und den Ankerknoten entstehen aber wesentlich kleiner Konfidenzellipsen als in den äußeren Bereichen. Der entscheidende Filter ist in diesem Fall durch die Wahrscheinlichkeitsbeziehung aus Gleichung 5.39 gegeben. Zum Vergleich werden die Konfidenzellipsen eines durch das abschließende Distanzkriterium des Hauptfilters identifizierten und eines durch

P identifizierten Kandidaten in Abbildung 5.14 angegeben. Bei der Darstellung werden die Ellipsenachsen um den Faktor 0,3 skaliert.

Da die räumliche Nähe zwischen den Kandidaten einen Einfluss auf die Identifizierung hat, werden die Fehlidentifizierungen in Abbildung 5.15 dargestellt. Auf den Instrumentenstandpunkten, auf welchen mindestens ein Kandidat nicht richtig identifiziert wurde, ist eine farbige Ringmarkierung angeführt. Die Ringfarbe symbolisiert in diesem Zusammenhang denjenigen Anker, der fehlidentifiziert wurde.

Als Gesamtbetrachtung kann festgestellt werden, dass lediglich bei einer Mobilknotenposition alle Kandidaten falsch identifiziert wurden. Bei dem Großteil der Messungen werden zwei bis drei Kandidaten nicht korrekt identifiziert. Speziell für den Außenbereich zeigen die farblichen Markierungen Probleme bei der Identifizierung der zentral angeordneten Anker AK_2 und AK_5 . Durch die räumliche Nähe zu den außen liegenden Ankern führt insbesondere das abschließende Distanzkriterium der primären Identifizierung zu einer entsprechenden Fehlzuzuweisung. Im umgekehrten Fall, der Fehlidentifizierung außen liegender Kandidaten, erfolgt eine Identifizierung der zentral gelegenen Kandidaten. Nur in vier Szenarien der dargestellten Identifizierungen wird der gegenüberliegende Anker desselben EKM-Rollbocks fälschlicherweise identifiziert. Die Trennung der Kandidaten hinsichtlich des Rollbocks erfolgt jedoch in allen Anwendungen korrekt.

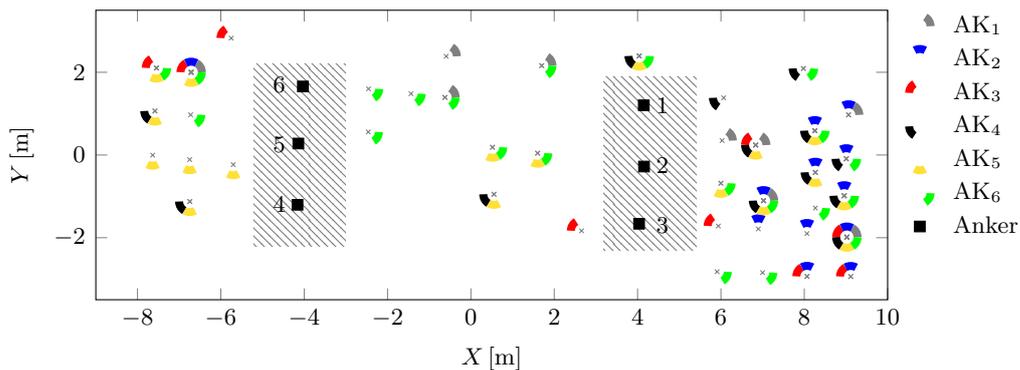


Abb. 5.15: Falsch identifizierte Kandidaten

Die Diskrepanz der Fehlidentifizierung zwischen außen- und innenliegenden Ankern eines Rollbocks wird in Anbetracht der Identifizierung mit präzisen Zusatzdaten besonders durch das Höhenkriterium kompensiert. Für die Versuchsfeldanwendung liegen die zentral auf dem Rollbock angebrachten Anker deutlich tiefer als die übrigen Kandidaten. Der Ausschluss der Kandidaten erfolgt diesbezüglich bereits in der ersten Stufe des Vorfilters. In entgegengesetzter Betrachtungsweise werden auch die außen liegenden Kandidaten hinsichtlich der Identifizierung zentral gelegener Kandidaten von der Liste potenzieller Bezugspunkte getrennt. Als abschließendes Resultat der erweiterten Verfahrensweise können somit alle Kandidaten korrekt identifiziert werden. Dieser Sachverhalt soll im Folgenden anhand des in Abbildung 5.16 dargestellten Beispiels erläutert werden.

Anhand der Positionslösung $\hat{\mathbf{X}}_0$ soll der Ankerknoten AK_6 identifiziert werden. Die Anker AK_2 und AK_5 werden im Vorfilter durch das Höhenkriterium ausgeschlossen. Hinsichtlich der Anwendung des Toleranzbereichs wird im Beispielfall keine Reduzierung der Kandidaten hervorgerufen. Die zugehörige Halbachse der Konfidenzellipse weist derart große Dimensionen auf, dass alle außen liegenden Anker nach der Vorfilterung als Kandidaten bestehen bleiben.

Bei der Anwendung des Hauptfilters werden die ermittelten Parameterschätzungen der Kandidaten (\hat{X}_1 , \hat{X}_3 , \hat{X}_4 , \hat{X}_6) zunächst durch die Wahrscheinlichkeitsbeziehung nach Gleichung 5.39 in Relation zur Ausgangslösung \hat{X}_0 gesetzt. Trotz der sehr großen Achsen der Konfidenzellipse können die Kandidaten AK_1 und AK_3 ausgeschlossen werden. Die Achsen der Konfidenzellipse werden in Abbildung 5.16 wie bei der vorangegangenen Betrachtungsweise mit dem Faktor 0,3 skaliert. Die zugehörigen Positionslösungen \hat{X}_1 und \hat{X}_3 liegen mehrere Meter außerhalb der Konfidenzellipse. Das abschließende Distanzkriterium des Hauptfilters muss folglich lediglich auf AK_4 und AK_6 angewendet werden. Die Differenz zwischen den resultierenden Werten beträgt im angeführten Beispiel zwar nur wenige Millimeter, führt aber zur korrekten Identifizierung des Ankers AK_6 .

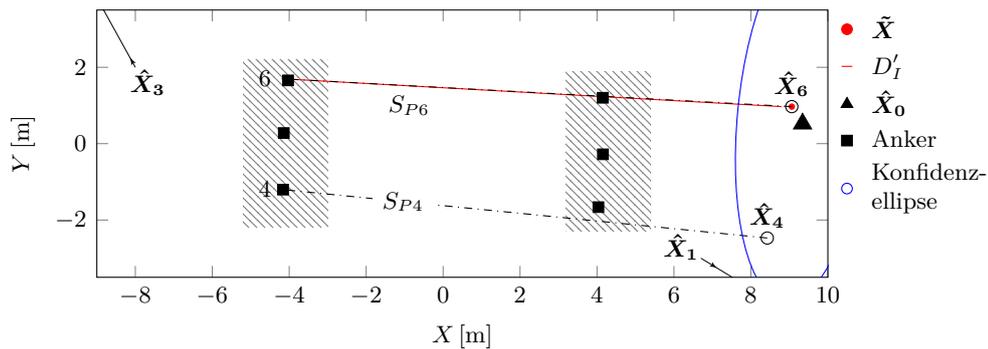


Abb. 5.16: Beispiel zum Identifizierungsverfahren

Auch aus der geometrischen Konstellation zwischen den Positionslösungen der Permutationen und der wahren Standpunkt-Koordinate \tilde{X} geht die Identifizierung von AK_6 hervor. Beim Vergleich von \hat{X}_6 und \hat{X}_4 tritt der enge räumliche Bezug der Positionslösung von AK_6 zu \tilde{X} deutlich hervor. Die zugehörigen Positionsdifferenzen sind im Millimeterbereich anzusiedeln. Als Ursache ist das erweiterte Ausgleichs- und Identifizierungsmodell anzugeben. Für die korrekte Identifizierung wird de facto mit zwei präzisen Tachymeterdistanzen gerechnet und die Stationshöhe gesetzt. Bezüglich des Bogenschnittverfahrens werden dadurch zwei Bogen gebildet, welche mehrere Schnittpunkte aufweisen können. Durch die Funkdistanzmessung muss im übertragenen Sinne nur die Auswahl bzw. Unterscheidung der besten Lösung herbeigeführt werden.

Aus den beschriebenen Verfahren geht hervor, dass die funkgestützte Identifizierung von Bezugspunkten realisierbar ist, jedoch an die Genauigkeit der Ausgleichsergebnisse und im besonderen Maße an die Bezugspunktverteilung geknüpft ist. Speziell die räumliche Nähe zwischen Kandidatenpunkten entscheidet über die Trenn- und Identifizierbarkeit der Bezugspunkte.

5.5 Praxisbezogene Spezifizierungen

Bei der Qualitätskontrolle schienenengebundener Fahrzeuge ist die Position des ersten Instrumentenstandpunkts besonders durch die Aufgabenstellung der Nivellierung vorgegeben. In Anlehnung an den Terminus der Versuchsfeldbeschreibung wird der Standpunkt im Innenbereich vorgesehen. Die Sichtbarkeit der EKM-Anhebeplätze wird zudem durch geringe Instrumentenhöhen gewährleistet. Die Messsituation wird vereinfacht in Abbildung 5.17 dargestellt. Für den geführten Programmablauf der Fahrzeugvermessung lassen sich die einzubeziehenden Kandidaten und somit auch die Trennschärfe der Identifizierung steuern. Die Definition einzubeziehender Kandidaten

muss mit der fahrzeugabhängigen Netzkonfiguration und in Kombination mit dem Messablauf erfolgen. Da die Instrumentenstandpunkte für Serienmessungen verschiedener Fahrzeuge ähnlich gelegen sind, kann die funktechnisch ermittelte Mobilknotenposition vorangegangener Vermessungen als Eingrenzung für folgende Messungen dienen. Das Konzept einer lernenden Datenbank kann verfolgt werden.



