

**Entwicklung eines optischen
Multi-Lasertracker-Systems zur berührungslosen
Positionsbestimmung in kinematischen Systemen**

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

vorgelegt
**an der Fakultät für Informatik und Automatisierung
der Technischen Universität Ilmenau**

von
Dipl.-Ing. Trần Trung Nguyễn
geboren am 23. Oktober 1982 in Hà Nội

Gutachter:

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament, Technische Universität Ilmenau

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte, Friedrich-Alexander Universität
Erlangen-Nürnberg

Herr Dr.-Ing. Christian Wachten, PI miCos GmbH

Tag der Einreichung: 31. März 2014

Tag der Verteidigung: 17. Juli 2014

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014000183

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Rahmen des BMBF-Forschungsprojekts „OPTIMI“ am Fachgebiet Systemanalyse des Instituts für Automatisierungs- und Systemtechnik der TU Ilmenau. Dem Leiter des Fachgebietes, meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament, gilt mein ganz besonderer Dank. Er hat diese Arbeit von Anfang an intensiv unterstützt, fachlich begleitet und mir stetig Freiraum gewährt.

Ebenso möchte ich mich bei meinen Kollegen in der mechatronischen Gruppe den Herrn Dr.-Ing. Arvid Amthor, Herrn Dipl.-Ing. Stephan Zschäck, Herrn Dipl.-Ing. Steffen Büchner, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Meister und Herrn M.Sc. Heiko Weiss für die sachlichen gewinnbringenden Diskussionen, die Anregungen und die aktive Unterstützung bei dieser Arbeit bedanken.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Korrekturlesern Herrn Dipl.-Ing. Andreas Meister, Herrn Dr.-Ing. Mike Eichhorn und Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Büchner für die tatkräftige Unterstützung bedanken.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachgebiets Systemanalyse sei für die hilfreiche Bereitschaft sowie für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre herzlich gedankt. Besonders erwähnen möchte ich Frau Mandy Assinner-Hoffmann, Herrn Dr.-Ing. Mike Eichhorn, Herrn Dr.-Ing. Fred Roß und Herrn M.Sc. Matthias Springer für die unermüdliche Unterstützung während der Fertigstellung dieser Arbeit am Fachgebiet.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Freundin Mai Linh und meinen Eltern für ihr unerschöpfliches Verständnis und die unzähligen notwendigen Gespräche, die mich immer wieder ermuntert und motiviert haben, danken. Ohne diesen Rückhalt wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

„THEORIA
CUM
PRACTICA“

Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646–1716

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit stellt ein neues Konzept eines global übergeordneten Multi-Lasertracker-Systems zur berührungslosen 3-D-Positionsmessung mehrerer Kinematiken für Anwendungen in Automatisierungsprozessen vor. Dabei ist das Ziel, ein Messsystem zu entwickeln, welches als 3-D-Positionssensor in einem geschlossenen Regelkreis eingesetzt werden kann. Das Gesamtsystem ist modular aufgebaut und besteht aus vier Trackermodulen mit den zugehörigen Versorgungs- und Auswerteeinheiten. Jedes Trackermodul besteht aus einem hochauflösenden Interferometer sowie einem hochdynamischen Strahlablesensystem. Ein solches Trackermodul ist in der Lage, ein Messobjekt im Raum zu verfolgen und dessen 3-D-Koordinaten aus den Winkel- sowie Längenmessungen zu berechnen. Für einen experimentellen Aufbau wurden in dieser Arbeit alle notwendigen Algorithmen entworfen. Hierzu zählen die automatisierte Lokalisierung des Messobjektes, die Kommunikation zwischen den Trackermodulen, die modellbasierte Regelung der Strahlnachführung für ein Trackermodul sowie die Berechnung der 3-D-Koordinaten des Messobjektes sowohl mit dem Messverfahren der Triangulation als auch der Multilateration.

Neben dem Entwurf der benötigten Algorithmen lag der Fokus der Arbeit auf der Entwicklung von Kalibrieralgorithmen. Die Berechnung der 3-D-Koordinaten eines Messobjektes mit Hilfe der Multilateration erfordert eine genauere Kenntnis der drei Initiaillängen, der 48 System- sowie der 18 Transformationsparameter des Multi-Lasertracker-Systems. Da nicht jeder Parameter direkt durch experimentelle Analysen ermittelt werden kann, wird der unbekannte Parametersatz durch ein zweistufiges Kalibrierverfahren identifiziert. Hierbei werden zunächst die Systemparameter jedes einzelnen Trackermoduls mithilfe eines 3-D-Messgerätes vorkalibriert und anschließend zusammen mit den Initiaillängen sowie den Transformationsparametern in einem weiteren Kalibriervorgang identifiziert. Die experimentellen Vergleichsmessungen zeigten, dass die Messabweichungen des Multi-Lasertracker-Systems trotz der hohen Anzahl der Parameter im einstelligen μm -Bereich liegen.

Abstract

This thesis presents a new concept of a contactless multi-sensor system, which is able to measure the three-dimensional (3-D) position of several kinematical systems. This new sensor system can be used as a non-contact position feedback sensor in automation processes. The goal of this work is the development of a high precision multi-lasertracker-system that allows both static and dynamic measurements. The multi-sensor system has a modular design and is build up out of four subsystems including integrated supply electronics and opto-electronic detection units. Every subsystem includes a high-resolution Michelson interferometer as well as a high-dynamic beam deflection unit. Each subsystem is able to track the moving target and compute the 3-D-coordinates of the target using the angle and length measurements. For this purpose the needed algorithms for the whole multi-sensor system were developed in this work. In particular these are the automated localization of the measurement object, the communication channel between the four subsystems, the model-based tracking control and the calculation of the 3-D-coordinates based on the method of triangulation as well as multilateration.

Beside the already mentioned algorithms the second focus of this work is the development of the needed calibration algorithms. In order to calculate the 3-D-coordinates very precisely the objective is the determination of the three offset length parameters, the 48 system parameters of the four subsystems as well as the 18 coordinate transformation parameters of the multi-lasertracker-system. Due to the fact that every unknown parameter cannot identify via a direct measurement a complex calibration procedure is indispensable in order to estimate all parameters. The proposed calibration strategy is divided in two steps. The system parameters of every subsystem are determined via a reference measurement device in a pre-calibration process and then they are used as initial values for the estimation of the residual 69 unknown parameters. Despite the high number of parameters the experimental results show a measurement error of the multi-lasertracker-system below 10 μm .

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xi
Formelzeichen	xiii
1 Einführung	1
1.1 Optische Messsysteme	4
1.2 Übersicht	6
2 Lasertracker-Systeme – Überblick und Klassifizierung	8
2.1 3-D-Koordinaten auf Basis von kombinierter Winkel- und Längenmessung	8
2.1.1 Längenmessinstrument	8
2.1.2 Winkelmessinstrument	13
2.1.3 Kommerzielle Lasertracker-Systeme	18
2.1.4 Einfluss von Winkelmessfehlern	20
2.2 3-D-Koordinaten durch reine Längenmessungen	21
2.2.1 LaserTRACER	22
3 Systemspezifikation	24
4 Experimenteller Aufbau	27
4.1 Aufbau und Wirkungsweise des Trackermoduls	27
4.1.1 Wirkungsweise des Trackermoduls	30
4.2 Modulare Versorgungs- und Auswerteeinheiten	32
4.2.1 Lasereinheit	32
4.2.2 Auswerteeinheit des Trackermoduls	33
4.2.3 Treiberelektronik des Strahlablesensystems	35
4.2.4 Umweltsensoren	36
4.2.5 Echtzeit-Signalverarbeitung	36
4.3 Multi-Lasertracker-System	37

5	Lokalisierung des Messreflektors	40
5.1	Zufallssuche	41
5.2	Rechtecksuche	42
5.3	Spiralsuche	43
5.4	Bewertung der drei Suchalgorithmen	44
5.5	Erweiterung des Spiralsuchalgorithmus	46
5.6	Kommunikation zwischen den Trackermodulen	48
6	Regelung der Strahlnachführung	50
6.1	Analyse der Regelstrecke	51
6.1.1	Identifikation des Galvanometer-Scanners	51
6.1.2	Modellierung des Strahlverlaufs zwischen Scannerspiegel und Messreflektor	55
6.1.3	Störmodell	56
6.1.4	Kennlinie der 4QD	57
6.1.5	Gesamtmodell der Regelstrecke	59
6.2	Reglersynthese	59
6.2.1	Digitaler PID-Regler	61
6.2.2	Analyse der Verfahrensgeschwindigkeit des Messobjekts	62
6.2.3	Erhöhung der Abtastfrequenz	63
6.2.4	Störgrößenaufschaltung	66
7	3-D-Messverfahren	71
7.1	TCP-Positionsbestimmung durch Längen- und Winkelmessungen . . .	72
7.1.1	Koordinatensystem des Trackermoduls	73
7.1.2	Strahlverlauf durch das Strahlablesystem	74
7.1.3	Interferometrische Messung im Strahlablesystem und Kor- rektur	77
7.2	TCP-Positionsbestimmung durch Triangulation mit zwei Tracker- modulen	79
7.3	Multilateration	82
7.4	Anwendung der vorgestellten 3-D-Messverfahren auf das MLTS . . .	86
7.5	Beziehung zwischen Trackermodul- und MLTS-Koordinatensystem . .	89
7.6	Analyse des Messbereichs	91
7.6.1	Messbereich des Trackermoduls	91
7.6.2	Messbereich des MLTS	92
8	Kalibrierung	95

8.1	Stand der Forschung	95
8.1.1	Systemparameter	95
8.1.2	Standortparameter	101
8.1.3	Zusammenfassung der vorgestellten Kalibrierverfahren	103
8.1.4	Weiterentwicklung der Kalibrieralgorithmen	104
8.2	Identifikation der Systemparameter	106
8.2.1	Auftreffpunkte von Spiegel 2	107
8.2.2	Normalvektor von Spiegel 2	110
8.2.3	Drehachse und Normalabstand von Spiegel 2	111
8.2.4	Auftreffpunkte von Spiegel 1	112
8.2.5	Parameter von Spiegel 1	113
8.2.6	Ursprung und Richtung des Laserstrahls	113
8.2.7	Abstand der Drehachsen	114
8.2.8	Koordinatentransformation	114
8.2.9	Parameter und Konstanten	115
8.3	Simulative Untersuchung der Spannungs-Winkelkennlinie	118
8.3.1	Modellierung der Winkelkennlinie durch Polynomfunktion	120
8.3.2	Modellierung der Winkelkennlinie durch segmentweise konstante Gradienten	120
8.3.3	Simulation und Bewertung der vorgestellten Winkelmodelle	122
8.4	Simulative Untersuchung der Längenkorrektur	126
8.4.1	Längenkorrektur in Abhängigkeit des Winkelmodells	127
8.4.2	Längenkorrektur in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte	129
8.5	Erweiterung des Punkt-Distanzverfahrens	130
8.6	Simulative Untersuchung des Selbst-Kalibrierverfahrens	132
8.6.1	Selbst-Kalibrierung unter idealen Bedingungen	133
8.6.2	Selbst-Kalibrierung unter Berücksichtigung der Initillängen und der Transformationsparameter	137
8.6.3	Kalibrierung des MLTS mit 69 Parametern	140
9	Kalibrier- und Messergebnisse, Leistungsfähigkeit der Algorithmen	145
9.1	Positionsmessung der Linearachsen des 3-D-Messgerätes	145
9.2	Kalibrierung des Trackermoduls	147
9.3	Kalibrierung des MLTS mit dem Messverfahren der Multilateration	150
9.3.1	Einfluss der Längenkorrektur auf die Berechnung der Koordinaten	151
9.3.2	Auswahl der Standortposition und Kalibrierung	152
9.4	Kalibrierung des MLTS mit dem Messverfahren der Triangulation	156
9.5	Experimentelle Validierung der Parameter	159

9.6	Leistungsfähigkeit der Algorithmen	163
9.6.1	Test der Lokalisierung und Kommunikation	164
9.6.2	Test der Dynamik	164
9.6.3	Test der Dynamik und der Präzision	166
10	Zusammenfassung und Ausblick	169
	Literaturverzeichnis	176

Abkürzungsverzeichnis

3-D	Dreidimensional
4QD	Vierquadranten Photodiode
6-D	Sechsdimensional
A/D	Analog/Digital
ADM	Absolutdistanzmessgerät
API	Automated Precision Inc.
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
D/A	Digital/Analog
FVK	Faserverbundwerkstoffe
He-Ne	Helium-Neon
HPS	High Precision Stage
I/O	Input/Output
iGPS	Indoor Global-Positioning-System
ISA	Industry Standard Architecture
KMG	Koordinatenmessgerät
LWL	Lichtwellenleiter
MLTS	Multi-Lasertracker-System
NPL	National Physical Laboratory, England
PC	Personal Computer

PCI	Peripheral Component Interconnect
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association
PE	Polyethylen
PID	Proportional-Integral-Differential
PSD	Positionempfindliche Photodiode
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PXI	Peripheral Component Interconnect (PCI) eXtensions for Instrumentation
RTI	Real-Time-Interface
RTW	Real-Time-Workshop
SGA	Störgrößenaufschaltung
SMC	Microstep-Controller System
TCP	Tool-Center-Point

Formelzeichen

A_S	Skalierungsfaktor bei der Spiralsuche
A_T	Messfläche des Trackermoduls
A_g	Gemeinsame Messfläche des MLTS
$G_{Lx}(s), G_{Ly}(s)$	Strahlengangmodelle in der x-z- bzw. y-z-Ebene
$G_{Mx}(s), G_{My}(s)$	Dynamikmodelle des Scanners
$G_{Rx}(s)$	Übertragungsfunktion des Reglers für x-Regelkreis
$G_{Sx}(s)$	Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises für das x_{4QD} -Signal
$G_{Zx}(s), G_{Zy}(s)$	Störmodelle der 4QD-Signale
K_P	Reglerverstärkung
$\begin{matrix} S_i \\ S_j \end{matrix} \mathbf{O}$	Orientierungsparameter für die Koordinatentransformation von \mathbf{S}_j in \mathbf{S}_i
$P(s)$	Charakteristisches Polynom
$\begin{matrix} S_j \\ T_i \end{matrix} \mathbf{P}_2$	Auftreffpunkt auf Spiegel 2 von T_i in \mathbf{S}_j -System
\mathbf{P}_{TCP}	TCP-Position
\mathbf{P}_0	Ortsvektor der Laserquelle
\mathbf{P}_1	Auftreffpunkt auf Spiegel 1
\mathbf{P}_2	Auftreffpunkt auf Spiegel 2
\mathbf{P}_j	Messpunkt, j
P_{0x}, P_{0y}, P_{0z}	Systemparameter des Trackermoduls
Q_Z	Maximaler Zählerstand der Offsetreihenfolge
Q	Gütwert
\bar{R}_D	Mittelwert des Residuums des Distanzfehlers
R_D	Residuum des Distanzfehlers
$\mathbf{R}_\alpha(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1)$	Drehalphabet um die \mathbf{x}_T -Achse
$\mathbf{R}_\beta(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1)$	Drehalphabet um die \mathbf{y}_T -Achse
$\mathbf{R}_\gamma(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1)$	Drehalphabet um die \mathbf{z}_T -Achse

$\mathbf{R}(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1)$	Transformationsalphabet von \mathbf{S}_2 zu \mathbf{S}_1
\mathbf{R}_R	Rodrigues alphabet, Rotation um einer beliebigen Achse
$\mathbf{R}(\mathbf{S}_j, \mathbf{S}_i)$	Transformationsalphabet von \mathbf{S}_j auf \mathbf{S}_i
\mathbf{S}_G	Globales Koordinatensystem des MLTS
\mathbf{S}_T	Lokales Koordinatensystem vom Trackermodul (allgemein)
\mathbf{S}_i	Koordinatensystem vom Trackermodul i
$\overset{\mathbf{S}_i}{\mathbf{T}_j} \mathbf{S}_j$	In \mathbf{S}_i -System transformiertes \mathbf{S}_j -System
T_D	Zeitkonstante des Differentialanteils
T_I	Zeitkonstante des Integralanteils
T_S	Abtastzeit
T_Z	Vorgegebene Zeitspanne bei der Spiralsuche
T	Teilungstiefe beim erweiterten Spiralsuchalgorithmus
$\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2$	Punkt auf Spiegel 1/2
$U_{Sx}(s), U_{Sy}(s)$	Eingangsgößen von $G_{Mx}(s)$ bzw. $G_{My}(s)$
V_M	Messvolumen des Trackermoduls, Abstand $\ell_z \geq 1$ m
V_T	Messvolumen des Trackermoduls
V_g	Gemeinsames Messvolumen des MLTS
$X_{4QD}(s), Y_{4QD}(s)$	Übertragungsfunktionen der 4QD-Signale
$X_R(s), Y_R(s)$	Übertragungsfunktionen der Störgrößen
\mathbf{a}_i	Auftreffpunkt i auf Spiegel 2
$b_{xj}, b_{yj}, c_{xj}, c_{yj}$	Parameter der Leitgerade j in Koordinatenform
b	Bogenlänge auf einem Teilerkreis
$\mathbf{c}_{T_i T_j}$	Positionsdivergenz zwischen T_i und T_j
d_{Ref}	Referenzdistanz
d_{ij}	Euklidischer Abstand zwischen \mathbf{P}_i und \mathbf{P}_j
d	Abstand der Drehachsen der Galvanometer-Scanner
e_A	Abweichung der Startwerte
e_K	Berechneter Korrekturwert im Strahlengang
e_L	Interferometrische Messabweichung
e_P	Kalibrierfehler bei der Parameterschätzung
e_R	Restabweichung der Längenkorrektur
e	Regelfehler im Zeitbereich

f_S	Abtastfrequenz
f_ψ	Schwebungsfrequenz
f	Frequenz
\mathbf{g}_L	Leitgerade
\mathbf{g}_0	Gerade zwischen Laserquelle und Spiegel 1
\mathbf{g}_1	Gerade zwischen Spiegel 1 und Spiegel 2
\mathbf{g}_2	Gerade zwischen Spiegel 2 und Messreflektor
$\mathbf{S}_i^j \mathbf{g}_2$	Geradengleichung des Trackermoduls T_j in \mathbf{S}_i -System
\mathbf{g}_{Ei}	„Erzeugende“ Gerade i
\mathbf{g}	Gerade im Raum
$i_{0^\circ} \dots i_{270^\circ}$	Ströme der photoelektrischen Auswerteeinheit des Interferometers
k_1, k_2	Abstand zwischen Drehachse und Spiegeloberfläche von Spiegel 1 bzw. Spiegel 2
k_{QDx}, k_{QDy}	Umrechnungsfaktoren der 4QD (Spannung in Versatz)
k_{off}	Offsetfaktor beim erweiterten Spiralsuchalgorithmus
$k_{\varphi x}, k_{\varphi y}$	Umrechnungsfaktoren der Winkelsensoren (Spannung in Winkel)
k_x	Einstellparameter für die Störgrößenaufschaltung
\mathbf{l}_i	Standort vom Trackermodul i im \mathbf{S}_G -System
$\mathbf{S}_i^j \mathbf{l}$	Standortkoordinaten von T_j im Koordinatensystem \mathbf{S}_i
$m_{xj}, m_{yj}, n_{xj}, n_{yj}$	Parameter der „Erzeugenden“ Gerade j in Koordinatenform
$\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$	Normalvektor von Spiegel 1/2
n_B	Anzahl der Bedingungen bei der Kalibrierung
n_I	Anzahl der vom Interferometer gezählten Inkremente
n_M	Anzahl der Messpunkte
n_k	Anzahl der Segmente der Spannung-Winkel-Kennlinie
n	Brechzahl der Luft
\mathbf{p}_T	Systemparameter
$\mathbf{S}_i^j \mathbf{r}_2$	Richtungsvektor von Spiegel 2 von T_i zum Messreflektor in \mathbf{S}_j -System
\mathbf{r}_0	Richtungsvektor vom Ursprung zu Spiegel 1

\mathbf{r}_1	Richtungsvektor vom Spiegel 1 zu Spiegel 2
\mathbf{r}_2	Richtungsvektor vom Spiegel 2 zu Messreflektor
r	Radius
s	Laplace-Operator
t_k	Abtastschritt
t_o	Zeitversatz bei der Spiralsuche
u_{Seg}	Segmentlänge
$u_I \dots u_{IV}$	Spannungen der 4QD
u_S	Stellwert des Galvanometer-Scanners
$u_{\text{Sin}}, u_{\text{Cos}}$	Quadratursignale des Interferometers
$u_{\text{senx}}, u_{\text{seny}}$	Gemessene Sensorwerte der Winkelencoder
\mathbf{u}	Stellgröße im Zeitbereich
$\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$	Richtung der Drehachse von Spiegel 1/2
v_R	Verfahrgeschwindigkeit des Messreflektors
v_S	Geschwindigkeit auf der Suchebene
\mathbf{w}	Führungsgröße im Zeitbereich
$x_{4\text{QD}}, y_{4\text{QD}}$	Horizontale/vertikale Position der 4QD
x_E, y_E	Koordinaten eines Suchpunktes
x_R, y_R	Positionen des Messreflektors auf der 4QD
x_S	Abstand zum Zentrum des Messreflektors
$\mathbf{x}_{S_T}, \mathbf{y}_{S_T}, \mathbf{z}_{S_T}$	Koordinatenachsen des Trackermoduls
x_g, y_g	Seiten der gemeinsamen Messfläche
x_i, y_i, z_i	Standortkoordinaten von Trackermodul i
\mathbf{y}	Regelgröße im Zeitbereich
$\Delta\ell_K$	Interferometrischer Korrekturwert
$\Delta\ell$	Messwert des Interferometers
α_x	Optischer Ablenkwinkel
$\alpha_L, \alpha_{n_1}, \alpha_{n_2}, \alpha_{v_1}, \alpha_{v_2}$	Systemparameter des Trackermoduls
$\mathbf{s}_j^i \alpha, \mathbf{s}_j^i \beta, \mathbf{s}_j^i \gamma$	Drehwinkel von $\mathbf{R}(\mathbf{S}_j, \mathbf{S}_i)$
$\beta_L, \beta_{n_1}, \beta_{n_2}, \beta_{v_1}, \beta_{v_2}$	Systemparameter des Trackermoduls
$\Delta\phi_{\text{ref}}$	Phasenunterschied des Interferometers
$\Delta\phi$	Phasenunterschied des ADM
ℓ_{ref}	Referenzlänge des Interferometers

ℓ_z	Abstand zwischen Koordinatenursprung und Messreflektor entlang der z-Achse
ℓ	Absolutlänge, euklidischer Abstand
$\tau_i \ell_0$	Initiallänge zwischen Spiegel 2 und Messreflektor nach dem Rücksetzen des Interferometers
λ_S	Schwebungswellenlänge
λ	Wellenlänge
λ_0	Wellenlänge im Vakuum
σ_D	Standardabweichung des Distanzfehlers
φ_0	Phasenversatz bei der Spiralsuche
$\varphi_x(s), \varphi_y(s)$	Ausgangsgrößen von $G_{Mx}(s)$ bzw. $G_{My}(s)$
φ_x, φ_y	Drehwinkel des Strahlablenksystems
φ	Winkel

1 Einführung

Sinkende Toleranzmaße in der mechanischen Fertigung von Präzisionsbauteilen erfordern, dass Bauteile in allen Bearbeitungsschritten hochpräzise gespannt und ausgerichtet sind. Dazu müssen Werkzeugmaschinen sowie die Zu- und Abführung von Bauteilen zuvor positioniert werden – ein Aufwand, der sich lohnt, wenn große Stückzahlen mit geringen Bauteilvarianten gefertigt werden. Sinkende Stückzahlen (bis zur Losgröße 1) machen adaptive und selbstoptimierende Fertigungs- und Anlagenkonzepte erforderlich, in denen eine präzise Ausrichtung online ohne separate Rüstzeiten während des laufenden Fertigungsprozesses möglich ist. Deshalb muss eine flexible Verkettung in der Handhabung von Präzisionsbauteilen konzipiert und realisiert werden.

Die zunehmende Bedeutung von Energie- und Ressourceneffizienz führt in der Industrie zum Umdenken von Produktionstechniken und -bauweisen. So werden neben den metallischen Werkstoffen wie Stahl oder Aluminium auch immer öfter hochfeste Faserverbundwerkstoffe (FVK) eingesetzt [30], um Leichtbaukonzepte und folglich die Einsparung von Rohstoffen sowie die Reduzierung der Energiekosten zu ermöglichen. Der Einsatz neuer Werkstoffe zur Serienfertigung von Bauteilen sowie deren steigende Qualitätsanforderungen in immer kürzeren Produktionszeiten erfordern in der Produktionskette flexible Automatisierungskonzepte, die für jeden einzelnen Prozess mit spezieller Sensorik und Aktorik dimensioniert werden müssen.

Als Beispiel für den gegenwärtigen Einsatz neuer Werkstoffe in der Produktion wird der Vorrichtungsbau in der Luftfahrtindustrie [1, 44, 75, 89] betrachtet. Der Flugzeugrumpf, welcher aus dem Material Aluminium besteht, wird zur Versteifung mit bis zu 100 Profilen versehen [75]. Die Profile, auch Stringer genannt, haben eine Länge zwischen 9 m und 18 m. Sie werden manuell am Flugzeugrumpf über Bohrungen festgeschraubt, die zuvor durch eine Fräsmaschine eingebracht wurden. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen sollen Rumpfelemente und Stringer aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) hergestellt werden [92]. Diese sind bei gleich bleibenden Qualitätsanforderungen im Vergleich zum Werkstoff Aluminium deutlich leichter. Durch das so verringerte Gewicht des Flugzeugs kann während der

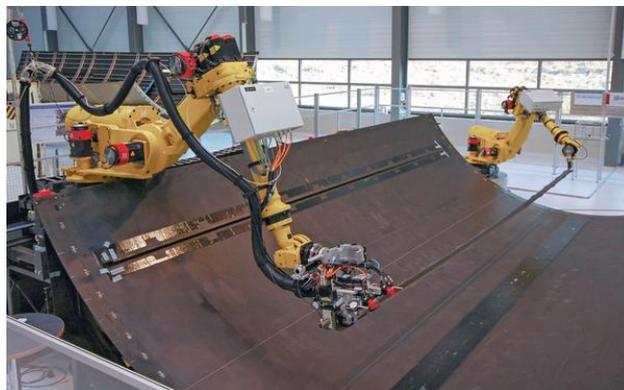
Nutzungsphase eine enorme Menge Treibstoff eingespart werden. Da jedoch Teile aus CFK in einem Autoklav aushärten, sind die zurzeit bestehenden Bohrtechniken für die Verbindungen aufgrund der CFK-Struktur nicht geeignet.

Ein neues Fertigungskonzept sieht vor, die CFK-Stringer auf die Außenhaut des Rumpfes zu kleben. Um Qualitätseinbußen zu vermeiden, ist beim Klebevorgang eine Abstandsgenauigkeit zwischen zwei Stringer in Umfangsrichtung gefordert. Diese ist mit einer Toleranz von $\pm 300 \mu\text{m}$ angegeben. Bisher erfolgt der Klebevorgang unter großem Aufwand manuell mithilfe von Werkmitarbeitern, die mit den vorhandenen Techniken bis zu vier Flugzeuge pro Monat fertigen [1, 75] (siehe Abbildung 1.1a). Dies genügt den gestellten Anforderungen der Flugzeughersteller nicht, da in Zukunft pro Monat bis zu dreizehn Flugzeuge verschiedener Typen gebaut werden sollen.

Um den Produktionsprozess zu beschleunigen, soll der beschriebene Klebevorgang voll automatisiert werden. Hierzu werden mehrere Knickarmroboter (Manipulatoren) eingesetzt [21, 47], die den manuellen Klebevorgang der Werkmitarbeiter ersetzen (siehe Abbildung 1.1b). Da jeder Roboter lediglich über maschineninterne lokale Positionssensorik und folglich keinerlei Informationen über den aktuellen Zustand anderer Roboter verfügt, ist die geforderte Toleranz von $\pm 300 \mu\text{m}$ im gesamten Arbeitsbereich von bis zu 18 m nicht zu erreichen. Auch eine optimale Ansteuerung der Roboter durch das Teach-In-Verfahren [91] im Bereich der Automobilindustrie ist aus ökonomischer Sicht nicht bezahlbar. Dies wird dadurch begründet, dass beim Einteachen für jeden Rumpftyp Probeteile hergestellt werden, welche zum einen sehr teuer sind und zum anderen große Lagerkapazitäten erfordern. Der Automatisierungsprozess für den Klebevorgang muss daher in einem geschlossenen Regelkreis erfolgen, in welchem jeweils die Position vom Endeffektor (Tool-Center-Point (TCP)) eines jeden Roboters durch ein übergeordnetes, direkt messendes



(a) Manuelle Bearbeitung [53]



(b) Maschinelle Bearbeitung [35]

Abbildung 1.1: Produktion des CFK-Rumpfteils vom Flugzeug

Sensorsystem bestimmt wird. Ein implementierter Regler im Regelkreis verwendet diese Messinformation, um ggf. die TCP-Position der Roboter zu korrigieren.

Ein mögliches Szenario für den Automatisierungsprozess des Klebevorganges im geschlossenen Regelkreis ist in Abbildung 1.2 illustriert. Vier Roboter positionieren und kleben die Stringer autonom auf beide Seiten des Rumpfelements. Das Kleben eines Stringers erfolgt jeweils mit zwei Robotern, wobei ein Roboter den Stringer an einer Startposition festhält und ein zweiter Roboter den Stringer entlang der vorgegebenen Trajektorie klebt. Dabei misst ein optisches Messsystem, bestehend aus mehreren Lasertrackern, kontinuierlich die TCP-Positionen sowie die Orientierungen der Roboter mithilfe eines am Endeffektor angebrachten Messreflektors. Jeder Lasertracker ist in der Lage, eine TCP-Position lokal in seinem Koordinatensystem zu messen und diese mit dem andern auszutauschen. Sind die Aufstellorte der Lasertracker zueinander definiert, so können die von den Lasertrackern lokal gemessenen TCP-Positionen in ein gemeinsames globales Koordinatensystem transformiert werden. Sämtliche Roboter sowie Lasertracker sind bei diesem Klebevorgang durch den Austausch der globalen Positionsdaten miteinander vernetzt. Eine manuelle Abstimmung bzw.

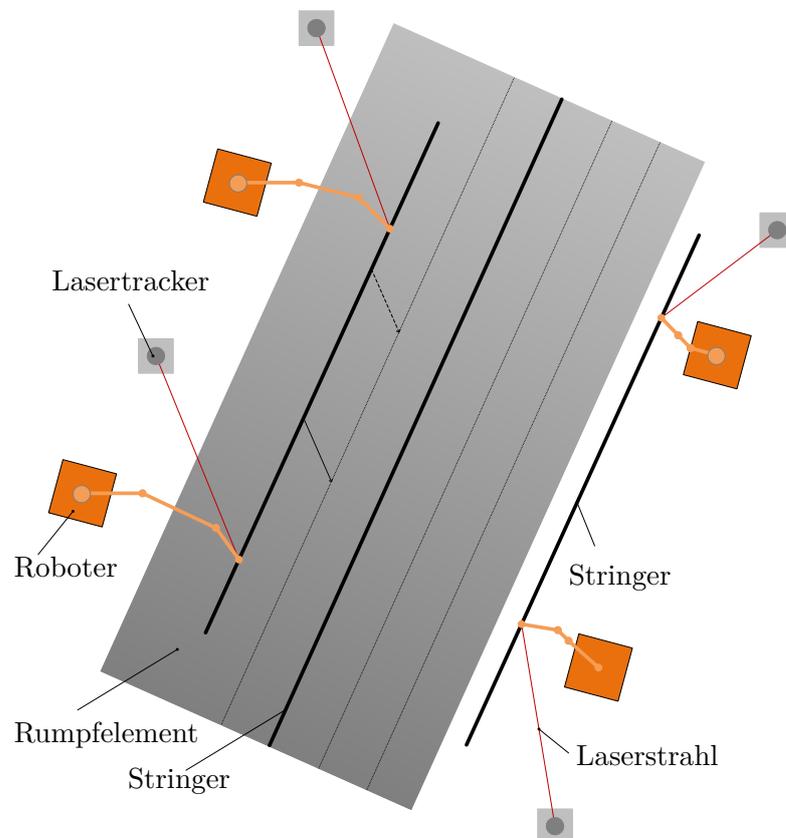


Abbildung 1.2: Szenario zur automatisierten Produktion eines Rumpfteils eines Flugzeugs mithilfe eines übergeordneten Messsystems

Justierung der Roboter untereinander durch den Ingenieur ist somit nicht mehr notwendig, da jeder Roboter über die Position der anderen informiert ist. Des Weiteren lassen sich beliebige Roboter verschiedener Serien und Hersteller einsetzen. Diese können zu dem kostengünstig angeschafft werden, da für den entworfenen Automatisierungsprozess keine maschineninterne Sensorik benötigt wird. Dies spart Rüst- sowie Produktionskosten und macht den Automatisierungsprozess flexibler im Vergleich zum traditionellen Vorrichtungsbau. Im Folgenden werden verschiedene optische Messsysteme vorgestellt, welche die Positionierung von Robotern bzw. Bearbeitungsmaschinen dynamisch erfassen können.

1.1 Optische Messsysteme

Für die steigenden Ansprüche an die Präzision von Robotern sowie Bearbeitungsmaschinen bieten sich optische Messverfahren an, da diese nicht in den Kraftfluss eingebracht werden müssen, sondern räumlich getrennt aufgestellt werden können. Darüber hinaus ermöglichen sie eine exakte Positionsbestimmung in großen räumlichen Messvolumina. Hierzu existieren verschiedene Ansätze:

- Das Indoor Global-Positioning-System (iGPS) basiert auf einem Netzwerk aus Infrarot-Lasersendern als Messsystem [69]. Deren Signale werden von einem am Messobjekt befindlichen Sensor empfangen und ausgewertet. Damit ist eine Messunsicherheit von weniger als 200 μm bei einer statischen Messung mit vier Sendern erreichbar [45]. iGPS erlaubt eine maximale Geschwindigkeit des Messobjekts von ca. $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [13]. Da das Grundprinzip des iGPS auf Laufzeitmessungen beruht, bedeutet dies für die Messung eines bewegten Objektes, dass während der Zeitmessung Tot- und Latenzzeiten entstehen, welche die Bestimmung der Winkelwerte (Azimut und Elevation) verfälschen. Bei einer Objektgeschwindigkeit von $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ kann so im ungünstigsten Fall eine Positionsdifferenz von rund 45 mm entstehen [13]. Dieses System erfüllt somit die gestellten Anforderungen hinsichtlich der Präzision zwar im statischen Betrieb, jedoch nicht bei der Verfolgung dynamischer Objekte.
- Laserscanner können eingesetzt werden, um mehrere bewegliche Objekte zu erkennen [43]. Dieser Ansatz erlaubt jedoch nur eine Abtastung mit einer Auflösung von 5 cm, was für Produktionsprozesse mit der geforderten Präzision ungeeignet ist.
- Ein Lasertracker benötigt grundsätzlich keine aktiven Bauteile am Messobjekt.

Es wird lediglich ein Retroreflektor [17] benötigt, da Laseremitter und Empfänger in derselben Komponente untergebracht sind. Lasertracker werden von verschiedenen Herstellern angeboten [3, 22, 33]. Grundsätzlich bestehen diese Systeme aus einer drehbar gelagerten Laseremitter- und Interferometereinheit. Aus der Winkel- und der Längeninformation des Interferometers wird die Position des Retroreflektors berechnet. Lasertrackersysteme erreichen eine Messunsicherheit von weniger als $10\ \mu\text{m}$ und erlauben Bewegungen des Messobjektes mit bis zu $6\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ [40].

Wie in der Abbildung 1.2 zu erkennen ist, werden mehrere Lasertracker räumlich getrennt neben den Robotern platziert, um die TCP-Positionen aller Roboter in einem globalen Koordinatensystem zu erfassen. Der Einsatz von Lasertrackern stellt im Vergleich zu Laserscannern oder iGPS den besten Kompromiss aus Präzision, Dynamik und Abdeckung eines großen Messvolumens dar. Durch die Nutzung mehrerer Lasertracker kann sichergestellt werden, dass ein Roboter kontinuierlich verfolgt werden kann.

Es ist möglich, einzelne Komponenten (Roboter, Bearbeitungsmaschinen, etc.) auszutauschen oder hinzuzufügen, ohne diese exakt ausrichten zu müssen, da die übergeordnete Positionsbestimmung und ggf. Positionskorrektur in globalen Koordinaten erfolgt. Gleiches gilt auch für den Austausch und die Hinzunahme weiterer Lasertracker, da Objekte von einem bereits im System befindlichen und dem neu hinzugekommenen Lasertracker gleichzeitig verfolgt werden können. Zudem ist ein solches Messsystem durch diesen Mechanismus selbstkalibrierend. Der Einsatz einer global agierenden Sensorinfrastruktur ermöglicht somit eine deutliche Steigerung der Flexibilität in der Produktion, da die Rüstzeiten trotz steigender Genauigkeit wesentlich verkürzt werden können.

Neben der Verkürzung von Rüstzeiten in der klassischen hochautomatisierten Industrieproduktion bietet der Aufbau einer global agierenden Sensorinfrastruktur besonders im Bereich der räumlich großvolumigen Produktion deutliche Vorteile. Die exakte Positionierung von mehrere Meter großen Werkstücken kann mit einer Vielzahl von interagierenden Lasertrackern deutlich beschleunigt werden. Darüber hinaus muss aber auch hier aufgrund geringer Fertigungsstückzahlen eine schnelle Umrüstbarkeit der Anlagen und damit eine hohe Flexibilität gewährleistet sein. Dies ist aufgrund der Trennung von Messsystem und Aktorik im Zusammenspiel mit der Nutzung von globalen Koordinaten jederzeit möglich.

1.2 Übersicht

Das bereits vorgestellte Beispiel aus der Luftfahrtindustrie zeigt, dass optische Messsysteme, insbesondere Lasertracker, als flexible Positionssensoren für industrielle Automatisierungsaufgaben geeignet sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein Multi-Lasertracker-System (MLTS) aus modularen Komponenten aufgebaut und entwickelt, welches die 3-D-Position eines Objektes im Raum mit höchster Präzision berührungslos misst. Die vorliegende Arbeit ist in folgende Kapitel unterteilt.