Abb. 5.17: Nivellierung des Schienenfahrzeugs (nach Ullrich 2015)

Darüber hinaus werden die Ankerknoten AK_2 und AK_5 bei der praktischen Anwendung entfallen, da diese auf den Gleitflächen der Feinhubgetriebe angebracht wurden und beim Verschieben der Getriebe hinderlich wären.

Bei den Ergebnissen der Basisausgleichung des Innenbereichs (Abb. 5.15) wurden in den meisten Fällen außen liegende Anker fehlidentifiziert. Als Resultat der Identifizierung wurden stattdessen die zentral angeordneten Knoten hervorgebracht. Entfallen die zentral angeordneten Ankerknoten, entstehen auch für die außen liegenden Bezugspunkte korrekte Identifizierungen und das Identifizierungsverfahren führt ohne Zusatzmessungen für alle Standpunkte des Innenbereichs zum Erfolg.

Schienenfahrzeuge mit einem geringen Abstand zwischen den Anbindungen eines Drehgestells bedingen kleine Abstände zwischen den Feinhubeinrichtungen der EKM. Demzufolge weisen auch die Anker eines Rollbocks weniger große Abstände auf als im Versuchsfeld dargestellt. Entsprechend der räumlichen Nähe und der Ausführungen des vorangegangenen Kapitels ist die Identifizierung der Anker in diesem Zusammenhang kritisch zu betrachten.

Die zu identifizierenden Bezugspunkte müssen jedoch nicht identisch zu den Ankern sein. Messpunkte am Fahrzeug oder auch die definierten Bezugspunkte am Traversenblech der EKM können zur Anwendung kommen. Aufgrund der Tatsache, dass die Bezugspunkte an den Traversenblechen in X -Richtung des Bezugssystems einen wesentlich größeren Abstand aufweisen als die Anker in Y -Richtung, ist eine sichere Identifizierung gegeben. Dieser Sachverhalt wird vor allem dadurch bekräftigt, dass selbst im Falle der primären Identifizierung alle Anker dem richtigen Rollbock zugeordnet werden konnten. Zudem müssen bei dieser Konstellation lediglich zwei Bezugspunkte identifiziert werden, um eine gute Näherungslösung für die Transformation zwischen dem Instrumenten- und Bezugssystem zu erhalten.

Die indirekte Punktidentifizierung bei der Qualitätskontrolle von Schienenfahrzeugen sollte deshalb mit den Bezugspunkten und beschriebenen Koordinatentransformation des Kapitels 4.4.1 durchgeführt werden, um den Messablauf frühzeitig zu automatisieren und Punktprüfungen in Echtzeit zu ermöglichen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus bilden vermessungstechnische Qualitätsprüfungen einen wichtigen Teil des gesamten Qualitätsmanagements. Für große Produktionsgüter werden in Abhängigkeit zur geforderten Genauigkeit besonders Industrietachymeter oder Lasertracker eingesetzt. In Anbetracht der gesamten Produktionskette stellt die vermessungstechnische Erfassung der qualitätsrelevanten Daten allerdings nur einen kleinen aber nicht unbedeutenden Teilabschnitt dar. Die Zeiträume für die Datenakquise sind dementsprechend eng bemessen. Unabhängig davon ist ein Höchstmaß an Genauigkeit und Datenvollständigkeit gefordert. Insbesondere der Anspruch an die Vollständigkeit der Daten mündet bei vielen Anwendungsfällen in einem automatisierten Messablauf. Definierte Messpunkte werden auf verschiedenen Instrumentenstandpunkten tabellarisch abgearbeitet bis die vollständige Erfassung der Geometrie erreicht ist. Dabei erfolgt die Steuerung des Messprozesses meist softwareseitig.

Die geodätische Intelligenz wird in diesem Zusammenhang auf die Software übertragen, wodurch in vielen Phasen des automatisierten Messablaufes Kontrollprozeduren hinsichtlich der Punktmessungen vorgesehen werden können. Aus diesen Gründen ist es nicht unüblich, dass die Qualitätskontrollen von Facharbeitern verschiedener Produktionsbereiche vorgenommen werden. Die Erfahrung im Umgang mit statistischen Informationen, der Interpretation von Messergebnissen und -abweichungen, aber vor allem auch der Lokalisierung von Fehlerursachen sind in diesem Zusammenhang nicht zwingend vorauszusetzen. Die Suche nach der Fehlerursache stellt zudem einen Zeitfaktor dar, der während eines Produktionsprozesses mit engen Prozessketten oft nicht eingeplant ist.

Im industriellen Umfeld müssen Koordinaten oft in übergeordnete Koordinatensysteme transformiert werden. Das kann z. B. mit Bezugspunktmessungen und einer anschließenden Helmert-Transformation erfolgen. Das Bezugssystem wird in diesem Fall durch das Produktkoordinatensystem repräsentiert, wobei die zugehörigen Bezugspunkte meist regelmäßig angeordnet sind. Im Grundriss betrachtet wird durch die Punkte z. B. ein Rechteck aufgespannt. Infolge der Regelmäßigkeit können Bezugspunktverwechslungen nicht in jedem Fall aufgedeckt werden. Die statistischen Ergebnisse der Ausgleichung sind für verschiedene Punktkombinationen nahezu identisch, liefern aber unterschiedliche Transformationsparameter. Da die Ergebnisse der Vermessung nicht durch Koordinaten, sondern durch definierte Abmaße dargestellt werden, kann die Anwendung eines falschen Satzes an Transformationsparametern auch dadurch nicht zwingend ausgeschlossen werden. Die Bewertung des Produkts auf Grundlage der Daten könnte demzufolge zu falschen Schlüssen führen; derselbe Zusammenhang kann ebenfalls auf regelmäßig verteilte Verknüpfungspunkte übertragen werden.

Aus diesen Gründen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit verschiedene Möglichkeiten der Punktidentifizierung diskutiert. Die Verfahren bilden die Basis der sicheren Zuordnung einer gemessenen Koordinate zu einem Bezugs- oder Verknüpfungspunkt und sollen damit zur Vermeidung von Punktverwechslungen sowie zur sicheren Bestimmung der Transformationsparameter beitragen. Erfolgt die korrekte Koordinatentransformation am Beginn der Messung kann das Messpersonal zudem unterstützt werden. Im Rahmen strukturierter Messabläufe kann die

Position der Messstelle anhand eines Soll-Ist-Vergleichs geprüft oder vor der Messung durch den Instrumentenlaser signalisiert werden.

Im Kontext der Arbeit wurde zwischen direkten und indirekten Identifizierungsmethoden unterschieden. Während direkte Verfahren hauptsächlich auf der Auswertung von Signalintensitäten eines Industrietachymeters beruhen, nutzen indirekte Verfahren zusätzliche Daten eines adaptiv am Instrument befestigten Funkknotens. Darüber hinaus wurden punktidifizierende Reflektorhalterungen für die Anwendung mit kugelförmigen Reflektoren konzipiert, welche ebenfalls den direkten Identifizierungsverfahren zugeordnet werden. Die Entwicklung und Anwendung der jeweiligen Verfahren wurde am Beispiel der Qualitätssicherung schienengebundener Fahrzeuge beschrieben.

Die direkte Identifizierung von Messpunkten wird schwerpunktmäßig bei photogrammetrischen Anwendungen vollzogen. Die Auswertung codierter Zielmarken ist in diesem Zusammenhang sensorbedingt problemlos möglich. In vergleichbarer Weise können die Bilddaten des ATR-Sensors oder einer Koaxialkamera bei modernen Tachymetern genutzt werden. Für Instrumente ohne Kameraunterstützung stellt die Signalintensitätsmessung als ein alternatives Verfahren der Punktidifizierung einen Schwerpunkt der Arbeit dar.

Das Industrietachymeter Leica TDRA6000 wurde bei den Intensitätsmessungen in Kombination mit codierten Zielmarken eingesetzt. Die aus der Photogrammetrie bekannten Formen der Zielzeichencodierung wurden verwendet und hinsichtlich der Intensitätsmessung modifiziert. Zwei Zielmarkenvarianten wurden genauer betrachtet. Zum einen ringförmig codierte Zielmarken und zum anderen ein sektorförmiges Derivat. Die Codebereiche der Zielmarkenvarianten wurden durch verschieden stark reflektierende Oberflächen repräsentiert, welche anhand der gemessenen Signalintensitäten voneinander trennbar sind. Die Dimensionen der aufgebrachtten Codebereiche gründen sich dabei auf den empirisch ermittelten Instrumentenparametern der Spotgröße, Intensitätsmessrate und der minimal ausführbaren Winkelgeschwindigkeit. Darüber hinaus wurden Erkenntnisse zu den Eigenschaften des Distanzmoduls bei der Dimensionierung berücksichtigt, welche besonders auf die Datenerfassungs- und Auswertestrategie Einfluss nehmen.

Bei der Datenerfassung werden die Codebereiche mit dem Instrumentenlaser abgetastet und die resultierenden Signalintensitäten gemessen. Während der Abtastung befindet sich das Instrument im Intensitätsmessmodus der Distanzmessmethode zur reflektorlosen Messung, wodurch geringe Laserspotgrößen gewährleistet werden. Die gemessenen Intensitätswerte werden bei der weiteren Prozessierung als Indikator für die Wertigkeit der Codebereiche eingesetzt. In Abhängigkeit zum Reflexionsgrad der Oberfläche fallen die Intensitätswerte signifikant hoch oder niedrig aus und können anhand eines Schwellwertes binarisiert werden. Durch die Binarisierung wird jedem Codebereich eine Wertigkeit von Null oder Eins zugeordnet, die im Resultat zur Bildung einer Dualzahl – der Punktkennung – führt.

Die Einsatzfähigkeit der codierten Zielmarken wurde im Nahbereich bis 50 m unter Zielmarkenneigungen von maximal 60° untersucht. Im Sinne der Zuverlässigkeit und zeiteffizienten Codeerfassung tritt in erster Linie die ringförmige Codierungsvariante hervor, die stets die korrekte Punktkennung hervorbrachte. Durch die Kombination zweier Auswerteverfahren, der Prüfring- und einer Korrelationsmethode, kann die Bestimmung der Punktkennung zusätzlich kontrolliert werden. Im Vergleich zur Sektorcodierung ergeben sich zudem Vorteile hinsichtlich der nicht benötigten Information über die Zielzeichenneigung. Die Bestimmung der Zielzeichenneigung bildet für sektorförmige Codierungen zugleich den limitierenden Faktor hinsichtlich der

praktikablen Anwendbarkeit. Nicht nur der Zeitaufwand, sondern auch die Genauigkeit der Neigungsbestimmung führen bei der Versuchsanwendung dazu, dass lediglich Zielmarkenneigungen bis 45° zu richtigen Identifizierungsergebnissen führen.

Als Basis der indirekten Identifizierungen steht die kombinatorische Auswertung von Tachymeter- und Funkdaten, die vom Leica TDRA6000 und dem Funksystem Metirionic MIC-DMK zur Verfügung gestellt werden. Beide Systeme werden kombiniert, indem der mobile Funkknoten am Tragegriff des Tachymeters angebracht wird. Zudem sind die Ankerknoten des Funksystems in einem Bezugssystem koordiniert. Grundsätzlich besteht durch die gegebene Konstellation das Ziel, den mobilen Knoten durch Bogenschnittverfahren im Bezugssystem zu positionieren und mit dieser Vorinformation die Identifizierung von tachymetrisch erfassten Bezugspunkten zu ermöglichen. Da zwischen dem Mobilknoten und den Ankern kontinuierliche Funkdistanzmessungen erfolgen, wird pro Anker ein repräsentativer Distanzwert festgesetzt. Die Einzelmessungen werden dazu einem Ausreißertest unterzogen und durch die Bildung eines niedrigen p -Quantils auf einen einzigen Wert reduziert. Als weitere Voraussetzungen müssen die Distanzdaten des Tachymeters und Funksystems auf einen gemeinsamen Nullpunkt reduziert werden. Dieser Prozessierungsschritt wird als Homogenisierung bezeichnet.

Im Berechnungsschema wird zunächst die Mobilknotenposition mithilfe der gefilterten Funkdistanzen und des Bogenschnittverfahrens bestimmt. Zur Ermittlung einer Näherungslösung für diese nichtlineare Problemstellung kommt das Verfahren des Least Median Square bei der direkten Lösung des räumlichen Bogenschnitts zum Einsatz. Bei der anschließenden Parameterschätzung wird ein gestufter Ausgleichungsansatz gewählt, welcher standpunktabhängige Messabweichungen berücksichtigt. In Abhängigkeit zum Iterationsschritt der Ausgleichung werden die Beobachtungsdaten unterschiedlich behandelt. Für freie Sichten zwischen den Sensorknoten konvergiert die Ausgleichung nach wenigen Iterationen und die Beobachtungen werden als gleichgenau betrachtet. In allen anderen Fällen werden die Gewichte mit den homogenisierten Verbesserungen und einer elliptischen Dämpfungsfunktion modifiziert. Als Ergebnis der Ausgleichung steht die Koordinate des Mobilknotens im Bezugssystem als initiale Parameterschätzung zur Verfügung.

Die initiale Parameterschätzung dient in der Folge zur Zuordnung der sogenannten Identifizierungsmessung des Tachymeters zu einem Bezugspunkt. Die Identifizierung des Bezugspunkts wird aufgrund einer Kandidatenliste vollzogen, die in mehreren Filterstufen bis zum Verbleib eines einzigen Kandidaten reduziert wird. Zunächst werden die Parameter einer Konfidenzellipse aus den Ausgleichungsergebnissen gebildet und ein Toleranzbereich definiert, in welchem der richtige Kandidat liegen muss. Für die verbleibenden Kandidaten wird der grundlegende Ausgleichungsansatz übernommen und durch kandidatenbezogene Restriktionen ergänzt. Als Ergebnis entsteht für jeden Kandidaten eine Positionslösung, die durch eine Wahrscheinlichkeitsbeziehung bzgl. der initialen Parameterschätzung bewertet wird. Werden die beschriebenen Filterstufen durch mehrere Kandidaten erfüllt, wird ein Distanzkriterium zur abschließenden Auswahl eines Kandidaten herangezogen. In diesem Zusammenhang wird jeweils die Strecke zwischen der kandidatenbezogenen Positionslösung und dem korrespondierenden Bezugspunkt gebildet. Derjenige Kandidat, dessen Distanzdifferenz zur Identifizierungsmessung minimal wird, stellt das Endergebnis der Identifizierung dar.

Mit dem beschriebenen Identifizierungsverfahren konnten in einem Versuchsfeld 84% der Kandidaten korrekt identifiziert werden. Das Versuchsfeld entsprach den realen Messbedingungen der Qualitätssicherung schienengebundener Fahrzeuge. Erst durch das Hinzunehmen einer eindeutig zuzuordnenden Tachymetermessung zu einem Bezugspunkt konnten alle Kandidaten korrekt

identifiziert werden. Generell ist der Erfolg des Identifizierungsverfahrens von den Parametern der Ausgleichung und im besonderen Maße von der Netzkonfiguration abhängig. Speziell die räumliche Nähe zwischen Kandidatenpunkten entscheidet über die Trenn- und Identifizierbarkeit der Bezugspunkte.

Zusammenfassend zeigt die Arbeit verschiedene Möglichkeiten der Punktidentifizierung auf, welche mit zusätzlicher Sensorik oder allein aus den Messdaten eines Tachymeters realisiert werden können. Am Beispiel der Qualitätssicherung schienengebundener Fahrzeuge wurde zudem veranschaulicht, wie die Anwendung der direkten und indirekten Identifizierungsverfahren innerhalb eines strukturierten Messablaufes zur zeiteffizienten und sicheren Qualitätskontrolle beitragen kann.

Neben den behandelten Verfahrensweisen der Punktidentifizierung könnte vor allem der Einsatz vonameratechnik zur Punktidentifizierung dienen. Da moderne Industrietachymeter derzeit noch nicht als Videotachymeter zur Verfügung stehen, besteht die Möglichkeit der adaptiven Befestigung einer Kamera anstelle des Okulars. In Einheit mit einer automatischen Fokussierung können die Kameradaten dann nach photogrammetrischen Auswertetechniken ebenfalls zur Punktidentifizierung dienen.

Darüber hinaus verfügen einige der aktuellen Gerätegenerationen wie die Leica Viva Serie über scannende Messtechnologien. Abgesehen von den kartesischen Koordinaten enthalten die scannend erfassten Messdaten auch die Intensitätswerte der Einzelpunkte. Insbesondere für sektorförmig codierte Zielmarken könnte durch einen sehr schnellen Zielmarkenscan ohne vorherige Neigungsbestimmung auf die Codierung der Zielmarke geschlossen werden. Das Intensitätsverhalten ist in diesem Zusammenhang für die verschiedenen Codebereichsausprägungen und speziell hinsichtlich verschiedener Zielzeichenneigungen zu untersuchen.

Für die Anwendung der funkgestützten Identifizierung sind hauptsächlich hardwareseitige Modifikationen denkbar. Ein Teil der derzeit verfügbaren Funksysteme zeichnet sich durch höhere Messgenauigkeiten und Datenraten aus. Dadurch könnte eine genauere Positionsbestimmung, kleinere Konfidenzellipsen und somit auch eine bessere Identifizierung der Kandidaten realisiert werden. Des Weiteren kann der Einfallswinkel des empfangenen Funksignals mit zusätzlichen Antennenarrays messtechnisch erfasst werden. Weitere Filterkriterien oder die vollständige Ermittlung der Transformationsparameter zwischen dem Instrumenten- und Bezugssystem sind denkbar.

Für die Montage des mobilen Knotens besteht außerdem die Möglichkeit der Integration in den Tragegriff. In Analogie zur Montage von GNSS-Antennen oder Bluetooth-Modulen könnten die Funkdaten damit direkt am Instrument zugänglich gemacht werden und die Homogenisierung der Daten kann instrumentenseitig erfolgen.