In *Kapitel 2* werden in einem Überblick verschiedene Lasertracker-Systeme vorgestellt und klassifiziert. Hierbei geht es insbesondere um den Aufbau sowie die Wirkungsweise der Systeme.

Im *3. Kapitel* werden die gewonnenen Erkenntnisse aus Kapitel 2 verwendet, um das zu entwickelnde System zu spezifizieren. Aus der Systemspezifikation werden Ziele für diese Arbeit abgeleitet, deren Realisierung in den nachfolgenden Kapiteln präsentiert wird.

Kapitel 4 beschreibt den experimentellen Aufbau des zu entwickelnden Messsystems, welcher auf Grundlage der zuvor definierten Systemspezifikation erstellt wurde. Neben der Beschreibung der Messinstrumente und der verwendeten Hardwarekomponenten wird die Wirkungsweise des Messsystems erläutert. Der experimentelle Aufbau ist der Ausgangspunkt für die Entwicklung der Algorithmen, die in den Kapiteln 5 bis 8 vorgestellt werden.

In *Kapitel 5* wird ein Algorithmus zur Lokalisierung des Messobjektes entworfen. Der Algorithmus ermöglicht dem MLTS, das Messobjekt in seinem vollständigen Arbeitsraum autonom zu finden.

Die Verfolgung des Messobjektes ist notwendig, um berührungslos messen zu können. Der Fokus des *6. Kapitels* ist die Realisierung einer Strahlnachführregelung. Auf Basis der in Kapitel 4 beschriebenen Hardwarekomponenten werden Modelle entwickelt, die für den Entwurf des Reglers verwendet werden. Hierzu werden verschiedene Reglerkonzepte erläutert und realisiert.

In *Kapitel 7* werden Algorithmen zur Berechnung der TCP-Position sowohl für einen Lasertracker als auch für das MLTS hergeleitet. Dabei werden die Messverfahren mit Winkel- und Längenmessungen (Triangulation) bzw. reinen Längenmessungen (Tri- bzw. Multilateration) angewendet. Darüber hinaus werden die Beziehungen zwischen dem Koordinatensystem sowie dem Arbeitsraum vom MLTS untersucht.

Die Genauigkeit der in Kapitel 7 hergeleiteten Algorithmen ist abhängig von der Kenntnis der Parameter im MLTS. Das zentrale Thema im *8. Kapitel* ist die Identifikation der Parameter sowohl für ein Subsystem als auch für das MLTS. Es werden analytische, aber auch experimentelle Kalibrierverfahren vorgestellt, die zur Identifikation der Parameter verwendet werden.

Im *9. Kapitel* werden die hergeleiteten Algorithmen aus Kapitel 8 mit experimentellen Daten validiert. Darüber hinaus werden Referenzfahrten realisiert, um die Genauigkeit des MLTS mit einem Referenzsystem zu vergleichen. Zum Schluss dieses Kapitels wird die Leistungsfähigkeit der entwickelten Algorithmen am experimentellen Aufbau gezeigt.

Kapitel 10 fasst die vorliegende Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick zum Einsatz des MLTS in einem Automatisierungsprozess.

2 Lasertracker-Systeme – Überblick und Klassifizierung

Das Lasertracker-System stammt ursprünglich aus der geodätischen Messtechnik und ist wie das Tachymeter, der Laserradar und der terrestrische Laserscanner dem polaren Gerätekoordinatensystem zugeordnet, welches die Position eines Objektpunktes berührungslos durch zwei Raumwinkel sowie eine Distanz misst [12, 19, 27, 36, 46, 77]. Der Hauptgrund für das Vorantreiben der Entwicklung des Lasertrackers in den achtziger Jahren war die Notwendigkeit, ein Messsystem zu schaffen, welches den Endeffektor eines Roboters verfolgt, dabei dessen TCP-Position bestimmt und so zur Kalibrierung von Robotern eingesetzt werden kann [38, 40]. Aus verschiedenen Entwicklungsansätzen wurde bis zur heutigen Zeit eine Vielzahl von Lasertracker-Systemen entwickelt. Die Systeme unterscheiden sich sowohl in ihrem Aufbau als auch in den verwendeten Messprinzipien. Im Laufe der Entwicklung haben sich zwei wesentliche Messprinzipien etabliert, nämlich die Winkel- und Längenmessung sowie die reine Längenmessung, die im Folgenden an unterschiedlichen Aufbauten erläutert werden.

2.1 3-D-Koordinaten auf Basis von kombinierter Winkel- und Längenmessung

In diesem Abschnitt werden zunächst die Komponenten des Längenmessinstruments näher erläutert, anschließend erfolgt die Beschreibung der unterschiedlichen Systeme zur Strahlableitung und der Winkelmessinstrumente.

2.1.1 Längenmessinstrument

Ein möglicher Aufbau der Längenmeseinrichtung auf Basis eines Interferometers ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Interferometrische Messverfahren zeichnen sich durch hohe

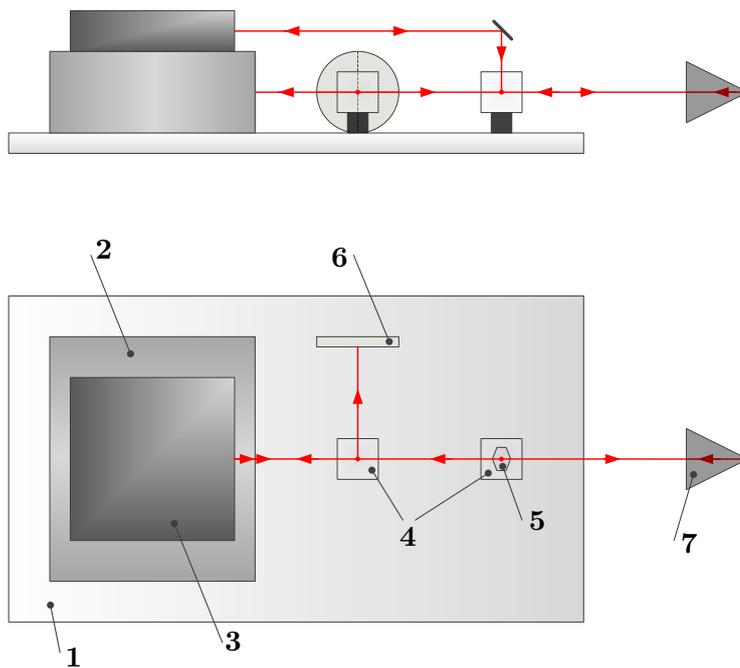


Abbildung 2.1:
Längenmessgerät mit
1 Grundplatte,
2 Interferometer,
3 ADM,
4 Strahlteiler,
5 Spiegel,
6 Positionsdetektor,
7 Messreflektor

Messgenauigkeit sowie Auflösung aus und sind deshalb für die vorliegende Anwendung besonders geeignet. Die zur Lösung der Aufgabe erforderlichen Komponenten wie Interferometer, Positionsdetektor, Absolutdistanzmessgerät (ADM), sowie optische Bauelemente sind auf einer Grundplatte angebracht und zueinander justiert. Die austretenden Laserstrahlen von ADM und Interferometer treffen nach Durchlaufen der optischen Bauelemente auf das Zentrum eines Messreflektors, welcher entlang der interferometrischen Achse angeordnet ist. Nach Reflexion am Reflektor gelangen die Strahlen zu ihrem Ursprungsort (ADM bzw. Interferometer) zurück, wo die Auswertung der Längenmessung stattfindet.

Homodyn- und Heterodyninterferometer

Für die Längenmessung wird ein auf dem Michelson-Konzept beruhendes Planspiegelinterferometer [8–10] verwendet. Ein Helium-Neon (He-Ne)-Laser versorgt das Interferometer mit kohärenter monochromatischer Strahlung. Der Laserstrahl wird mithilfe eines Strahlteilers in zwei Teilstrahlen getrennt, die unterschiedliche Wegstrecken (Mess- und Referenzstrecke) durchlaufen. Werden die beiden Teilstrahlen nach dem Durchlaufen wiedervereinigt (Interferenz), so entsteht bei ungleich langen Wegstrecken ein optischer Phasenunterschied zwischen den Wellenfronten beider Teilstrahlen. Dieser Phasenunterschied stellt die zu messende Längeninformation dar, welche mithilfe der photoelektrischen Auswerteeinheiten in photoelektrische Signale umgewandelt wird [28]. Die photoelektrischen Signale werden in elektronischen

Auswerteeinheiten als ganze Perioden, entsprechend einem optischen Phasenunterschied von halben Wellenlängen, und in Bruchteile einer Periode registriert. Aus der Anzahl ganzer Perioden und der Bruchteile ergibt sich die Längenänderung des Messobjektes [10, 14].

Zur Gewinnung der Längeninformation mit Interferometern gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Verfahren: Homodyn- und Heterodyninterferometer.

Homodyninterferometer werden von einem frequenzstabilisierten He-Ne-Laser mit einer definierten und sehr genau bekannten Wellenlänge versorgt, welche die Basis für hochgenaue Längenmessung darstellt. Homodyninterferometer erzeugen am Interferometerausgang bei ruhendem Messreflektor ein zeitlich unveränderliches Interferenzbild. Beim bewegten Messreflektor ändert sich die Intensität am Interferometerausgang periodisch, wobei die Frequenz der Periodenwechsel von der Verfahrensgeschwindigkeit des Messreflektors abhängt. Dies bedeutet, dass die photoelektrische Auswerteelektronik für eine Bandbreite von $f = 0$ Hz bis zu einer von der jeweiligen Anwendung abhängigen Grenzfrequenz f_{\max} ausgelegt sein muss.

Heterodyninterferometer werden von He-Ne-Laser mit zwei dicht benachbarten Frequenzen (f_1, f_2) versorgt. Im Strahlteiler werden beide Frequenzen geteilt, so dass z. B. die Frequenz f_1 den Messarm und die Frequenz f_2 den Referenzarm des Interferometers durchläuft. Die Frequenzen f_1 und f_2 werden nach Durchlaufen der Mess- und Referenzarme wiedervereinigt, wobei bei ruhendem Messreflektor die Schwebungsfrequenz f_ψ entsteht. Bei bewegtem Messreflektor vergrößert bzw. verringert sich die Schwebungsfrequenz abhängig von der Bewegungsrichtung des Messreflektors.

Im Gegensatz zu Homodyninterferometer steht bei Heterodyninterferometer stets ein Wechselsignal an, so dass für die photoelektrische Auswerteelektronik wesentlich günstigere Bedingungen vorliegen. Das in dieser Arbeit verwendete Planspiegelinterferometer gehört zur Gruppe der Homodyninterferometer. Das Problem der Messfrequenz $f = 0$ Hz wurde hier durch das Schwingerkonzept gelöst [8, 10]. Die wesentlichen Unterschiede zwischen beiden Verfahren bestehen in der Art und Weise der Messwertgewinnung, aber nicht in der Auflösung und Genauigkeit.

Absolutdistanzmessung

Das im vorherigen Abschnitt beschriebene Interferometer ist ein Inkrementalverfahren und kann daher lediglich Längenänderung messen. Sollen jedoch die 3-D-Koordinaten ermittelt werden, ist eine Absolutmessung zwingend erforderlich. Dies kann durch die Integration eines Absolutdistanzmessgerätes in die Anordnung realisiert werden.

Die Messung der Absolutlänge beruht auf dem Fizeau-Prinzip. Hierzu existieren zwei Verfahren mit fester synthetischer Wellenlänge sowie variabler synthetischer Wellenlänge, welche die Bestimmung der Absolutlänge im statischen Betrieb ohne Verschiebung des Messreflektors gestatten [6, 41, 58, 74, 93].

Bei dem Verfahren mit fester synthetischer Wellenlänge wird mittels eines Diodenlasers die Absolutlänge zwischen Messobjekt und Messgerät im statischen Betrieb ohne Verschiebung des Messreflektors bestimmt. Dabei wird der Diodenlaser durch den eingestellten Injektionsstrom zwischen zwei vorgegebenen Wellenlängen (λ_1, λ_2) ohne Modensprung durchgestimmt und der dadurch entstehende Phasenunterschied $\Delta\phi$ mittels hochauflösendem Photoempfänger gemessen. Aus dem Phasenunterschied sowie der Schwebungswellenlänge λ_S wird

$$\ell = \frac{1}{2} \cdot \Delta\phi \cdot \underbrace{\left(\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right)}_{\lambda_S} \quad (2.1)$$

berechnet [93]. Da der Wert im Nenner zur Berechnung der Schwebungswellenlänge sehr klein ist und eine exakte Einstellung der beiden Wellenlängen aufgrund der gegebenen Elektronik nicht möglich ist, schwankt die berechnete Absolutlänge sehr stark. Dies hat zur Folge, dass das Ergebnis mit einem großen Fehler behaftet ist.

Das Verfahren mit variabler synthetischer Wellenlänge vermeidet die Berechnung der Schwebungswellenlänge, indem ein zusätzliches Interferometer mit konstanter Länge ℓ_{ref} als Referenzsystem eingesetzt wird [74]. Dabei werden die aus der Wellenlängendurchstimmung hervorgehenden Phasenunterschiede am Messinterferometers $\Delta\phi$ als auch am Referenzinterferometer $\Delta\phi_{\text{ref}}$ detektiert. Demzufolge ändert sich Gleichung (2.1) wie folgt:

$$\ell = \ell_{\text{ref}} \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta\phi_{\text{ref}}} \quad (2.2)$$

Eine Kombination aus beiden Verfahren stellt laut dem Stand der Technik die beste Lösung dar, wobei die Absolutlänge bis zu einem Abstand von 20 m mit einer Messunsicherheit kleiner als 10^{-6} m bestimmt werden kann [74]. Wie in Abbildung 2.1 zu erkennen ist, wird der Laserstrahl vom ADM durch einen Ablenkspiegel und einen Strahlteiler in den Strahlengang des Interferometers eingekoppelt. Somit können gleichzeitig Absolutlänge und Längenänderung des Messobjektes ermittelt werden. Der optische Aufbau aus beiden Messgeräten erfordert jedoch auf Grund der Komplexität der Komponenten sowie der aufwendigen Justageeinrichtung einen hohen Kostenaufwand, der bei einer Realisierung eines Lasertracker-Systems berücksichtigt werden muss.

Laserquelle

Als Laserquelle werden meist He-Ne-Laser verwendet [81,95]. Diese zeichnen sich durch kompakte Abmessungen, hohe Frequenzstabilität, keine optische Rückwirkungen sowie eine Einlaufzeit von ca. 20 min aus. Des Weiteren ist der Laser [81] mit einer Lichtwellenleiter-Einkoppel-Vorrichtung ausgestattet. Somit kann die Laserquelle vom Interferometer getrennt werden. Dies ist essentiell, da der Laser eine Wärmequelle darstellt, welche die Messinformation signifikant beeinflusst.

Messreflektor

Der Messreflektor ist ein passives optisches Element, welches einen einfallenden Lichtstrahl in die Richtung zurückstrahlt, aus der er gekommen ist. Dies erfolgt unabhängig von der Orientierung des Messreflektors. Ein Hauptmerkmal, mit welchem Reflektoren beschrieben werden, ist der Öffnungswinkel. Dieser gibt den maximalen Strahleinfallswinkel an, bei welchem eine Parallelreflexion noch erfolgen kann. Im Wesentlichen werden zwei Typen von Messreflektoren unterschieden: zum einen Katzenaugenreflektoren (CatEye) und zum anderen Tripelreflektoren [17,33,82,83,90] (siehe Abbildung 2.2).

Ein CatEye zeichnet sich durch seinen großen Öffnungswinkel aus. Es besteht aus zwei Halbkugeln unterschiedlicher Größe aus massivem Glas. Sie werden zueinander ausgerichtet und mit den Planflächen miteinander verklebt. Die kleine Halbkugel ist dem Laserstrahl zugewandt, während die sphärische Innenfläche der großen Kugel als Reflektor dient. Die große Halbkugel ist an der Rückseite verspiegelt und erlaubt somit eine Rückreflexion des Laserstrahls in die entgegengesetzte Richtung. Die Herstellungskosten eines CatEyes gegenüber einem Tripelreflektor liegen deutlich höher, da der Bearbeitungsprozess bzgl. der Klebtechnik sowie der Justierung der Halbkugeln zueinander sehr komplex ist [90].



(a) Cateye



(b) Tripelreflektoren

Abbildung 2.2: Kommerzielle Messreflektoren [33]

Tripelreflektoren werden in Tripelprismen und Tripelspiegel unterschieden. Ein Tripelprisma entsteht, wenn ein Glaswürfel senkrecht auf die Würfel diagonale geschnitten wird. Die Schnittebene ist die Strahleintrittsfläche des Laserstrahls in das Tripelprisma und die Würfel diagonale bildet die optische Achse des Tripelreflektors. Je nach Abstand zwischen dem in den Tripelreflektor eintretenden Strahl und der optischen Achse des Tripelreflektors entsteht ein Parallelversatz zwischen eintretendem und reflektiertem Strahl. Jeder in das Prisma eintretende Strahl wird an je einer der allen drei orthogonalen Würfel flächen reflektiert. Auf diesem Zusammenhang beruht die Kippinvarianz von Tripelreflektoren. Durch Ausnutzung der Totalreflexion an den Grenzflächen kann auf eine weitere Beschichtung der Ebenen verzichtet werden. Im Gegensatz zu einem Tripelprisma besteht ein Tripelspiegel aus drei orthogonal zueinander stehenden Spiegelebenen. Die Metallbeschichtung dieser Ebenen wird so gewählt, dass diese ein hohes Reflexionsvermögen bzgl. der Laserwellenlänge aufweist. Je nach Abstand zwischen Strahlachse und optischen Achse des Tripelspiegels entsteht ein entsprechender Parallelversatz, der in der vorgesehenen Messanordnung detektiert wird [90].

2.1.2 Winkelmessinstrument

Aus dem vorangegangenen Abschnitt wird deutlich, dass eine Längenmessung des Objektes nur dann realisiert werden kann, wenn sich der Laserstrahl kontinuierlich im Zentrum des Messreflektors befindet. Um diese Bedingung zu erfüllen, muss der Laserstrahl in Nick- und Gierrichtung abgelenkt werden. Für die Strahlnachführung sind Positionsdetektor sowie Strahlableitungs system notwendig.

Positionsdetektor

Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, wird ein Teil des vom Messreflektor zum Interferometer zurück reflektierten Laserstrahls an den Positionsdetektor weitergeleitet. Der Positionsdetektor ist aktiv, wenn der Laserstrahl auf den Messreflektor trifft. Somit kann die Positionsabweichung bzw. der Parallelversatz zwischen der Strahlrichtung und dem Zentrum des Messreflektors in zwei Dimensionen gemessen werden. Für diese Messung können folgende Sensoren eingesetzt werden [29, 52, 72]:

- Positionsempfindliche Photodiode (PSD)
- Vierquadranten Photodiode (4QD)

Eine PSD besteht aus einer homogenen quadratischen Photodiode, die mit vier Elektroden an jeder Kante der Diode angeschlossen ist (siehe Abbildung 2.3a). Beim Lichteinfall werden die erzeugten Ladungsträger entsprechend dem Auftreffort unterschiedlich auf die Elektroden verteilt und somit entstehen unterschiedliche Photoströme, die für die Berechnung der Position des Laserstrahls auf der PSD herangezogen werden. Damit kann der Schwerpunkt des Laserstrahls auf der PSD aus den Verhältnissen der Photoströme ermittelt werden. Dadurch ist eine absolute Ortsbestimmung des Laserstrahls auf der PSD möglich. Aufgrund der beschriebenen Eigenschaften ist die Herstellung dieses Sensortyps sehr aufwendig und deshalb mit hohen Kosten verbunden [72].

Eine 4QD entsteht, wenn die lichtempfindliche Fläche eines Photodetektors in vier Quadranten geteilt wird, wobei die Trennlinien nur wenige Mikrometer breit sind (siehe Abbildung 2.3b). Sie ist einfach im Vergleich zu einer PSD herzustellen und ist hoch dynamisch. Beim Lichteinfall auf die 4QD liefert jeder Quadrant einen Photostrom, der gemessen wird. Dieser stellt indirekt die Positionsinformation des Laserstrahls in Bezug auf den Koordinatenursprung der 4QD dar. Aus den Verhältnissen der Photoströme kann die zweidimensionale Position des Laserstrahls auf der 4QD berechnet werden. Diese Messinformation ermöglicht eine präzise Justierung des Koordinatenursprungs der 4QD zum Zentrum des Messreflektors, denn beim Lichteinfall auf das Zentrum des Messreflektors wird die 4QD zum Laserstrahl so ausgerichtet, bis alle vier Quadranten den gleichen Strombetrag liefern und somit ein Gleichgewicht bzw. der Koordinatenursprung eingestellt ist. Da jedoch das Intensitätsprofil eines Laserstrahls ein Gauß-Profil darstellt, kann aus den Verhältnissen der Photoströme lediglich der Koordinatenursprung eindeutig bestimmt werden. Bei einer Verschiebung des Laserstrahls aus dem Zentrum des Messreflektors ist eine Berechnung der absoluten Positionen wie bei einer PSD nicht möglich [52, 72].

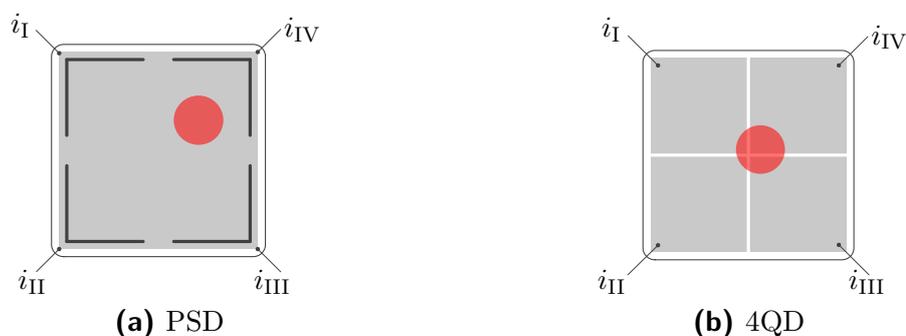


Abbildung 2.3: Positionsdetektoren

Der beschriebene Positionsdetektor stellt das Bindeglied zwischen dem Längenmessinstrument und dem Strahlablenssystem dar. Denn aus den Messinformationen des Positionsdetektors kann der Parallelversatz zwischen dem Laserstrahl und dem Zentrum des Messreflektors durch das Nachführen des Laserstrahls korrigiert werden. Dies wird durch das Strahlablenssystem realisiert.

Strahlablenssystem mit drehbarem Längenmessinstrument

Eine Möglichkeit, die eindimensionale Längenmessung auf die Bewegung von Messobjekten im 3-D-Raum zu erweitern, ist die Realisierung einer Ablenkeinheit mit drehbarem Längenmessinstrument. Der schematische Aufbau einer solchen Ablenkeinheit ist in Abbildung 2.4 zu sehen. Das Längenmessinstrument ist in der Ablenkeinheit aufgehängt und kann sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Achse rotieren. Diese Form der Ablenkung beruht auf dem tachymetrischen Prinzip [77]. Hierzu werden hochdynamische Servomotoren für die Drehbewegung eingesetzt, die jeweils mit Winkelencodern integriert sind. Dadurch werden die Winkel bei einer Drehbewegung des Längenmessinstruments gemessen. Die Encoder beruhen auf dem Inkrementalverfahren und erreichen somit eine sehr hohe Auflösung, welche bei der Bestimmung der 3-D-Koordinaten entscheidend ist.

Ein solcher Aufbau stellt eine kompakte geschlossene Einheit dar und erlaubt einen großen Messbereich. Darüber hinaus sind keine weiteren Justageeinrichtungen zwischen Längenmessinstrument und Ablenkeinheit notwendig, da sie bereits durch die Konstruktion miteinander verbunden sind. Bei der Konstruktion muss jedoch berück-

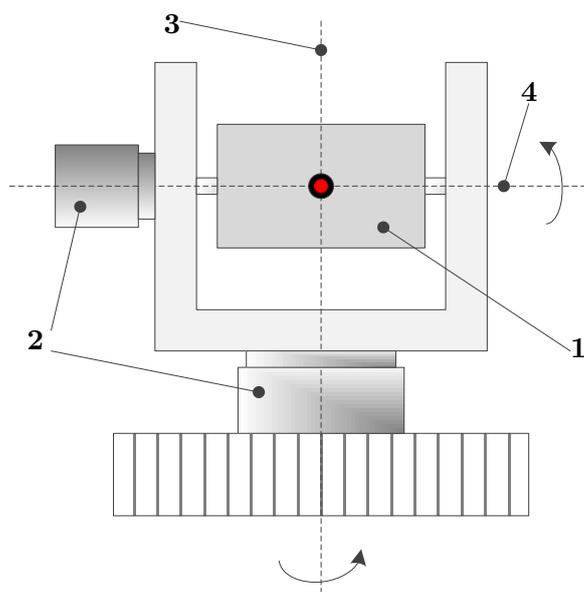


Abbildung 2.4:

Drehbares Längenmessinstrument,
1 Längenmessinstrument,
2 Motoren mit Winkelencodern,
3 vertikale Drehachse,
4 horizontale Drehachse

sichtigt werden, dass der Schnittpunkt der horizontalen und vertikalen Drehachsen gleichzeitig auch der Bezugspunkt des Längenmessinstruments ist. Dieser Punkt stellt den Ursprung des polaren Koordinatensystems des Lasertracker-Systems dar [6].

Zur Realisierung dieses Aufbaus muss bei der Auswahl der Motoren berücksichtigt werden, dass das gesamte Längenmessinstrument bewegt wird. Dies wirkt sich insbesondere auf die Dynamik des Gesamtsystems und somit auch auf die Verfahrensgeschwindigkeit bei der Objektverfolgung aus. Des Weiteren muss bei der Beschaffung der Winkelmesssysteme beachtet werden, dass diese durch die geforderte hohe Genauigkeit und Auflösung den Kostenaufwand für das Gesamtsystem maßgebend beeinflussen.

Strahlablesystem mit kardanisch gelagertem Spiegel

Unter einem kardanisch gelagerten Spiegel ist zu verstehen, dass sich der Spiegel sowohl um die horizontale als auch um die vertikale Achse drehen kann. Abbildung 2.5 stellt den schematischen Aufbau der Ablenkeinheit dar. Der Spiegel ist an der horizontalen Achse aufgehängt und ermöglicht in Kombination mit der vertikalen Drehachse eine räumliche Ablenkung des Laserstrahls. Bei diesem Aufbau wird lediglich der Spiegel rotiert, welcher wie bei der zuvor beschriebenen Ablenkeinheit über zwei Servomotoren mit hochauflösenden Winkelencodern aufgehängt wird. Um den Laserstrahl im Raum abzulenken, ist eine Justageeinrichtung zwischen Spiegel und Längenmessinstrument erforderlich.

Bei dieser Ablenkeinheit bilden die Drehachsen das Koordinatensystem, wobei der Schnittpunkt der beiden Achsen den Ursprung definiert. Da der Laserstrahl bei der

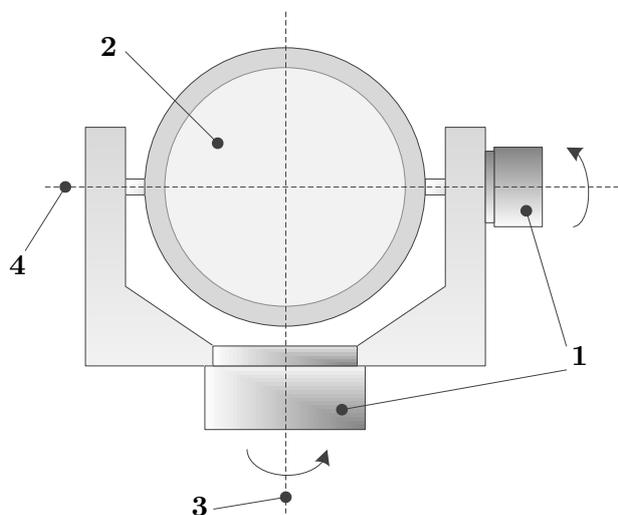


Abbildung 2.5:
Gelagerter Ablenkspiegel,
1 Motoren mit Winkelencoder,
2 Ablenkspiegel,
3 vertikale Drehachse,
4 horizontale Drehachse

Justierung nicht vollkommen den Ursprung trifft, sind Messabweichungen vorhanden [42]. Diese Abweichungen können mittels eines Modells korrigiert werden. Hierzu sind jedoch Kalibrieralgorithmen notwendig, um unbekannte Modellparameter zu identifizieren.

Strahlablesystem mit zwei drehbaren Spiegeln

Die Verwendung von zwei Ablenkspiegeln zur Strahlablesung stellt den einfachsten Aufbau einer Ablenkeinheit dar. Wie in Abbildung 2.6 zu erkennen ist, sind beide Spiegel voneinander entkoppelt. Jeder Spiegel besitzt eine eigene Drehachse und ist mit einem Drehaktor verbunden. Als Aktoren können kostengünstige Galvanometer-Scanner eingesetzt werden. Dieser Aktortyp verfügt über einen Winkelencoder und zeichnet sich durch seinen kompakten Aufbau sowie die hohe Dynamik aus [11, 90]. Nachteilig bei dieser Ablenkeinheit ist der durch die zweimalige Reflexion am Spiegel stark begrenzte Messbereich. Außerdem verfügen die bei diesen Geräten eingesetzte Winkelencoder über eine geringere Auflösung im Vergleich zum zuvor beschriebenen Winkelencoder. Des Weiteren stehen die Drehachsen nicht ideal orthogonal zueinander, wodurch eine Definition des Koordinatensystems durch die Ablenkeinheit erschwert wird. Dies führt wie beim kardanisch gelagerten Spiegel zu Messabweichungen [42]. Eine Anwendung des polaren Messprinzips ist somit nicht möglich. Daher muss zur Berechnung der 3-D-Koordinaten des Messobjektes ein Modell über den Strahlengang in der Ablenkeinheit erstellt werden, das die Korrektur der Messabweichung gestattet. Auch bei dieser Ablenkeinheit sind Kalibrieralgorithmen erforderlich, um Systemparameter zu identifizieren.

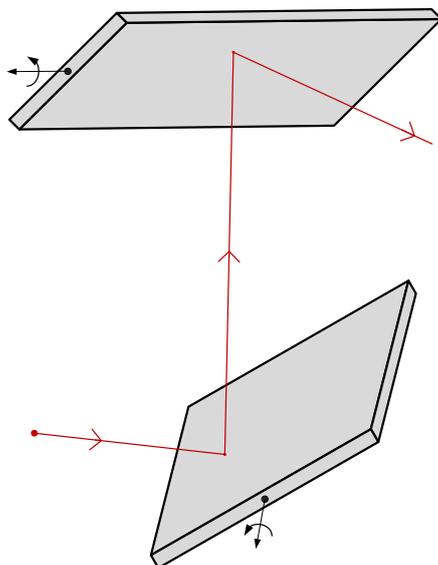


Abbildung 2.6:

Strahlablesystem mit zwei drehbaren Spiegeln

2.1.3 Kommerzielle Lasertracker-Systeme

Das oben erläuterte Messprinzip sowie die notwendigen Komponenten stellen die Grundlagen für die Herstellung eines Lasertracker-Systems dar. Auf dem kommerziellen Markt gibt es drei marktbestimmende Firmen, die Lasertracker-Systeme produzieren und vertreiben. Hierzu gehören Automated Precision Inc. (API), Hexagon Metrology und Faro [3, 22, 33].

In Abbildung 2.7 sind die Messinstrumente der jeweiligen Firma dargestellt. Sie werden meist in der Automobil- und Luftfahrtindustrie sowie im Windkraftanlagenbau zur Messung von großen Bauteilen und zur Kalibrierung von Robotern eingesetzt. Die dargestellten Messinstrumente zeichnen sich durch einen sehr kompakten Aufbau, hohe Genauigkeit und einen sehr großen Messbereich aus. Sie können sowohl statische als auch dynamische Messungen durchführen. Für die Strahlablenkung können entweder Ablenkeinheit mit drehbarem Längmessinstrument oder mit gelagertem Spiegel verwendet werden.

Neben den notwendigen Komponenten im Messinstrument sind ein Kamerasystem sowie Umweltsensoren integriert, um Messobjekte schnell zu lokalisieren und um äußere Einflüsse wie Luft, Druck und Temperatur zu kompensieren. Alle diese Systeme verfügen außer dem Messinstrument über eine Elektronikeinheit, welche die Längen- und Winkelmesssignale verarbeitet und die 3-D-Koordinaten des Messobjektes berechnet. Mittels einer Software können die gemessenen Daten ausgewertet und zur Verfügung gestellt werden. Somit ist eine Auswertung der 3-D-Koordinaten in Echtzeit bis dato nur bedingt möglich. Hexagon Metrology arbeitet zurzeit an

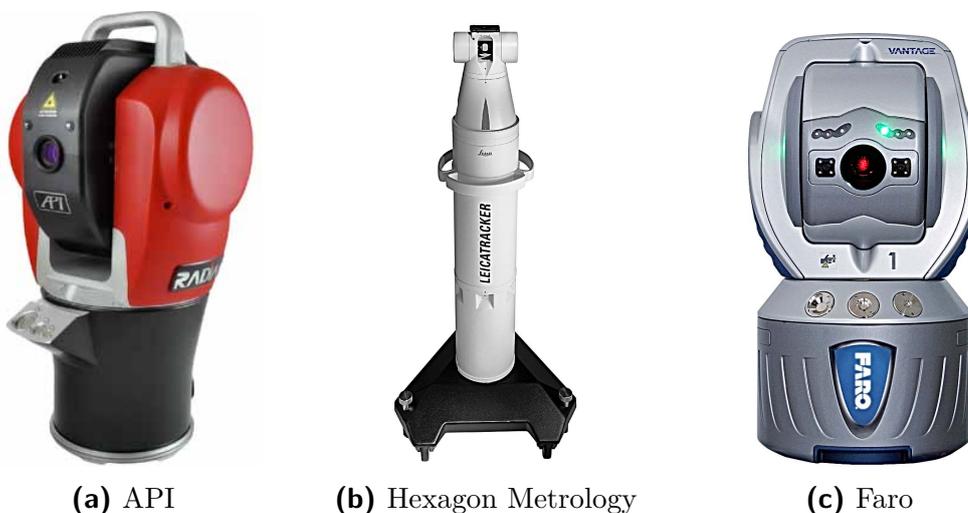


Abbildung 2.7: Kommerzieller Lasertracker [3, 22, 33]

einer Echtzeitschnittstelle für die Ausgabe der Positionsdaten, die auf Basis des im IEC-Standard IEC61158 offengelegten Protokolls EtherCAT [39] beruht. Somit kann eine Abtastrate von maximalen 5 kHz in Echtzeit erreicht werden.

Aufgrund der hohen Beschaffungskosten in den Einzelkomponenten liegt der Basispreis für ein Lasertracker-System weit über 100000 Euro. Ein Einsatz der Systeme als Positionssensor für den geschlossenen Regelkreis in einem Automatisierungsprozess würde die Gesamtkosten in die Höhe treiben. Die Systeme sind als Sensor für den Regelkreis überdimensioniert, da sie für solche Anwendungsszenarien nicht konzipiert wurden. Wie das Beispiel des automatisierten Klebprozesses eines Flugzeugumpfes in der Einleitung gezeigt hat, sind die Systeme wegen der hohen Kosten nicht geeignet, wenn mehrere Positionssensoren gleichzeitig verwendet werden. Des Weiteren sind diese Systeme aufgrund ihrer Baugröße und dem hohen Gewicht nur begrenzt anwendbar.

Ein weiteres interessantes Lasertracker-System auf Basis eines Galvanometer-Scanners ist der Prototyp der Firma PI miCos (Abbildung 2.8) [73]. Hierbei wird als Ablenkeinheit ein System mit zwei separaten Spiegeln verwendet. Die Entwicklung dieses Systems war ursprünglich Thema einer Dissertation am Imtek der Universität Freiburg [37]. Das System wurde nach dem Baukastenprinzip realisiert und besteht aus mehreren modularen Komponenten wie Interferometer-, Sensor-, Aktormodul sowie Signalverarbeitungselektronik. Da die einzelnen Systemkomponenten aus dem traditionellen Produktkatalog von verschiedenen Firmen aufgebaut wurden, sind die



Abbildung 2.8: Lasertracker-System der Firma PI miCos sowie deren Signalverarbeitungselektronik [73]

Module jederzeit austauschbar [90]. Das Messinstrument ist im Vergleich zu den drei vorgestellten Systemen deutlich kompakter und leichter. Es verfügt jedoch weder über ein Absolutdistanzmessgerät noch über einen hochauflösende Winkelencoder. Dadurch liegt der Preis dieses System deutlich unter 50000 Euro. Die erreichbare Auflösung liegt unter $100\ \mu\text{m}$, korreliert jedoch mit der Entfernung zwischen Aufstellungsort und Messobjekt. Da keine Absolutlänge zum Anfang der Messung bestimmt werden kann, ist eine Kalibrierfahrt auf Basis eines mathematischen Modells durch ein Referenzmesssystem erforderlich, um die initiale Absolutlänge zu identifizieren.

Die Notwendigkeit eines Referenzmesssystems sowie das benötigte Hintergrundwissen über den Kalibrieralgorithmus erschweren den Einsatz dieses Systems als Positionssensor in Automatisierungsprozessen. Dies zeigt deutlich, dass der Prototyp temporär noch nicht ausgereift ist. Dennoch ist es denkbar, dieses System aufgrund der Baugröße sowie der geringen Kosten weiter zu entwickeln.

2.1.4 Einfluss von Winkelmessfehlern

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Lasertracker-Systeme bestimmen die 3-D-Position des Messobjektes auf der Grundlage von Längen- sowie Winkelmessung. Dabei ist die Auflösung des Längenmessinstruments (Interferometer) der des Winkelmessinstruments deutlich überlegen. Durch die Messung der Winkel nimmt die Genauigkeit der 3-D-Koordinaten mit zunehmendem Abstand zwischen Messinstrument und Messobjekt ab, da die inkrementellen Winkelencoder nur eine begrenzte Auflösung besitzen. Dies soll anhand eines Berechnungsbeispiels gezeigt werden.