Literaturverzeichnis

- [Aerotec 2016] PREMIUM AEROTEC GMBH: *Montagevorrichtung für die CFK-Haut des Rumpfmittelteils vom Eurofighter*. Internetseite [online]. Verfügbar unter: <http://www.premium-aerotec.com/Flugzeugstrukturen.html>. Zugriff: 15. August 2016.
- [Ahn und Oberdorfer 1998] AHN, S. J. ; OBERDORFER, B.: *Optoelektronisch erfassbares Identifizierungs- oder Zielelement sowie Verfahren zu seiner Erfassung*. Anmeldung: 09 August 1996. DE, Patentschrift DE19632058C1. 05. März 1998.
- [Ahn und Rauh 1998] AHN, S. J. ; RAUH, W.: *Circular Coded Target and Its Application to Optical 3D-Measurement Techniques*. S. 245–252. In: LEVI, P. (Hrsg.) ; SCHANZ, M. (Hrsg.) ; AHLERS, R.-J. (Hrsg.) ; MAY, F. (Hrsg.): *Mustererkennung 1998*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1998.
- [Aimess 2013] AIMESS PRODUCTS GMBH: *Produktkatalog*. Burg : Aimess Products GmbH, 2013.
- [Al Rifai 2009] AL RIFAI, A.: *Indoor Positioning at Arlanda Airport*. Schweden, Kista, KTH School of Information and Communications Technology, Masterarbeit, 2009.
- [Albertz und Wiggenhagen 2009] ALBERTZ, J. ; WIGGENHAGEN, M.: *Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung*. 5. Auflage. Wichmann Verlag, 2009.
- [AST 2010] A.S.T. GMBH: *Die Kunst der Präzision. Kraftsensoren, Messverstärker, mechanische Konstruktionen, Software und Systeme zur Qualitätssicherung von Schienenfahrzeugen*. Produktbroschüre. Dresden : A.S.T. GmbH, 2010.
- [Baarda 1968] BAARDA, W.: *A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks*. Publications on Geodesy, New Series, Vol. 2, No. 5. Delft : Netherlands Geodetic Commission, 1968.
- [Baltsavias 1991] BALTSAVIAS, E. P.: *Multiphoto Geometrically Constrained Matching*, ETH Zürich, Dissertation, 1991.
- [Bayoud 2006] BAYOUD, F.: *Leica's PinPoint EDM Technology with Modified Signal Processing and Novel Optomechanical Features*. In: *Proceedings of the 23rd FIG Congress*, 2006, S. 1–16.
- [Beaulieu 2003] BEAULIEU, N. C.: *Introduction to "Linear Diversity Combining Techniques"*. In: *Proceedings of the IEEE 91* (2003), Nr. 2, S. 328–330.
- [Becker u. a. 2009] BECKER, E. ; METSIS, V. ; ARORA, R. ; VINJUMUR, J. ; XU, Y. ; MAKEDON, F.: *SmartDrawer: RFID-based smart medicine drawer for assistive environments*. In: *Proceedings of the 2nd international Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive environments*, 2009, S. 1–8.
- [Berg u. a. 2011] BERG, U. ; UTTERBÄCK, A. ; CARLÈN, J.: *Target for use in measuring and surveying applications*. Anmeldung: 30. Mai 2007. US, Patentschrift US7913405 B2. 29. März 2011.
- [Bernhart und Hennes 2012] BERNHART, F. ; HENNES, M.: *Leistungsfähigkeit eines „Reflektor 160“ in Kombination mit einem Lasertracker*. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 2* (2012), Nr. 119, S. 63–69.
- [Berthold und Imkamp 2013] BERTHOLD, J. ; IMKAMP, D.: *Looking at the future of manufacturing metrology: roadmap document of the German VDI/VDE Society for Measurement and Automatic Control*. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems 2* (2013), Nr. 1, S. 1–7.
- [Böge und Plassmann 2007] BÖGE, W. (Hrsg.) ; PLASSMANN, W. (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker*. 4. Auflage. Verlag Vieweg+Teubner, 2007.
- [Bhatia und Vandana 2010] BHATIA, N. ; VANDANA, A.: *Survey of Nearest Neighbor Techniques*. In: *International Journal of Computer Science and Information Security 8* (2010), Nr. 2, S. 302–305.
- [Blankenbach u. a. 2014] BLANKENBACH, J. ; NORRDINE, A. ; HELLMERS, H.: *Magnetic Indoor Local Positioning System – ein robustes 3D-Positionierungssystem für Innenraumumgebungen*. In: WIESER, A. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 14: Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich*, Wichmann Verlag, 2014, S. 185–196.
- [Blankenbach u. a. 2007] BLANKENBACH, J. ; NORRDINE, A. ; SCHLEMMER, H. ; WILLERT, V.: *Indoor-Positionierung auf Basis von Ultra Wide*

- Band. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* (2007), Nr. 5, S. 169–178.
- [Blankenbach u. a. 2016] BLANKENBACH, J. ; STERNBERG, H. ; TILCH, S.: *Indoor-Positionierung*. S. 1–36. In: FREEDEN, W. (Hrsg.) ; RUMMEL, R. (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie*. Band Ingenieurgeodäsie. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2016.
- [Blankenbach und Willert 2009] BLANKENBACH, J. ; WILLERT, V.: Robuster räumlicher Bogenschnitt – Ein Ansatz zur robusten Positionsberechnung in Indoor-Szenarien. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* (2009), Nr. 8–9, S. 320–327.
- [BNA 2015] BUNDESNETZAGENTUR: *Funkanwendungen auf den ISM-Bändern*. Informationsblatt [online]. Verfügbar unter: <http://emf3.bundesnetzagentur.de/pdf/ISM-BNetzA.pdf>. Zugriff: 22. Mai 2015.
- [Bolsakov u. a. 1985] BOLSAKOV, V. D. ; DEUMLICH, F. ; GOLUBOV, A. N. ; VASILEV, V. P.: *Elektronische Streckenmessung*. 1. Auflage. Berlin : VEB Verlag für Bauwesen, 1985.
- [Brandhorst u. a. 2014] BRANDHORST, M. ; DELLMANN, T. ; HAIGERMOSER, A. ; HECHT, M. ; KARCH, S. ; LÖFFLER, G. ; RÖSCH, W. ; SCHINDLER, C. (Hrsg.): *Handbuch Schienenfahrzeuge: Entwicklung, Produktion, Instandhaltung*. 1. Auflage. Hamburg : Eurailpress, 2014.
- [Braun u. a. 2013] BRAUN, J. ; ŠTRONER, M. ; URBAN, R.: Extensive Testing and Comparison of a new Type of Target for use in Engineering Surveying. In: *Slovak Journal of Civil Engineering* 21 (2013), Nr. 2, S. 29–40.
- [Brumbi 1997] BRUMBI, D.: *Applikationsspezifische Ausführungsformen und Verfahren beim FMCW-Füllstands-Radar*. S. 221–225. In: BONFIG, K. W. (Hrsg.): *Sensoren und Sensorsignalverarbeitung: Wegweisende, serienreife neue Produkte und Verfahren*. Renningen : Expert Verlag, 1997.
- [Brunson 2012] BRUNSON INSTRUMENT COMPANY: *SMR Target Holders and Accessories Catalog*. Produktbroschüre. Kansas City : Brunson Instrument Company, 2012.
- [Bürki u. a. 2010] BÜRKI, B. ; GUILLAUME, S. ; SORBER, P. ; OESCH, H.-P.: DAEDALUS: A versatile usable digital clip-on measuring system for Total Stations. In: *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2010, S. 1–10.
- [Burnside 1991] BURNSIDE, C. D.: *Electromagnetic Distance Measurement*. 3. Auflage. Oxford : BSP Professional Books, 1991.
- [Caesar und Michaelis 1997] CAESAR, T. ; MICHAELIS, M.: Ein neues Verfahren zur robusten Erkennung textcodierter Meßmarken. In: *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 65 (1997), Nr. 5–6, S. 150–157.
- [Caspary 2013] CASPARY, W.: *Fehlertolerante Auswertung von Messdaten: Daten- und Modellanalyse, robuste Schätzung*. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2013.
- [Connor 1989] CONNOR, F. R.: *Modulation: Analog-, Digital- und Pulssysteme*. Verlag Vieweg+Teubner, 1989.
- [Cover 1968] COVER, T. M.: Estimation by the nearest neighbor rule. In: *IEEE Transactions on Information Theory* 14 (1968), Nr. 1, S. 50–55.
- [Deumlich und Staiger 2002] DEUMLICH, F. ; STAIGER, R.: *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. 9. Auflage. Heidelberg : Wichmann Verlag, 2002.
- [DIN 13-1 1999] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 13-1: Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung – Teil 1: Nenmmaße für Regelgewinde; Gewinde-Nenndurchmesser von 1 mm bis 68 mm*. Berlin : Beuth Verlag, November 1999.
- [DIN 25043 2012] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 25043: Bahnanwendungen – Messen von Schienenfahrzeugen beim Neubau*. Berlin : Beuth Verlag, Februar 2012.
- [DIN EN 13715 2015] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN 13715: Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle, Räder, Radprofile; Deutsche und französische Fassung prEN 13715:2015*. Berlin : Beuth Verlag, April 2015.
- [DIN EN 13775 2004] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN 13775: Bahnanwendungen – Vermessung von Güterwagen beim Neubau und bei Umbauten; Deutsche Fassung EN 13775:2003*. Berlin : Beuth Verlag, September 2004.
- [DIN EN ISO 9000ff 2016] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 9000ff: Normensammlung für das Qualitätsmanagement und zur Qualitätssicherung*. Berlin : Beuth Verlag, März 2016.
- [Drane u. a. 1998] DRANE, C. ; MACNAUGHTAN, M. ; SCOTT, C.: Positioning GSM telephones. In: *IEEE Communications Magazine* 36 (1998), Nr. 4, S. 46–59.

- [Faro 2007] FARO TECHNOLOGIES: *Understanding Laser Tracker Targets*. Technology White Paper for Measurement Technology and Laser Tracker. Kornthal-Münchingen : Faro Technologies, 2007.
- [Finkenzeller 2015] FINKENZELLER, K.: *RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC*. 7. Auflage. München : Hanser Verlag, 2015.
- [Förstner 1985] FÖRSTNER, W.: *Prinzip und leistungsfähigkeit der Korrelation und Zuordnung digitaler Bilder*. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie, Nr. 11. Stuttgart : Universität Stuttgart, 1985.
- [Fraser 1997] FRASER, C. S.: Innovations in Automation for Vision Metrology Systems. In: *Photogrammetric Record* 90 (1997), Nr. 15, S. 901–911.
- [Froome und Bradsell 1966] FROOME, K. D. ; BRADSELL, R. H.: A new method for the measurement of distances up to 5000 ft by means of a modulated light beam. In: *Journal of Scientific Instruments* 43 (1966), Nr. 3, S. 129–133.
- [Fry und Lenert 2005] FRY, E. A. ; LENERT, L. A.: MASCAL: RFID tracking of patients, staff and equipment to enhance hospital response to mass casualty events. In: *Proceedings of the AMIA Annual Symposium*, 2005, S. 261–265.
- [Gargula 2009] GARGULA, T.: Establishing of a damping function criterion in the robust adjustment algorithm. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 116 (2009), S. 64–69.
- [Gargula und Krupinski 2007] GARGULA, T. ; KRUPINSKI, W.: The use of conic equation as a damping function in robust estimation. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 114 (2007), Nr. 10, S. 337–340.
- [Geomics 2003] GEOMICS LTD.: *Magnetic Drift Nest*. Produktbroschüre. Priorslee : Geomics Ltd., 2003.
- [Gevatter und Grünhaupt 2006] GEVATTER, H.-J. (Hrsg.) ; GRÜNHaupt, U. (Hrsg.): *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2006.
- [Gierlich u. a. 2007] GIERLICH, R. ; HUETTNER, J. ; DABEK, A. ; HUEMER, M.: Performance Analysis of FMCW Synchronization Techniques for Indoor Radiolocation. In: *Proceedings of the European Conference on Wireless Technologies*, 2007, S. 24–27.
- [Goldberg 2014] GOLDBERG, S.: *Untersuchungen zu einem low-cost Positionierungssystem in geschlossenen Räumen auf Basis von RFID*, TU Dresden, Masterarbeit, 2014.
- [Gottwald 1996] GOTTWALD, R.: Industriemesssysteme in der 4. Generation - Leica Axyz. In: *Vermessungswesen und Raumordnung* 58 (1996), Nr. 7, S. 356–362.
- [Grafarend u. a. 1989] GRAFAREND, E. W. ; LOHSE, P. ; SCHAFFRIN, B.: Dreidimensionaler Rückwärtsschnitt. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* 114 (1989), Nr. 2, S. 61–67.
- [Grün 1985] GRÜN, A.: Adaptive Least Squares Correlation – a powerful Image Matching Technique. In: *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography* 14 (1985), Nr. 3, S. 175–187.
- [Gu u. a. 2009] GU, Y. ; LO, A. ; NIEMEGERES, I.: A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. In: *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 11 (2009), Nr. 1, S. 13–32.
- [Gustrau 2013] GUSTRAU, F.: *Hochfrequenztechnik: Grundlagen der mobilen Kommunikationstechnik*. 2. Auflage. München : Hanser Verlag, 2013.
- [Händler 2012] HÄNDLER, V.: *Konzeption eines bildbasierten Sensorsystems zur 3D-Indoorpositionierung sowie Analyse möglicher Anwendungen*, TU Darmstadt, Dissertation, 2012.
- [Haralick u. a. 1994] HARALICK, B. M. ; LEE, C.-N. ; OTTENBERG, K. ; NÖLLE, M.: Review and Analysis of Solutions of the Three Point Perspective Pose Estimation Problem. In: *International journal of Computer Vision* 13 (1994), Nr. 3, S. 331–356.
- [Harding 2013] HARDING, K. (Hrsg.): *Handbook of Optical Dimensional Metrology*. CRC Press, 2013 (Series in Optics and Optoelectronics).
- [Harnisch 2009] HARNISCH, C.: *Netzwerktechnik*. 4. Auflage. Frechen : mitp Verlag, 2009.
- [Heipke 1990] HEIPKE, C.: *Integration von digitaler Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion innerhalb der digitalen Photogrammetrie*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 366, Dissertation, 1990.
- [Hekimoglu und Koch 1999] HEKIMOGLU, S. ; KOCH, K. R.: How can reliability of the robust methods be measured. In: *Proceedings of the Third Turkish-German Joint Geodetic Days*, 1999, S. 179–196.

- [Hennes 2007] HENNES, M.: Potentiale der Ingenieurgeodäsie im Maschinenbau. In: *Beiträge zum 3. Dresdener Ingenieurgeodäsietag, Berufliche Weiterbildung Industriemesstechnik*, 2007, S. 21–27.
- [Hennes 2016] HENNES, M.: *Messmittel der Large Volume Metrology (LVM)*. S. 1–24. In: FREEDEN, W. (Hrsg.) ; RUMMEL, R. (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2016.
- [Hennes und Krickel 2000] HENNES, M. ; KRICKEL, B.: Zur Entwicklung von Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern. In: *Flächenmanagement und Bodenordnung* 62 (2000), S. 26–33.
- [Hering u. a. 1999] HERING, E. ; VOGT, A. ; BRESSLER, K.: *Handbuch der elektrischen Anlagen und Maschinen*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1999.
- [Herrmann 2014] HERRMANN, C.: Retroreflektoren in der Industrievermessung. In: WIESER, A. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 14: Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich*, Wichmann Verlag, 2014, S. 89–94.
- [Hexagon 2015] HEXAGON METROLOGY: *Leica Geosystems Metrology Products*. Produktkatalog Version 1.3. Wetzlar : Hexagon Metrology, 2015.
- [Hightower und Borriello 2001] HIGHTOWER, J. ; BORRIELLO, G.: Location systems for ubiquitous computing. In: *IEEE Computer* 34 (2001), Nr. 8, S. 57–66.
- [Hightower u. a. 2000] HIGHTOWER, J. ; WANT, R. W. ; BORRIELLO, G.: *SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength*. Univ. of Washington, CSE Report: UW CSE 2000-02-02, 2000.
- [Höfle u. a. 2009] HÖFLE, B. ; VETTER, M. ; PFEIFER, N. ; MANDBURGER, G. ; STÖTTER, J.: Water surface mapping from airborne laser scanning using signal intensity and elevation data. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 34 (2009), Nr. 12, S. 1635–1649.
- [Höher 2013] HÖHER, P. A.: *Grundlagen der digitalen Informationsübertragung: Von der Theorie zu Mobilfunkanwendungen*. 2. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg Verlag, 2013.
- [Hölzler und Thierbach 1966] HÖLZLER, E. (Hrsg.) ; THIERBACH, D. (Hrsg.): *Nachrichtenübertragung: Grundlagen und Technik*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1966.
- [Homajnejad und Shortis 1995] HOMAINEJAD, A. S. ; SHORTIS, M. R.: Development of a template for automatic stereo matching. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 30 (1995), S. 318–322.
- [Hubbs 2011] HUBBS MACHINE & MFG. INC.: *Laser Tracker 1.5 Sphere Mounts*. Produktbroschüre. Cedar Hill : Hubbs Inc., 2011.
- [Ingensand und Bitzi 2001] INGENSAND, H. ; BITZI, P.: Technologien der GSM-Positionierungsverfahren. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* (2001), Nr. 8–9, S. 286–294.
- [Jäger u. a. 2005] JÄGER, R. ; MÜLLER, T. ; SALER, H. ; SCHWÄBLE, R.: *Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren*. Heidelberg : Wichmann Verlag, 2005.
- [Joeckel u. a. 2008] JOECKEL, R. ; STOBER, M. ; HUEP, W.: *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. 5. Auflage. Heidelberg : Wichmann Verlag, 2008.
- [Joram 2015] JORAM, N.: *Design of a Dual Band Local Positioning System*, TU Dresden, Dissertation, 2015.
- [Juretzko 2005] JURETZKO, M.: *Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen*, RU Bochum, Dissertation, 2005.
- [Juretzko 2006] JURETZKO, M.: Leistungsfähigkeit des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Tachymeterserie TPS1200 von Leica. In: *Flächenmanagement und Bodenordnung* 68 (2006), Nr. 2, S. 90–95.
- [Kaasalainen u. a. 2005] KAASALAINEN, S. ; AHOKAS, E. ; HYYPPÄ, J. ; SUOMALAINEN, J.: Study of surface brightness from backscattered laser intensity: calibration of laser data. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 2 (2005), Nr. 3, S. 255–259.
- [Kark 2016] KARK, K. W.: *Antennen und Strahlungsfelder: Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung*. 6. Auflage. Wiesbaden : Verlag Springer Vieweg, 2016.
- [Keferstein und Marxer 2015] KEFERSTEIN, C. P. ; MARXER, M.: *Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren*. 8. Auflage. Wiesbaden : Verlag Springer Vieweg, 2015.