Ein Winkelencoder besteht aus einem Teilkreis mit einer bestimmten Anzahl von Inkrementen. Zwei benachbarte Inkremente repräsentieren den maximal auflösbaren Winkel φ des Encoders. Dieser ist beim „Leica Absolute Tracker AT901“ von Hexagon Metrology mit 0,14 Winkelsekunden angegeben, was einem Wert von rund $6,79 \cdot 10^{-7}$ rad entspricht. Durch diese Angabe kann die kleinste aufgelöste Bogenlänge b auf dem Teilkreis berechnet werden. Sie ist eine Funktion des Winkels φ und des Radius des Teilkreises, die wie folgt aufgestellt wird:

$$b = r \cdot \pi \cdot \varphi. \quad (2.3)$$

Der Radius r in Gleichung (2.3) beschreibt den Abstand zwischen dem Koordinatenursprung des Lasertracker-Systems und dem Messreflektor. Bei einem Abstand von 1 m und einer Winkelauflösung von $6,79 \cdot 10^{-7}$ rad beträgt die kleinste auflösbare Bogenlänge nach Gleichung (2.3) rund $2\ \mu\text{m}$. Dieser Wert liegt bei einem konventionel-

len Winkelencoder, wie dem Encoder vom Galvanometer-Scanner der Firma GSI [11], deutlich höher. Laut Herstellerangabe schafft der Encoder eine Auflösung bei extrem rauschfreiem Prozess von rund $10 \mu\text{rad}$. Damit kann eine kleinste Bogenlänge von rund $31 \mu\text{m}$ pro Meter aufgelöst werden. Mit zunehmendem Abstand wächst die Bogenlänge und somit auch die Messabweichung. Diese wirkt sich signifikant auf die Genauigkeit der Winkelmessung aus, wie das Beispiel zeigt.

Die entstehende Messabweichung kann zum einen reduziert werden, indem die Auflösung des Encoders weiter erhöht wird. Dies ist jedoch mit sehr hohen Kosten verbunden, da der technische Aufwand zur Realisierung des Encoders, speziell in den Elektronikkomponenten, erhöht wird. Zum anderen kann die Messabweichung vermieden werden, wenn keine Winkel zur Berechnung der 3-D-Koordinaten verwendet werden. Dies führt zu einem neuen Messprinzip, das nur auf der Längenmessung der Interferometer beruht, welches im Folgenden vorgestellt wird.

2.2 3-D-Koordinaten durch reine Längenmessungen

Der Zusammenhang zwischen 3-D-Koordinaten und ihrem Koordinatenursprung ist durch den euklidischen Abstand gegeben. Wird ein Punkt im Raum mit den Koordinaten $\mathbf{P} = [x, y, z]^T$ in Bezug auf seinen Koordinatenursprung angegeben, so lässt sich der euklidische Abstand ℓ durch folgende Gleichung beschreiben:

$$\ell = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (2.4)$$

Der euklidische Abstand im 3-D-Raum ist somit die Summe der vom ADM sowie vom Interferometer gemessenen Längen zwischen Lasertracker-System und Messreflektor. Unter Verwendung von drei Lasertracker-Systemen und unter der Voraussetzung, dass die Standortpositionen der Systeme in einem definierten Koordinatensystem bekannt sind, kann das Gleichungssystem in Gleichung (2.4) nach den Koordinaten x, y, z umgestellt werden. Dies stellt das Messprinzip der Trilateration dar, welches aus den Längenmessungen die 3-D-Koordinaten berechnet. Da die sphärische Gleichung (2.4) eine nichtlineare Funktion beschreibt, ergeben sich bei der Trilateration mehrere Lösungen. Erst durch die Integration eines vierten Lasertracker-Systems (das Prinzip der Multilateration) wird eine eindeutige Berechnung der Koordinaten x, y, z ermöglicht [62, 65, 84–86].

Die Anwendung der Trilateration erlaubt es, den bisher betrachteten Aufbau eines Lasertracker-Systems zu vereinfachen. Es kann auf kostenintensive Winkelencoder bei

der Dimensionierung der Ablenkeinheit verzichtet werden. Darüber hinaus ist kein Absolutdistanzmessgerät im Aufbau notwendig, da die Absolutlängen vor Beginn der Messung durch Verwendung mehrerer Systeme geschätzt werden können (siehe Kapitel 8). Einen solchen Aufbau stellt der kommerzielle LaserTRACER dar, welcher die Position des Messobjektes ausschließlich mit hochgenauen Interferometern bestimmt.

2.2.1 LaserTRACER

In einer Zusammenarbeit zwischen dem National Physical Laboratory (NPL) in England und der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) wurde der LaserTRACER konzipiert, welcher von der Firma eTALON marktreif weiterentwickelt und vertrieben wird [20].

Der LaserTRACER als Längenmessinstrument unterscheidet sich von den erwähnten Lasertracker-Systemen durch seinen kleinen Bauraum sowie das eingesetzte Interferometer, das im Innern eine reflektierende Präzisionskugel als Bezugspunkt für die Längenmessung verwendet (siehe Abbildung 2.9). Das Interferometer ist in der Ablenkeinheit integriert und wird um die Kugel herumgeführt, ohne diese dabei zu bewegen. Die Kugel befindet sich auf einem stabilen Lager, so dass sie von der Ablenkeinheit entkoppelt ist. Da der Mittelpunkt der Kugel den messtechnischen Bezug aller interferometrischen Messungen herstellt, erreicht der LaserTRACER eine sehr geringe Messunsicherheit, die mit $0,2\mu\text{m} + 0,3\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ angegeben wird [42]. Eine weitere Besonderheit des LaserTRACERs ist die Trennung zwischen Messinstrument und Laserquelle. Das Laserlicht wird mit einem Monomode-Lichtwellenleiter (LWL) in das Messinstrument eingekoppelt, so dass die interferometrische Messung nicht durch den Wärmeeintrag der Laserquelle beeinflusst wird. Die Umweltsensoren kompensieren Temperatur- und Luftdruckschwankungen.

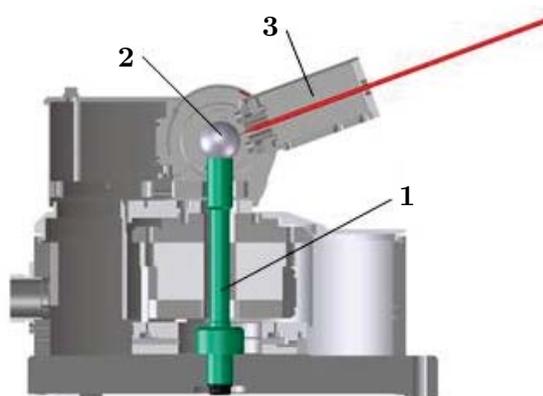


Abbildung 2.9:
LaserTRACER [13],
1 Halterung,
2 Präzisionskugel,
3 Drehbares Interferometer

Der LaserTRACER wird meist zur Kalibrierung von Präzisionswerkzeugmaschinen und insbesondere von Koordinatenmessgeräten (KMG) eingesetzt. Wenn das Koordinatenmessgerät (KMG) mit einem LaserTRACER kalibriert wird, müssen die vom KMG angefahrenen Punkte viermal nacheinander an unterschiedlichen Standortpositionen gemessen werden. Dabei werden die Standortpositionen sowie die fehlenden Absolutlängen zu Beginn der Messung mittels eines Optimierungsverfahrens geschätzt. Auf Basis dieser Informationen werden die vom KMG angefahrenen Punkte in das Koordinatensystem des LaserTRACERs transformiert, um daraus die Genauigkeit des KMGs abzuleiten [42].

Die verwendete Messmethode zur Kalibrierung des KMGs stellt das Messprinzip der Multilateration dar. Werden vier LaserTRACER im Raum zur Messung der 3-D-Koordinaten eingesetzt, so erreichen diese die höchste Genauigkeit im Vergleich zu allen erwähnten Systemen. Da jedoch der Preis für einen LaserTRACER ca. 100000 Euro beträgt, ist ein Multisystem als Positionssensor in einem Automatisierungsprozess nur selten gefragt.

3 Systemspezifikation

Im vorherigen Kapitel wurden kommerzielle Lasertracker-Systeme sowie deren Messprinzipien vorgestellt. Diese Systeme sind meist als Stand-Alone-Systeme konzipiert und daher als 3D-Positionssensor in einem Regelkreis überdimensioniert, sodass sie für Anwendungen in Automatisierungsprozessen nicht geeignet sind. Die Verwendung eines Interferometers als Längenmessinstrument in Kombination mit einer Ablenkeinheit aus einem Galvanometer-Scanner, wie beim Prototyp der Firma PI miCos, stellt ein kostengünstiges Messsystem dar, ist jedoch als Einzelsystem aufgrund des fehlenden Absolutdistanzmessgerätes sowie der geringen Auflösung der Winkelencoder nur bedingt einsetzbar. Eine Erweiterung dieses Prototyps auf ein Multi-Lasertracker-System (MLTS) stellt den besten Kompromiss zwischen Preis und Präzision für einen 3D-Positionssensor dar, welche sowohl das Messprinzip der Multilateration als auch der Winkel- und Längenmessungen anwendet.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist daher, ein mobiles MLTS zu entwickeln, welches vier Messinstrumente umfasst und die 3-D-Koordinaten eines Messobjektes im Raum direkt mit höchster Präzision erfasst (siehe Abbildung 3.1). Dabei liegt der Fokus auf einem kompakten Aufbau, welcher sich aus verschiedenen modularen Komponenten kostengünstig zusammensetzt. Jedes Messinstrument soll in der Lage sein, ein Messobjekt im Raum zu verfolgen und dessen 3-D-Koordinaten aus den Winkel- sowie Längenmessungen zu berechnen. Hierzu soll die Messauflösung des Gesamtsystems vom Millimeter- bis Mikrometerbereich skalierbar sein. Denn für den Fall, dass eine hohe Präzision vom Messobjekt gefordert wird, sind die 3-D-Koordinaten durch reine Längenmessungen der vier Messinstrumente zu berechnen.

Da das MLTS als 3-D-Positionssensor in einem Regelkreis arbeiten soll, ist kein großer Messbereich, wie bei kommerziellen Systemen, erforderlich. Aus Seiten der Industrie, wenn mehrere Messsysteme zur Messung des Messobjektes eingesetzt werden, ist ein Messvolumen für jedes Messinstrument von etwa $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ ausreichend, wobei der Abstand zwischen Messobjekt und Messinstrument 1 m beträgt. Dabei sollen die Messinstrumente das Messobjekt bis zu einer Verfahrgeschwindigkeit von bis zu $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ verfolgen können.

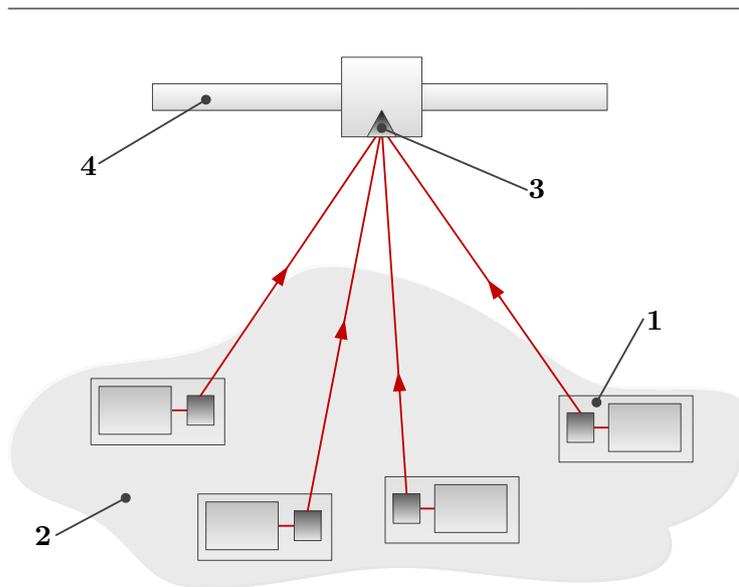


Abbildung 3.1:
MLTS zur Messung der 3-D-Position,
1 Trackermodul,
2 MLTS,
3 Messreflektor,
4 Kinematik

Um die gestellten Ziele zu erreichen, werden zum einen die Messinstrumente sowie deren Hardwarekomponenten aufgebaut und zum anderen die dazugehörigen Algorithmen entwickelt. Im Folgenden werden die Arbeitsaufgaben im Rahmen dieser Arbeit spezifiziert:

Experimenteller Aufbau:

- Es sollen vier Trackermodule aufgebaut werden, welche ausschließlich aus je einem Strahlablesystem, einem Positionsdetektor sowie einem Interferometer zusammengesetzt werden. Jedes Trackermodul soll in der Lage sein, die dreidimensionalen Koordinaten des Zielobjektes zu erfassen und zu verfolgen. Dabei soll auf das kostenintensive ADM, die hochauflösenden Winkelencoder sowie ein Kamerasystem verzichtet werden.
- Neben der Entwicklung der Trackermodule wird eine zentrale Signalverarbeitung aufgebaut. Hierzu soll ein Rapid Control Prototyping System eingesetzt werden, um den Entwicklungsprozess der Algorithmen zu beschleunigen. Im Rahmen dieser Arbeit muss ein geeignetes Echtzeitsystem angeschafft werden, dass die passenden Schnittstellen zu den Messinstrumenten bereitstellt.

Algorithmen:

- Da kein Kamerasystem im Aufbau vorhanden ist, soll ein Algorithmus hergeleitet werden, welcher dem Messinstrument die Lokalisierung der Position des Messreflektors autonom im gesamten Arbeitsraum ermöglicht. Der Algorithmus dient dem Auffinden des Retroreflektors, wenn dessen Position nicht bekannt ist. Dies ist der Fall zu Beginn einer jeden Messung, oder wenn z. B. ein Strahlverlust durch einen Gegenstand auftritt.

- Für die Verfolgung des Messobjektes ist ein geschlossener Regelkreis bestehend aus einem Regler, einem Positionsdetektor sowie der Galvanometer-Scanner zu realisieren. Ein modellbasierter Regler zur gezielten Ansteuerung der Galvanometer-Scanner soll hinsichtlich der Stabilität und Dynamik entworfen werden, damit der Laserstrahl bei der Objektbewegung kontinuierlich zum Zentrum des Messreflektors nachgeführt wird.
- Es sollen Algorithmen für die Berechnung der 3-D-Koordinaten aus den Messinformationen hergeleitet werden. Dabei muss für ein Messinstrument der Strahlengang durch die Ablenkeinheit mathematisch analysiert werden. Darüber hinaus ist ein Modell herzuleiten, welches aus den vier relativen Längenmessungen die 3-D-Koordinaten berechnet.
- Die aus Galvanometer-Scannern bestehende Ablenkeinheit verursacht im Strahlengang interferometrische Messabweichung, welche signifikant auf die Genauigkeit der 3-D-Koordinaten wirken. Diese Messabweichungen können auf Basis des zuvor hergeleiteten Modells korrigiert werden, wenn alle Systemparameter im Strahlengang bekannt sind. Es soll daher ein effizienter Kalibrieralgorithmus entwickelt werden, der die Systemparameter ermittelt und dadurch die Genauigkeit der 3-D-Koordinaten erhöht.
- Für die Berechnung der 3-D-Koordinaten auf Basis der Multilateration sind die Standorte der Trackermodule sowie deren Absolutlängen zu Beginn einer Messung zwingend notwendig. Mithilfe eines Kalibrieralgorithmus sollen diese unbekannt Parameter aus Interferometer-Messwerten ermittelt werden.

4 Experimenteller Aufbau

Im Rahmen eines von Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts „Spitzenforschung in den neuen Länder“ OPTIMI wurde ein Messsystem im Fachgebiet Systemanalyse an der Technische Universität Ilmenau entwickelt, welches zur optisch berührungslosen dreidimensionalen Messung eines Objektes im Raum eingesetzt werden kann. Das aufgebaute Gesamtsystem (Abbildung 4.1) umfasst vier Trackermodule mit den jeweiligen modularen Versorgungs- und Auswerteeinheiten [62–68].

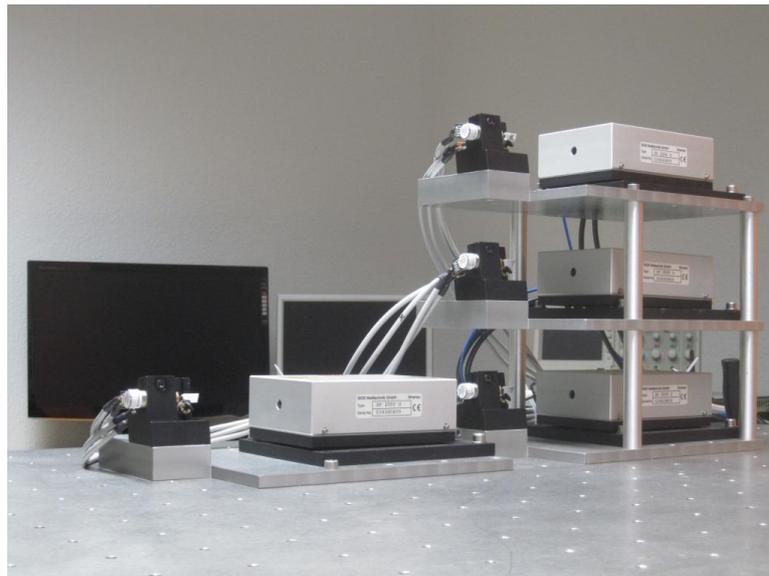


Abbildung 4.1: Aufbau des Messsystems

4.1 Aufbau und Wirkungsweise des Trackermoduls

Ein Trackermodul (Abbildung 4.2) besteht im Wesentlichen aus dem laserinterferometrischen Trackerkopf sowie einem Strahlableitungs- und Versorgungsnetzwerk. Diese Komponenten werden gemeinsam auf einer Grundplatte aus Aluminium befestigt und zueinander justiert. Durch die Justierung wird gewährleistet, dass der aus dem Trackerkopf



Abbildung 4.2: Das aufgebaute Trackermodul

austretende Laserstrahl auf das Strahlablesystem trifft. Der Trackerkopf wurde von der SIOS Messtechnik GmbH [81] entwickelt und zur Verfügung gestellt. Im Trackerkopf befindet sich das Längenmesssystem. Zur Längenmessung wird ein modifiziertes Michelson-Interferometer nach dem Homodynverfahren eingesetzt. Über einen polarisationserhaltenden LWL wird das Licht des frequenzstabilisierten Lasers in das Interferometer eingekoppelt. Durch die photoelektrische Auswertung der optischen Phasendifferenz erreicht das verwendete Interferometer eine Auflösung im Subnanometerbereich [31].

Neben dem genannten Interferometer ist eine 4QD im Trackerkopf angebracht (Abbildung 4.3). Die 4QD wurde von der Firma HAMAMATSU [29] hergestellt. Vier einzelne Photodioden (Quadranten) sind gemeinsam auf einem Substrat hergestellt, die durch einen $30\ \mu\text{m}$ schmalen Spalt voneinander getrennt sind. Die gesamte aktive Fläche der vier Quadranten beträgt $5 \times 5\ \text{mm}^2$. Beim Lichteinfall auf den vier Qua-

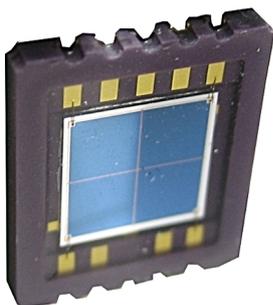


Abbildung 4.3:
Die verwendete 4QD [64]

dranten werden Photoströme erzeugt, die als elektrische Signale zur Erfassung des Strahlversatzes verwendet werden. Die 4QD dient als Sensor für die Verfolgung des Messobjektes.

Zur Strahlnachführung werden zwei Galvanometer-Scanner (Abbildung 4.4) der Firma GSIG [11] eingesetzt, die das Kernstück des Strahlablensystems bilden. Die Scanner werden über eine spezielle Halterung nahezu orthogonal aufeinander angeordnet und ermöglichen dadurch eine Strahlablenkung sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung. Der vom Scanner ausgesandte Strahl bewegt sich räumlich in einem Kegel mit einem Öffnungswinkel von $\pm 30^\circ$. Jeder Scanner besteht aus einem elektromagnetischen Drehantrieb vom Typ „Moving Magnet“ sowie einem Ablenkspiegel mit einer Apertur von vier Millimetern. Durch eine breitbandige Silberbeschichtung erreicht der Spiegel einen sehr hohen Reflexionsgrad von ca. 98,6%. Über einen speziellen Spiegelhalter wird der Ablenkspiegel mit der Welle des Drehantriebes fest verbunden. Der Drehantrieb mit integriertem Winkelsensor zeichnet sich durch kompakte Abmessungen und hohe Dynamik aus und ermöglicht darüber hinaus eine sehr präzise Ablenkung des Laserstrahls. Der optische Winkelsensor arbeitet nach einem inkrementellen Messprinzip und erzielt dadurch eine hohe Auflösung, gute Wiederholgenauigkeit sowie geringe Driftwerte. Die erfassten elektrischen Signale des Sensors werden an die Treiberelektronik weitergegeben und für die interne Regelung der Winkelposition verwendet. Am Gehäuse des Scanners sind Signalanschlüsse in Form einer achtpoligen Buchse angebracht.

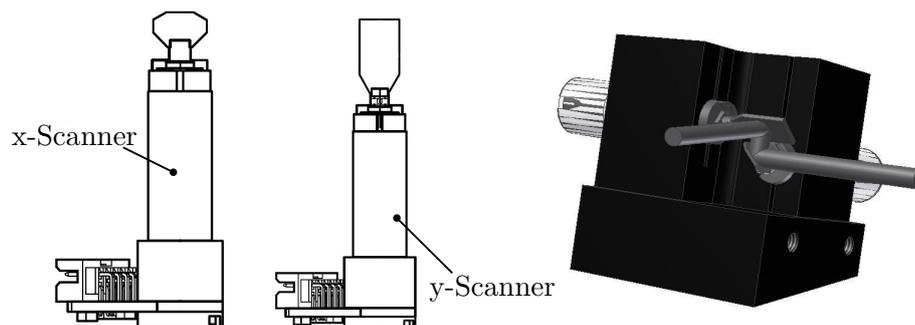


Abbildung 4.4: Die Galvanometer-Scanner und das Strahlablensystem

Ein wichtiger Bestandteil neben dem Trackermodul ist der Messreflektor, welcher am Messobjekt angebracht ist. Eine besondere Eigenschaft des Messreflektors ist die Retroreflexion (Totalreflexion), hierbei wird der Lichtstrahl in Richtung der Strahlquelle stets parallel zurück geworfen. Die Reflexion ist unabhängig von der Orientierung des Messreflektors (Kippinvarianz). Für den experimentellen Aufbau wird ein Tripel-

spiegel (Abbildung 4.5) der Firma Edmund Optics [17] als Messreflektor verwendet, welcher einen Öffnungswinkel von $\pm 10^\circ$ und eine Apertur von 25,4 mm besitzt. Der Tripelspiegel besteht aus drei Aluminium-beschichteten Planspiegeln, die durch eine rechtwinklige Anordnung zueinander montiert sind. Eine gepolsterte Fassung schützt den Tripelspiegel vor Schmutz, Streulicht, Stößen und Erschütterungen.



Abbildung 4.5:
Der verwendete Tripelspiegel

4.1.1 Wirkungsweise des Trackermoduls

Der Strahlverlauf vom Kollimator zum Messreflektor und zurück zum Trackerkopf ist schematisch in Abbildung 4.6 dargestellt. Im Trackerkopf wird der aus der Monomode-LWL divergent austretende Laserstrahl in einen Parallelstrahl umgewandelt. Der linear polarisierte Laserstrahl durchläuft einen Polarisationsfilter und trifft auf die Teilerschicht des polarisierten Strahlteilers B1. Durch den Polfilter wird in B1 eine polarisierte Teilung des Laserstrahls in Referenz- und Messstrahl ermöglicht, deren Polarisations Ebenen senkrecht aufeinander stehen. In B1 zeigt der Referenzstrahl in Richtung des Referenzspiegels und der Messstrahl in Richtung des neutralen Strahlteilers B2.

Von B1 aus passieren sowohl Referenz- als auch Messstrahl $\lambda/4$ -Platten, welche die Strahlen von linearer in zirkulare Polarisation umwandeln. Der zirkular polarisierte Referenzstrahl gelangt zum Referenzspiegel, der orthogonal zum Strahl angeordnet wurde. Nach der Reflexion am Referenzspiegel läuft der Referenzstrahl zu B1 zurück. Dabei wird seine zirkulare Polarisation wieder durch die $\lambda/4$ -Platte zur linearen Polarisation mit um 90° gedrehter Schwingungsebene umgewandelt.

Simultan zum Referenzstrahl durchläuft der zirkular polarisierte Messstrahl einen neutralen Strahlteiler B2 und verlässt den Trackerkopf. Aus dem Trackerkopf gelangt der Messstrahl zum ersten Scanner-Spiegel des Strahlablesensystems. Durch die in etwa orthogonal versetzte Anordnung der beiden Scanner-Spiegel wird der Messstrahl

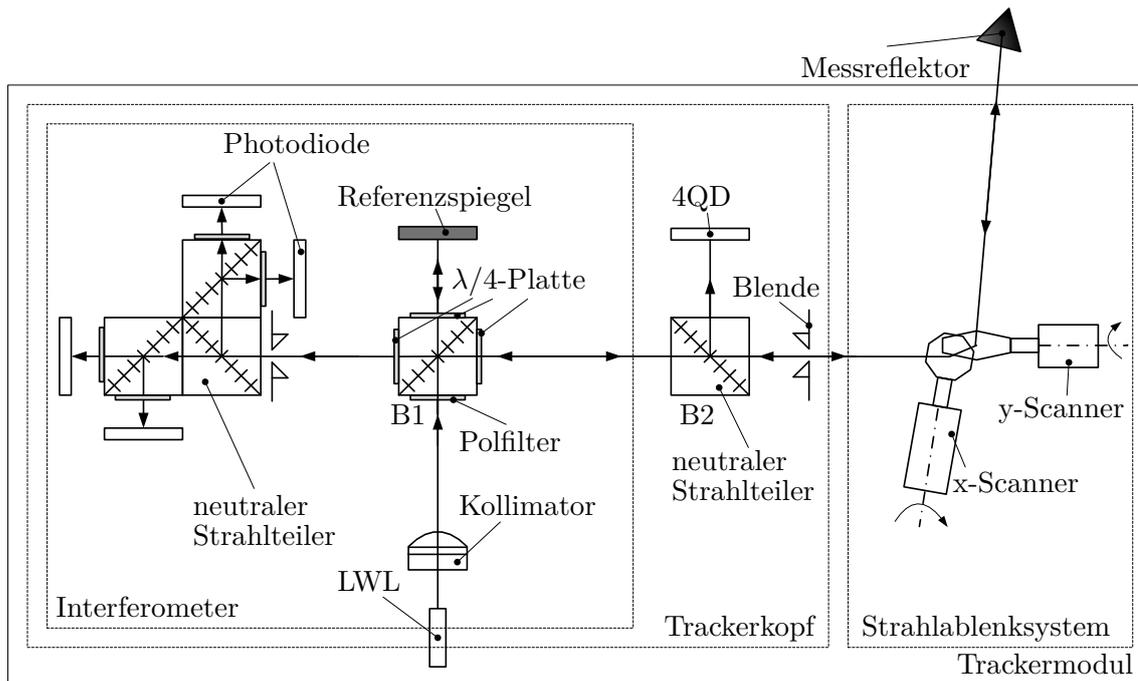


Abbildung 4.6: Der Verlauf des Laserstrahls im Trackermodul

vom ersten zum zweiten Scanner-Spiegel reflektiert, der wiederum den Messstrahl in den freien Raum reflektiert. Befindet sich im Raum ein Messreflektor und trifft der Messstrahl das Zentrum des Messreflektors, so wird der Messstrahl aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Messreflektors antiparallel reflektiert. Nach der Reflexion am Messreflektor gelangt der Messstrahl zum Trackerkopf zurück. In B2 wird der rücklaufende Messstrahl zu äquivalenten Anteilen reflektiert und durchgelassen.

Der an B2 durchgelassene Messstrahl ist zirkular polarisiert und wird durch die $\lambda/4$ -Platte an B1 linear polarisiert mit um 90° gedrehter Schwingungsebene. Die in B1 wiedervereinigten Strahlen (Referenz- und Messstrahl) überlagern sich zu einem Strahl in B1, der in Richtung der optronischen Anordnung zeigt. Da aber die Polarisations Ebenen des überlagerten Strahls linear und senkrecht aufeinander stehen, ist eine Interferenz in B1 nicht möglich. Erst wenn der überlagerte Strahl die $\lambda/4$ -Platte am Ausgang von B1 durchläuft, entstehen aus den orthogonal linearen Polarisierungen eine links- und eine rechtszirkulare Polarisation, die nach dem Superpositionsprinzip interferieren [8, 31, 32].

Die photoelektrische Auswertung am Interferometerausgang erfasst den interferierten Strahl und teilt diesen dann in vier Strahlen auf, deren Polarisations Ebene jeweils um 90° phasenverschoben sind. Vier Photodioden wandeln die phasenverschobenen Strahlen in elektrische Ströme (i_{0° , i_{90° , i_{180° , i_{270°) um, die an die Signalverarbeitung des Interferometers weitergeleitet werden. Eine Auswertung der Längsinformation

ist nur dann möglich, wenn Referenz- sowie Messstrahl während der Messung kontinuierlich interferieren. Diese Forderung wird durch die 4QD sowie den reflektierten Messstrahl an B2 eingehalten. Der vom Messreflektor zurückkehrende Strahl wird an der Teilerschicht in B2 zur 4QD reflektiert. Der Koordinatenursprung der 4QD repräsentiert gleichzeitig den Strahlauftreffpunkt im Zentrum des Messreflektors.

Eine Bewegung des Messreflektors würde eine Verschiebung des reflektierten Messstrahls vom Ursprung der 4QD verursachen, welche in Form elektrischer Signale mit Hilfe der 4QD erfasst wird. Die kontinuierliche Messung mit dem Interferometer ist nur dann möglich, wenn die genannte Verschiebung wieder zum Ursprung korrigiert wird. Die Korrektur erfolgt mit Hilfe eines Regelalgorithmus, der aus der Signalinformation der 4QD die erforderlichen Stellwinkel für die Scanner berechnet. Somit wird der Messstrahl durch die beiden Ablenkspiegel stetig zum Zentrum des Messreflektors bzw. zum Ursprung der 4QD nachgeführt. Dadurch wird eine stetige Verfolgung bzw. interferometrische Messung des Messreflektors ermöglicht.

4.2 Modulare Versorgungs- und Auswerteeinheiten

Die vier Trackermodule stellen das Messinstrument des Gesamtsystems dar und werden von verschiedenen Versorgungs- und Auswerteeinheiten unterstützt, welche über optische und elektrische Kabel miteinander verbunden sind. Die Einheiten sind in mehreren 19-Zoll-Einschüben untergebracht, die wiederum an einem mobilen 19-Zoll-Rack befestigt sind. Zu den Komponenten zählen Lasereinheit, Auswerteeinheit des Trackerkopfes, Treiberelektronik des Strahlablenksystems, Umweltsensoren, Echtzeitverarbeitungshardware, Anschlussrack sowie Netzteile zur Energieversorgung.

4.2.1 Lasereinheit

Die Funktion der Lasereinheit ist die Versorgung der Trackermodule mit Laserlicht aus vier frequenzstabilisierten Helium-Neon Lasern mit Faradayisolatoren. Das Stabilisierungsverfahren basiert auf dem Zwei-Moden-Vergleichsverfahren. Durch die Regelung der Resonatorenlänge werden die beiden Moden mit unterschiedlicher linearer Polarisation auf ein konstantes Intensitätsverhältnis thermisch geregelt. Nach einer geringen Einlaufzeit beträgt die Frequenzstabilisierung des Lasers $u(f)/f < 2 \cdot 10^{-8}$ bei einer Wellenlänge von 632,9914 nm [15, 32, 80, 95]. Die stabilisierte Mode wird aus dem Laserrohr mittels eines Polfilters herausgekoppelt. Um Störreflexionen (Rückreflexion des Lichtes in den Laser) zu vermeiden, wurde in den Strahlengang ein optischer

Isolator eingebaut. Die Lasereinheit ist in einem zylindrischen Gehäuse untergebracht und verfügt über eine LWL-Einkoppel-Vorrichtung. Der Singlemode-LWL leitet den Laserstrahl zum Trackerkopf.

4.2.2 Auswerteeinheit des Trackermoduls

Die elektrischen Signale des Trackerkopfes werden in der Auswerteeinheit für die Weiterverarbeitung im Echtzeitsystem aufbereitet. Die Auswerteeinheit des Trackerkopfes enthält die Elektronik zur Signalverarbeitung der 4QD sowie des Interferometers, die als modulare Einsteckkarte in das 19-Zoll-Rack eingeschoben werden können.

Signalverarbeitung des Interferometers

Die Verarbeitung des Längenmesswertes ist in drei Module unterteilt, welche aus einer Eingangs-, einer Regler- sowie einer Demodulationskarte bestehen. Die vom Trackerkopf vorverstärkten Interferenzströme ($i_{0^\circ}, i_{90^\circ}, i_{180^\circ}, i_{270^\circ}$) werden im Eingangsmodul in gleichanteilfreie Sinus- und Cosinussignale zusammenschaltet, welche auch als Quadratursignale ($u_{\text{Sin}}, u_{\text{Cos}}$) bezeichnet werden [2, 14, 15]. Die Eliminierung der Gleichanteile erfolgt durch Differenzenbildung der Interferenzsignale i_{0° und i_{180° bzw. i_{90° und i_{270° . Dadurch werden Störungen unterdrückt und eine Auswertung der Längenmesswerte ermöglicht, die unabhängig von den Intensitätsschwankungen der Laserquelle sowie den Intensitätsänderungen im Messstrahl des Trackermoduls ist. Diese Störungen liegen aufgrund der unterschiedlichen Reflexionseigenschaften des Messreflektors vor [15, 32].

Nach der Differenzenbildung werden die Quadratursignale durch die Reglerkarte auf eine definierte Amplitude verstärkt. Bei diesem Vorgang entsteht durch die Nichtlinearität in der Optronik ein Restgleichanteil (Restoffset) in den Quadratursignalen, der mit Hilfe der Reglerkarte abgeglichen bzw. kompensiert wird. Die Verwendung von zwei Quadratursignalen erlaubt die Detektion der Richtungsumkehr bei einer Bewegung des Messreflektors. Für die Berechnung des Längenmesswertes werden die aufbereiteten Quadratursignale in der Demodulationskarte zunächst in digitale 12-Bit-Signale gewandelt. Bei einer Bewegung des Messreflektors entsteht durch die Quadratursignale eine kreisförmige Lissajous-Figur, die in 4096 Inkremente aufgeteilt ist. Mittels eines Oszillators werden die Inkremente abgetastet und entsprechend der Bewegung gezählt. Eine volle Umdrehung der Lissajous-Figur von 2π rad entspricht einer Bewegung des Messreflektors um die Hälfte der verwendeten Laserwellenlän-

ge [2, 15, 32]. Durch die Anzahl der gezählten Inkremente n_I sowie die Information über die Wellenlänge λ in der Luft kann der relative Längenmesswert $\Delta\ell$ wie folgt bestimmt werden:

$$\Delta\ell = \frac{n_I \cdot \lambda}{8192}. \quad (4.1)$$

Für $n_I = 1$ ergibt sich nach Gleichung (4.1) eine Längenauflösung der Demodulationskarte von rund 0,08 nm. Die Ausgabe des Längenmesswertes erfolgt über ein 32-Bit-Integer-Signal, das durch eine Berechnungsvorschrift in einen Längenmesswert umgerechnet werden muss. Zusätzlich verfügt die Karte über zwei digitale Eingänge zur Steuerung. Das ZERO Signal setzt den Zählerstand der Inkremente zurück. Über das CLOCK Signal werden die 32-Bit-Werte bei steigender Flanke in einem Register gespeichert. Nach einer Verzögerung von ungefähr 220 ns können die gespeicherten Werte von der nachgeschalteten Hardware übernommen werden [81]. Für die Versorgung und Auswertung des Trackerkopfes stehen zwei 19-Zoll-Einschübe zur Verfügung. Jeder Einschub enthält wiederum zwei Lasereinheiten sowie zwei Auswerteeinheiten des Trackerkopfes.

Signalverarbeitung der 4QD

Die Photoströme der 4QD werden zunächst durch Transimpedanzverstärker verstärkt und in normierte Spannungen (0 V bis 10 V) umgewandelt. Durch einen einstellbaren Widerstand wird der Verstärker anhand der Intensität des einfallenden Strahls abgestimmt. Anschließend werden aus den Spannungen ($u_I, u_{II}, u_{III}, u_{IV}$) der Quadranten Differenzen, Summen sowie Gesamtsummen gebildet, die zur Berechnung der horizontalen Position (x_{4QD}) sowie der vertikalen Position (y_{4QD}) des Strahls auf der Vierquadrantendiode verwendet werden. Die Gleichungen für die Berechnung der Positionen nach Abbildung 2.3b können aus [72] entnommen werden. Sie sind wie folgt definiert:

$$x_{4QD} = \frac{(u_I + u_{II}) - (u_{III} + u_{IV})}{u_{\text{Sum}}} \cdot k_{QDx} \quad (4.2)$$

$$y_{4QD} = \frac{(u_I + u_{IV}) - (u_{II} + u_{III})}{u_{\text{Sum}}} \cdot k_{QDy} \quad (4.3)$$

$$u_{\text{Sum}} = u_I + u_{II} + u_{III} + u_{IV}. \quad (4.4)$$

In den Gleichungen (4.2), (4.3) repräsentieren die römischen Ziffern die jeweiligen Quadranten. Die Normierung mit der Gesamtsumme u_{Sum} aus allen Quadranten

dient der Störunterdrückung, somit werden die berechneten Positionen von Intensitätsschwankungen befreit und erreichen eine Auflösung in Submikrometerbereich. Die Positionen (x_{4QD}, y_{4QD}) sowie die Gesamtsumme werden als analoge Signale (0 V bis 10 V) ausgegeben. Mit den Parametern (k_{QDx}, k_{QDy}) können die gemessenen Spannungen in eine Längeneinheit umgerechnet werden. Durch eine Sub-D Buchse am Ausgang der Einsteckkarte können die Signale für die weitere Verwendung abgegriffen werden.