- [Kern 2001] KERN, F.: *Bauaufnahme der Synagoge Wörlitz mittels reflektorloser Polaraufnahme*. S. 198–205. In: WERFERLING, U. (Hrsg.) ; HEINE, K. (Hrsg.) ; WULF, U. (Hrsg.): *Handaufmaß bis High Tech*, Verlag Philipp von Zabern, 2001.
- [Kern 2003] KERN, F.: *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*, TU Braunschweig, Dissertation, 2003.
- [Kersten und Maas 1994] KERSTEN, T. P. ; MAAS, H.-G.: Digital high resolution still video camera versus film-based camera in photogrammetric industrial metrology. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 30 (1994), Nr. 1, S. 114–121.
- [Kickingereder 2007] KICKINGEREDER, R.: *Optische Vermessung partiell reflektierender Oberflächen*, Universität Passau, Dissertation, 2007.
- [Kleusberg 1994] KLEUSBERG, A.: Die direkte Lösung des räumlichen Hyperbelschnitts. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* 119 (1994), Nr. 1994, S. 188–192.
- [Knobloch 1992] KNOBLOCH, M.: Miros: A new software for Rollei RS1 digital monocomparator. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 29 (1992), S. 35–42.
- [Knyaz und Sibiryakov 1998] KNYAZ, V. A. ; SIBIRYAKOV, A. V.: The development of new coded targets for automated point identification and non-contact 3D surface measurements. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 32 (1998), S. 80–85.
- [Komarov und Smolskiy 2003] KOMAROV, I.V. ; SMOLSKIY, S.M.: *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Boston, London : Artech House, 2003.
- [Konecny und Lehmann 1984] KONECNY, G. ; LEHMANN, G.: *Photogrammetrie*. 4. Auflage. Berlin : De Gruyter, 1984.
- [Kraus 1996] KRAUS, K.: *Photogrammetrie – Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. Band 2. 4. Auflage. Bonn : Dümmers Verlag, 1996.
- [Kraus 1997] KRAUS, K.: *Photogrammetrie – Grundlagen und Standardverfahren*. Band 1. 6. Auflage. Bonn : Dümmers Verlag, 1997.
- [Kraus 2004] KRAUS, K.: *Photogrammetrie – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. Band 1. 7. Auflage. Berlin, New York : De Gruyter, 2004.
- [Kuhlmann 2002] KUHLMANN, H.: *Untersuchung von alternativen Messverfahren zur Brückenüberwachung am Beispiel der Klosterwegbrücke*. Deutsche Geodätische Kommission, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe B, Heft 311, 2002.
- [Kühn u. a. 2011] KÜHN, E. ; REINHARDT, J. ; BERGEMANN, S. ; SIECK, J.: RFID Based Applications in Culture, Media and Creative Industries. In: *Proceedings of the 3rd International Workshop on Near Field Communication*, 2011, S. 11–14.
- [Lang 2012] LANG, H.: *Genauigkeiten bei reflektorlosen Messungen elektronischer Tachymeter*. In: Netzpublikationen zur Grabungstechnik [online]. Verfügbar unter: http://www.landesarchaeologen.de/fileadmin/Dokumente/Dokumente_Kommissionen/Dokumente_Grabungstechniker/Netzpublikationen/Lang_reflektorlose_Messungen.pdf. Zugriff: 02. Mai 2015. Nr. 3, 2012.
- [Langfeld 2012] LANGFELD, N.: *Entwicklung eines automatisierten Messprogramms durch automatische Erkennung codierter Zielmarken mit einer Robotik-Totalstation und eingebauter Videokamera*, Beuth Hochschule Berlin, Diplomarbeit, 2012.
- [Lau u. a. 2009] LAU, S.-Y. ; LIN, T.-H. ; HUANG, T.-Y. ; NG, I.-H. ; HUANG, P.: A measurement study of zigbee-based indoor localization systems under RF interference. In: *Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Experimental Evaluation and Characterization*, 2009, S. 35–42.
- [Lauck und Richter 2005] LAUCK, L. ; RICHTER, E.: Verwiegen von Schienenfahrzeugen. In: *ZEV rail Glasers Annalen* 129 (2005), Nr. 9, S. 382–391.
- [Lehmann 2010] LEHMANN, R.: Normierte Verbesserungen – wie groß ist zu groß? In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* (2010), Nr. 2, S. 53–61.
- [Leica 1999] LEICA GEOSYSTEMS AG: *Anwendung des Videogrammetriesystems Leica V-STARS/E im Waggonbau*. Leica Praxisreport. Heerbrugg : Leica Geosystems AG, 1999.
- [Leica 2009a] LEICA GEOSYSTEMS AG: *Leica TDRA6000*. Gebrauchsanweisung, Version 1.0. Heerbrugg : Leica Geosystems AG, 2009.
- [Leica 2009b] LEICA GEOSYSTEMS AG: *Leica TS30*. White Paper. Heerbrugg : Leica Geosystems AG, 2009.
- [Leica 2013a] LEICA GEOSYSTEMS AG: *Leica Nova MS50*. Datenblatt. Heerbrugg : Leica Geosystems AG, 2013.

- [Leica 2013b] LEICA GEOSYSTEMS: *Leica TDRA6000*. Produktbroschüre, Version 02/2013. Heerbrugg : Leica Geosystems AG, 2013.
- [Lichtenegger 1995] LICHTENEGGER, H.: Eine direkte Lösung des räumlichen Bogenschnitts. In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 83 (1995), S. 224–226.
- [Lienhart u. a. 2009] LIENHART, W. ; ZOGG, H.-M. ; NINDLE, D.: Innovative Lösungen zur Erreichung höchster Genauigkeit und Geschwindigkeit am Beispiel der TS30 Totalstation von Leica Geosystems. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 116 (2009), Nr. 11–12, S. 374–381.
- [Lim u. a. 2010] LIM, H. ; KUNG, L.-C. ; HOU, J. C. ; LUO, H.: Zero-Configuration Indoor Localization over IEEE 802.11 Wireless Infrastructure. In: *Wireless Networks* 16 (2010), Nr. 2, S. 405–420.
- [Lindner 1991] LINDNER, H.: *Physik für Ingenieure*. 12. Auflage. Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg Verlag, 1991.
- [Liu u. a. 2007] LIU, H. ; DARABI, H. ; BANERJEE, P. ; LIU, J.: Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 37 (2007), Nr. 6, S. 1067–1080.
- [Löffler 2002] LÖFFLER, F. u. a. ; MÖSER, M. (Hrsg.) ; MÜLLER, G. (Hrsg.) ; SCHLEMMER, H. (Hrsg.) ; WERNER, H. (Hrsg.): *Handbuch Ingenieurgeodäsie: Maschinen- und Anlagenbau*. Heidelberg : Wichmann Verlag, 2002.
- [Loser 2001] LOSER, R.: *Weiterentwicklung eines absoluten, hochpräzisen und trackingfähigen Distanzmessers für industrielle Anwendungen*, ETH Zürich, Dissertation, 2001.
- [Luhmann 1986] LUHMANN, T.: Automatic point determination in a réseau scanning system. In: *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Commission Congress 5 Symposium*, 1986, S. 400–408.
- [Luhmann 2000] LUHMANN, T.: *Photogrammetrische Verfahren in der industriellen Messtechnik*. In: *Publikationen der Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Band 9, 2000.
- [Luhmann 2010] LUHMANN, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg : Wichmann Verlag, 2010.
- [Lyberopoulos u. a. 2015] LYBEROPOULOS, D. ; LIU, J. ; YANG, X. ; CHOUDHURY, R. R. ; HANDZISKI, V. ; SEN, S.: A realistic evaluation and comparison of indoor location technologies: Experiences and lessons learned. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 2015, S. 178–189.
- [Maas und Kersten 1994] MAAS, H.-G. ; KERSTEN, T.: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie bei der Endmontage im Schiffsbau. In: *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 62 (1994), Nr. 3, S. 96–102.
- [Mansilla 2006] MANSILLA, C. A. C.: *Hochauflösende Hochfrequenzsensoren für geophysikalische und glaziologische Anwendungen*. Göttingen : Cuvillier Verlag, 2006.
- [Mäusl und Göbel 2002] MÄUSL, R. ; GÖBEL, J.: *Analoge und digitale Modulationsverfahren: Basisband und Trägermodulation*. Hüthig Verlag, 2002.
- [Mautz 2009] MAUTZ, R.: Overview of current indoor positioning systems. In: *Geodesy and Cartography* 35 (2009), Nr. 1, S. 18–22.
- [Mautz 2012] MAUTZ, R.: *Indoor positioning technologies*, ETH Zürich, Habilitationsschrift, 2012.
- [Menges 1992] MENGES, R.: *Synthese und Simulation dreidimensionaler Hand-Arm-Bewegungen an manuellen Montagearbeitsplätzen*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1992.
- [Menz 2005] MENZ, M.: *RFID-basierte Positionsbestimmung*, HU Berlin, Studienarbeit, 2005.
- [Meschede 2005] MESCHEDÉ, D.: *Optik, Licht und Laser*. 2. Auflage. Wiesbaden : Springer Verlag, 2005.
- [Metirionic 2014] METIRIONIC GMBH: *mRApp User's Guide*. Bedienungsanleitung. Dresden : Metirionic GmbH, 2014.
- [Möser 2007] MÖSER, M.: 20 Jahre Industrievermessung. In: *Beiträge zum 3. Dresdener Ingenieurgeodäsietag, Berufliche Weiterbildung Industriemesstechnik*, 2007, S. 7–19.
- [Möser 2012] MÖSER, M. u. a. ; MÖSER, M. (Hrsg.) ; MÜLLER, G. (Hrsg.) ; SCHLEMMER, H. (Hrsg.): *Handbuch Ingenieurgeodäsie: Grundlagen*. 4. Auflage. Heidelberg : Wichmann Verlag, 2012.
- [Müller und Denecke 2013] MÜLLER, C. ; DENECKE, .: *Stochastik in den Ingenieurwissenschaften: Eine Einführung mit R*. Berlin, Heidelberg : Verlag Springer Vieweg, 2013.

- [Müller und Schwendemann 2009] MÜLLER, T. ; SCHWENDEMANN, J.: iGPS – ein vielseitiges Messsystem hoher Genauigkeit. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* (2009), Nr. 4, S. 146–157.
- [Narayan 2007] NARAYAN, C.P.: *Antennas and Propagation*. Pune : Technical Publications Pune, 2007.
- [Neitzel u. a. 2010] NEITZEL, F. ; MORDWINZEW, W. ; LERCHE, C.: Untersuchung von Registrierungsverfahren hinsichtlich des Einsatzes terrestrischer Laserscanner in der Deformationsmessung. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 117 (2010), Nr. 6, S. 213–219.
- [Ni u. a. 2004] NI, L. M. ; LIU, Y. ; LAU, Y. C. ; PATIL, A. P.: LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID. In: *Wireless Networks* 10 (2004), Nr. 6, S. 701–710.
- [Niederöst und Maas 1996] NIEDERÖEST, M. ; MAAS, H.-G.: Entwurf und Erkennung von codierten Zielmarken. In: *Tagungsband der 16. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 1996, S. 18–20.
- [Niemeier 2008] NIEMEIER, W.: *Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden*. 2. Auflage. Berlin, New York : De Gruyter, 2008.
- [Norrdine 2008] NORRDINE, A.: *Präzise Positionierung und Orientierung innerhalb von Gebäuden*, TU Darmstadt, Dissertation, 2008.
- [Pahlavan u. a. 2002] PAHLAVAN, K. ; LI, X. ; MAKELA, J.-P.: Indoor geolocation science and technology. In: *IEEE Communications Magazine* 40 (2002), Nr. 2, S. 112–118.
- [Pappu u. a. 2004] PAPPU, M. ; SINGHAL, R. ; ZOGHI, B.: RFID in hospitals: Issues and Solutions. In: *Report of the Consortium for the Accelerated Deployment of RFID in Distribution* (2004), S. 1–12.
- [PEP 2005] PEP (PROFESSIONAL ENGINEERING PUBLISHERS): *Railway Rolling Stock*. Wiley, 2005.
- [Pfeifer und Schmitt 2010] PFEIFER, T. ; SCHMITT, R.: *Fertigungsmesstechnik*. 3. Auflage. München : Oldenbourg Verlag, 2010.
- [Raguse und Wiggenhagen 2003] RAGUSE, K. ; WIGGENHAGEN, M.: *Qualitative Beurteilung photogrammetrischer Aufnahmekonstellationen im Nahbereich*. In: LUHMANN, T. (Hrsg.): *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003*. Heidelberg : Wichmann Verlag, 2003.
- [Read 2004] READ, R.: *Nachrichten- und Informationstechnik*. Verlag Pearson Studium, 2004.
- [Richter und Juretzko 2007] RICHTER, E. ; JURETZKO, M.: Das Messverhalten des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Leica TPS1200-Serie an Kanten. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 114 (2007), Nr. 6, S. 212–223.
- [Roth 2002] ROTH, J.: *Mobile Computing: Grundlagen, Technik, Konzepte*. Heidelberg : Dpunkt Verlag, 2002.
- [Rousseeuw und Leroy 2003] ROUSSEEUW, P. J. ; LEROY, A. M.: *Robust Regression and Outlier Detection*. Hoboken, New Jersey : Wiley Verlag, 2003.
- [Runne 1993] RUNNE, H.: *Geodätische Datengewinnung für Gebäudeinformationssysteme unter Anwendung reflektorloser tachymetrischer Verfahren*, TU Braunschweig, Dissertation, 1993.
- [Russo und Knockeart 1972] RUSSO, F. A. ; KNOCKEART, R. P.: Automated Data Acquisition with an Optical Code Reader. In: *Bendix Technical Journal* 5 (1972), S. 48–52.
- [Rybak 2007] RYBAK, T.: Analysis of sputnik data from 23c3. In: *Tagungsband zum 24. Chaos Communication Congress* (2007), S. 19–51.
- [Schäfer 2014] SCHÄFER, T.: Eine Simulationsumgebung zur Analyse berührungsloser Distanzmessungen unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen Laserstrahl und Objekt. In: WIESER, A. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 14: Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich*, Wichmann Verlag, 2014, S. 27–36.
- [Schlemmer 1996] SCHLEMMER, H.: *Grundlagen der Sensorik: Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure*. Heidelberg : Wichmann Verlag, 1996.
- [Schlemmer 2010] SCHLEMMER, H.: *Indoor-Positionierung – Präzise und weniger präzise Verfahren und ihre Anwendungen*. Vortrag beim Workshop Sensitive und reaktionsfähige Gebäude, Leibniz Universität Hannover, 2010.
- [Schlemmer und Welsch 1989] SCHLEMMER, H. ; WELSCH, W.: Berührungslose geodätische Meßsysteme für die Industrievermessung – ein Überblick. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 96 (1989), Nr. 11–12, S. 397–411.
- [Schmitt und Pfeifer 2015] SCHMITT, R. ; PFEIFER, T.: *Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken*. 5. Auflage. München, Wien : Hanser Verlag, 2015.

- [Schneider 1991a] SCHNEIDER, C.-T.: 3-D Vermessung von Oberflächen und Bauteilen durch Photogrammetrie und Bildverarbeitung. In: *Proceeding of the IDENT/ VISION*, 1991, S. 90–93.
- [Schneider 1991b] SCHNEIDER, C.-T.: *Objektgestützte Mehrbildzuordnung*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 375, Dissertation, 1991.
- [Schneider und Sinnreich 1993] SCHNEIDER, C.-T. ; SINNREICH, K.: Optical 3-D measurement systems for quality control in industry. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 29 (1993), S. 56–59.
- [Schneider 2006] SCHNEIDER, D.: Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams. In: *Proceedings of the 3rd IAG Symposium of Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurements*, 2006, S. 1–10. – digitale Veröffentlichung.
- [Schneider u. a. 2006] SCHNEIDER, M. ; WEHDEN, D. ; SALOMON, R.: Akustische Ortung mobiler Objekte in großen Räumen. In: *Tagungsband zur 32. Deutschen Jahrestagung für Akustik*, 2006, S. 405–406.
- [Schulz und Ingensand 2004] SCHULZ, T. ; INGENSAND, H.: Terrestrial Laser Scanning – Investigations and Applications for High Precision Scanning. In: *Proceedings of the FIG Working Week – The Olympic Spirit in Surveying*, 2004, S. 1–15. – digitale Veröffentlichung.
- [Schuricht u. a. 2007] SCHURICHT, P. ; CASSEBAUM, O. ; BÄKER, B.: *Sensorielle Umfelderkennung und Sensordatenfusion: Schlüsseltechnologie für das intelligente Auto der Zukunft*. S. 181–195. In: BÄKER, B. (Hrsg.): *Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug II*. Renningen : Expert Verlag, 2007.
- [Schütt u. a. 2004] SCHÜTT, C. ; ASCHOFF, T. ; WINTERHALDER, D. ; THIES, M. ; KRETSCHMER, U. ; SPIECKER, H.: Approaches for recognition of wood quality of standing trees based on terrestrial laserscanner data. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 36 (2004), S. 179–182.
- [Schwarz 2013] SCHWARZ, W.: *Skript Geodäsie für die Studiengänge Bauingenieurwesen, Infrastruktur & Umwelt sowie Lehramt Bautechnik. Sommersemester 2013, Kap. 7: Dreidimensionale Punktaufnahme, S. 13*. 2013. – unveröffentlicht.
- [Sieck 2012] SIECK, J.: Location Based Services and Museum Information Systems. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, 2012, S. 663–666.
- [Singer u. a. 1993] SINGER, P. ; STRÖBEL, D. ; HÖRDT, R. ; BAHNDORF, J. ; LINKWITZ, K.: Direkte Lösung des räumlichen Rückwärtsschnitts. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* (1993), Nr. 1, S. 20–24.
- [Song u. a. 2009] SONG, Z. ; CHEN, Y. Q. ; SASTRY, C. R. ; TAS, N. C.: *Optimal Observation for Cyber-physical systems: a Fisher-information-matrix-based Approach*. London : Springer Verlag, 2009.
- [Stelzer u. a. 2004] STELZER, A. ; POURVOYEUR, K. ; FISCHER, A.: Concept and application of LPM – a novel 3-D local position measurement system. In: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 52 (2004), Nr. 12, S. 2664–2669.
- [Stempfhuber 2004] STEMPFHUBER, W.: *Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen*, TU München, Dissertation, 2004.
- [Stöcker 2004] STÖCKER, H.: *Taschenbuch der Physik*. 5. Auflage. Frankfurt am Main : Verlag Harri Deutsch, 2004.
- [Striegl u. a. 2010] STRIEGL, P. ; HEISTER, H. ; KANDAWASVIKA, A. ; REINHARDT, W. ; RENTER, J.: Multisensorsystem geoASYS zur 3D-Kanaldokumentation. In: WUNDERLICH, T. A. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 10: Beiträge zum 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München*. Wichmann Verlag, 2010, S. 145–156.
- [Thiesse u. a. 2006] THIESSE, F. ; FLEISCH, E. ; DIERKES, M.: LotTrack: RFID-based process control in the semiconductor industry. In: *IEEE Pervasive Computing* 5 (2006), Nr. 1, S. 47–53.
- [Thürmel 1996] THÜRMELE, P.: *Frequenzmoduliertes Dauerstrich-Laser-Radar für die industrielle Messtechnik*. München : Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 1996.
- [Topcon 2012] TOPCON EUROPE POSITIONING B.V.: *SX Series*. Produktbroschüre. Tokyo : Topcon Europe Positioning B.V., 2012.
- [Torres-Solis u. a. 2010] TORRES-SOLIS, J. ; FALK, T. H. ; CHAU, T.: *A review of indoor localization technologies: towards navigational assistance for topographical disorientation*. S. 51–84. In: MOLINA, F. J. V. (Hrsg.): *Ambient Intelligence*, InTech, 2010.
- [Tost 2009] TOST, F.: *Signalstärkebasierte Ortung – Ein Beitrag zur probabilistischen, symbolischen, zellgenauen Ortung mobiler Netzwerkknoten*