4.2.3 Treiberelektronik des Strahlablenssystems

Die Ansteuerung eines Strahlablenssystems ist in der Treiberelektronik (Abbildung 4.7) integriert, die aus mehreren elektronischen Komponenten wie Mikroprozessor, Analog/Digital (A/D)- und Digital/Analog (D/A)-Wandler, Leistungsverstärker etc. besteht. Die Treiberelektronik [11] steuert einen x-Scanner sowie einen y-Scanner und verfügt über zwei analoge Ein- sowie Ausgänge. Die analogen Eingänge ermöglichen das Einlesen der Winkelsollwerte, welche als Spannungssignale vorliegen. Dabei ist das Spannungssignal ($\pm 10\text{ V}$) proportional zum mechanischen Auslenkungswinkel ($\pm 15^\circ$) des Scanners. Die Messung des mechanischen Auslenkungswinkels für den jeweiligen Scanner wiederum erfolgt durch den am Scanner integrierten Winkelsensor. Die Treiberelektronik wandelt die vom Winkelsensor gemessenen Signale in ein analoges Spannungssignal ($\pm 3\text{ V}$) um. Über die analogen Ausgänge können die Winkelsignale (x-Scanner und y-Scanner) ausgelesen werden. In der Treiberelektronik wird das gemessene Winkelsignal für die Steuerung der Scanner in einem geschlossenen Regelkreis verwendet. Der im Mikroprozessor implementierte PID-Regleralgorithmus rechnet aus dem Fehler zwischen dem Winkelsollwert und dem gemessenen Winkelwert eine Stromgröße aus, die eine rotatorische Bewegung des Scanners bewirkt. Die Parameter des Reglers werden über eine vom Hersteller mitgelieferte Software eingestellt. Die Spannungsversorgung der Treiberelektronik erfolgt durch ein Schalt-



Abbildung 4.7:
Die verwendete Treiberelektronik

netzteil mit Mehrfachquellen der Firma PeakTech [71]. Das Schaltnetzteil liefert eine Ausgangsleistung von 144 W pro Ausgang bei einer Spannung von 24 V.

4.2.4 Umweltsensoren

Wie bereits in Abschnitt 4.2.2 erläutert wurde, wird die interferometrische Messlänge über die Wellenlänge des stabilisierten He-Ne-Lasers berechnet (siehe Gleichung (4.1)). Da die Wellenlänge im Umgebungsmedium der Luft ausbreitet, kann diese in Abhängigkeit der Brechzahl ändern. Der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge des Lasers in der Luft und der Brechzahl kann wie folgt beschrieben werden:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}. \quad (4.5)$$

In Gleichung (4.5) beschreibt λ_0 die Wellenlänge des Lasers im Vakuum, n die Brechzahl und λ die Wellenlänge im Umgebungsmedium der Luft. Hierbei ist die Brechzahl wiederum eine Funktion der Temperatur, Luftdruck und Feuchte, welche durch die Edlén-Formel beschrieben wird [5].

Um diesen Einflussfaktoren zu kompensieren, wird für diesen Aufbau Temperatur-, Druck- und Feuchtesensor verwendet. Dabei werden Temperatur- und Feuchtefühler mit integriertem Messumformer der Firma B+B Thermo-Technik GmbH verwendet [4], welche über einen analogen Spannungsausgang verfügen. Eine Spannung von 0 V bis 10 V entspricht hierbei einer Temperatur von -30°C bis 70°C und einer Feuchte von 0 % bis 100 %. Das Sensormodul hat ein Fühlerrohr aus Edelstahl mit Polyethylen (PE)-Sinterfilter und ist vorkalibriert. Neben dem Sensormodul wird in dieser Arbeit ein Drucksensor der Firma Hydrogen Instruments GmbH verwendet [34]. Der Drucksensor funktioniert nach dem piezoresistiven Prinzip und verfügt über einen Spannungsausgang von 0 V bis 5 V, welchen einen Absolutdruck von 0 bar bis 2 bar entspricht. Der Sensor ist vorkalibriert und wird in das Sensormodul integriert.

4.2.5 Echtzeit-Signalverarbeitung

Die analogen und digitalen Signale der Versorgungs- und Auswerteeinheiten sind an einem Anschlussrack angeschlossen, das die Signale an die Echtzeit-Signalverarbeitung weiterleitet. Das verwendete System ist von der Firma dSPACE [16] und dient zur Messwerterfassung, Positionsberechnung, Positionsregelung sowie der gesamten Ablaufsteuerung des vorgestellten Messsystems. Kernstück des Systems ist eine Echt-

zeitbearbeitungshardware mit verschiedenen modularen Einsteckkarten, die durch ein spezielles Bussystem miteinander verbunden sind. Eine Prozessorkarte (DS1006) mit einem 3 GHz Quad-Core Prozessor führt die rechenintensiven Algorithmen in Echtzeit aus. Zusätzlich sind Input/Output (I/O)-Karten in der Echtzeitbearbeitungshardware integriert, welche die Signale der Versorgungs- und Auswerteeinheiten einlesen bzw. ausgeben. Die I/O-Karten sowie deren jeweilige Verwendungszwecke sind wie folgt aufgelistet:

- 2 × digitale I/O-Karten (DS 4004) mit jeweils 96 bidirektionalen Kanälen für die Verarbeitung der Interferometersignale sowie zum Ein- und Ausschalten der Scanner
- 2 × High-Speed-A/D-Karten (DS 2004, 800 ns A/D-Wandlungszeit, 16-Bit-Auflösung) mit jeweils 16 Kanälen zum Einlesen der analogen Winkelsignale und der 4QD-Signale
- 2 × High-Resolution-D/A-Karten (DS 2102, 16-Bit-Auflösung) mit jeweils 6 Kanälen zur Steuerung der Scanner

Neben der eingesetzten Echtzeitbearbeitungshardware verfügt das System über eine Software „ControlDesk“, die auf einem Host-PC installiert wird. Die Software dient der Überwachung der experimentellen Prozesse und ermöglicht dem Anwender im laufenden Betrieb einen Zugriff auf die Parameter der übersetzten Echtzeitmodelle. Mit Hilfe der Software Matlab/Simulink [55] werden die entworfenen Algorithmen als Echtzeitmodelle erstellt. Durch die in der Matlab Real-Time-Interface (RTI)-Bibliothek enthaltenen Funktionsblöcke werden die Ein- bzw. Ausgänge der Echtzeitmodelle mit den I/O-Karten verknüpft. Die Real-Time-Workshop (RTW)-Bibliothek übersetzt automatisch die erstellten Echtzeitmodelle in die Programmiersprache C. Der entstehende C-Code wird kompiliert, dann direkt auf die Prozessorkarte heruntergeladen und gestartet. Der Datenaustausch zwischen der Prozessorkarte und dem Host-PC erfolgt über ein Industry Standard Architecture (ISA)-Bussystem, welche durch eine Personal Computer Memory Card International Association (PCMCIA)-Schnittstelle am Host PC realisiert wird. Das System arbeitet mit einer Abtastfrequenz von 10 kHz.

4.3 Multi-Lasertracker-System

Die vorgestellten vier Trackermodule sowie deren modulare Versorgungs- und Auswerteeinheiten sind essentielle Bestandteile des Gesamtsystems und stellen das Funda-

ment für die berührungslose 3-D-Messung eines Messobjektes dar. Jedes Trackermodul ist mit einem Strahlablesystem aus hochdynamischen Galvanometer-Scannern sowie einem Interferometer aufgebaut und ist somit in der Lage, eine statische als auch dynamische Längenmessung in Nanometerauflösung durchzuführen. Die hohe Messauflösung des Interferometers soll dazu beitragen, die gestellten Anforderungen aus Kapitel 3 hinsichtlich der 3-D-Positionsgenauigkeit zu erfüllen.

Damit der experimentelle Aufbau zu einem vollständigen Messsystem wird, das ein Messobjekt im Raum verfolgt und dabei die 3-D-Position bestimmt, müssen die notwendigen Algorithmen entwickelt werden. Das aufgebaute Messsystem wird in dieser Arbeit daher als Multi-Lasertracker-System (MLTS) bezeichnet, welches in Abbildung 4.8 dargestellt ist. Die Funktionalität sowie die Genauigkeit des MLTS wird durch die Algorithmen bestimmt, welche im folgenden Kapitel vorgestellt werden. Hierzu zählen

- Lokalisierung des Messreflektors (Kapitel 5)
- Regelung der Strahlnachführung (Kapitel 6)
- 3-D-Messverfahren (Kapitel 7)
 - Winkel- und Längenmessung (Triangulation)
 - Multilateration
- Kalibrierung (Kapitel 8)
 - Systemparameter
 - Standortparameter

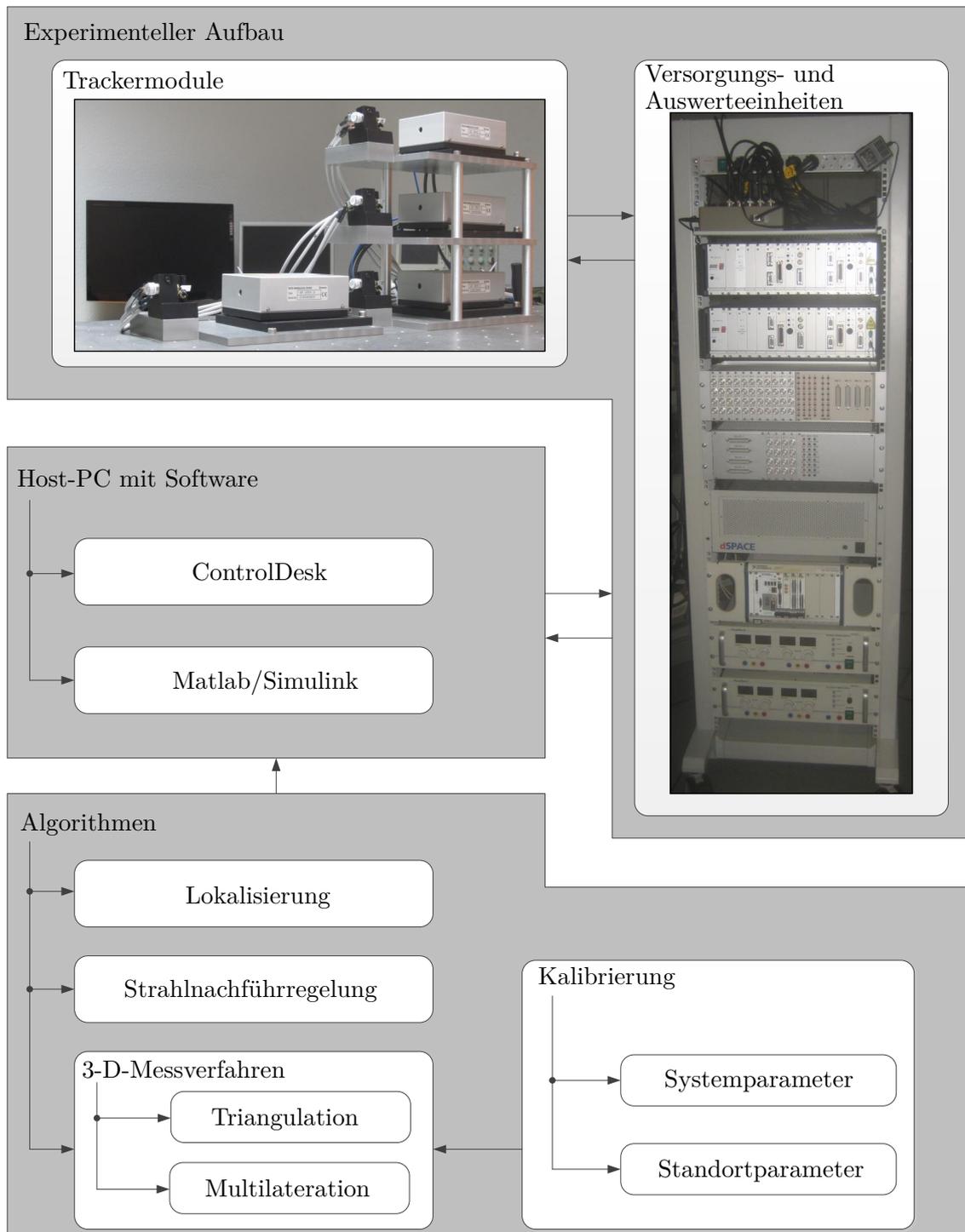


Abbildung 4.8: Die Gesamtstruktur des MLTS

5 Lokalisierung des Messreflektors

Die Lokalisierung ist die gezielte Ansteuerung der Scanner, um den Ort des Messreflektors in einem vom Trackermodul vorgegebenen Arbeitsbereich zu identifizieren. Das Trackermodul detektiert die Position des Messreflektors, wenn der durch das Strahlableitungs-system reflektierte Laserstrahl auf den Messreflektor trifft und wenn der rücklaufende Messstrahl im Trackerkopf auf die 4QD trifft. Für den Entwurf des Lokalisierungsalgorithmus bildet das Strahlableitungs-system ein kartesisches Koordinatensystem \mathbf{S}_L , das in der Abbildung 5.1 dargestellt ist. Das Strahlableitungs-system ist ideal kardanisch aufgehängt. Die Drehachsen der Scanner entsprechen der x- und y-Achse und aus deren Kreuzprodukt wird die z-Achse definiert. Der Laserstrahl startet vom Koordinatenursprung. Der Messbereich vom Trackermodul, der gleichzeitig als Suche-bene \mathbf{E} zu betrachten ist, berechnet sich aus dem maximalen Drehwinkel (φ_x, φ_y) sowie dem Abstand ℓ_z zwischen Ursprung und Messreflektor entlang der negativen z-Achse. Der Suchpunkt \mathbf{P}_E hat die Koordinaten (x_E, y_E) . Mit zunehmendem Abstand wächst die Fläche der Ebene in Abhängigkeit der Winkel. Bei einem Abstand ℓ_z von 1 m beträgt die maximal zu lokalisierende Fläche rund 1 m^2 . Wird der Laserstrahl mit einem Durchmesser von 2 mm betrachtet, dann ergeben sich insgesamt für die zu durchsuchende Fläche rund 320000 Suchpunkte. Die Suchzeit beträgt bei einer idealen Abtastung von 10 kHz rund 32 Sekunden. Das hat jedoch

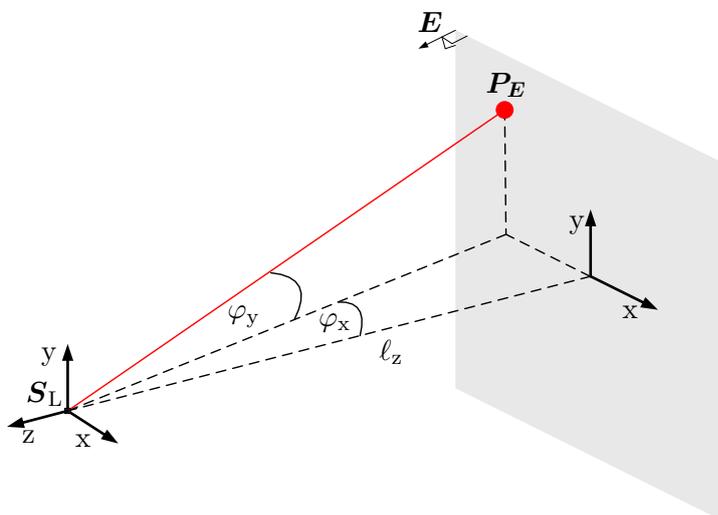


Abbildung 5.1:
Suchraum des Messreflektors

zur Folge, dass die Stellantriebe enorm belastet werden. Bei einer Verdopplung des Abstandes ℓ_z steigt die Anzahl der Suchpunkte um etwa das 5-fache. Die Suche würde dann mehrere Minuten benötigen.

Es werden Forderungen nach geringer Belastung (Winkelbeschleunigung) der Drehantriebe sowie einer zeiteffizienten Lokalisierung an den entwickelten Suchalgorithmus gestellt. Für diese Aufgabenstellung werden deterministische (Rechtecksuche, Spiralsuche) und stochastische (Zufallssuche) Suchalgorithmen untersucht und gegenüber gestellt. Der Lokisierungsalgorithmus mit den Suchpunkten wird zunächst in zweidimensionalen kartesischen Koordinaten entworfen. Anschließend werden die Suchpunkte in Winkelkoordinaten transformiert, die wie folgt berechnet werden [63, 82, 83]:

$$\varphi_x = \arctan \frac{x_E}{\ell_z} \quad (5.1)$$

$$\varphi_y = \arctan \frac{y_E}{\ell_z}. \quad (5.2)$$

5.1 Zufallssuche

Die Zufallssuche beruht auf einer diskreten Pseudo-Zufallszahlenfolge, welche die zweidimensionalen Koordinaten x und y durch einen Zufallsgenerator mit Normalverteilung zu jedem Tastschritt erzeugt. Hierbei wird für den Entwurf der Abstand zwischen Trackermodul und der Suchebene auf 1 m festgesetzt. Somit können die Grenzen für den Zufallsgenerator definiert werden. Um Aussagen über die Belastung der Scanner treffen zu können, müssen die Winkelgeschwindigkeit und -beschleunigung bei diesem Algorithmus untersucht werden. Die größte Belastung der Scanner wird erreicht, wenn zwischen zwei Punkten eine maximale Winkelauslenkung erfolgt. In diesem Fall ist eine maximale optische Auslenkung von 60° in einem Abtastschritt zu realisieren. Dies entspricht bei einer Abtastzeit von 10 kHz einer Winkelgeschwindigkeit von rund $1 \cdot 10^4 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ und einer Winkelbeschleunigung von rund $1 \cdot 10^{11} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$. Dies entspricht einer Suchgeschwindigkeit in der Suchebene von $1,41 \cdot 10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Der verwendete Scanner kann die dafür benötigten Stellgrößen nicht realisieren. Aus diesem Grund wird bei der Zufallssuche eine konstante Suchgeschwindigkeit für die Bewegung des Spiegels zwischen zwei zufallsgenerierten Punkten in der Suchebene definiert, um sprunghafte Größenänderungen in der Winkelgeschwindigkeit sowie Winkelbeschleunigung zu vermeiden. Somit wird zwischen zwei Zufallspunkten eine Gerade approximiert, die wiederum aus mehreren Suchpunkten besteht, welche in Abhängigkeit der Abtastzeit sowie der vorgegebenen Suchgeschwindigkeit entworfen

werden. In Abbildung 5.2 ist eine Suchfolge in der x-y-Ebene dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Suchpunkte im Raum ungleichmäßig verteilt sind, wodurch große Lücken ohne Abtastung entstehen. Dabei ergeben sich auch Punkte, welche der Laserstrahl mehrmals abtastet. Auch zu sehen sind die ständigen Richtungsänderung der approximierten Geraden, welche die Antriebe enorm belasten. Die ungleichmäßige Verteilung der Suchpunkte bei diesem Algorithmus führt dazu, dass keine Vorhersage über die Suchzeit getroffen werden kann, also wann der Suchraum vollständig abgetastet wird. Dadurch kann die Suche eine übermäßige Suchzeit in Anspruch nehmen.

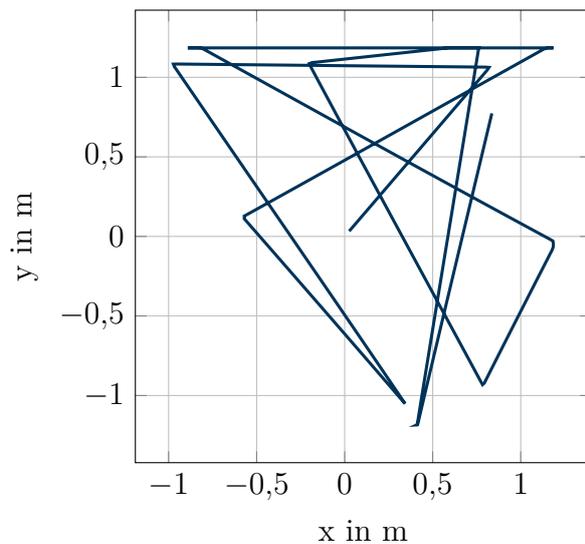


Abbildung 5.2:
Punktverteilung bei der Zufallssuche

5.2 Rechtecksuche

Die Rechtecksuche ist im Vergleich zur Zufallssuche ein deterministisches Suchverfahren mit gleichmäßiger Punktverteilung. Für die Suche wird ein Rechteck als Funktion der Zeit entworfen, das sich aus vier Segmenten ($S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}$) zusammensetzt (siehe Abbildung 5.3). Die Segmente werden durch lineare mathematische Gleichungen beschrieben und auf Basis der gegebenen Suchebene entworfen. Anders als bei der Zufallssuche kann eine Suchzeit vorgegeben werden, in der der Laserstrahl auf der Suchebene von einem Startpunkt $\mathbf{P}_{\text{Start}}$ bis zum Endpunkt \mathbf{P}_{End} läuft. Dabei gibt die Suchfrequenz an, wie viele Rechtecktrajektorien der Scanner in einer Sekunde zeichnen soll. Aus der Frequenz und der Suchzeit kann die Gesamtanzahl der Rechtecktrajektorien auf der Suchebene ermittelt werden. Anders als beim Zufallsalgorithmus wird die Suchgeschwindigkeit auf der Suchebene berechnet. Sie ist eine Funktion der Suchfläche, der Suchfrequenz sowie der vorgegebenen Suchzeit. Bei der Rechtecksuche

rotiert immer nur ein Spiegel zu einem bestimmten Zeitpunkt. Wie in Abbildung 5.3 zu sehen ist, wird der Laserstrahl zunächst in y -Richtung beim konstanten x -Wert bewegt, anschließend folgt die Bewegung in der x -Richtung. Bei diesem Verlauf wird der Scanner in der y -Richtung stärker belastet. Daher erfolgt nach jedem Suchlauf eine Drehung um 90° , um die Belastung auf die Scanner gleichmäßig zu verteilen. Die Belastung ist jedoch über den gesamten Suchraum gleichförmig durchgehend relativ hoch.

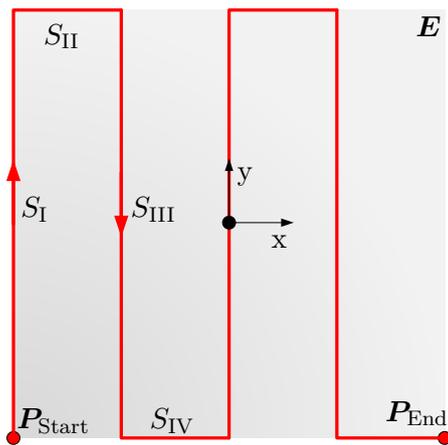


Abbildung 5.3:
Verlauf der Rechtecksuche

5.3 Spiralsuche

Neben dem Rechteckalgorithmus ist der Spiralalgorithmus ein weiteres deterministisches Verfahren, mit dem eine beherrschbare Punktverteilung im Raum erzielt werden kann. Dabei wird für den Entwurf eine arithmetische Spirale verwendet, welche die Eigenschaft hat, dass der Radius bei einer Drehbewegung proportional zum Drehwinkel wächst. Die Koordinaten (x_E, y_E) auf der Suchebene werden wie folgt berechnet:

$$x_E = v_S \cdot t_k \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_k) \quad (5.3)$$

$$y_E = v_S \cdot t_k \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_k). \quad (5.4)$$

Zu jedem Abtastschritt t_k werden die Suchkoordinaten berechnet. Die Geschwindigkeit auf der Suchebene v_S errechnet sich durch die gewünschte Skalierung A_S (Endradius) und die vorgegebene Zeitspanne T_Z , welche den Radius vergrößert wird ($v_S = A_S \cdot T_Z^{-1}$). Über die Skalierung kann eine Variation des maximalen Endradius erfolgen. Die Frequenz f ist ein Maß dafür, wie viele Umdrehungen in der Suchzeitspanne stattfinden. Dieser Wert kann in Verbindung mit dem Endradius als

Auflösung verstanden werden. Der Abstand der Messpunkte in radialer Richtung (Windungsabstand) und der Abstand der Messpunkte auf der Kreisbahn hängen sehr stark von der einstellbaren Frequenz f ab. Eine Erhöhung der Kreisfrequenz führt zu einer besseren Suchraumabtastrung, jedoch auch zu einer höheren mechanischen Belastung der Scanner. Wird die Zeitspanne erhöht, in welcher die Spirale abgefahren wird, verändert sich unter gleichbleibender Kreisfrequenz durch die zeitliche Skalierung die abgefahrte Spirale nicht. Es verringert sich lediglich der Abstand zwischen den Messpunkten, an denen die Signale aufgenommen werden. Ein Suchzyklus besteht dabei aus einer spiralförmigen Bewegung ausgehend von einem definierten Zentrum bis zu einem vorgegebenen maximalen Radius (hinlaufende Spirale) und abschließender Rückkehr zum Zentrum. Die Zeitspanne, in der das System diese Bewegung ausführt, wird als Suchzeitspanne bezeichnet. Optional kann für die Rückkehr des Laserstrahls in das Zentrum auch der sogenannte „Softmode“ verwendet werden, um eine sprungförmige Belastung der Scanner zu vermeiden. Bei diesem Modus springt der Laserstrahl nicht in die Zentrumsposition, sondern läuft spiralförmig in das Zentrum zurück (rücklaufende Spirale siehe Abbildung 5.4) [82].

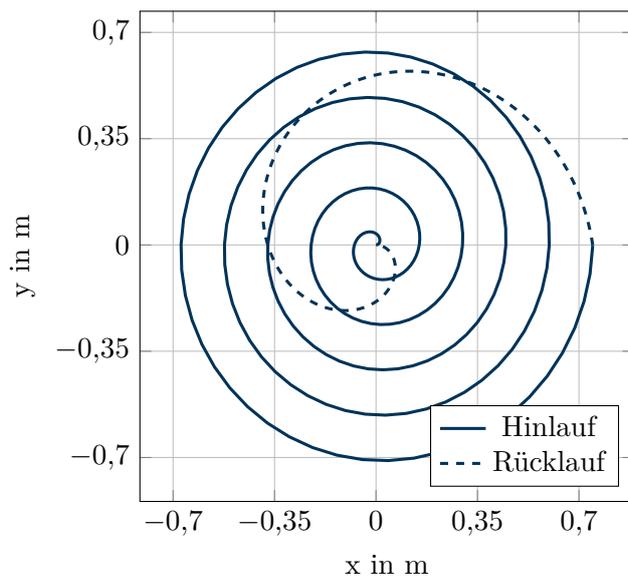


Abbildung 5.4:

Der Verlauf der Spiralsuche bei aktiviertem „Softmode“

5.4 Bewertung der drei Suchalgorithmen

Es stehen drei Lokisierungsalgorithmen zur Auswahl, zum einen der stochastische Suchalgorithmus und zum anderen die deterministischen Suchalgorithmen. Der stochastische Algorithmus ist aperiodisch und hat keine Frequenzinformation. Dadurch ist die Verteilung der Suchpunkte im Raum ungleichmäßig. Dieser Algorithmus ist

für eine vorgegebene Suchdauer, in dem der Laserstrahl den vollständigen Suchraum abtasten soll, nicht geeignet. Demnach sind die deterministischen Algorithmen dem stochastischen Algorithmus vorzuziehen.

Zu den deterministischen Suchalgorithmen zählen die Rechteck- und Spiralsuche, welche die Punkte gleichmäßig im Raum verteilen. Werden die beiden Suchverfahren miteinander verglichen, so weist die Rechtecksuche bei gleicher Einstellung eine bessere Punktverteilung als die Spiralsuche auf. Ein Vorteil der Rechtecksuche ist, dass der Punktabstand nicht vom Radius abhängt. Dadurch sind die Suchpunkte im Raum besser verteilt. In Abbildung 5.5 sind die Winkelbeschleunigungen der beiden Verfahren bei gleichem Suchraum und gleicher Suchzeit dargestellt. Bei der Spirale steigt die Belastung mit wachsendem Radius an. Im Gegensatz hierzu ist die maximale Belastung bei Rechtecksuche konstant, wobei die Belastung bei der Rechtecksuche rund 40-mal höher ist als bei der Spiralsuche. Der Vorteil der geringeren Beschleunigung bei der Spiralsuche wird gegenüber dem Vorteil der gleichmäßigeren Punktverteilung bei der Rechtecksuche höher gewichtet. Demnach ist die Spiralsuche der Rechtecksuche vorzuziehen.

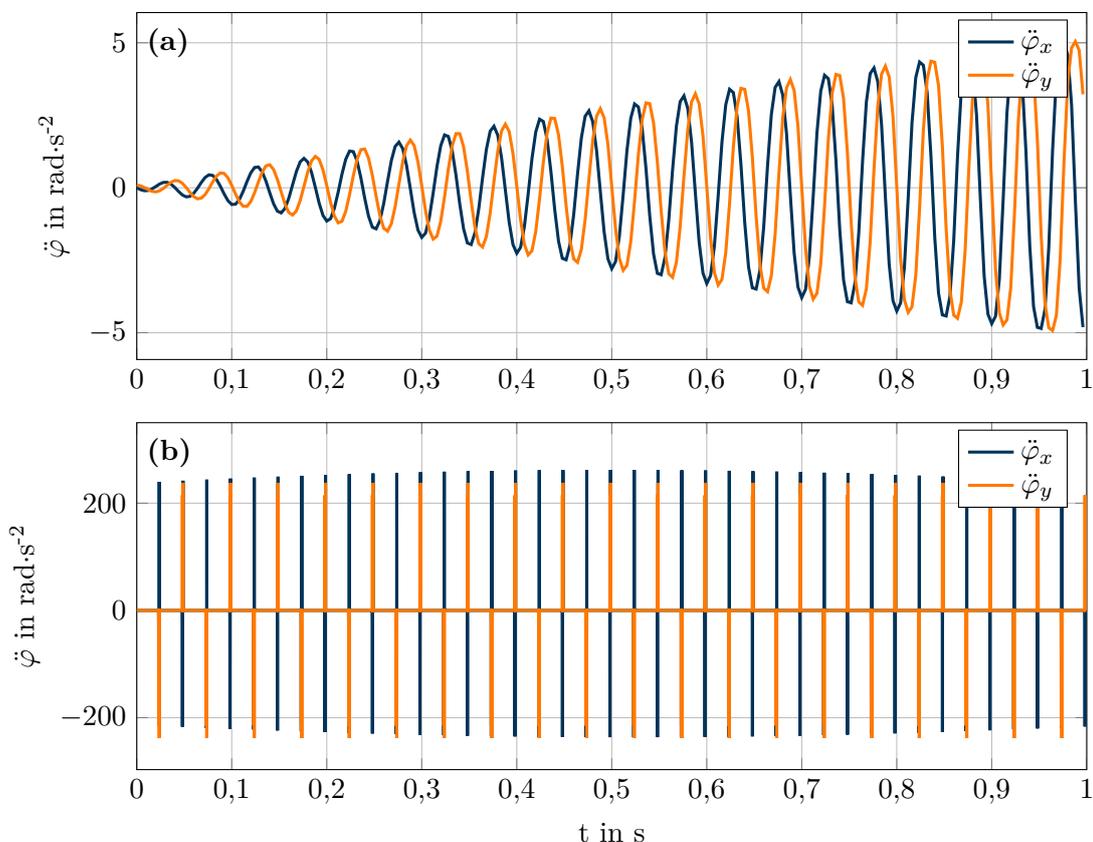


Abbildung 5.5: Winkelbeschleunigung: (a) Spiralsuche; (b) Rechtecksuche

5.5 Erweiterung des Spiralsuchalgorithmus

Ist der Abstand der Spiralwindungen zu groß, kann es vorkommen, dass sich das Zentrum des Messreflektors genau zwischen zwei Spiralwindungen befindet, und so nicht detektiert werden kann. Dieses Problem tritt auch auf, wenn die Punkte auf einer Windung, an denen die Position abgetastet wird, aufgrund einer zu hohen Bahngeschwindigkeit, einen zu großen Abstand aufweisen. Die Distanz zwischen den Windungen sowie die Entfernung zwischen den Tastpunkten nehmen mit wachsendem Abstand zum Trackermodul zu. Abbildung 5.6 stellt diesen Sachverhalt dar. Deutlich zu erkennen ist hier der größere Windungsabstand. Logisch ist auch, dass die Spirale in Abbildung 5.6b einen größeren Weg zurücklegen muss. Da in beiden Fällen gleich viele Werte pro Sekunde aufgenommen werden, bedeutet dies einen größeren Abstand der Punkte auf der Windung. Aus diesem Grund wird der Suchalgorithmus um einen Phasenversatz φ_o oder einen Zeitversatz t_o erweitert. Durch Variation dieser Parameter nach einem erfolglosen Durchlaufen der Spirale, wird der wiederholte Ablauf der gleichen Spirale unterbunden. Um die Abtastpunkte besser im Raum zu verteilen, werden für den Entwurf der Spirale die bereits verwendeten Gleichungen (5.3) und (5.4) wie folgt erweitert [82, 83]:

$$x_E = v_S \cdot (t_k + t_o) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot (t_k + t_o) + \varphi_o) \quad (5.5)$$

$$y_E = v_S \cdot (t_k + t_o) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot (t_k + t_o) + \varphi_o). \quad (5.6)$$

Für den Phasen- und Zeitversatz existiert ein Zähler. Er gibt an, welcher Offset verwendet werden soll. Die verwendeten Offsets sind Bruchteile einer vorgegebenen Längsbasis. Eine solche Längsbasis ist bei diesem Entwurf eine Abtastzeit T_S sowie einen Winkel von 2π rad.

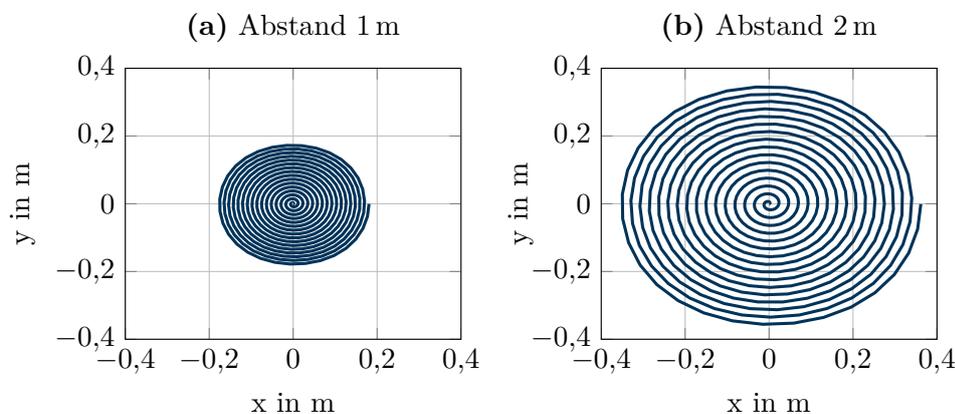


Abbildung 5.6: Einfluss des Abstandes auf den Windungsabstand der Spirale

Über den Zähler werden die entsprechenden Offsets (siehe Tabelle 5.1) ausgewählt. Durch die somit generierte Offsetfolge werden immer die Zwischenräume der bereits abgetasteten Messpunkte mittig abgetastet. Die Genauigkeit verdoppelt sich somit mit jeder Erhöhung der Teilungstiefe. Der Zeitversatz sorgt dabei für eine höhere Genauigkeit auf einer Spiralwindung und der Phasenversatz für eine Verringerung des Abstands zwischen den Windungen (siehe Abbildung 5.7). Sind die Optionen Phasenversatz (Spiraldrehung) und Zeitversatz aktiv (die Teilungstiefen sind größer Null), wird zuerst die Spiraldrehung durchgeführt bis alle Offsets der Folge verwendet wurden. Erst danach erhöht sich der Zählerstand für die zeitlichen Offsets um eins und die Offsetfolge für die Spiraldrehung beginnt vom vorn. Der maximale Zählerstand Q_Z bzw. die Anzahl der zusätzlich zu fahrenden Spiralen berechnet sich nach Gleichung (5.7).

$$Q_Z = 2^T - 1 \tag{5.7}$$

Tabelle 5.1: Beispiele für Offsetreihenfolgen

Teilungstiefe T	Zähler	Offsetfaktor k_{off}	Offset bei Längenbasis	
			$\varphi_o = 2\pi \cdot k_{\text{off}}$	$t_o = T_s \cdot k_{\text{off}}$
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
	1	0,5	π	0,00005
2	0	0	0	0
	1	0,5	π	0,00005
	2	0,25	$1/2\pi$	0,000025
	3	0,75	$3/2\pi$	0,000075
3	0	0	0	0
	1	0,5	π	0,00005
	2	0,25	$1/2\pi$	0,000025
	3	0,75	$3/2\pi$	0,000075
	4	0,125	$1/4\pi$	0,0000125
	5	0,375	$3/4\pi$	0,0000375
	6	0,625	$5/4\pi$	0,0000625
	7	0,875	$7/4\pi$	0,0000875
...

In Abbildung 5.7 sind vier nacheinander abgefahrene Spiralen zu sehen, welche mit einer Teilungstiefe $T = 2$ berechnet wurden. Dadurch wird eine deutlich dichtere Suchraumabdeckung erreicht. Diese Suchraumabdeckung ist im Gegensatz zur Frequenzerhöhung zwar zeitintensiver, führt jedoch zu keiner höheren mechanischen Belastung der Scanner. Ist der Abstand gering, so genügt meist bereits die Grundspirale, um den Messreflektor zu finden. Andernfalls wird der beschriebene erweiterte Suchalgorithmus angewendet.