- innerhalb von Gebäuden*, BTU Cottbus, Dissertation, 2009.
- [**Trenkler 1981**] TRENKLER, G.: *Anordnung zur automatischen Sortierung von Stückgütern, insbesondere quaderähnlicher Form*. Anmeldung; 15. März 1980. DE, Patentschrift DE3010112 A1. 24. September 1981.
- [**Trimble 2013a**] TRIMBLE GERMANY GMBH: *Trimble S3 Totalstation*. Datenblatt. Raunheim : Trimble Germany GmbH, 2013.
- [**Trimble 2013b**] TRIMBLE GERMANY GMBH: *Trimble S8 Totalstation*. Datenblatt. Raunheim : Trimble Germany GmbH, 2013.
- [**Ullrich 2015**] ULLRICH, R.: Qualitätssicherung von Schienenfahrzeugen. In: *Magazin des Verbandes deutscher Vermessungsingenieure* 66 (2015), Nr. 5, S. 390–401.
- [**Ullrich u. a. 2013**] ULLRICH, R. ; FUHRLAND, M. ; RIESE, M. ; MÖSER, M.: Hochfrequentes Neigungsmonitoring mit Distanzsensoren. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2 (2013), Nr. 120, S. 64–70.
- [**Ullrich und Ihra 2014**] ULLRICH, R. ; IHRA, R.: Qualitätskontrolle an Schienenfahrzeugen – fehlerfrei Akquise und lückenlose Dokumentation wagenspezifischer Messdaten nach DIN 25043. In: *Tagungsband zur 13. internationalen Schienenfahrzeugtagung*. Dresden : DVV Media Group GmbH, 2014, S. 164–166.
- [**Ullrich und Möser 2016**] ULLRICH, R. ; MÖSER, M.: Tachymetrische Identifizierung von Zielmarken durch Signalintensitätsmessungen. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 10 (2016), Nr. 123, S. 276–283.
- [**Van Den Heuvel u. a. 1993**] VAN DEN HEUVEL, F. A. ; KROON, R. J. G. A. ; LE POOLE, R. S.: Digital close-range Photogrammetry using artificial Targets. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 29 (1993), S. 222–229.
- [**VGB 2008**] VGB POWERTECH E.V.: *3D-Geometriebestimmung in Industrieanlagen – As-built Anlagendokumentation*. Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften, 2008.
- [**Voges 2004**] VOGES, E.: *Hochfrequenztechnik : Bauelemente, Schaltungen, Anwendungen*. 3. Auflage. Hüthig Verlag, 2004.
- [**Vossiek und Gulden 2008**] VOSSIEK, M. ; GULDEN, P.: The switched injection-locked oscillator: A novel versatile concept for wireless transponder and localization systems. In: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 56 (2008), Nr. 4, S. 859–866.
- [**VW 2015**] VOLKSWAGEN AG: Supervisor sorgt für Tempo – Witte beschleunigt den neuen Serienmessraum bei VW in Emden. In: *Industrie Anzeiger* 137 (2015), Nr. 10, S. 69–70.
- [**Wagner u. a. 2014**] WAGNER, A. ; WASMEIER, P. ; WUNDERLICH, T. ; INGENSAND, H.: Vom selbstzielenden Theodolit zur Image Assisted Total Station. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 121 (2014), Nr. 5, S. 171–180.
- [**Walser 2004**] WALSER, B. H.: *Development and Calibration of an Image Assisted Total Station*, ETH Zürich, Dissertation, 2004.
- [**Wehrli 2011**] WEHRLI, S.: *Integrated Active Pulsed Reflector for an Indoor Local Positioning System*, ETH Zürich, Dissertation, 2011.
- [**Werner 1987**] WERNER, H.: Ist auch der Maschinenbau ein Arbeitsfeld des Vermessungsingenieurs? In: *Vermessungstechnik* 35 (1987), S. 8–9.
- [**Wickström 2013**] WICKSTRÖM, F.: *A proof of concept for people tracking application using smart-spaces, onling services and computer vision*, Åbo Akademi University, Masterarbeit, 2013.
- [**Wolf 1997**] WOLF, H.: *Ausgleichsrechnung 1: Formeln zur praktischen Anwendung*. 3. Auflage. Bonn : Dümmler Verlag, 1997.
- [**Wong u. a. 1988**] WONG, K. W. ; LEW, M. ; WILEY, A. G.: 3D metric vision for engineering construction. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 27 (1988), S. 647–656.
- [**Yamashita u. a. 2008**] YAMASHITA, T. ; TAKAOKA, D. ; IZUMI, N. ; SASHIMA, A. ; KURUMATANI, K. ; HASIDA, K.: Proposal of Mobile Content Delivery Based on Location Estimation with Active RFID. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology*, 2008, S. 150–155.
- [**Yang und Friedsam 1999**] YANG, B ; FRIEDSAM, H: Ray-tracing studies for a whole-viewing-angle retroreflector. In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Accelerator Alignment*, 1999, S. 1–12. – digitale Veröffentlichung.
- [**Yoshida und Asakura 1976**] YOSHIDA, A. ; ASAKURA, T.: A simple technique for quickly measuring the spot size of Gaussian laser beams. In: *Optics and Laser Technology* 8 (1976), Nr. 6, S. 273–274.

- [Zeiss 2012] CARL ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK GMBH: *Industrielle Messtechnik – Portalmessgeräte*. Produktbroschüre. Oberkochen : Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, 2012.
- [Zhang u. a. 2010] ZHANG, D. ; XIA, F. ; YANG, Z. ; YAO, L. ; ZHAO, W.: Localization technologies for indoor human tracking. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Future Information Technology*, 2010, S. 1–6.
- [Zheng 2005] ZHENG, J.: *Optical Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) Interferometry*. New York : Springer Verlag, 2005.
- [Zhou u. a. 2007] ZHOU, S. ; LING, W. ; PENG, Z.: An RFID-based remote monitoring system for enterprise internal production management. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33 (2007), Nr. 7–8, S. 837–844.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der A.S.T. GmbH, Mess- und Regeltechnik, in Dresden. Für die Möglichkeit zur Promotion ist an dieser Stelle zu danken.

Einen besonderen Dank möchte ich an Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Möser richten. In erster Linie gilt der Dank dem entgegengebrachten Vertrauen, als externer Doktorand am Geodätischen Institut promovieren zu können. Die Anregungen zum Inhalt der Arbeit, fachliche Unterstützungen und praktische Hinweise haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach und Prof. Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger für die Übernahme der Gutachten bedanken.

Herrn Gunnar Lelle-Neumann und Ludwig Schröder vom Geodätischen Institut bzw. Institut für Planetare Geodäsie der Technischen Universität Dresden danke ich für die fachlichen Anregungen und dem Gedankenaustausch während der Entstehung dieser Dissertation. In diesem Zusammenhang möchte ich zudem Prof. Dr.-Ing. Stefan Knoblach von der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt meinen Dank aussprechen.

Darüber hinaus gilt ein Dank der Firma Hexagon, vor allem Herrn Jörg Illema, für die technischen Details des untersuchten Messgerätes und die gute Zusammenarbeit.

Im besonderen Maße zu Dank verpflichtet bin ich jedoch Dir liebe Anne^{+ $\frac{34}{40}$} für die aufgebrachte Geduld, das Verschmerzen vieler Freizeit- und Urlaubseinbußen, die Schaffung von Freiräumen zur Erstellung der Arbeit, das stetige Motivieren und vor allem für das Nachsehen beim Aufziehen so mancher Gewitterwolke.