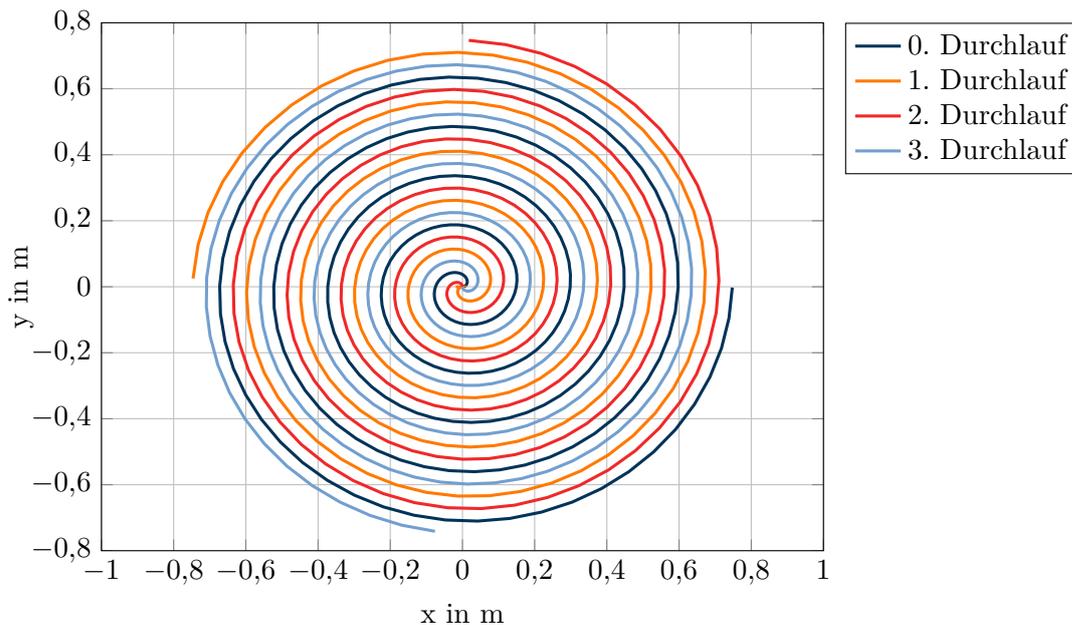


Abbildung 5.7: Suchraumabdeckung mit aktivierten Spirale, Teilungstiefe $T = 2$

5.6 Kommunikation zwischen den Trackermodulen

Die Spiralsuche ist für alle Trackermodule gleich gestaltet. Sofern mindestens zwei Trackermodule den Messreflektor gefunden haben, kann der entsprechende Punkt im Raum durch die Messmethode der Triangulation relativ genau ermittelt werden. Dadurch ist es möglich, über die Positionsdaten den Trackermodulen zu vermitteln, in welche Richtung diese den Laserstrahl auslenken müssen, um den Retroreflektor zu finden. Dies erfolgt über die Kommunikation zwischen den Modulen. Durch Auswertung des Summensignals der 4QD wird der Zustand (Angabe, ob ein Tracker den Reflektor gefunden hat) eines Trackermoduls ermittelt. Über diesen Zustand kann die Kommunikation entscheiden, welche Daten vom Trackermodul zur Positionsermittlung verwendet werden können. Abbildung 5.8 zeigt ein Beispiel für einen Kommunikationsablauf. Haben zwei Trackermodule T_1 und T_3 den Messreflektor

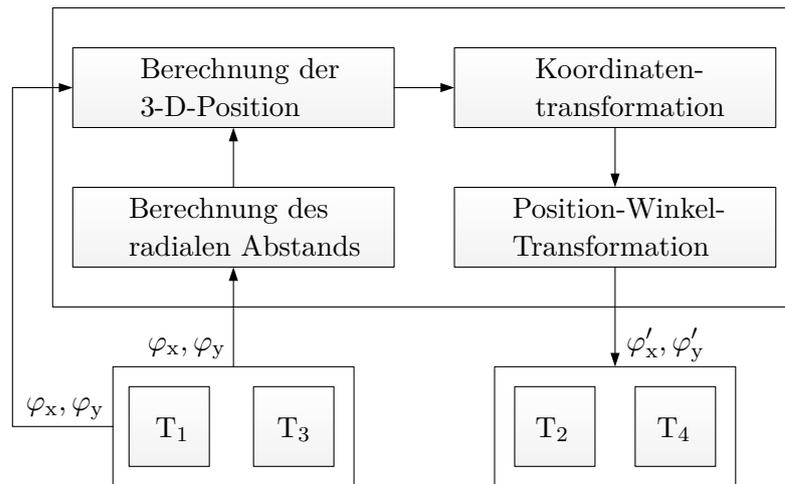


Abbildung 5.8: Der Kommunikationsablauf bei der erweiterten Spiralsuche [64]

gefunden, so wird die Kommunikation eingeschaltet. Diese berechnet für T_1 und T_3 zunächst die fehlenden radialen Abstände zwischen Trackermodulen und Messreflektor auf Basis der Winkelinformationen. Anschließend erfolgt die Berechnung der 3-D-Position in einem globalen Koordinatensystem. Im dritten Schritt wird die globale 3-D-Position in das lokale Koordinatensystem des jeweiligen Trackermoduls transformiert (Koordinatentransformation). Abschließend werden die entsprechenden Auslenkungen der einzelnen Scanner aus den Positionsdaten durch das inverse Strahlableitmodell errechnet (Position-Winkel-Transformation). Die ermittelten Auslenkungen sowie die Information, dass diese verwendet werden können, werden an die Trackermodule T_2 und T_4 weitergeleitet. Somit werden die Ablenkspiegel von T_2 und T_4 entsprechend der errechneten Auslenkungen ausgerichtet. Die durch die Triangulation berechneten Auslenkungen können jedoch erhebliche Abweichungen aufweisen. Daher wird die empfangene Auslenkung als Mittelpunkt einer kleinen Spirale mit hoher Auflösung verwendet, um im Bereich der ermittelten Position eine hochgenaue Suche zu ermöglichen. Durch die Verwendung der Daten anderer Trackermodule kann der Suchprozess deutlich verkürzt werden. Bei Strahlverlust kann das Trackermodul bei vorhandenen Kommunikationsdaten den Messreflektor sehr schnell wieder finden. Resultat ist, dass die Dauer eines Strahlverlusts durch äußere Störung deutlich verringert wird [63, 64, 82].

6 Regelung der Strahlnachführung

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein Spiralalgorithmus für die Lokalisierung des Retroreflektors entworfen. Dabei wird das Intensitätssignal der 4QD als Abbruchbedingung für den Suchlauf verwendet. Steigt dieses Signal über einen vorgegebenen Schwellwert, so befindet sich der Laserstrahl im Messreflektor. In diesem Fall wird die Lokalisierung deaktiviert, und die aktuellen Stellgrößen der Scanner werden als konstanter Offsetwert für die Regelung gehalten. Es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass sich der Laserstrahl bei einem Suchabbruch im Zentrum des Messreflektors befindet. Die dabei vorliegende Abweichung des Laserstrahls zum Zentrum wird von der 4QD als horizontales sowie vertikales Positionssignal gemessen. Mithilfe dieser Messinformation kann der Laserstrahl durch die Ablenkeinheit so lange nachgeführt werden, bis er das Zentrum des Messreflektors trifft. Dieser rückgekoppelte Prozess der Strahlnachführung wird durch einen Regelkreis realisiert.

Abbildung 6.1 stellt den geschlossenen Regelkreis der Strahlnachführung als Blockschaltbild dar. Der Regelkreis besteht aus einem Regler sowie einer Strecke. Die Regelgröße y des Regelkreises enthält die Positionssignale (x_{4QD}, y_{4QD}) der 4QD. Da der Laserstrahl zum Ursprung ($x_{4QD} = y_{4QD} = 0$) der 4QD nachgeführt werden soll, handelt es sich bei diesem Regelkreis um eine Festwertregelung ($w = 0$). Die Aufgabe des zu entwerfenden Reglers ist, die entstehende Differenz (Regelfehler e) zwischen Führungs- und Regelgröße zu eliminieren. Der Regler berechnet also aus dem Regelfehler eine Stellgröße u , welche als Eingangsgröße auf die erweiterte Regelstrecke wirkt [23, 25, 26, 51, 79, 88, 96]. Dabei stellt die Treiberelektronik des Scanners die Stelleinrichtung dar und die 4QD repräsentiert die Messeinrichtung. Die eigentliche Regelstrecke ist der Scanner sowie der Lichtweg, welcher den Strahlengang

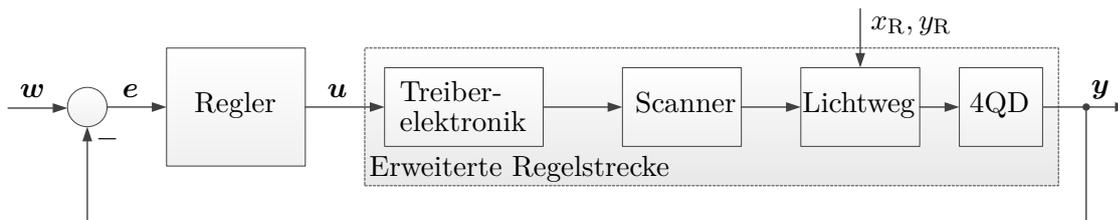


Abbildung 6.1: Blockschaltbild des Regelkreises für die Strahlnachführung

vom Ablenkspiegel bis zum Zentrum des Messreflektors beschreibt. Die Position des Messreflektors wird als äußere Störungen (x_R, y_R) auf der 4QD betrachtet. Um einen geeigneten Regler hinsichtlich der Stabilität sowie der Dynamik zu entwerfen, muss das Verhalten der erweiterten Regelstrecke bekannt sein. Es werden zwei Regelstrecken modelliert, die unabhängig voneinander zu betrachten sind. Anschließend wird auf Basis der hergeleiteten Modelle die wesentlichen Schritte beim Entwurf des Reglers vorgestellt.

6.1 Analyse der Regelstrecke

Um den Laserstrahl auf das Zentrum der 4QD nachzuführen, sind zwei Übertragungsfunktionen zur Beschreibung der Regelgrößen (x_{4QD}, y_{4QD}) herzuleiten. In Abbildung 6.2 ist die Regelstrecke für das x_{4QD} -Signal im Laplace-Bereich dargestellt, welche analog auf das y_{4QD} -Signal übertragen werden kann. Dabei beschreibt die Übertragungsfunktion $G_{Mx}(s)$ das dynamische Verhalten des x-Scanners und $G_{Lx}(s)$ den Strahlengang zwischen dem Scanner-Spiegel und dem Messreflektor. Die Übertragungsfunktion $G_{Zx}(s)$ stellt ein Störmodell dar, welches auf die Regelstrecke wirkt. Im Folgenden wird auf die einzelnen Teilstrecken eingegangen.

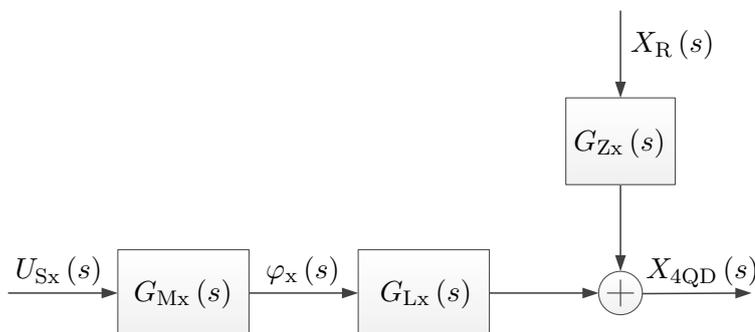


Abbildung 6.2:
Ersatzschaltbild der Regelstrecke für das x_{4QD} -Signal

6.1.1 Identifikation des Galvanometer-Scanners

Wie bereits in den Abschnitten 4.1 und 4.2.3 beschrieben wurde, ist in der Treiber-elektronik des Scanners ein Winkelregler integriert, der die Winkelposition einstellt. Der Scanner sowie dessen Treiber-elektronik stellt somit einen geschlossenen Winkelregelkreis dar, welcher hinsichtlich der Dynamik zu untersuchen ist. Zur Modellierung der Dynamik wird die Übertragungsfunktion herangezogen, die allgemein durch

$$G_M(s) = \frac{b_0 + b_1 \cdot s + \dots + b_m \cdot s^m}{a_0 + a_1 \cdot s + \dots + a_n \cdot s^n} \quad (6.1)$$

beschrieben ist. In Gleichung (6.1) sind a_i, b_i die Koeffizienten der Übertragungsfunktion $G_M(s)$. Die Ordnung des Zähler- bzw. des Nennerpolynoms der Übertragungsfunktion ist mit m bzw. n dargestellt. Der Parameter s beschreibt den Laplace-Operator.

Die Identifikation der Koeffizienten erfolgt mithilfe der experimentellen Modellbildung, welche aus den Eingangs- sowie Ausgangsmessdaten das dynamische Verhalten des Scanners bestimmt [66, 82, 83]. Dabei wird die Methode der Identifikation mittels Sprungantwort angewendet. Die Ansteuerung und Messwerterfassung werden aufgrund der hohen Dynamik des Scanners mit einem PCI eXtensions for Instrumentation (PXI)-System unter Verwendung einer Abtastfrequenz von 320 kHz durchgeführt [60]. Da die internen Größen des Regelkreises nicht bekannt sind (Black Box), kann das Systemverhalten aufgrund von nichtlinearen Einflüssen (z.B. interne Stellwertbegrenzung und Anti-Windup) je nach Stellwertdifferenz variieren. Das Verhalten ist für Stellwertdifferenzen ($u_S < 6\text{ V}$) weitestgehend identisch. Als Beispiel ist in Abbildung 6.3a die Antwort auf einen Sollwertsprung zum Zeitpunkt $t = 0$ auf $u_S = 5\text{ V}$ dargestellt. Dabei wird der Sensorwert u_{sen} vom Winkelencoder gemessen [94]. Unter Verwendung des allgemeinen Pol-Nullstellenmodells der in Gleichung (6.1) gegebenen Übertragungsfunktion wird über mehrere Pol-Nullstellenkombinationen bis zum System zehnter Ordnung das Systemverhalten mithilfe der Matlabfunktion `tfest` approximiert und verglichen. Dabei zeigt sich bei allen Scannern, dass die Ordnung $n = 9, m = 9$ die beste Approximation liefert. Dies bestätigt die Untersuchung des Scanners aus [90]. In Abbildung 6.3b ist der Verlauf der Modellapproximation 2. Ordnung und 9. Ordnung sowie der gemessenen Sprungantwort des Scanners zu Vergleichszwecken dargestellt. Bei der Übertragungsfunktion zweiter Ordnung erreicht die Ähnlichkeit gegenüber der gemessenen Kurve bei der Modellapproximation immer noch über 85% (normalized root mean square error (NRMSE)). Ein Vergleich hinsichtlich des Verzögerungsverhaltens zeigt, dass die dominierende Zeitkonstante bei beiden Modellen keinen großen Unterschied aufweist. Daher wird für den Entwurf des Reglers das Modell mit der niedrigeren Ordnung (zweiter Ordnung) gewählt, die in folgender Form beschrieben wird:

$$G_M(s) = \frac{U_{\text{sen}}(s)}{U_S(s)} = \frac{b_0}{a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0}. \quad (6.2)$$

Neben der Identifikation der Parameter wird der Zusammenhang zwischen dem Stellwert sowie dem Sensorwert untersucht. Abbildung 6.4a stellt den Verlauf der Sensor-Kennlinie im Stellbereich von $\pm 10\text{ V}$ dar, welche 5-mal zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen werden. Die Verläufe sind nahezu identisch. Es ist zu

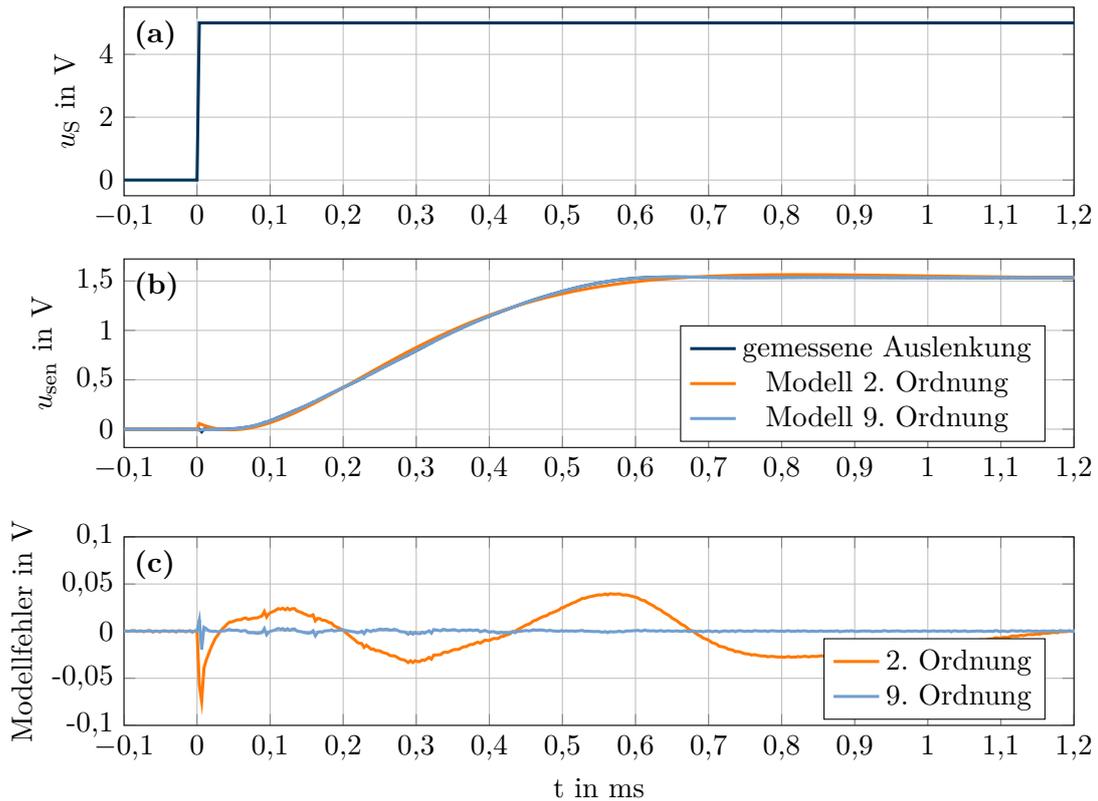


Abbildung 6.3: Sprungantwort des Galvanometer Scanners [83]

erkennen, dass der Verlauf $u_{sen}(u_S)$ linear von -3 V bis $+3\text{ V}$ ansteigt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der gemessene Sensorwert proportional zum Stellwert ist. Im Stellbereich von $9,5\text{ V}$ bis 10 V ist der Sensorwert in der Sättigung. Dies bedeutet, dass in diesem Spannungsabschnitt keine Auslenkung des Scanners eingestellt werden kann. Daher wird der verwendete Ansteuerbereich auf $\pm 9,5\text{ V}$ herabgesetzt (siehe gestrichelte Linien).

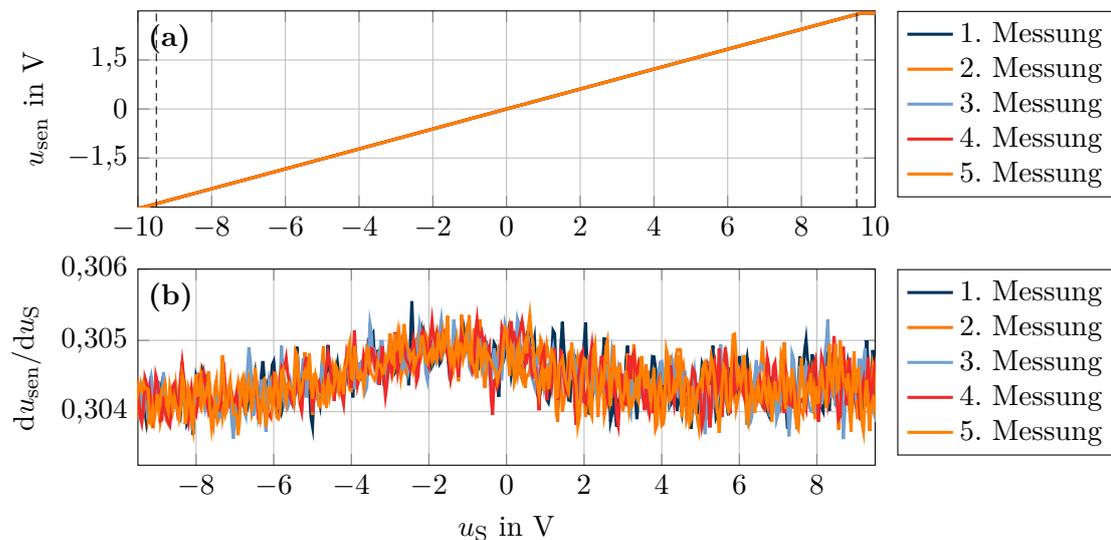


Abbildung 6.4: Kennlinienverlauf zwischen Stell- und Sensorwert

Laut Herstellerangabe hat die Kennlinie eine Nichtlinearität (siehe Abschnitt 8.3) von 0,2 % [11]. Diese wird erst ersichtlich, wenn der Sensorwert nach dem Stellwert abgeleitet wird. In Abbildung 6.4b ist der gefilterte Verlauf du_{sen}/du_S zu sehen. Der Anstieg des Sensorwerts schwankt zwischen 0,30 und 0,31 im Stellbereich vom $\pm 9,5\text{ V}$ und weist einen geringfügig nichtlinearen Verlauf auf. Dies hat zwar keinen gravierenden Einfluss auf die Strahlnachführregelung, jedoch muss es später bei der Kalibrierung sowie bei der Berechnung der TCP-Position berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 8.3). Mit dem ermittelten Modell wird das Frequenzverhalten des Scanners analysiert, welches in Abbildung 6.5 dargestellt ist. Das Amplitudenverhalten ist bis zu einer Kreisfrequenz von ca. $1000\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ nahezu konstant.

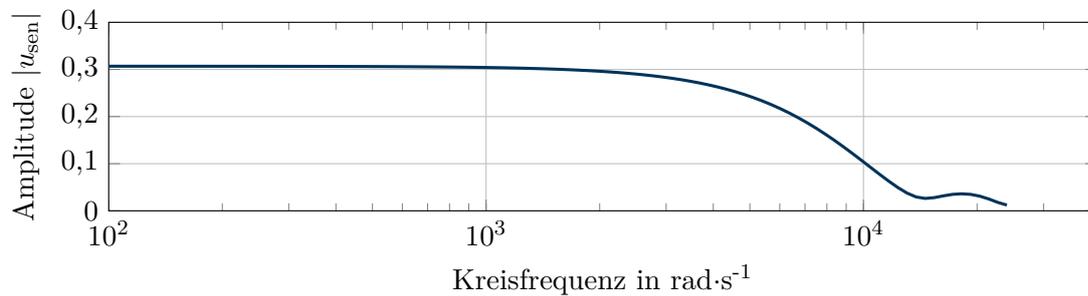


Abbildung 6.5: Amplitudengang des approximierten Modells vom Galvanometer-Scanner [83]

Der Entwurf des Reglers erfordert sowohl für den x- als auch y-Scanner eine Umrechnung der Sensorwerte ($u_{\text{senx}}, u_{\text{sény}}$) vom Encoder in mechanischen Winkel (φ_x, φ_y). Die Umrechnungsfaktoren ($k_{\varphi_x}, k_{\varphi_y}$) werden auf Basis der Kennlinie aus Abbildung 6.4 und des vom Hersteller maximal angegebenen Drehwinkels ($\pm 15^\circ \hat{=} \pm 3\text{ V}$) ermittelt.

$$\varphi_x = k_{\varphi_x} \cdot u_{\text{senx}} \quad (6.3)$$

$$\varphi_y = k_{\varphi_y} \cdot u_{\text{sény}} \quad (6.4)$$

Da für jeden Scanner das dynamische Modell aus Gleichung (6.2) verwendet wird, kann für den x- und y-Scanner jeweils das Übertragungsverhalten zwischen mechanischen Winkeln und Stellwerten ($u_{\text{Sx}}, u_{\text{Sy}}$)

$$G_{\text{Mx}}(s) = \frac{\varphi_x(s)}{U_{\text{Sx}}(s)} = \frac{k_{\varphi_x} \cdot b_0}{a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \quad (6.5)$$

$$G_{\text{My}}(s) = \frac{\varphi_y(s)}{U_{\text{Sy}}(s)} = \frac{k_{\varphi_y} \cdot b_0}{a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \quad (6.6)$$

aufgestellt werden.

6.1.2 Modellierung des Strahlverlaufs zwischen Scannerspiegel und Messreflektor

Wie bereits im Abschnitt 6.1 erwähnt, steht bei der Strahlnachführung die 4QD als Positionssensor im Mittelpunkt. Die Spannungssignale der 4QD gehen aus dem Belichtungsverhältnis der vier Dioden hervor und sind von der geometrischen Auslenkung des Laserstrahls auf dieser abhängig. Daher wird im Folgenden die horizontale bzw. die vertikale Bewegung des Messreflektors ausschließlich durch die geometrischen Auslenkungen x_{4QD} und y_{4QD} beschrieben. Zu diesem Zweck muss eine Gleichung gefunden werden, welche die resultierende zweidimensionale Auslenkung auf der 4QD beschreibt. Die beiden Auslenkungen sollen dabei zur Vereinfachung unabhängig voneinander betrachtet werden und beschreiben somit die Ablenkung des Laserstrahls durch einen Ablenkspiegel [62, 82, 90]. Daher wird das x_{4QD} -Signal durch den auf die x-z-Ebene projizierten Lichtweg beschrieben. Das y_{4QD} -Signal wird analog dazu durch den Lichtweg beschrieben, welcher durch Projektion auf die y-z-Ebene erhalten wird. In diesem und den folgenden Abschnitten wird das System als ideal betrachtet. Dies bedeutet, dass der Laserstrahl immer genau auf die Achse eines Ablenkspiegels trifft und jede Spiegelachse parallel zu einer der Koordinatenachsen ist. Zudem stehen die Spiegelebenen des hier zur Veranschaulichung verwendeten Messreflektors alle exakt senkrecht aufeinander. Alle nachfolgenden Betrachtungen werden am Beispiel des x_{4QD} -Signals in der x-z-Ebene durchgeführt. Diese können analog auf das y_{4QD} -Signal übertragen werden.

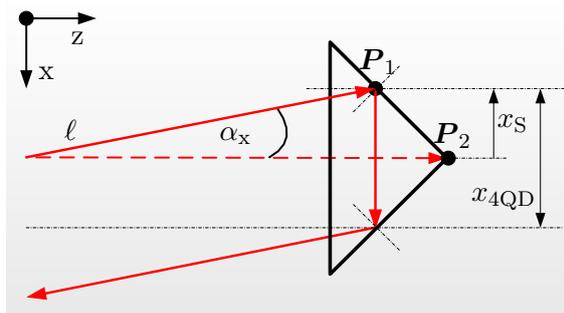
In Abbildung 6.6 ist der Strahlengang zwischen dem Scanner-Spiegel und dem Messreflektor in der x-z-Ebene dargestellt. Der Laserstrahl trifft zunächst im Punkt \mathbf{P}_1 auf den Messreflektor und hat dabei einen Abstand von x_S in x-Richtung zum Zentrum des Messreflektors. Dadurch entsteht einen Parallelversatz des reflektierten Strahls, welcher von der 4QD als Spannungssignal gemessen wird. Die Beziehung zwischen x_{4QD} und x_S ist

$$x_{4QD} = 2 \cdot x_S. \quad (6.7)$$

Aus dem gemessenen x_{4QD} -Signal wird ein optischer Winkel α_x berechnet, welcher dem Winkel entspricht, mit dem der Laserstrahl durch den Scanner-Spiegel von \mathbf{P}_1 zu \mathbf{P}_2 abgelenkt wurde. Somit ist der Zusammenhang

$$x_S = \sin \alpha_x \cdot \ell. \quad (6.8)$$

Der Parameter ℓ in Gleichung (6.8) beschreibt die Absolutlänge zwischen Trackermodule und Messreflektor. Bei dieser Betrachtung ist der Abstand x_S kleiner als 1 mm

**Abbildung 6.6:**

Der Zusammenhang zwischen der Rotation des Scanner-Spiegels und dem x_{4QD} -Signal

und $\ell > 1000$ mm. Hieraus folgt ein maximaler Winkel von

$$\alpha_x = \arcsin\left(\frac{x_S}{\ell}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \text{ mm}}{1000 \text{ mm}}\right) = 0,001 \text{ rad} \approx 0,057^\circ. \quad (6.9)$$

Da der berechnete Winkel in Gleichung (6.9) klein ist, wird die Sinusfunktion in Gleichung (6.8) linearisiert. So ergibt sich für Gleichung (6.8)

$$x_S = \alpha_x \cdot \ell. \quad (6.10)$$

Die Beziehung zwischen optischem und mechanischem Winkel φ ist

$$\alpha_x = 2 \cdot \varphi_x. \quad (6.11)$$

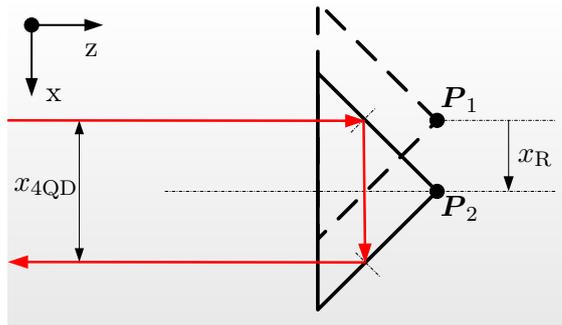
Wird die Gleichung (6.11) in (6.10) eingesetzt und in den Laplace-Bildbereich transformiert, so ergibt sich die Übertragungsfunktion

$$G_{Lx}(s) = \frac{X_S(s)}{\varphi_x(s)} = 2 \cdot \ell. \quad (6.12)$$

6.1.3 Störmodell

Zu Beginn dieses Kapitels wurde bereits erwähnt, dass die Bewegung des Messreflektors einen Einfluss auf die 4QD-Signale hat. Bei einer Positionsänderung des Messreflektors von \mathbf{P}_1 zu \mathbf{P}_2 , wie in Abbildung 6.7 gezeigt, verschiebt sich das Zentrum des Messreflektors um x_R , was wiederum von der 4QD gemessen wird ($x_{4QD} = 2 \cdot x_R$). Dies wirkt als Störung auf die Regelstrecke und soll durch den Scanner-Spiegel kompensiert werden. Das Störmodell hat daher die folgende Form:

$$G_{Zx}(s) = \frac{X_{4QD}(s)}{X_R(s)} = 2. \quad (6.13)$$

**Abbildung 6.7:**

Entstehender Parallelversatz durch Verschiebung des Messreflektors

6.1.4 Kennlinie der 4QD

Für die Berechnung der Stellgrößen müssen die Umrechnungsfaktoren k_{QDx} und k_{QDy} von den gemessenen Spannungssignalen der 4QD in den Versatz des reflektierten Strahls ermittelt werden. Da keine einzelne 4QD vorliegt und der Ausbau einer Diode aus einem Trackermodul mit erheblichem Aufwand verbunden ist, soll im Folgenden ein experimentelles Vorgehen zur Messung der Kennlinie vorgestellt werden [68, 83]. Dabei wird lediglich der Interferometerkopf des Trackermoduls verwendet. Die Kennlinienaufnahme erfolgt mithilfe eines 3D-Messsystems, an welches der Messreflektor angebracht ist. In Abbildung 6.8 ist das verwendete 3D-Messsystem dargestellt, das aus drei Linearachsen (High Precision Stage (HPS)-170) der Firma PI miCos [73] besteht. Die Ansteuerung der Linearachsen erfolgt durch ein „Microstep-Controller System“ (SMC), welches über einen integrierten Regelkreis verfügt. Der Controller ist mittels RS-232-Schnittstelle mit dem Computer verbunden und kann durch Matlab angesteuert werden. Zu Beginn der Kennlinienaufnahme wird das Zentrum des Messreflektors auf den austretenden Laserstrahl ausgerichtet. Dies erfolgt automatisiert mithilfe eines Regelalgorithmus, welcher das 3-D-Messsystem durch einen Regler so lange angesteuert, bis sich der Laserstrahl im Ursprung der 4QD befindet. Anschlie-

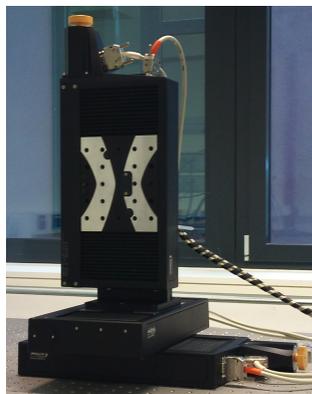
**(a)** Linearachsen [73, 82]**(b)** Controller [73, 82]

Abbildung 6.8: Das verwendete 3-D-Messsystem zur Messung der 4QD-Kennlinie

ßend fährt das 3-D-Messsystem mehrere definierte Positionen entlang der horizontalen und vertikalen Achse (x_R, y_R) nacheinander ab. Dadurch entstehen Abweichungen des Laserstrahls zum Ursprung, welche von der 4QD als x_{4QD} - bzw. y_{4QD} -Signal gemessen werden. Diese Abweichungen stellen den zuvor beschriebenen Parallelversatz dar. Das Echtzeitsystem dSpace [16] nimmt in jedem Positionsschritt 100 Werte der erfassten Signale auf. Daraus wird der Mittelwert gebildet. Bei dieser Messung beträgt der Verfahrbereich um das Zentrum des Messreflektors $\pm 500 \mu\text{m}$ [73, 82].

In Abbildung 6.9 sind die so ermittelten Kennlinienverläufe der 4QD dargestellt, welche im mittleren Bereich annähernd lineares Verhalten aufweisen. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Abstand zum Zentrum des Messreflektors die Verläufe in den Sättigungsbereich übergehen. In diesem Bereich kann vom 4QD-Signal nicht mehr eindeutig auf die vom 3-D-Messsystem gefahrene Weglänge geschlossen werden. Daher wird ausschließlich der Bereich $\pm 200 \mu\text{m}$ für die Strahlnachführregelung verwendet (siehe gestrichelte markierte Grenze), welcher einen Arbeitsbereich von $\pm 400 \mu\text{m}$ auf der 4QD entspricht. Dieser entspricht wiederum dem gemessenen Spannungsbereich von $\pm 1,8 \text{ V}$. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Verläufe achsensymmetrisch zueinander sind. In der horizontalen Richtung bewirkt eine positive Bewegung ein negatives x_{4QD} -Signal, hingegen erzeugt eine positive Bewegung in vertikaler Bewegung ein positives y_{4QD} -Signal. Aus den gemessenen Kennlinienverläufen im ungesättigten Bereich werden die Umrechnungsfaktoren k_{QDx} und k_{QDy} durch lineare Regression berechnet.

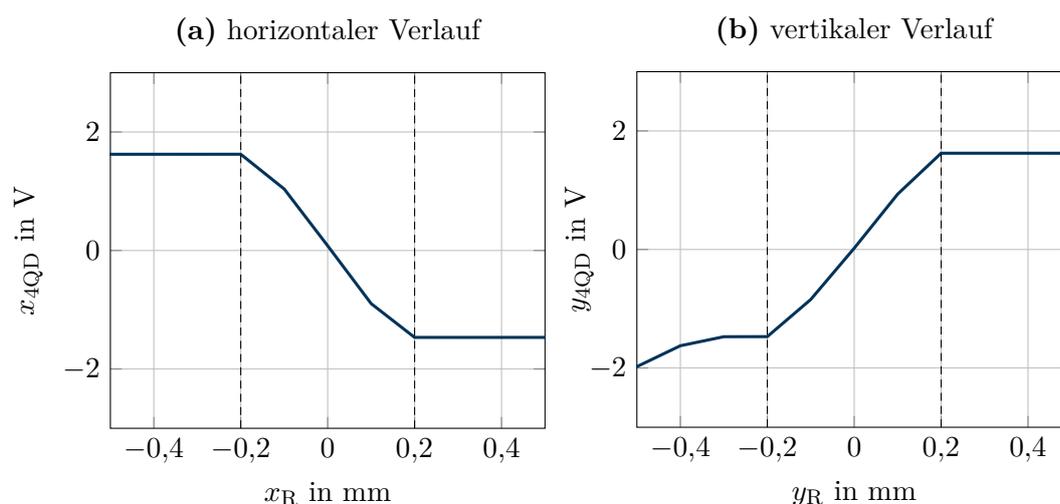


Abbildung 6.9: Kennlinie der 4QD Signale [82]

6.1.5 Gesamtmodell der Regelstrecke

Aus den einzelnen Teilstrecken werden nach Abbildung 6.2 die Übertragungsfunktionen der Regelstrecken für das $x_{4\text{QD}}$ - als auch das $y_{4\text{QD}}$ -Signal berechnet. Diese lauten

$$\begin{aligned} X_{4\text{QD}}(s) &= G_{\text{Mx}}(s) \cdot G_{\text{Lx}}(s) \cdot U_{\text{Sx}}(s) + G_{\text{Zx}}(s) \cdot X_{\text{R}}(s) \\ &= 2 \cdot k_{\text{QDx}} \cdot \left(\frac{b_0}{a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \cdot k_{\varphi\text{x}} \cdot 2 \cdot \ell \cdot U_{\text{Sx}}(s) + X_{\text{R}}(s) \right) \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} Y_{4\text{QD}}(s) &= G_{\text{My}}(s) \cdot G_{\text{Ly}}(s) \cdot U_{\text{Sy}}(s) + G_{\text{Zy}}(s) \cdot Y_{\text{R}}(s) \\ &= 2 \cdot k_{\text{QDy}} \cdot \left(\frac{b_0}{a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \cdot k_{\varphi\text{y}} \cdot 2 \cdot \ell \cdot U_{\text{Sy}}(s) + Y_{\text{R}}(s) \right). \end{aligned} \quad (6.15)$$

6.2 Reglersynthese

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die erweiterte Strecke für den in Abbildung 6.2 dargestellten Regelkreis modelliert. Auf Basis der hergeleiteten Gleichungen (6.14), (6.15) soll für jedes 4QD-Signal ein Regler entworfen werden, welcher die Forderungen an den Regelkreis nach Stabilität, stationärer Genauigkeit und hoher Dynamik erfüllt. Darüber hinaus sind äußere Störeinflüsse auf dem Regelkreis zu unterdrücken [25, 51]. Im Weiteren wird der Entwurf am $x_{4\text{QD}}$ -Signal erläutert, welcher dann auf das $y_{4\text{QD}}$ -Signal übertragen wird. Für den Regelkreis wird ein Proportional-Integral-Differential (PID)-Regler eingesetzt, der über die drei Parameter ($K_{\text{P}}, T_{\text{I}}, T_{\text{D}}$) verfügt. Der Regler ist durch die folgende Differentialgleichung

$$u_{\text{x}}(t) = K_{\text{P}} \left(e_{\text{x}}(t) + \frac{1}{T_{\text{I}}} \int_0^t e_{\text{x}}(\tau) d\tau + T_{\text{D}} \frac{d}{dt} e_{\text{x}}(t) \right) \quad (6.16)$$

beschrieben. In Gleichung (6.16) beschreibt $u_{\text{x}}(t)$ das Ausgangssignal des Reglers, welches eine Funktion vom Eingangssignal $e_{\text{x}}(t)$ ist. Für die Untersuchung hinsichtlich der Stabilität sowie der Dynamik wird die Differentialgleichung in den Laplace-Bildbereich

$$G_{\text{Rx}}(s) = \frac{U_{\text{Sx}}(s)}{E_{\text{x}}(s)} = \frac{\overbrace{\left(\frac{K_{\text{I}}}{(K_{\text{P}}/T_{\text{I}}) + K_{\text{P}} \cdot s} \right)}^{K_{\text{I}}} + \overbrace{(K_{\text{P}} \cdot T_{\text{D}})}^{K_{\text{D}}} \cdot s^2}{s} \quad (6.17)$$

transformiert. Die Eingangsgröße $E_x(s)$ der Übertragungsfunktion stellt den Regelfehler dar, welcher mit $E_x(s) = W_x(s) - Y_x(s)$ angegeben wird (siehe Abbildung 6.10). Mit der Führungsgröße $W_x(s) = 0$ und der Regelgröße $Y_x(s) = X_{4\text{QD}}(s)$ wird die Übertragungsfunktion in Gleichung (6.17) nach dem Stellwert

$$U_{\text{Sx}}(s) = -\frac{K_I + K_P \cdot s + K_D \cdot s^2}{s} \cdot X_{4\text{QD}}(s) \quad (6.18)$$

umgestellt. Wird die Gleichung (6.18) in (6.14) eingesetzt, ergibt sich

$$X_{4\text{QD}}(s) = 2 \cdot k_{\text{QDx}} \cdot \left(-\frac{b_0 \cdot (K_I + K_P \cdot s + K_D \cdot s^2) \cdot k_{\varphi_x} \cdot 2 \cdot \ell}{(a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0) \cdot s} \cdot X_{4\text{QD}}(s) + X_{\text{R}}(s) \right). \quad (6.19)$$

Mit Gleichung (6.19) kann die Störübertragungsfunktion $G_{\text{Sx}}(s)$ des geschlossenen Regelkreises bestimmt werden. Die Gesamtfunktion wird als Verhältnis von Ausgangsgröße $X_{4\text{QD}}(s)$ zu Eingangsgröße $X_{\text{R}}(s)$ wie folgt aufgestellt:

$$G_{\text{Sx}}(s) = \frac{X_{4\text{QD}}(s)}{X_{\text{R}}(s)} = \frac{2 \cdot k_{\text{QDx}} \cdot s \cdot \left(s^2 + \frac{a_1}{a_2} \cdot s + \frac{a_0}{a_2} \right)}{s^3 + \left(\frac{a_1 + \epsilon \cdot K_D}{a_2} \right) \cdot s^2 + \left(\frac{a_0 + \epsilon \cdot K_P}{a_2} \right) \cdot s + \frac{\epsilon \cdot K_I}{a_2}} \quad (6.20)$$

mit $\epsilon = 4 \cdot k_{4\text{QDx}} \cdot k_{\varphi_x} \cdot \ell \cdot b_0$.

Die Funktion $G_{\text{Sx}}(s)$ geht gegen Null, wenn $t \rightarrow \infty$ und somit im Bildbereich $s \rightarrow 0$ [79, 88] geht:

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{\text{Sx}}(s) = \frac{2 \cdot k_{\text{QDx}} \cdot s \cdot \left(s^2 + \frac{a_1}{a_2} \cdot s + \frac{a_0}{a_2} \right)}{s^3 + \left(\frac{a_1 + \epsilon \cdot K_D}{a_2} \right) \cdot s^2 + \left(\frac{a_0 + \epsilon \cdot K_P}{a_2} \right) \cdot s + \frac{\epsilon \cdot K_I}{a_2}} = 0. \quad (6.21)$$

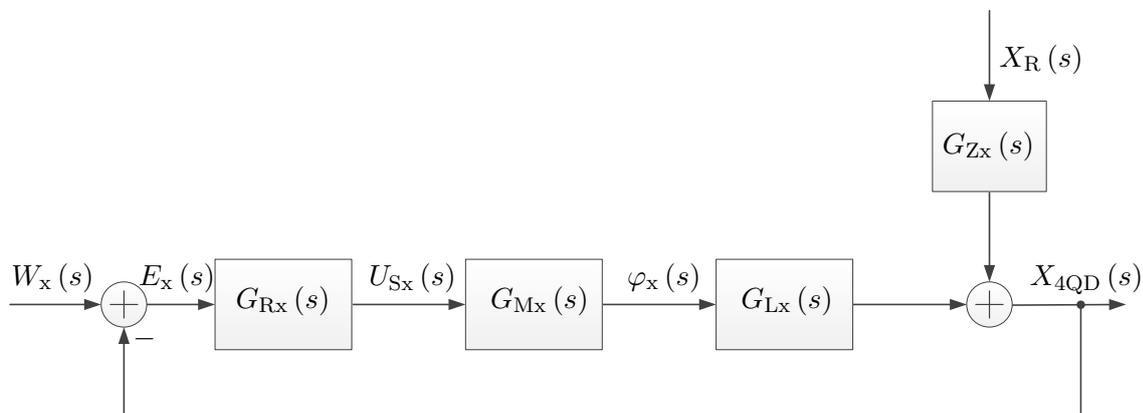


Abbildung 6.10: Blockschaltbild des Regelkreises für das $x_{4\text{QD}}$ -Signal

Aus Gleichung (6.21) wird ersichtlich, dass der entworfene Regelkreis mit dem gewählten Regler die Störung $X_R(s)$ vollständig kompensieren kann. Das dynamische Verhalten sowie die Stabilität des Regelkreises sind im Nenner der Übertragungsfunktion $G_{Sx}(s)$ gegeben, welche von den Parametern (K_P, K_I, K_D) beeinflusst werden. Um die Parameter zu bestimmen, wird für den Nenner der Gleichung (6.20) ein gewünschtes charakteristisches Polynom $P(s)$ mit den Koeffizienten (p_2, p_1, p_0) vorgegeben [25, 26]. Das Polynom wird mit der Methode der Polvorgabe entworfen und lautet wie folgt:

$$P(s) = s^3 + p_2 \cdot s^2 + p_1 \cdot s + p_0. \quad (6.22)$$

Das Polynom aus Gleichung (6.22) wird mit dem Nenner der Übertragungsfunktion $G_{Sx}(s)$ gleichgesetzt. Durch Koeffizientenvergleich berechnen sich die Reglerparameter wie folgt:

$$K_I = \frac{p_0 \cdot a_2}{\epsilon}; \quad K_P = \frac{p_1 \cdot a_2 - a_0}{4 \cdot k_{4QDx} \cdot k_{\varphi x} \cdot \ell \cdot b_0}; \quad K_D = \frac{p_2 \cdot a_2 - a_1}{\epsilon} \quad (6.23)$$

und $T_I = \frac{K_P}{K_I} = \frac{p_1 \cdot a_2 - a_0}{p_0 \cdot a_2}; \quad T_D = \frac{K_D}{K_P} = \frac{p_2 \cdot a_2 - a_1}{p_1 \cdot a_2 - a_0}.$

In Gleichung (6.23) ist zu erkennen, dass der Parameter K_P eine Funktion der unbekanntem Absolutlänge ℓ ist, welche mit zunehmendem Abstand sinkt. Für die Berechnung des Parameters, bei gewünschter Polvorgabe, wird der Abstand zunächst auf 1 m festgelegt. Dieser Wert kann jedoch zu jeder Messung variieren und ist abhängig von der Position des Messreflektors. Wird dieser bei der Berechnung des Parameters K_P nicht mit berücksichtigt, so verschiebt sich die Pollage des geschlossenen Regelkreises. Diese Verschiebung hat im ungünstigsten Fall zur Folge, dass der Regelkreis instabil wird. Ein Algorithmus zur Identifikation des radialen Abstandes mittels eines Trackermoduls, wie in [90] beschrieben, hat einen hohen Realisierungsaufwand und kann ggf. zu einer großen Ungenauigkeit führen. In dieser Arbeit wird daher die Methode der Triangulation angewendet, welche mithilfe von mindestens zwei Trackermodulen den fehlenden Abstand ℓ ermittelt. Somit können die Reglerparameter zu jedem Tastschritt aktualisiert werden. Der verwendete Algorithmus wird im späteren Abschnitt 7.2 näher erläutert.

6.2.1 Digitaler PID-Regler

Wie bereits im Abschnitt 4.2.5 erklärt, wird eine Echtzeit-Signalverarbeitung mit der Abtastfrequenz von 10 kHz zur Steuerung und Regelung des MLTS eingesetzt. Die

zeitdiskrete Abtastung des Echtzeitsystems erfordert den Entwurf eines digitalen PID-Reglers, welcher durch einen programmierten Regelalgorithmus realisiert wird. Hierzu wird die Differentialgleichung zur Beschreibung des kontinuierlichen PID-Reglers (siehe Gleichung (6.16)) in eine Differenzengleichung

$$u_k = K_P \cdot \left(e_k + \frac{T_S}{T_I} \sum_{i=0}^k e_i + \frac{T_D}{T_S} \cdot (e_k - e_{k-1}) \right) \quad (6.24)$$

transformiert (Rechteckregel [23]). In Gleichung (6.24) beschreiben die Parameter T_S die Abtastzeit und k den aktuellen Abtastzeitpunkt. Die Stellgröße u_k berechnet sich aus dem diskreten P-, I- und D-Anteil, wobei der I-Anteil die aktuelle sowie alle vorherigen Regelabweichungen aufsummiert. Dadurch kann die Regelabweichung e_i mit jedem Abtastschritt wachsen. Diese führt bei der zeitdiskreten Regelung im Controller zum Variablen-Überlauf für $t \rightarrow \infty$. Daher wird die Summe in der Differenzengleichung eliminiert, indem die vorherige Stellgröße u_{k-1} für die Berechnung der aktuellen Stellgröße

$$u_k = u_{k-1} + q_0 \cdot e_k + q_1 \cdot e_{k-1} + q_2 \cdot e_{k-2} \quad (6.25)$$

mit $q_0 = K_P \cdot \left(1 + \frac{T_S}{T_I} + \frac{T_D}{T_S} \right)$; $q_1 = K_P \cdot \left(-1 - 2 \frac{T_D}{T_S} \right)$; $q_2 = K_P \frac{T_D}{T_S}$

verwendet wird. Die Gleichung (6.25) stellt die rekursive Schreibweise des zeitdiskreten Regleralgorithmus dar, welcher im Echtzeitsystem implementiert wird. Durch den Einsatz des digitalen Reglers muss die Stabilität des geschlossenen Regelkreises erneut untersucht werden. Hierzu kann die in Abhängigkeit der Abtastzeit T_S aufgestellte Störübertragungsfunktion in Gleichung (6.20) mit dem bereits entworfenen Regler in den z-Bereich transformiert werden, was in Matlab durch den Befehl `c2d` auszuführen ist. Die verwendete Abtastzeit beträgt bei diesem Entwurf $T_S = 0,0001$ s.

6.2.2 Analyse der Verfahrensgeschwindigkeit des Messobjekts

Im vorherigen Abschnitt wurde ein Regelkreis für die Strahlnachführung entworfen, welcher die Verfolgung des Messobjekts ermöglicht. Es stellt sich die Frage, ob der entworfene Regelkreis die in Kapitel 3 gestellte Anforderung bzgl. der Verfahrensgeschwindigkeit v_R des Messobjektes von $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ erfüllen kann. Einen essentiellen Einflussfaktor auf die Verfolgung des Messreflektors stellt der im Regelkreis entstehende Regelfehler dar, welcher dem entgegengesetzten von der 4QD gemessenen Signal entspricht. Er korreliert mit der Abtastfrequenz f_S sowie der Verfahrensgeschwindigkeit

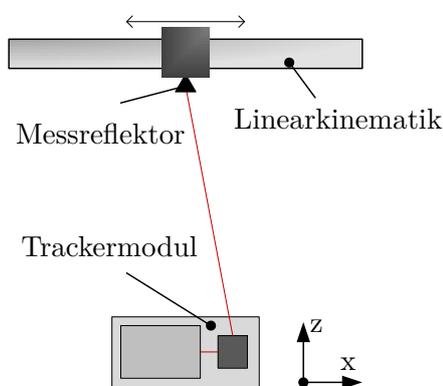
des Messreflektors. Der Zusammenhang kann für den Regelkreis mit dem $x_{4\text{QD}}$ -Signal wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{aligned} e_x &= -x_{4\text{QD}}, \\ x_{4\text{QD}} &= \frac{v_R}{f_S}. \end{aligned} \quad (6.26)$$

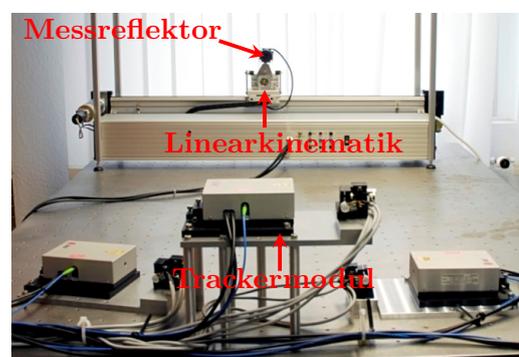
In Gleichung (6.26) ist zu erkennen, dass der bei konstanter Abtastfrequenz betrachtete Regelfehler mit zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit ansteigt. Werden für $v_R = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und die Abtastfrequenz f_S von 10 kHz eingesetzt, so beträgt der Regelfehler bei zwei darauf folgenden Abtastpunkten ohne Berücksichtigung der Scanner-Dynamik $100 \mu\text{m}$. Dieser Wert liegt im Arbeitsbereich der 4QD und kann durch den Regler ausgeglichen werden. Für einen stabilen Regelkreis soll grundsätzlich der Regelfehler so klein wie möglich gehalten werden. Wie in Gleichung (6.26) zu sehen ist, kann der Regelfehler durch Erhöhung der Abtastfrequenz reduziert werden.

6.2.3 Erhöhung der Abtastfrequenz

Für die Untersuchung des Regelfehlers in Abhängigkeit der Abtastfrequenz wurde ein Versuchsstand aufgebaut, welcher in Abbildung 6.11 dargestellt ist. Das Trackermodul soll in einem Abstand von rund 1,5 m eine Linearkinematik verfolgen. Die Kinematik besteht aus einer festen Führungsschiene, worauf ein Wagen an einem Endlosriemen befestigt wird. Auf dem Wagen wird der Messreflektor angebracht. Damit der Wagen entlang seiner Bewegungsachse gleiten kann, wird der Endlosriemen über zwei jeweils am Ende der Führungsschiene angebrachte Umlenkrollen geführt, wobei an einer der Umlenkrollen ein Gleichstrommotor mit Getriebe angekoppelt ist.



(a) Prinzipbild



(b) Experimentelle Untersuchung [66]

Abbildung 6.11: Strahlverfolgung eines Linearschlittens

An der Welle des Motors ist ein Drehzahlsensor integriert, der die Geschwindigkeit des Wagens erfasst. Darüber hinaus verfügt die Kinematik über einen rotatorischen Inkrementalgeber, welcher die Position des Wagens in einem Verfahrbereich von rund $\pm 0,40$ m misst. Beide Messensoren verfügen jeweils über einen analogen Ausgang mit einem Messbereich von ± 10 V. Die eingesetzte Linearkinematik wird so aufgestellt, dass seine Bewegungsachse der x-Achse des Trackermoduls entspricht. Dadurch wird hauptsächlich das $x_{4\text{QD}}$ -Signal beeinflusst. Das Echtzeitsystem übernimmt bei diesem Experiment sowohl die Trajektorienfolgeregelung der Linearkinematik als auch die Strahlnachführregelung des Trackermoduls. Die Verarbeitungszeit der implementierten Algorithmen im Echtzeitsystem liegt bei $40 \mu\text{s}$, wodurch eine maximale Abtastfrequenz von 25 kHz ermöglicht wird.

In Abbildung 6.12 sind die gefahrene sinusförmige Trajektorie sowie der Geschwindigkeitsverlauf der Linearkinematik dargestellt. Der entworfene Sinusverlauf hat eine Amplitude von $0,2 \text{ m}$ und eine Frequenz von $0,6 \text{ Hz}$. Mit der eingestellten Frequenz schafft die Kinematik eine Höchstgeschwindigkeit von rund $\pm 0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, was der maximal erreichbaren Dynamik der Kinematik entspricht.

Auf Basis der entworfenen Trajektorie wird der bei dieser Untersuchung entstehende Regelfehler im Regelkreis des Trackermoduls für die verschiedenen Abtastfrequenzen aufgenommen. Der untersuchte Frequenzbereich liegt zwischen 1 kHz bis 25 kHz . In Abbildung 6.13 sind die gemessenen Verläufe des Regelfehlers in Abhängigkeit der Abtastfrequenzen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Regelfehler, wie nach Gleichung (6.26) aufgestellt, durch die Erhöhung der Abtastfrequenz reduziert wird.

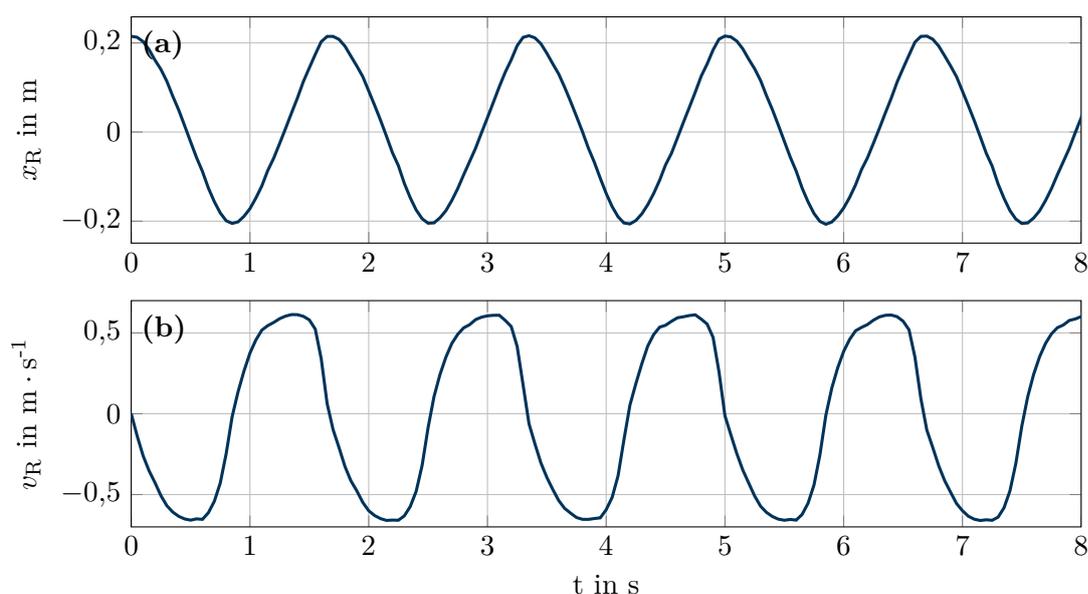


Abbildung 6.12: Trajektorie der Linearkinematik (a) Position; (b) Geschwindigkeit

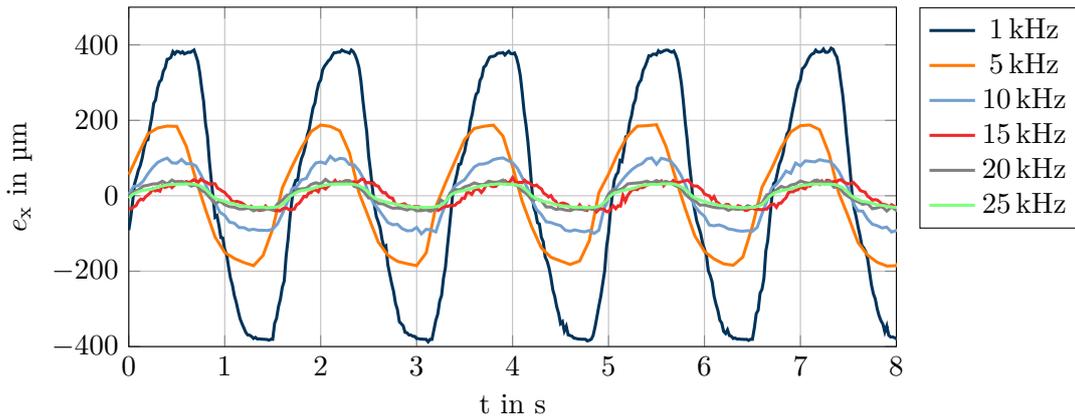


Abbildung 6.13: Gemessener Regelfehler in Abhängigkeit von der Abtastfrequenz

Der maximale Regelfehler (betragsmäßig) ist bei 1 kHz rund $394 \mu\text{m}$. Zur Erinnerung: Der erlaubte Messbereich der 4QD beträgt $\pm 400 \mu\text{m}$. Der Regelfehler liegt also an der Grenze des Arbeitsbereichs der 4QD. Bei einer Erhöhung der Abtastfrequenz auf 10 kHz sinkt der maximale Regelfehler auf $108 \mu\text{m}$ und ist somit deutlich unterhalb der Arbeitsbereichsgrenze der 4QD. Es ist ebenfalls zu sehen, dass der Regelfehler im Bereich zwischen 15 kHz und 25 kHz kaum Veränderung aufweist. Dies wird in Abbildung 6.14 deutlich, welche die maximale Regelfehler als Funktion der Abtastfrequenz darstellt.

Im Weiteren werden die gemessenen Regelfehler zwischen den beiden Achsen gezeigt. Abbildung 6.15 stellt die Regelfehler e_x und e_y bei 10 kHz gegenüber. Es ist zu erkennen, dass die Bewegung der Linearkinematik bei dieser Untersuchung ausschließlich das $x_{4\text{QD}}$ -Signal und somit den Regelfehler e_x beeinflusst. Der Regelfehler e_y liegt nahezu konstant im Nullbereich. Dies zeigt, dass die Regelung des $x_{4\text{QD}}$ -Signals keine Wirkung auf die Regelung des $y_{4\text{QD}}$ -Signals hat. Somit kann die Verkopplung zwischen dem $x_{4\text{QD}}$ - und $y_{4\text{QD}}$ -Signals vernachlässigt werden.

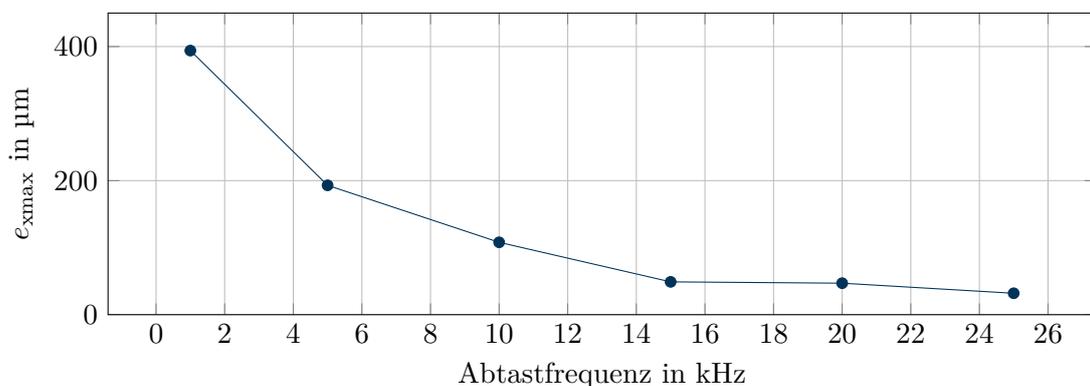


Abbildung 6.14: Maximaler Regelfehler in Abhängigkeit von der Abtastfrequenz

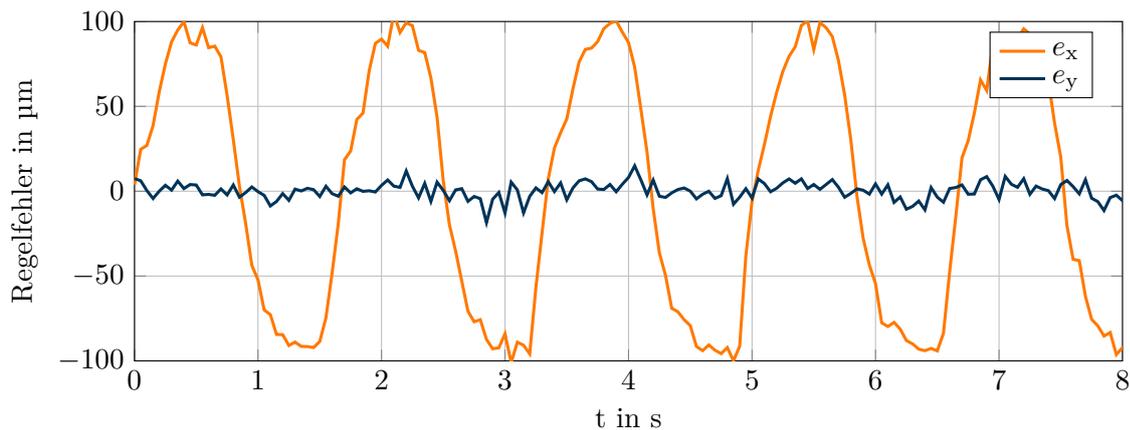


Abbildung 6.15: Gemessener Regelfehler der 4QD-Signale

Die experimentelle Untersuchung zeigt, dass das Trackermodul mit der gewählten Abtastfrequenz von 10 kHz die Linearkinematik mit der Verfahrensgeschwindigkeit von $\pm 0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ verfolgen kann. Dabei liegt der maximale Regelfehler deutlich innerhalb des erlaubten Messbereiches der 4QD. Durch den entworfenen Regelkreis ist also davon auszugehen, dass sich der Laserstrahl auch bei der geforderten Verfahrensgeschwindigkeit des Messreflektors von $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ im erlaubten Messbereich der 4QD befindet.

Mit der vorgestellten Methode wird dem Trackermodul ermöglicht, dem Messreflektor bei höherer Verfahrensgeschwindigkeit zu verfolgen. Jedoch wird durch die Erhöhung der Abtastfrequenz die zur Verfügung stehende Verarbeitungszeit im Echtzeitsystem deutlich verkürzt. Im Folgenden wird eine weitere Methode zur Verbesserung der Regelgüte vorgestellt, welche unabhängig von der Abtastfrequenz entworfen wird.

6.2.4 Störgrößenaufschaltung

Bisher wurde die Positionsänderung des Messreflektors für den entworfenen Regelkreis als Störgröße betrachtet. Der Regler reagiert erst auf den Regelfehler, wenn die Störgröße von der 4QD gemessen wird. Dieses Verhalten führt dazu, dass der Regler dem Regelfehler während einer Bewegung des Messreflektors immer hinterher läuft. Daher soll die Geschwindigkeit des Messreflektors $V_R(s)$ im entworfenen Regelkreis berücksichtigt werden. Wie in Abbildung 6.16 zu sehen ist, wird das in Gleichung (6.13) betrachtete Störmodell $G_{Zx}(s)$ um einen Integrator erweitert, welcher die folgende Form aufweist:

$$G_{Zx}(s) = \frac{X_{4QD}(s)}{V_R(s)} = 2 \cdot \frac{1}{s}. \quad (6.27)$$

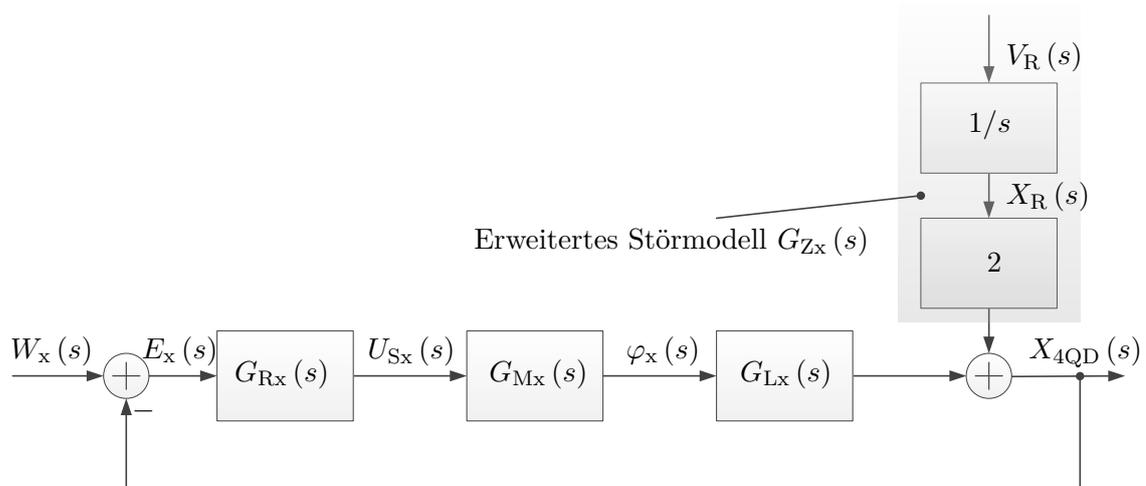


Abbildung 6.16: Regelkreis mit erweitertem Störmodell

Demnach ändert sich die Gesamtübertragungsfunktion des Regelkreises in Gleichung (6.20) zu

$$G_{Sx}(s) = \frac{X_{4QD}(s)}{X_R(s)} = \frac{2 \cdot k_{QDx} \cdot \left(s^2 + \frac{a_1}{a_2} \cdot s + \frac{a_0}{a_2} \right)}{s^3 + \left(\frac{a_1 + \epsilon \cdot K_D}{a_2} \right) \cdot s^2 + \left(\frac{a_0 + \epsilon \cdot K_P}{a_2} \right) \cdot s + \frac{\epsilon \cdot K_I}{a_2}}. \quad (6.28)$$

Wird die Gleichung (6.28) mit (6.20) verglichen, so ist das Nennerpolynom bei beiden Gleichungen gleich. Jedoch hat sich die Ordnung des Zählerpolynoms in Gleichung (6.28) um eins reduziert. Folglich ist der Grenzwert der Funktion $G_{Sx}(s)$ für $t \rightarrow \infty$ und in den Laplace-Bildbereich $s \rightarrow 0$:

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{Sx}(s) = \frac{2 \cdot k_{QDx} \cdot a_0}{\epsilon \cdot K_I}. \quad (6.29)$$

In Gleichung (6.29) wird ersichtlich, dass bei einer Bewegung des Messreflektors der entstehende Regelfehler durch den gewählten Regler nicht vollständig beseitigt werden kann. Dieser Fehler ist in der Struktur des Regelkreises gegeben.

Um die Regelgüte zu verbessern, wird auf dem Reglereingang die Störung $V_R(s)$ mit einem Parameter k_x zurückgeführt. Dies zeigt das Prinzip der Störgrößenaufschaltung. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass die Geschwindigkeit des Messreflektors im entworfenen Regelkreis messbar ist. Abbildung 6.17 stellt das Blockschaltbild des

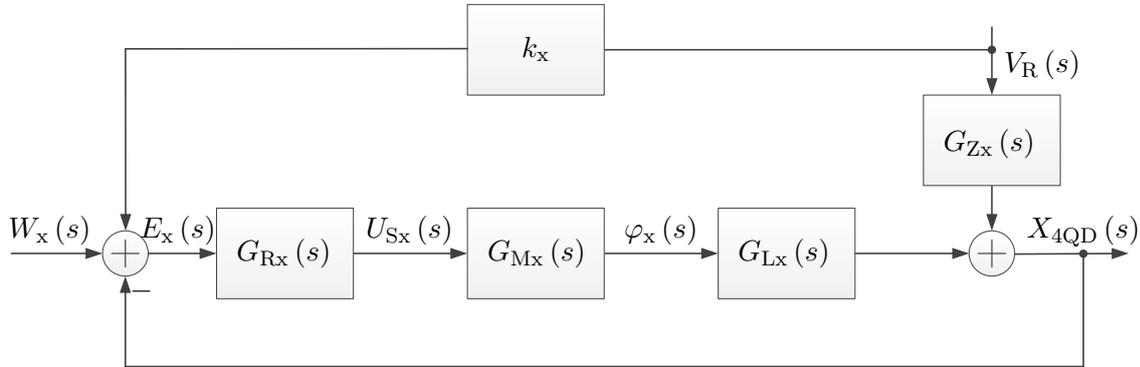


Abbildung 6.17: Erweiterter Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung

erweiterten Regelkreises mit der Störgrößenaufschaltung dar, wobei die Regelgröße $X_{4QD}(s)$ wie folgt gebildet wird:

$$X_{4QD}(s) = G_{Rx}(s) \cdot G_{Mx}(s) \cdot G_{Lx}(s) \cdot E_x(s) + G_{Zx}(s) \cdot V_R(s). \quad (6.30)$$

Mit $W_x(s) = 0$ ergibt sich

$$E_x(s) = 0 - X_{4QD}(s) + k_x \cdot V_R(s). \quad (6.31)$$

Wird die Gleichung (6.31) in (6.30) eingesetzt und nach dem Verhalten von $X_{4QD}(s)$ zu $V_R(s)$ umgestellt, so wird die Übertragungsfunktion des erweiterten Regelkreises

$$G_{Sx} = \frac{X_{4QD}(s)}{V_R(s)} = \frac{k_x \cdot G_{Rx}(s) \cdot G_{Mx}(s) \cdot G_{Lx}(s) + G_{Zx}(s)}{1 + G_{Rx}(s) \cdot G_{Mx}(s) \cdot G_{Lx}(s)} \quad (6.32)$$

beschrieben. In Gleichung (6.32) ist zu erkennen, dass die wirkende Störung auf die Regelstrecke vollkommen eliminiert werden kann, wenn der Zähler der Übertragungsfunktion gleich Null ist. Dies kann anstatt durch den Parameters k_x , wie in der Literatur beschrieben [25, 26], durch die Verwendung eines inversen Modells $G_{inv}(s) = -\frac{G_{Zx}(s)}{G_{Rx}(s) \cdot G_{Mx}(s) \cdot G_{Lx}(s)}$ in der Rückführung der Störgrößenaufschaltung realisiert werden. Jedoch ist die gegebene Funktion $G_{inv}(s)$ aufgrund der ungenaueren Modellkenntnisse in der Praxis kaum realisierbar. Daher wird der Grenzwert der Übertragungsfunktion in (6.32) für $s \rightarrow 0$

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{Sx}(s) = \frac{k_x \cdot \epsilon \cdot (s^2 \cdot K_D + s \cdot K_P + K_I) + 2 \cdot k_{QDx} \cdot (s^2 + a_1 \cdot s + a_0)}{a_2 \cdot s^3 + s^2 \cdot (a_1 + K_D \cdot \epsilon) + s \cdot (a_0 + \epsilon \cdot K_P) + \epsilon \cdot K_I} \quad (6.33)$$

gebildet. Es ist in Gleichung (6.33) zu erkennen, dass der Parameter k_x nur im Zähler der Übertragungsfunktion vorkommt. Somit hat dieser keinen Einfluss auf die Stabilität sowie die Dynamik des entworfenen Regelkreises. Mit der Bedingung

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{Sx}(s) = \frac{k_x \cdot \epsilon \cdot K_I + 2 \cdot k_{QDx} \cdot a_0}{\epsilon \cdot K_I} \stackrel{!}{=} 0 \quad (6.34)$$

kann der Parameter k_x als Funktion der Regler- und Streckenparameter berechnet werden. Demnach wird der Regelfehler mit

$$k_x = -\frac{2 \cdot a_0 \cdot k_{QDx}}{\epsilon \cdot K_I} \quad (6.35)$$

kompensiert. Der erweiterte Regelkreis mit der Störgrößenaufschaltung wird experimentell mithilfe des aufgebauten Versuchstands validiert (siehe Abbildung 6.11). Hierzu verfolgt das Trackermodul die Linearkinematik mit einer Abtastfrequenz von 10 kHz, wobei die Linearkinematik die bereits entworfene sinusförmige Trajektorie abfährt (siehe Abbildung 6.12). In Abbildung 6.18a sind die Regelfehler mit und ohne Störgrößenaufschaltung (SGA) dargestellt. Durch die Aufschaltung der Geschwindigkeit der Linearkinematik am Reglereingang konnte der Regelfehler signifikant reduziert werden. Die Regelgüte (root mean square error (RMSE)) verbessert sich im Vergleich zu der nichtvorhandenen Störgrößenaufschaltung um Faktor 14.

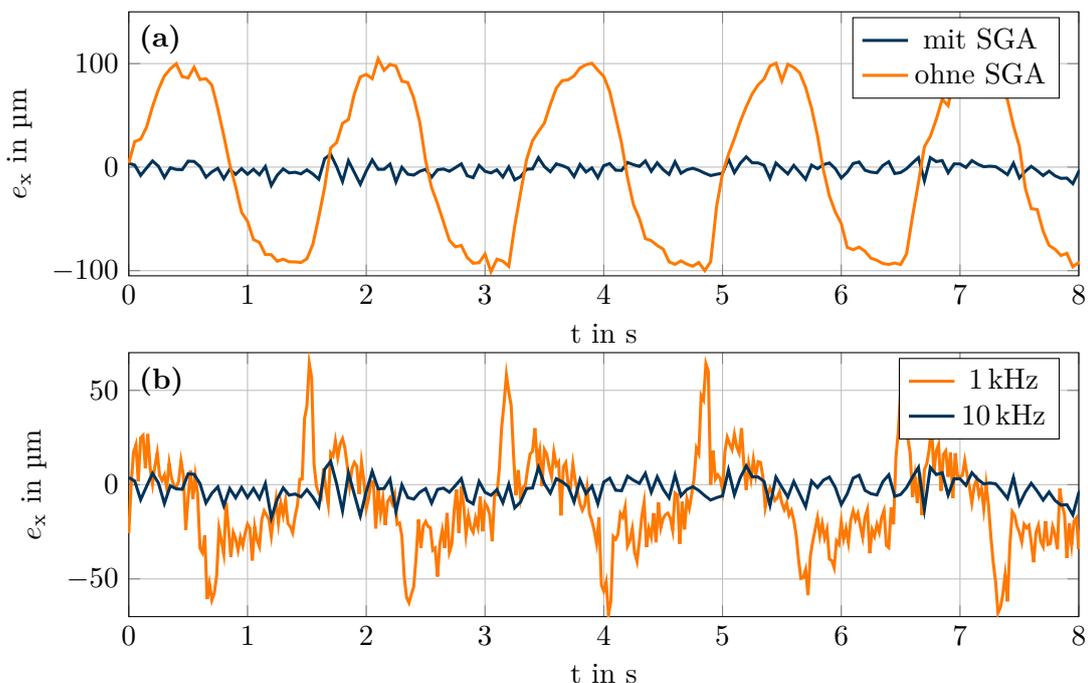


Abbildung 6.18: Regelfehler bei der Verfolgung der Linearkinematik (a) mit und ohne SGA; (b) SGA in Abhängigkeit von der Abtastfrequenz

Weiterhin wurde die Störgrößenaufschaltung in Abhängigkeit der Abtastfrequenz untersucht. Hierzu wird der Regelfehler bei der 1 kHz-Abtastung und der 10 kHz-Abtastung miteinander verglichen. Abbildung 6.18b zeigt die beiden Verläufe. Es fällt auf, dass der Regelfehler bei der 1 kHz-Abtastung zwar durch die Störgrößenaufschaltung reduziert werden kann, jedoch liegt dieser höher als mit der 10 kHz-Abtastung.

Durch die experimentellen Untersuchungen kann festgestellt werden, dass das Trackermodul durch zusätzliche Messinformationen der Linearkinematik in der Lage ist, den Messreflektor mit hoher Verfahrensgeschwindigkeit zu verfolgen. Der mittlere Regelfehler konnte durch die Störgrößenaufschaltung bei einer Abtastfrequenz von 10 kHz bis auf rund $5\ \mu\text{m}$ verringert werden. Die Störgrößenaufschaltung in Kombination mit einer höheren Abtastfrequenz zeigt ein sehr gutes Resultat bei der Strahlnachführregelung. Darüber hinaus kann mit dieser Methode eine dynamische Messung realisiert werden, die eine quasi-statische Messung ohne Regelfehler darstellt.

7 3-D-Messverfahren

Die folgenden Abschnitte dienen der Herleitung der verschiedenen Messmethoden zur Bestimmung der TCP-Position für ein Trackermodul als auch für mehrere Trackermodule. Hierbei werden die Methoden der Triangulation sowie der Multilateration unterschieden (siehe Abbildung 7.1). Die Triangulation benötigt sowohl die Analyse von Winkel- und Längenmessungen [38, 56, 57], während Multilateration nur die Längenmessungen berücksichtigt [85, 86].

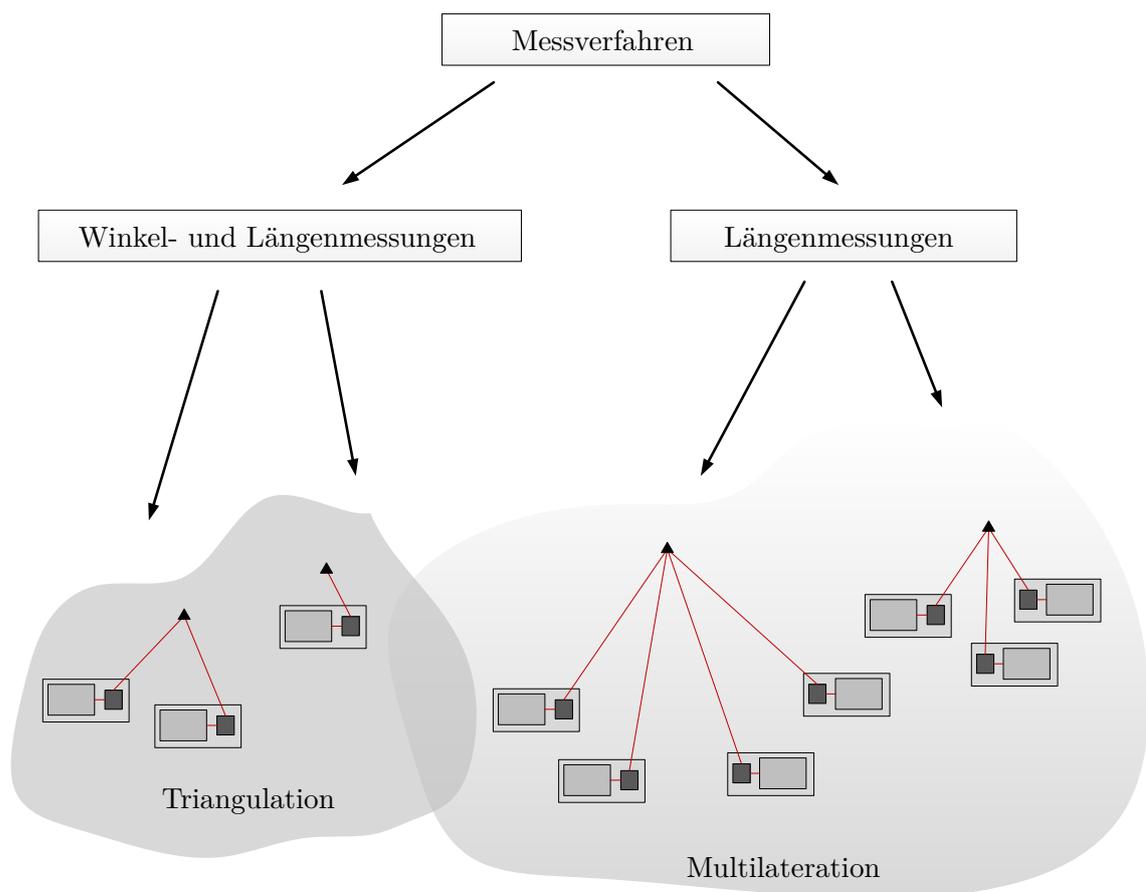


Abbildung 7.1: Messmethoden mit Winkel- und Längenmessungen

7.1 TCP-Positionsbestimmung durch Längen- und Winkelmessungen

Die Koordinate eines Punktes (x, y, z) im dreidimensionalen Raum kann mit Hilfe von zwei Winkeln sowie einer Länge ℓ bestimmt werden (siehe Abbildung 7.2). Unter der Verwendung eines idealen Strahlablenssystems erfolgt die Berechnung des Punktes

$$\mathbf{P}_{\text{TCP}} = \begin{bmatrix} x_{\text{TCP}} \\ y_{\text{TCP}} \\ z_{\text{TCP}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi \\ \ell \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi \\ \ell \cdot \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

in sphärischen Koordinaten [70]. Unter einem idealen Strahlablenssystem ist zu verstehen, dass sich der Strahllaufweg im Strahlablenssystem zu jeder beliebigen Winkelstellung nicht ändert und sich die Drehachsen der Azimutwinkel φ sowie Polarwinkel θ orthogonal in einem Punkt kreuzen. Dabei bilden die Drehachsen das Koordinatensystem.

Im Unterschied zum idealen Strahlablenssystem besteht das verwendete Strahlablenssystem aus zwei rotatorischen Achsen, die sich nicht schneidend und nicht parallel im Raum befinden. Eine Berechnung des Punktes ist mit der genannten Gleichung nur sehr ungenau. Der Strahlweg von der Laserquelle bis zum TCP kann nur mit Hilfe der analytischen Geometrie eindeutig bestimmt werden. Des Weiteren ist eine Definition eines Koordinatensystems im Trackermodul erforderlich, um den Bezug der Systemparameter eindeutig zuweisen zu können.

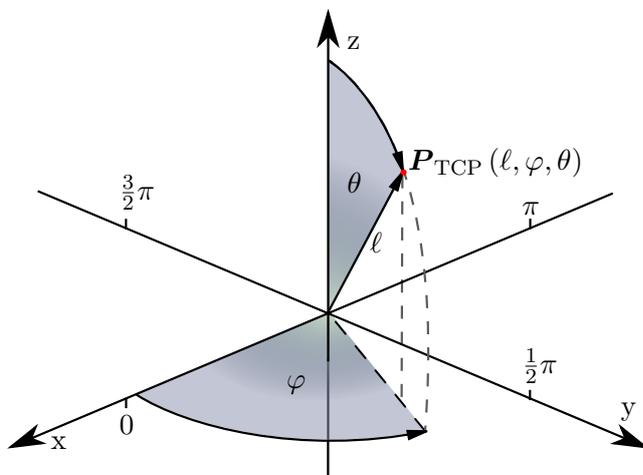


Abbildung 7.2:
Koordinatensystem des Trackermoduls unter Verwendung der sphärischen Koordinaten

7.1.1 Koordinatensystem des Trackermoduls

Die Lage eines Punktes im Raum kann mit Hilfe von kartesischen Koordinaten angegeben werden, die aus drei orthogonalen Achsen zueinander zusammengesetzt sind. Jedes Trackermodul verfügt über ein eigenes Koordinatensystem S_T . Ausgehend von diesem kartesischen Koordinatensystem kann jeder Punkt im Raum in sphärischen Koordinaten durch die Messung von zwei Winkeln und einer Länge berechnet werden. Hierbei werden die Koordinatenachsen (x_{S_T} , y_{S_T} , z_{S_T}) des Koordinatensystems durch das jeweilige Strahlablesystem vom Trackermodul wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{S_T} &= \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{y}_{S_T} &= \mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{z}_{S_T} &= \mathbf{x}_{S_T} \times \mathbf{y}_{S_T}. \end{aligned} \quad (7.2)$$

Abbildung 7.3 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Unter der Annahme, dass die Drehachsen der Spiegel (\mathbf{v}_1 , \mathbf{v}_2) als Einheitsvektoren in einem vorgegebenen Koordinatensystem S_B bekannt sind, wird die Drehachse \mathbf{v}_2 mit \mathbf{x}_{S_T} gleichgesetzt. Aufgrund der Tatsache, dass \mathbf{y}_{S_T} orthogonal zu \mathbf{x}_{S_T} sein muss, wird \mathbf{y}_{S_T} aus dem Kreuzprodukt zwischen \mathbf{v}_1 und \mathbf{v}_2 berechnet. Ist \mathbf{y}_{S_T} bekannt, so kann \mathbf{z}_{S_T} aus dem Kreuzprodukt zwischen \mathbf{x}_{S_T} und \mathbf{y}_{S_T} ermittelt werden. Der Koordinatenursprung befindet sich im Schnittpunkt von \mathbf{v}_2 und der in die \mathbf{x}_{S_T} - \mathbf{z}_{S_T} -Ebene projizierten Achse \mathbf{v}_1 . Der Parameter d beschreibt den Abstand zwischen der Drehachse des Spiegels 1 und dem Ursprung in \mathbf{y}_{S_T} -Richtung.

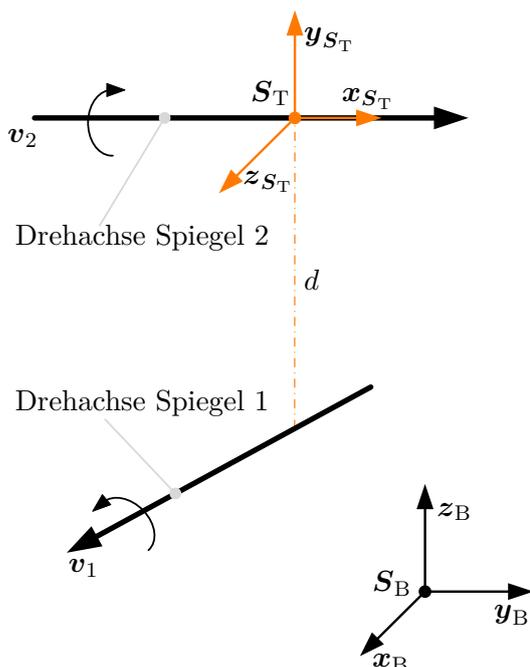


Abbildung 7.3:
Koordinatensystem des Trackermoduls

7.1.2 Strahlverlauf durch das Strahlablesystem

Nachdem das Koordinatensystem für das Trackermodul definiert wurde, kann der Strahlverlauf von der Laserquelle bis zum Messreflektor, dargestellt in der Abbildung 7.4, berechnet werden [56, 57, 90]. Der Laserstrahl tritt aus einer Laserquelle aus, die durch den Ortsvektor $\mathbf{P}_0 = [P_{0x}, P_{0y}, P_{0z}]^T$ beschrieben wird. Die Richtung des Strahls wird durch den Vektor $\mathbf{r}_0 = [r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}]^T$ angegeben. Der Laserstrahl ist so ausgerichtet, dass er den ersten Spiegel des Strahlablesystems im Punkt \mathbf{P}_1 trifft. Durch die Reflexion an Spiegel 1 wird die Richtung des Strahls verändert und somit gelangt der Strahl zum zweiten Spiegel mit dem Auftreffpunkt \mathbf{P}_2 . Dabei wird der Richtungsvektor zwischen Spiegel 1 und Spiegel 2 als \mathbf{r}_1 bezeichnet. Der Spiegel 2 wiederum reflektiert den Strahl in Richtung \mathbf{r}_2 zum Punkt \mathbf{P}_{TCP} , der die Messreflektor-Position im Raum darstellt. Um die TCP-Position im Raum bestimmen zu können, müssen die Auftreffpunkte ($\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$) sowie die Richtungsvektoren ($\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$) berechnet werden. Hierbei wird die Berechnung des Schnittpunktes zwischen Ebene und Gerade im Raum angewendet. Unter der Berücksichtigung der Vektoren ($\mathbf{P}_0, \mathbf{r}_0$) und mit der Variable t kann der Verlauf des Laserstrahls, bevor er auf den ersten

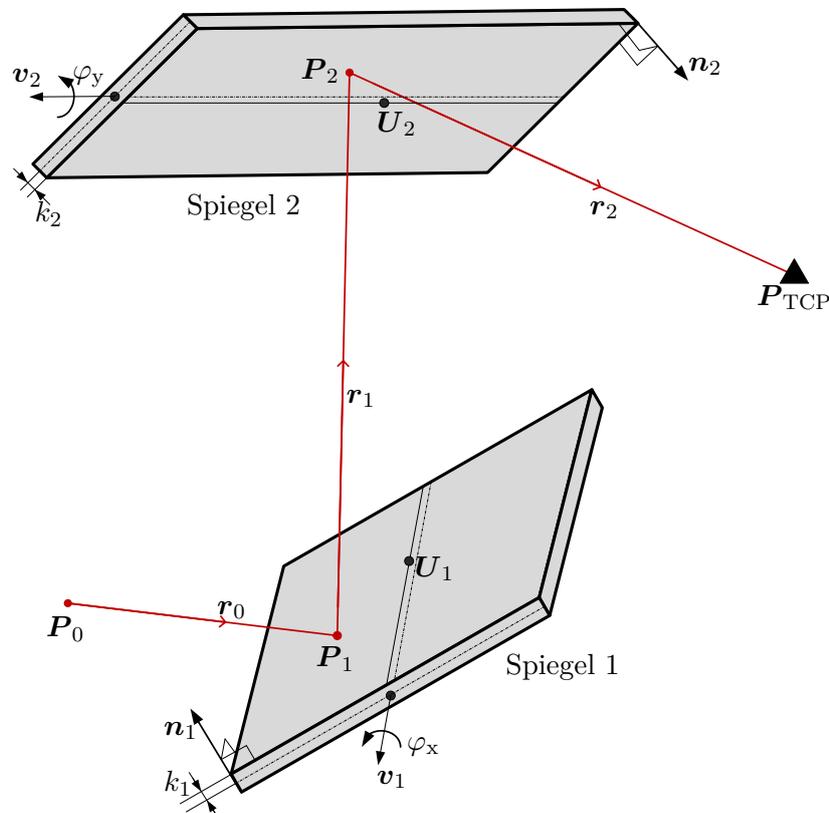


Abbildung 7.4: Verlauf des Laserstrahls durch das Strahlablesystem

Spiegel trifft, als eine Geradengleichung

$$\mathbf{g}_0 = \mathbf{P}_0 + t \cdot \mathbf{r}_0 \quad (7.3)$$

im Raum aufgestellt werden. Die Ebene \mathbf{E}_1 , welche die Reflexionsfläche des rotierenden Spiegel 1, ist gekennzeichnet durch ihren Normalvektor \mathbf{n}_1 sowie einen Punkt \mathbf{U}_1 auf der Ebene. Die Gleichung der beschriebenen Ebene lässt sich durch folgende Normalform

$$\mathbf{E}_1 : \mathbf{n}_1 \cdot \left(\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T - \mathbf{U}_1 \right) = 0 \quad (7.4)$$

ausdrücken. Wobei der Punkt \mathbf{U}_1 wie folgt definiert wird:

$$\mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} 0 & d & 0 \end{bmatrix}^T + k_1 \cdot \mathbf{n}_1. \quad (7.5)$$

Der Parameter d ist der Abstand zwischen \mathbf{v}_1 und \mathbf{v}_2 in \mathbf{y}_{S_T} -Richtung (siehe Abbildung 7.3). Der Normalabstand zwischen \mathbf{v}_1 und der Spiegeloberfläche ist durch den Parameter k_1 charakterisiert. Gleichung (7.5) zeigt deutlich, dass der Punkt \mathbf{U}_1 eine Funktion des Normalvektors \mathbf{n}_1 ist. Schneidet die beschriebene Gerade \mathbf{g}_0 die Ebene \mathbf{E}_1 , kann der Auftreffpunkt \mathbf{P}_1 durch Gleichung (7.3) und Gleichung (7.4) wie folgt berechnet werden:

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}_0 + \frac{\langle (\mathbf{U}_1 - \mathbf{P}_0), \mathbf{n}_1 \rangle}{\langle \mathbf{r}_0, \mathbf{n}_1 \rangle} \cdot \mathbf{r}_0. \quad (7.6)$$

Unter Anwendung des Reflexionsgesetzes und mit Hilfe des Normalvektors \mathbf{n}_1 lässt sich der Richtungsvektor \mathbf{r}_1 durch die Richtung des einfallenden Strahls \mathbf{r}_0 in folgender Form bestimmt werden:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_0 - 2 \cdot \langle \mathbf{r}_0, \mathbf{n}_1 \rangle \cdot \mathbf{n}_1. \quad (7.7)$$

Der von Spiegel 1 zu Spiegel 2 reflektierte Laserstrahl ist nun durch den Auftreffpunkt \mathbf{P}_1 sowie den Richtungsvektor \mathbf{r}_1 als

$$\mathbf{g}_1 = \mathbf{P}_1 + t \cdot \mathbf{r}_1 \quad (7.8)$$

beschrieben. Analog zum Spiegel 1 wird Spiegel 2 als eine Ebene \mathbf{E}_2 mit dem Normalvektor \mathbf{n}_2 sowie dem Punkt \mathbf{U}_2 betrachtet. Hierbei ist \mathbf{U}_2 ein Punkt auf der Spiegeloberfläche, der den Normalabstand k_2 zwischen dem Koordinatenursprung und der Oberfläche des Spiegels 2 wiedergibt. Dementsprechend ist

$$\mathbf{E}_2 : \mathbf{n}_2 \cdot \left(\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T - k_2 \cdot \mathbf{n}_2 \right) = 0. \quad (7.9)$$

Auch der Auftreffpunkt \mathbf{P}_2 lässt sich wie in Gleichung (7.6) mit Hilfe der Gleichungen (7.8) und (7.9) wie folgt bestimmen:

$$\mathbf{P}_2 = \mathbf{P}_1 + \frac{\langle (\mathbf{U}_2 - \mathbf{P}_1), \mathbf{n}_2 \rangle}{\langle \mathbf{r}_1, \mathbf{n}_2 \rangle} \cdot \mathbf{r}_1. \quad (7.10)$$

Der Richtungsvektor \mathbf{r}_2 ergibt sich aus dem Normalvektor \mathbf{n}_2 sowie den einfallenden Strahl von Spiegel 1

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_1 - 2 \cdot \langle \mathbf{r}_1, \mathbf{n}_2 \rangle \cdot \mathbf{n}_2. \quad (7.11)$$

Der Auftreffpunkt \mathbf{P}_2 sowie der Richtungsvektor \mathbf{r}_2 beschreiben den aus dem Strahl-
ablenksystem austretenden Strahl

$$\mathbf{g}_2 = \mathbf{P}_2 + \ell \cdot \mathbf{r}_2, \quad \text{mit } \ell = \ell_0 + \Delta\ell, \quad (7.12)$$

der dann im gegebenen Fall auf den Reflektor trifft. Dieser Punkt ist in Abbildung 7.4 als \mathbf{P}_{TCP} angegeben. Der Parameter ℓ in Gleichung (7.12) beschreibt einen Abstand zwischen Auftreffpunkt \mathbf{P}_2 und \mathbf{P}_{TCP} . Im Startpunkt der Messung \mathbf{P}_{TCP} wird die Messlänge $\Delta\ell$ des Interferometers auf den Wert Null gesetzt. Mit der Annahme, dass die Initiallänge ℓ_0 sowie alle anderen Systemparameter im Strahlablenksystem bekannt sind, kann der Punkt \mathbf{P}_{TCP} durch die Gleichung (7.12) berechnet werden.

Nun soll der Messreflektor vom Punkt \mathbf{P}_{TCP} aus beliebig zum Punkt \mathbf{P}'_{TCP} bewegt werden (siehe Abbildung 7.5). Dabei wird der Laserstrahl durch die Rotation der Spiegel kontinuierlich nachgeführt. Im Punkt \mathbf{P}'_{TCP} haben sich die beschriebenen Ebenen verändert (somit auch die Auftreffpunkte $(\mathbf{P}'_1, \mathbf{P}'_2)$ und die Richtungsvektoren $(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2)$), denn aufgrund der Tatsache, dass die Normalvektoren der Ebene orthogonal zu den Drehachsen stehen, werden diese bei der Bewegung des Messreflektors vom Punkt \mathbf{P}_{TCP} zum \mathbf{P}'_{TCP} mit rotiert. Somit entstehen im Punkt \mathbf{P}'_{TCP} neue Normalvektoren, die mit Hilfe der Rodrigues-Formel wie folgt berechnet werden [78, 90]:

$$\mathbf{n}'_i = \mathbf{R}_R \cdot \mathbf{n}_i, \quad i = 1, 2 \quad (7.13)$$

mit

$$\mathbf{R}_R = \begin{bmatrix} v_x^2 \cdot C_1 + C & v_x \cdot v_y \cdot C_1 - v_z \cdot S & v_x \cdot v_z \cdot C_1 + v_y \cdot S \\ v_x \cdot v_y \cdot C_1 + v_z \cdot S & v_y^2 \cdot C_1 + C & v_y \cdot v_z \cdot C_1 - v_x \cdot S \\ v_x \cdot v_z \cdot C_1 - v_y \cdot S & v_y \cdot v_z \cdot C_1 + v_x \cdot S & v_z^2 \cdot C_1 + C \end{bmatrix} \quad (7.14)$$

$$C = \cos \varphi_j, S = \sin \varphi_j, C_1 = (1 - C), j = x, y.$$

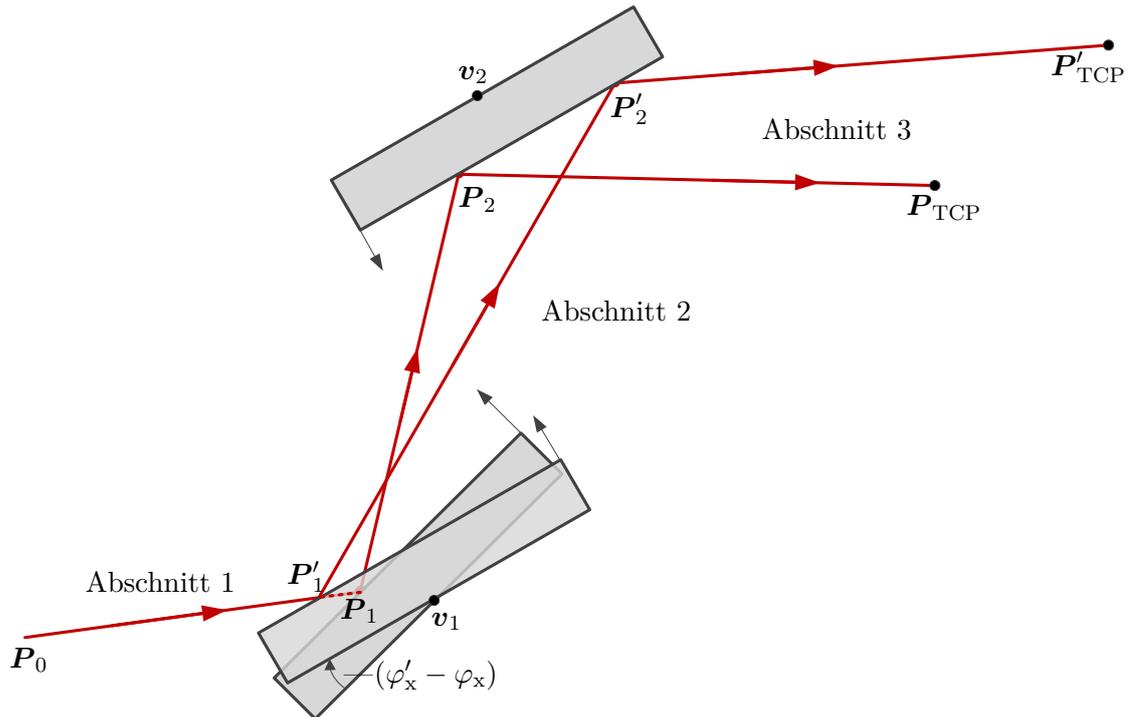


Abbildung 7.5: Interferometrische Längenmessung im Strahlengang

Die Matrix \mathbf{R}_R beschreibt die Rotation um eine beliebige Drehachse im Raum. Der Drehwinkel φ wird dabei durch den integrierten Winkelencoder gemessen. Hierbei bilden die Elemente $[v_x, v_y, v_z]^T$ den Einheitsvektor der jeweiligen Drehachse. Die neu ermittelten Normalvektoren werden in Gleichungen (7.6), (7.7), (7.10), (7.11) eingesetzt, um die Auftreffpunkte (P'_1, P'_2) sowie die Richtungsvektoren (r'_1, r'_2) im Punkt P'_{TCP} zu berechnen.

7.1.3 Interferometrische Messung im Strahlablenssystem und Korrektur

Abbildung 7.5 zeigt deutlich, dass die Auftreffpunkte des Laserstrahls im Strahlablenssystem bei jeder Winkelstellung unterschiedlich sind. Dies führt dazu, dass das Interferometer nicht nur die Längenänderung zwischen P_{TCP} und P'_{TCP} misst, sondern auch Längenänderungen im Strahlablenssystem.

Zwischen Drehachse und Spiegeloberfläche existiert ein Versatz, und da der Laserstrahl nicht direkt auf die Drehachse trifft, ergibt sich eine veränderte Wegstrecke, die der Laserstrahl durchlaufen muss. Diese variable Wegstrecke im Strahlengang wird zusätzlich zu der Längenänderung zwischen P_{TCP} und P'_{TCP} von dem Interferometer gemessen. Die Überlagerung der Längenänderungen führt zu einer fehlerbehafteten

Berechnung der TCP-Position. Um die gemessenen Längenänderung im Strahlengang kompensieren zu können, muss zunächst die gesamte relativ gemessene Längenänderung

$$\begin{aligned} \Delta\ell = & \underbrace{\|(\mathbf{P}'_1 - \mathbf{P}_0) - (\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_0)\|}_{\text{Abschnitt 1}} \\ & + \underbrace{\|(\mathbf{P}'_2 - \mathbf{P}'_1) - (\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1)\|}_{\text{Abschnitt 2}} + \underbrace{\|(\mathbf{P}'_{\text{TCP}} - \mathbf{P}'_2) - (\mathbf{P}_{\text{TCP}} - \mathbf{P}_2)\|}_{\text{Abschnitt 3}} \end{aligned} \quad (7.15)$$

betrachtet werden. Dazu wird das System abschnittsweise analysiert und für jeden Abschnitt die Längenänderung aufaddiert, die bei Bewegung des Messreflektors von \mathbf{P}_{TCP} aus zu einem beliebigen \mathbf{P}'_{TCP} auftritt (siehe Abbildung 7.5). Hierbei entspricht Abschnitt 1 der Änderung zwischen dem Auftreffpunkt auf Spiegel 1 und dem Ursprung des Laserstrahls, Abschnitt 2 der Wegänderung zwischen den Auftreffpunkten innerhalb des Strahlablensystems und Abschnitt 3 der Änderung zwischen dem Messreflektor und dem Auftreffpunkt auf Spiegel 2 [56]. Bei einem idealen Strahlablensystem sind die Abschnitte 1 und 2 zu jedem Zeitpunkt Null. Diese Abschnitte entsprechen der vom Interferometer gemessenen Längenänderung im Strahlengang, welche durch einen Korrekturterm

$$\begin{aligned} e_K = & \|\mathbf{P}'_1(\varphi'_x) - \mathbf{P}_0\| - \|\mathbf{P}_1(\varphi_x) - \mathbf{P}_0\| \\ & - \|\mathbf{P}'_2(\varphi'_x, \varphi'_y) - \mathbf{P}'_1(\varphi'_x)\| - \|\mathbf{P}_2(\varphi_x, \varphi_y) - \mathbf{P}_1(\varphi_x)\| \end{aligned} \quad (7.16)$$

eliminiert werden kann. Somit kann die korrigierte Länge

$$\Delta\ell_K = \Delta\ell - e_K \quad (7.17)$$

als Funktion der Systemparameter sowie der Längen- und Winkelmessungen angegeben werden. Die Herleitung für die Berechnung der TCP-Position mit einem Trackermodul ist durch die Gleichung (7.16) vollständig beschrieben. Sind die Systemparameter bekannt, so lässt sich mit diesem analytischen Modell durch die Längen ($\Delta\ell$)- und die Winkelmessungen ($\varphi_x, \varphi_y, \varphi'_x, \varphi'_y$) eine dreidimensionale Position im Raum berechnen. Die Koordinaten ergeben sich allgemein als Funktion der Systemparameter in folgender Form:

$$\mathbf{P}_{\text{TCP}} = f(\mathbf{P}_0, \mathbf{r}_0, \mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, d, k_1, k_2, \ell_0). \quad (7.18)$$

Mit der Annahme, dass die Systemparameter $\mathbf{p}_T = [\mathbf{P}_0, \mathbf{r}_0, \mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, d, k_1, k_2]^T$ in Gleichung (7.18) bekannt sind, so ist der Punkt \mathbf{P}_{TCP} nur noch von der Initi-

allänge ℓ_0 abhängig. Da das Interferometer nach der Lokalisierungsphase auf den Wert Null zurückgesetzt werden muss, ist die Initiallänge, abhängig vom Standort des Messreflektors, zu jeder Messung unterschiedlich. Die unbekannte Initiallänge kann mithilfe einer Kalibrierfahrt identifiziert werden. Dieses Verfahren erfordert jedoch ein zusätzliches Referenzmesssystem. Eine Alternative stellt das Messverfahren der Triangulation dar, bei welcher die bereits vorliegenden Sensorwerte zweier Trackermodule zur Berechnung der Initiallänge verwendet werden.

7.2 TCP-Positionsbestimmung durch Triangulation mit zwei Trackermodulen

Der austretende Laserstrahl jedes Trackermoduls ist durch die hergeleitete Geradengleichung (siehe Gleichung (7.12)) mit dem Richtungsvektor sowie den Auftreffpunkt beschrieben. Werden zwei Trackermodule zur 3-D-Positionsmessung verwendet, ist die Berechnung der Absolutlänge ℓ für jedes Trackermodul durch den Schnittpunkt der beiden Laserstrahlen möglich [57]. Abbildung 7.6 stellt diesen Sachverhalt dar. Zwei Trackermodule (T_1 , T_2) sind im Raum aufgestellt, jedes Modul verfügt über ein eigenes Koordinatensystem (S_1 , S_2). Der Ursprung beschreibt somit den Standort des jeweiligen aufgestellten Trackermoduls. Die Laserstrahlen treffen den Messreflektor und schneiden sich im Idealfall in dessen Zentrum. Jedoch muss aufgrund der messtechnischen Eigenschaften wie Quantisierungsrauschen, der endlichen Messauflösung sowie Nichtlinearitäten des Winkelsensors angenommen werden, dass sich aus den berechneten Geraden beim Auftreffen auf den Messreflektor kein Schnittpunkt

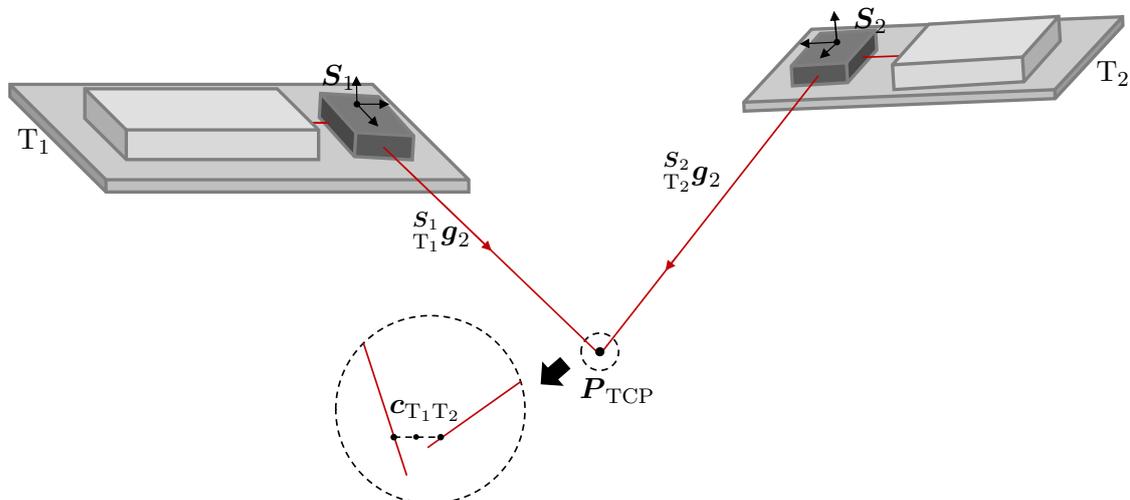


Abbildung 7.6: 3-D-Positionserfassung mit zwei Trackermodulen

ergibt, die Geraden also nicht schneidend und nicht parallel (windschief) angenommen werden. Da sich die berechneten Geraden

$$\begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{matrix} \mathbf{g}_2 = \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{matrix} \mathbf{P}_2 + \ell_1 \cdot \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{matrix} \mathbf{r}_2 \quad (7.19)$$

$$\begin{matrix} \mathbf{S}_2 \\ T_2 \end{matrix} \mathbf{g}_2 = \begin{matrix} \mathbf{S}_2 \\ T_2 \end{matrix} \mathbf{P}_2 + \ell_2 \cdot \begin{matrix} \mathbf{S}_2 \\ T_2 \end{matrix} \mathbf{r}_2 \quad (7.20)$$

nicht schneiden, ist der Mittelpunkt einer Schnittgerade zwischen beiden Geraden zu finden, der die TCP-Position repräsentiert. Es ist zu beachten, dass die Gleichungen (7.19) und (7.20) in den lokalen Koordinatensystemen $(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2)$ der Trackermodule angegeben sind.

Um den Punkt \mathbf{P}_{TCP} berechnen zu können, müssen die beiden Geradengleichungen in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden. Hierfür wird das lokale Koordinatensystem von T_1 als Weltkoordinatensystem betrachtet. Die Geradengleichung von T_2 wird durch folgende Transformationsvorschrift in das globale Koordinatensystem

$$\begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{matrix} \mathbf{g}_2 = \mathbf{R}(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1) \cdot \begin{matrix} \mathbf{S}_2 \\ T_2 \end{matrix} \mathbf{g}_2 + \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{matrix} \mathbf{l} = \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{matrix} \mathbf{P}_2 + \ell_2 \cdot \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{matrix} \mathbf{r}_2 \quad (7.21)$$

mit

$$\mathbf{R}(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1) = \mathbf{R}_\alpha(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1) \cdot \mathbf{R}_\beta(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1) \cdot \mathbf{R}_\gamma(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1) \quad (7.22)$$

überführt. Der Vektor $\begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{matrix} \mathbf{l} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{bmatrix} x, \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{bmatrix} y, \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{bmatrix} z$ in Gleichung (7.21) beschreibt den Standort des Trackermoduls T_2 im globalen \mathbf{S}_1 -System. Durch die Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1)$ wird das \mathbf{S}_2 - in das \mathbf{S}_1 -System gedreht [24, 78]. Diese ist eine 3×3 -Matrix und beschreibt die Drehachsen und die dazugehörigen Drehwinkel der Rotation. Dabei wird zunächst um die $x_{\mathbf{S}_2}$ -Achse mit dem Winkel $\begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \alpha$ gedreht, anschließend erfolgt die Drehung um die $y_{\mathbf{S}_2}$ -Achse mit $\begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \beta$ und zum Schluss wird die Rotation um die $z_{\mathbf{S}_2}$ -Achse mit $\begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \gamma$ realisiert. Nach Gleichung (7.22) werden die einzelnen Drehungen multiplikativ miteinander verknüpft. Die Rotation um die jeweilige Achse ist wie folgt definiert:

$$\mathbf{R}_\alpha(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \alpha & -\sin \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \alpha \\ 0 & \sin \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \alpha & \cos \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \alpha \end{bmatrix} \quad (7.23)$$

$$\mathbf{R}_\beta(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1) = \begin{bmatrix} \cos \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \beta & 0 & \sin \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \beta & 0 & \cos \begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \beta \end{bmatrix} \quad (7.24)$$

$$\mathbf{R}_\gamma(\mathbf{S}_2, \mathbf{S}_1) = \begin{bmatrix} \cos_{\mathbf{S}_2} \mathbf{S}_1 \gamma & -\sin_{\mathbf{S}_2} \mathbf{S}_1 \gamma & 0 \\ \sin_{\mathbf{S}_2} \mathbf{S}_1 \gamma & \cos_{\mathbf{S}_2} \mathbf{S}_1 \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7.25)$$

Nach der Transformation kann der minimale Abstand zwischen den windschiefen Geraden wie folgt bestimmt werden:

$$\|\mathbf{c}_{T_1 T_2}\| = \left\langle \left(\begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{smallmatrix} \mathbf{g}_2 - \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{smallmatrix} \mathbf{g}_2 \right), \left(\begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{smallmatrix} \mathbf{g}_2 - \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{smallmatrix} \mathbf{g}_2 \right) \right\rangle. \quad (7.26)$$

Die Gleichung (7.26) wird nach ℓ_1, ℓ_2 partiell abgeleitet und zu Null gesetzt, somit entsteht ein lineares Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} \ell_1 \\ \ell_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left\langle \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{smallmatrix} \mathbf{r}_2, \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{smallmatrix} \mathbf{r}_2 \right\rangle & \left\langle -\begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{smallmatrix} \mathbf{r}_2, \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{smallmatrix} \mathbf{r}_2 \right\rangle \\ \left\langle -\begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{smallmatrix} \mathbf{r}_2, \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{smallmatrix} \mathbf{r}_2 \right\rangle & \left\langle \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{smallmatrix} \mathbf{r}_2, \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{smallmatrix} \mathbf{r}_2 \right\rangle \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \left\langle \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{smallmatrix} \mathbf{r}_2, \left(\begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{smallmatrix} \mathbf{P}_2 - \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{smallmatrix} \mathbf{P}_2 \right) \right\rangle \\ \left\langle \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{smallmatrix} \mathbf{r}_2, \left(\begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{smallmatrix} \mathbf{P}_2 - \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{smallmatrix} \mathbf{P}_2 \right) \right\rangle \end{bmatrix}. \quad (7.27)$$

Die TCP-Position lässt sich durch Gleichungen (7.19) und (7.21) wie folgt bestimmen:

$$\mathbf{P}_{\text{TCP}} = \begin{bmatrix} x_{\text{TCP}} \\ y_{\text{TCP}} \\ z_{\text{TCP}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \left(\begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_1 \end{smallmatrix} \mathbf{g}_2 + \begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{smallmatrix} \mathbf{g}_2 \right). \quad (7.28)$$

Gleichung (7.27) zeigt, dass die Abstände (ℓ_1, ℓ_2) zwischen den Spiegeln 2 und dem Messreflektor zu jedem beliebigen Punkt im Raum mit Hilfe von zwei Trackermodulen berechnet werden können. Durch das zusätzliche Trackermodul steigt jedoch auch die Anzahl der zu ermittelnden Parameter. Außer den Systemparametern von beiden Trackermodulen sind zusätzlich Standortparameter $\begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ T_2 \end{smallmatrix} \mathbf{l}$ sowie Orientierungsparameter $\left(\begin{smallmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{smallmatrix} \mathbf{O} = [\mathbf{S}_2 \alpha, \mathbf{S}_2 \beta, \mathbf{S}_2 \gamma]^T \right)$ zwischen den Koordinaten zu bestimmen. Dies erfordert eine weitere Identifikation der Koordinatensysteme. Somit ist die Genauigkeit der zu bestimmenden Abstände von den Systemparametern sowie den gemessenen Winkeln abhängig. Die Genauigkeit verschlechtert sich aufgrund der genannten Messbedingungen, je weiter der Messreflektor vom Ursprung entfernt ist. Des Weiteren ist die Genauigkeit der Position abhängig von der Auflösung des verwendeten Winkelsensors. Dies wurde bereits im Abschnitt 2.1.4 erläutert.

Eine Verschlechterung der berechneten Absolutlängen führt zu Positionsungenauigkeiten, die auf das gesamte Messsystem wirken. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, können drei Trackermodule zur Berechnung der TCP-Position verwendet werden, die dann nur noch auf Längenmessung beruht.

7.3 Multilateration

Die von mehreren Trackermodulen mittels Interferometer gemessenen Längen werden zur Berechnung der TCP-Position des Messreflektors verwendet. Unter Verwendung von drei Trackermodulen wird das Messverfahren der Trilateration angewendet, bei mehr als drei Trackermodule das Messverfahren der Multilateration [85]. Die Bewegung des Messreflektors wird von den vier Trackermodulen verfolgt, indem die Längenänderung zwischen den jeweiligen Koordinatenursprüngen und den Zielpunkten gemessen werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Es wird vorausgesetzt, dass die vier Trackermodule das Zentrum des Messreflektors im Punkt \mathbf{P}_{TCP} gefunden haben.

Damit eine relative Längenmessung stattfindet, wird das Interferometer des jeweiligen Trackermoduls im Punkt \mathbf{P}_{TCP} auf Null zurückgesetzt. Dadurch entsteht eine unbekannte Initiallänge ${}_{T_i}\ell_0$ ($i = 1 \dots 4$) zwischen dem Punkt \mathbf{P}_{TCP} und dem Auftreffpunkt auf dem Spiegel 2 \mathbf{P}_2 . Diese Länge entspricht der bereits erwähnten Absolutlänge zwischen Trackermodul und Messreflektor. Bewegt sich der Messreflektor vom Punkt \mathbf{P}_{TCP} zu \mathbf{P}'_{TCP} , so wird dieser vom Trackermodul verfolgt. Dabei misst das Interferometer in Bezug auf das \mathbf{S}_i -System eine Längenänderung $\Delta\ell_i$ zwischen \mathbf{P}_{TCP} und \mathbf{P}'_{TCP} .

Es wird angenommen, dass die im Strahlablesystem auftretende zusätzliche Wegänderung durch das im Abschnitt 7.1.3 hergeleitete Korrekturmodell vollständig

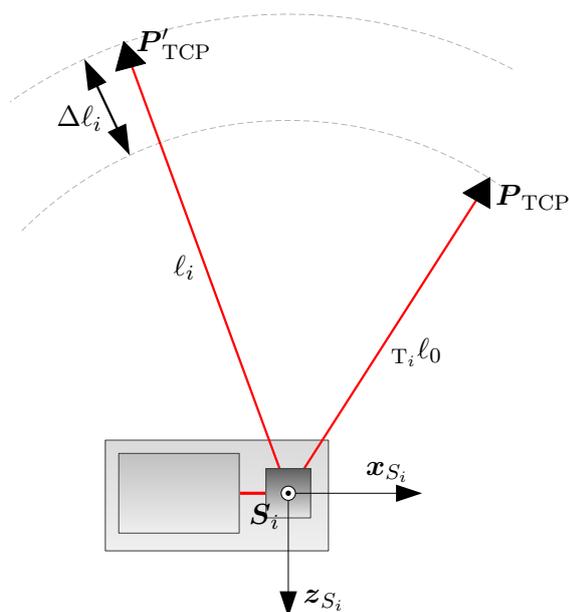


Abbildung 7.7:
Absolutlänge zwischen Messreflektor und Trackermodul

kompensiert wurde. Die Auftreffpunkte auf dem Spiegel seien unverändert und die Absolutlängen der Trackermodule seien vom lokalen Koordinatenursprung bis zum TCP betrachtet. Demnach wird die Absolutlänge im Punkt \mathbf{P}'_{TCP} durch die unbekannte Initiaallänge sowie die gemessene Längenänderung

$$\ell_i = {}_{T_i}\ell_0 + \Delta\ell_i, \quad i = 1 \dots 4 \quad (7.29)$$

berechnet. Werden die Absolutlängen zur Berechnung der TCP-Position unter der Anwendung des Messprinzips der Tri- bzw. Multilateration herangezogen, so müssen die vier Trackermodule den Messreflektor in einem gemeinsamen Koordinatensystem \mathbf{S}_G messen, welches in Abbildung 7.8 dargestellt ist [85, 86]. Das aufgestellte \mathbf{S}_G -System kann als ein globales Koordinatensystem betrachtet werden. Dabei beschreiben die Ursprünge der \mathbf{S}_i -Systeme die Standorte $\mathbf{l}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ der Trackermodule in globalen \mathbf{S}_G -System. Jedes Trackermodul hat somit drei Standortkoordinaten. Wird bspw. das \mathbf{S}_1 -System vom Trackermodul T_1 als das globale \mathbf{S}_G -System definiert, so liegt sein Standort im Ursprung des \mathbf{S}_G -Systems. Demnach ergeben sich für die verbleibenden Trackermodule insgesamt neun Standortkoordinaten. Die Zahl der

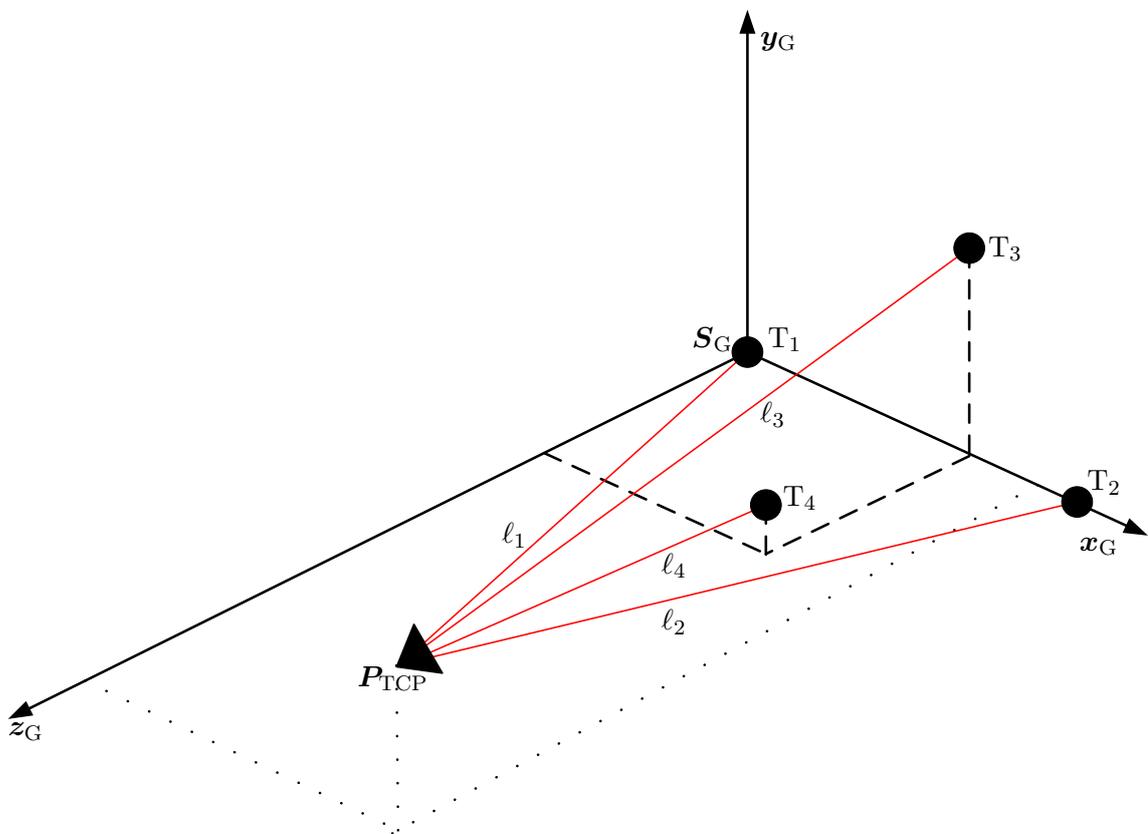


Abbildung 7.8: Das Messprinzip der Tri- bzw. Multilateration in einem gemeinsamen Koordinatensystem [64]

erforderlichen Standortkoordinaten kann von neun auf sechs verringert werden, indem das \mathbf{S}_G -System in Abhängigkeit des Aufstellungsorts der Trackermodule definiert wird. Wie in Abbildung 7.8 zu sehen ist, wird der Standort des Trackermoduls T_1 als Nullpunkt des \mathbf{S}_G -Systems und hat daher die Koordinaten $\mathbf{l}_1 = [0, 0, 0]^T$. Mit dem Trackermodul T_2 wird die \mathbf{x}_G -Achse des \mathbf{S}_G -Systems gebildet. Die \mathbf{x}_G -Achse ist eine Gerade im Raum, welche die Ursprünge der Trackermodule T_1 und T_2 schneidet. Somit liegt das Trackermodul T_2 entlang der \mathbf{x}_G -Achse und hat daher die Standortkoordinaten $\mathbf{l}_2 = [x_2, 0, 0]^T$. Nun wird die \mathbf{y}_G -Achse durch das Hinzufügen des Trackermoduls T_3 definiert. Damit auch T_3 die kleinst mögliche Anzahl Parameter besitzt, wird dessen Standort mit $\mathbf{l}_3 = [x_3, y_3, 0]^T$ definiert. Auf Basis der \mathbf{x}_G - und \mathbf{y}_G -Achse wird die \mathbf{z}_G -Achse durch deren Kreuzprodukt gebildet. Wird ein weiteres Trackermodul T_4 eingesetzt, so hat dieses die Standortposition $\mathbf{l}_4 = [x_4, y_4, z_4]^T$.

Die Beziehung zwischen den Absolutlängen sowie der TCP-Position im definierten \mathbf{S}_G -System kann in Abhängigkeit der Standortkoordinaten durch die folgende sphärischen Gleichungen

$$0 = (\tau_1 \ell_0 + \Delta \ell_1)^2 - (x_{\text{TCP}}^2 + y_{\text{TCP}}^2 + z_{\text{TCP}}^2) \quad (7.30)$$

$$0 = (\tau_2 \ell_0 + \Delta \ell_2)^2 - ((x_{\text{TCP}} - x_2)^2 + y_{\text{TCP}}^2 + z_{\text{TCP}}^2) \quad (7.31)$$

$$0 = (\tau_3 \ell_0 + \Delta \ell_3)^2 - ((x_{\text{TCP}} - x_3)^2 + (y_{\text{TCP}} - y_3)^2 + z_{\text{TCP}}^2) \quad (7.32)$$

$$0 = (\tau_4 \ell_0 + \Delta \ell_4)^2 - ((x_{\text{TCP}} - x_4)^2 + (y_{\text{TCP}} - y_4)^2 + (z_{\text{TCP}} - z_4)^2) \quad (7.33)$$

beschrieben werden [85, 86]. Die Position des Messreflektors kann durch das Auflösen der ersten drei Gleichungen (7.30), (7.31), (7.32) bestimmt werden. Wird Gleichung (7.30) mit (7.31) gleichgesetzt und nach der Koordinate x_{TCP} umgestellt, so ergibt sich

$$x_{\text{TCP}} = \frac{\ell_1^2 - \ell_2^2 + x_2^2}{2 \cdot x_2} \quad (7.34)$$

Analog hierzu wird Gleichung (7.30) mit (7.32) gleichgesetzt, so kann nach der Koordinate

$$y_{\text{TCP}} = \frac{\ell_1^2 - \ell_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - 2 \cdot x_3 \cdot x_{\text{TCP}}}{2 \cdot y_3} \quad (7.35)$$

aufgelöst werden. Die Ergebnisse aus Gleichung (7.34) und (7.35) werden schließlich in (7.30) eingesetzt und nach der Koordinate

$$z_{\text{TCP}} = \pm \sqrt{\ell_1^2 - x_{\text{TCP}}^2 - y_{\text{TCP}}^2} \quad (7.36)$$

aufgelöst. Es ist zu erkennen, dass die x_{TCP} -Koordinate nur von den Parametern von

T_1 und T_2 , und die y_{TCP} -Koordinate wiederum von x_{TCP} und T_3 , abhängen. Werden drei Trackermodule zur Berechnung der TCP-Position verwendet, ergeben sich zwei zueinander symmetrische Lösungen. Beide Lösungen haben die gleiche x_{TCP} - und y_{TCP} -Koordinate. Die z_{TCP} -Koordinate ist entgegengesetzt. Durch das gewählte \mathbf{S}_G -System nach Abbildung 7.8 kann jedoch eine der Lösungen ausgeschlossen werden, da nur entlang der positiven oder negativen z_G -Achse gemessen wird.

Eine eindeutige Lösung ist erst möglich, wenn das vierte Trackermodul zur Messung hinzugefügt wird. Dies zeigt das Messprinzip der Multilateration. In diesem Fall werden die Ergebnisse aus den Gleichungen (7.34) und (7.35) in (7.33) eingesetzt und mit Gleichung (7.30) gleichgesetzt, dann wird

$$z_{\text{TCP}} = \frac{\ell_1^2 - \ell_4^2 + x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 - 2 \cdot x_4 \cdot x_{\text{TCP}} - 2 \cdot y_4 \cdot y_{\text{TCP}}}{2 \cdot z_4} \quad (7.37)$$

eindeutig bestimmt [67, 84–86]. Die Gleichungen für die x_{TCP} -, y_{TCP} - und z_{TCP} -Koordinate lassen sich als lineares Gleichungssystem in kompakter Matrizenform

$$\mathbf{P}_{\text{TCP}} = \begin{bmatrix} x_{\text{TCP}} \\ y_{\text{TCP}} \\ z_{\text{TCP}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} \ell_1^2 - \ell_2^2 + x_2^2 \\ \ell_1^2 - \ell_3^2 + x_3^2 + y_3^2 \\ \ell_1^2 - \ell_4^2 + x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 \end{bmatrix} \quad (7.38)$$

darstellen, wobei

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{x_2} & 0 & 0 \\ -\frac{x_3}{x_2 \cdot y_3} & \frac{1}{y_3} & 0 \\ -\frac{x_4}{x_2 \cdot z_4} + \frac{x_3 \cdot y_4}{x_2 \cdot y_3 \cdot z_4} & \frac{y_4}{y_3 \cdot z_4} & \frac{1}{z_4} \end{bmatrix}. \quad (7.39)$$

Mit Gleichung (7.38) ist die Berechnung der TCP-Position unter Anwendung der Multilateration vollständig hergeleitet [67]. Die spezielle Wahl des vorgestellten \mathbf{S}_G -Systems führt zu einer Reduktion der Parameteranzahl, die zur Beschreibung des Modells benötigt werden. Es ergeben sich bei der Multilateration insgesamt sechs erforderliche Standortparameter $\mathbf{p}_S = [x_2, x_3, y_3, x_4, y_4, z_4]^T$ sowie vier Initiaillängenparameter $\mathbf{l}_0 = [T_1 \ell_0, T_2 \ell_0, T_3 \ell_0, T_4 \ell_0]^T$, die unbekannt sind. Diese Parameter (\mathbf{p}_S , \mathbf{l}_0) müssen in Bezug auf das \mathbf{S}_G -System mithilfe eines Kalibrieralgorithmus identifiziert werden, welcher im Kapitel 8 vorgestellt wird. Eine Berechnung der TCP-Position ist nur dann möglich, wenn die nach Gleichung (7.39) aufgestellte Matrix \mathbf{M} bekannt

ist. Dies bedeutet, dass die zur Herleitung des Berechnungsmodells verwendeten Gleichungen (7.30) - (7.33) voneinander linear unabhängig sein müssen und die Nenner in den einzelnen Matrixelementen von \mathbf{M} nicht Null sein dürfen. Es existieren drei Fälle, wo die Matrix \mathbf{M} nicht berechnet werden kann.

- $x_2 = 0$: Das Trackermodul T_2 liegt im Ursprung des \mathbf{S}_G . Somit ist die Absolutlänge vom T_2 identisch mit der vom T_1 .
- $y_3 = 0$: Die drei Trackermodule (T_1, T_2, T_3) liegen auf der \mathbf{x}_G -Achse und verhindert dadurch die Definition der \mathbf{y}_G -Achse des \mathbf{S}_G -Systems.
- $z_4 = 0$: Das vierte Trackermodul T_4 liegt in der \mathbf{x}_G - \mathbf{y}_G -Ebene. Dies stellt das Messverfahren der Trilateration dar, wo zwei Lösungen für die z_{TCP} -Koordinate gefunden werden können.

Für die Wahl der Standorte gilt daher, dass kein Trackermodul in der Ebene liegen darf, die durch die anderen drei Trackermodule definiert wurde. Liegt eines der Trackermodule auf, oder auch in der Nähe, der durch die anderen Trackermodule aufgespannten Ebene, so wird die Identifikation der benötigten Parameter schlecht konditioniert. Dies könnte zu großen Schätzfehler der Parameter führen [86,87].

7.4 Anwendung der vorgestellten 3-D-Messverfahren auf das MLTS

Der beschriebene Algorithmus zur Berechnung der TCP-Position unter Anwendung der Tri- bzw. Multilateration kann nur angewendet werden, wenn die Auftreffpunkte auf den Spiegeln unverändert bleiben oder nur minimal von ihren Drehzentren abweichen. Da im experimentellen Aufbau ein Strahlablesystem mit zwei Ablenkspiegeln verwendet wird, verändert sich die Position des Laserstrahls auf den Spiegeln zu jedem Zeitpunkt. Diese Positionsänderung kann im Millimeterbereich liegen und muss daher bei der Berechnung der TCP-Position berücksichtigt werden, um hohe Präzision zu erreichen.

Abbildung 7.9 veranschaulicht die Aufpunktänderungen auf dem Spiegel für ein Trackermodul. Ausgehend von einem lokalen Koordinatensystem \mathbf{S}_T des Trackermoduls trifft der Laserstrahl im Punkt \mathbf{P}_2 auf den Spiegel 2 und hat die Richtung \mathbf{r}_2 . In diesem Punkt wird das Interferometer zurückgesetzt. Somit entsteht zwischen Punkt \mathbf{P}_2 und \mathbf{P}_{TCP} eine unbekannte Initillänge ℓ_0 , welche zur Berechnung der TCP-Position mit der Methode der Multilateration verwendet wird. Nun bewegt sich

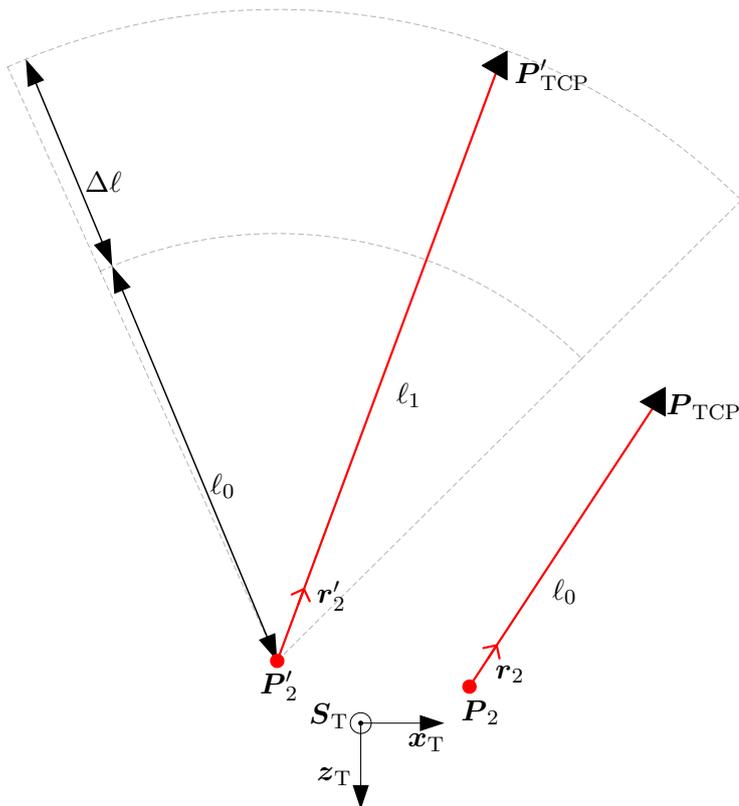


Abbildung 7.9:

Zusammenhang zwischen den Auftreffpunkten und den gemessenen Längenänderungen

der Messreflektor von \mathbf{P}_{TCP} aus zu \mathbf{P}'_{TCP} . Es kommt zu einer Positionsänderung des Laserstrahls auf dem Spiegel 2, welcher durch den Punkt \mathbf{P}'_2 gekennzeichnet ist. Dadurch misst das Interferometer im \mathbf{P}'_{TCP} eine Längenänderung $\Delta\ell$, welche mit der Initillänge zu der Absolutlänge aufaddiert wird (siehe Gleichung (7.29)). Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Absolutlänge in Abhängigkeit des Auftreffpunktes ändert. Somit muss der in Abschnitt 7.3 vorgestellte Berechnungsalgorithmus modifiziert werden, damit die Auftreffpunkte auf dem Spiegel zur Berechnung der TCP-Position berücksichtigt werden. Für die Modifikation des Multilaterationsalgorithmus sind folgende Rechenschritte zur Berechnung der Auftreffpunkte auf dem Spiegel 2 notwendig:

- Festlegung des globalen Koordinatenursprungs durch den lokalen Koordinatenursprung vom Trackermodul T_1
- Definition des globalen Koordinatensystems \mathbf{S}_G durch die Standorte der Trackermodule nach Abschnitt 7.3
- Berechnung der Auftreffpunkte (${}^{S_i}\mathbf{P}_2$, $i = 1 \dots 4$) auf dem Spiegel 2 für jedes Trackermodul nach Gleichung (7.10)

$${}^{S_i}\mathbf{P}_2 = f(\mathbf{p}_{T_i})$$

- Koordinatentransformation der Auftreffpunkte in das globale Koordinatensystem nach Gleichung (7.21)

$$\mathbf{S}_{T_i}^G \mathbf{P}_2 = \mathbf{R}(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_G) \cdot \mathbf{S}_i \mathbf{P}_2 + \mathbf{l}_i, \quad i = 1 \dots 4$$

Nach den oben genannten Rechenschritten sind die Auftreffpunkte im \mathbf{S}_G -System gegeben. Dadurch kann das Verfahren der Multilateration angewendet werden. Jedoch erhöht sich die Anzahl der Standortpositions- und Orientierungsparameter aufgrund der Transformation zwischen lokalen und globalen Koordinatensystem auf insgesamt 18. Die vier aufgestellten sphärischen Gleichungen nach Abschnitt 7.3 ändern sich wie folgt:

$$(\ell_1 - T_1 e_K)^2 = \left((x_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_1}^G P_{2x})^2 + (y_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_1}^G P_{2y})^2 + (z_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_1}^G P_{2z})^2 \right) \quad (7.40)$$

$$(\ell_2 - T_2 e_K)^2 = \left((x_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_2}^G P_{2x})^2 + (y_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_2}^G P_{2y})^2 + (z_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_2}^G P_{2z})^2 \right) \quad (7.41)$$

$$(\ell_3 - T_3 e_K)^2 = \left((x_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_3}^G P_{2x})^2 + (y_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_3}^G P_{2y})^2 + (z_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_3}^G P_{2z})^2 \right) \quad (7.42)$$

$$(\ell_4 - T_4 e_K)^2 = \left((x_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_4}^G P_{2x})^2 + (y_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_4}^G P_{2y})^2 + (z_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_4}^G P_{2z})^2 \right). \quad (7.43)$$

Diese werden nach den Koordinaten $(x_{\text{TCP}}, y_{\text{TCP}}, z_{\text{TCP}})$ umgestellt, dabei kann schematisch wie in Abschnitt 7.3 vorgegangen werden. Zunächst kann die Gleichung (7.40) nach

$$z_{\text{TCP}}^2 = (\ell_1 - T_1 e_K)^2 - (x_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_1}^G P_{2x})^2 - (y_{\text{TCP}} - \mathbf{S}_{T_1}^G P_{2y})^2 + 2 \cdot z_{\text{TCP}} \cdot \mathbf{S}_{T_1}^G P_{2z} - \mathbf{S}_{T_1}^G P_{2z}^2 \quad (7.44)$$

umgestellt werden. Anschließend wird die Lösung der Gleichung (7.44) in Gleichung (7.41) eingesetzt, dann ergibt sich für die Koordinate

$$x_{\text{TCP}} = q_1 + q_2 \cdot y_{\text{TCP}} + q_3 \cdot z_{\text{TCP}}, \quad (7.45)$$

$$q_1 = \frac{-(\ell_1 - T_1 e_K)^2 + (\ell_2 - T_2 e_K)^2 + q_4}{2 \cdot (\mathbf{S}_{T_1}^G P_{2x} - \mathbf{S}_{T_2}^G P_{2x})},$$

$$q_2 = \frac{-\mathbf{S}_{T_1}^G P_{2y} + \mathbf{S}_{T_2}^G P_{2y}}{\mathbf{S}_{T_1}^G P_{2x} - \mathbf{S}_{T_2}^G P_{2x}}, \quad q_3 = \frac{-\mathbf{S}_{T_1}^G P_{2z} + \mathbf{S}_{T_2}^G P_{2z}}{\mathbf{S}_{T_1}^G P_{2x} - \mathbf{S}_{T_2}^G P_{2x}},$$

$$q_4 = \mathbf{S}_{T_1}^G P_{2x}^2 - \mathbf{S}_{T_2}^G P_{2x}^2 + \mathbf{S}_{T_1}^G P_{2y}^2 - \mathbf{S}_{T_2}^G P_{2y}^2 + \mathbf{S}_{T_1}^G P_{2z}^2 - \mathbf{S}_{T_2}^G P_{2z}^2.$$

Die Lösung der Gleichungen (7.44) und (7.45) werden in Gleichung (7.42) eingesetzt, somit ist

$$y_{\text{TCP}} = q_5 + q_6 \cdot z_{\text{TCP}}, \quad (7.46)$$

$$q_5 = \frac{-(\ell_1 - T_1 e_K)^2 + (\ell_3 - T_3 e_K)^2 + 2 \cdot q_1 \cdot \left(-\frac{S_G P_{2x}}{T_1} + \frac{S_G P_{2x}}{T_3}\right) + q_7}{2 \cdot \left(q_2 \cdot \frac{S_G P_{2x}}{T_1} - q_2 \cdot \frac{S_G P_{2x}}{T_3} + \frac{S_G P_{2y}}{T_1} - \frac{S_G P_{2y}}{T_3}\right)},$$

$$q_6 = \frac{-q_3 \cdot \frac{S_G P_{2x}}{T_1} + q_3 \cdot \frac{S_G P_{2x}}{T_3} - \frac{S_G P_{2z}}{T_1} + \frac{S_G P_{2z}}{T_3}}{q_2 \cdot \frac{S_G P_{2x}}{T_1} - q_2 \cdot \frac{S_G P_{2x}}{T_3} + \frac{S_G P_{2y}}{T_1} - \frac{S_G P_{2y}}{T_3}},$$

$$q_7 = \frac{S_G P_{2x}^2}{T_1} - \frac{S_G P_{2x}^2}{T_3} + \frac{S_G P_{2y}^2}{T_1} - \frac{S_G P_{2y}^2}{T_3} + \frac{S_G P_{2z}^2}{T_1} - \frac{S_G P_{2z}^2}{T_3}.$$

Um eine eindeutige Lösung der TCP-Position zu erhalten, werden die berechneten x_{TCP} - und y_{TCP} -Koordinaten sowie das Ergebnis der Gleichung (7.44) in Gleichung (7.43) eingesetzt. Es ergibt sich für

$$z_{\text{TCP}} = \frac{-(\ell_1 - T_1 e_K)^2 + (\ell_4 - T_4 e_K)^2 + 2 \cdot \left(\left(-\frac{S_G P_{2x}}{T_1} + \frac{S_G P_{2x}}{T_4}\right) \cdot (q_1 + q_2 \cdot q_5)\right) + q_8}{2 \cdot \left(\left(\frac{S_G P_{2x}}{T_1} - \frac{S_G P_{2x}}{T_4}\right) \cdot (q_3 + q_2 \cdot q_6) + q_6 \cdot \left(\frac{S_G P_{2y}}{T_1} - \frac{S_G P_{2y}}{T_4}\right) + \frac{S_G P_{2z}}{T_1} - \frac{S_G P_{2z}}{T_4}\right)},$$

$$q_8 = \frac{S_G P_{2x}^2}{T_1} - \frac{S_G P_{2x}^2}{T_4} + \frac{S_G P_{2y}^2}{T_1} - \frac{S_G P_{2y}^2}{T_4} + \frac{S_G P_{2z}^2}{T_1} - \frac{S_G P_{2z}^2}{T_4} + 2 \cdot q_5 \cdot \left(\frac{S_G P_{2y}}{T_1} - \frac{S_G P_{2y}}{T_4}\right). \quad (7.47)$$

7.5 Beziehung zwischen Trackermodul- und MLTS-Koordinatensystem

Jedes Trackermodul besitzt sein eigenes lokales Koordinatensystem \mathbf{S}_i , welches durch sein Strahlablensystem im Raum definiert wurde. Der Ursprung des \mathbf{S}_i -Systems von einem einzelnen Trackermodul liegt nach Abbildung 7.3 in einem Punkt an der Drehachse des Spiegels 2. Da die Lage jedes Strahlablensystems im Raum zueinander verschieden ist, ergeben sich vier unterschiedliche lokale \mathbf{S}_i -Systeme (siehe Abbildung 7.10).

Vier Trackermodule wiederum bilden das globale Koordinatensystem \mathbf{S}_G , wobei die Ursprünge von drei lokalen \mathbf{S}_i -Systemen die \mathbf{S}_G -Achse sowie die \mathbf{x}_G - \mathbf{y}_G -Ebene des globalen \mathbf{S}_G -Systems aufspannen. Wie in Abbildung 7.10 zu sehen ist, unterscheidet sich das globale \mathbf{S}_G -System von den lokalen \mathbf{S}_i -Systemen. Unter der Verwendung der Winkel- und Längenmessung berechnet jedes Trackermodul die TCP-Position in seinem lokalen \mathbf{S}_i -System. Soll die berechnete TCP-Position von einem \mathbf{S}_i -System mit

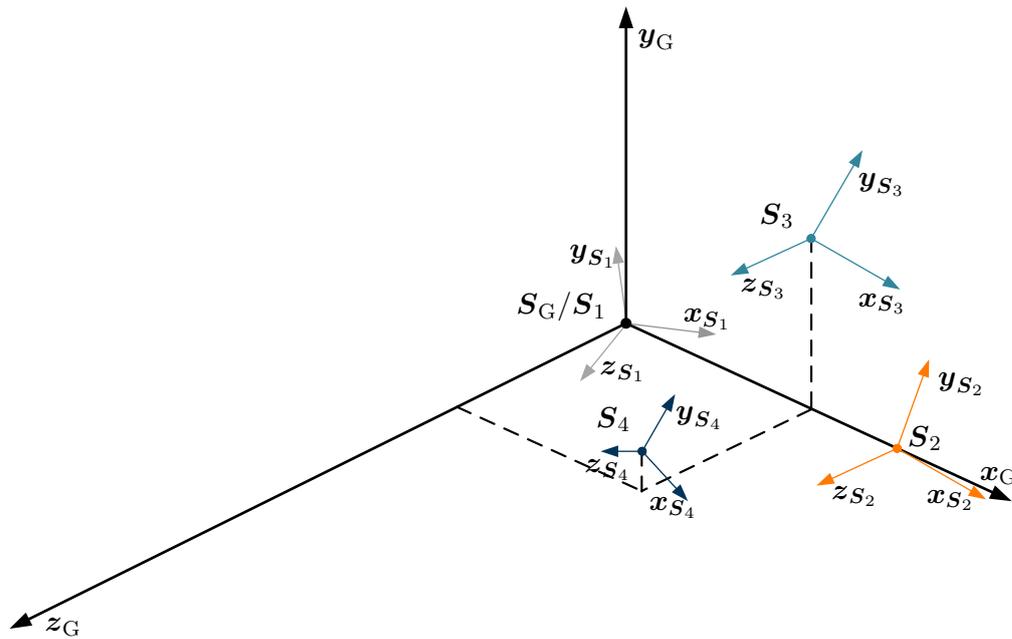


Abbildung 7.10: Beziehung zwischen den lokalen und globalen Koordinatensystemen

dem anderen verglichen werden, so ist eine Koordinatentransformation durchzuführen. Darüber hinaus ist eine Transformation bei der Anwendung des Messverfahrens der Triangulation erforderlich. Wie bereits im Abschnitt 7.2 beschrieben wurde, kann ein S_i -System als das globale Koordinatensystem festgelegt werden, worauf sich alle verbleibenden lokalen Koordinatensysteme beziehen. Durch die folgende Transformationsvorschrift wird der Zusammenhang zwischen den Koordinatensystemen beschrieben:

$$\mathbf{S}_j^i \mathbf{S}_j = \mathbf{R}(\mathbf{S}_j, \mathbf{S}_i) \cdot \mathbf{S}_{T_j} + \mathbf{S}_i^i \mathbf{l}, \quad i, j = 1 \dots 4. \quad (7.48)$$

Das S_j -System wird durch eine Rotation und eine Translation in das S_i -System transformiert. Dabei wird die Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\mathbf{S}_j, \mathbf{S}_i)$ verwendet, um die Lage der Koordinatenachsen vom S_j -System in das S_i -System zu überführen. Es wird vorausgesetzt, dass die Orientierungsparameter $(\mathbf{S}_j^i \mathbf{O} = [\mathbf{S}_j^i \alpha, \mathbf{S}_j^i \beta, \mathbf{S}_j^i \gamma]^T)$ der Rotationsmatrix zwischen dem S_{T_j} - und dem S_{T_i} -System bekannt sind. Die Berechnung der Rotationsmatrix entspricht dem Schema der Gleichungen (7.22)-(7.25). Da die Trackermodule an den unterschiedlichen Positionen im Raum liegen, wird der Vektor $\mathbf{S}_i^i \mathbf{l}$ benötigt, um den Standort des transformierten S_{T_j} -Systems in Bezug auf den Ursprung des S_i -Systems festzulegen. Entsprechend der Gleichung (7.48) kann die Transformation zwischen dem globalen S_G -System und den lokalen S_i -Systemen

$$\mathbf{S}_i^G \mathbf{S}_i = \mathbf{R}(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_G) \cdot \mathbf{S}_i + \mathbf{l}_i, \quad i = 1 \dots 4 \quad (7.49)$$

aufgestellt werden.

7.6 Analyse des Messbereichs

7.6.1 Messbereich des Trackermoduls

Der Messbereich von einem Trackermodul wird von seinen maximal erlaubten Drehwinkeln bestimmt. Wie bereits im Abschnitt 4.2.3 erläutert, verfügen die Scanner über einen Drehbereich, der einem mechanischen Winkel von $\pm 15^\circ$ entspricht. Dieser wiederum kann in einen optischen Winkel von $\pm 30^\circ$ umgerechnet werden. Bei dieser Untersuchung wird der komplexe Strahlverlauf durch das Strahlablesystem vernachlässigt, da der Koordinatenursprung des Trackermoduls sowie der Auftreffpunkt auf dem Spiegel 2 sehr nah beieinander liegen. Des Weiteren wird angenommen, dass aufgrund der Justageeinrichtung der Laserstrahl bei der Nullstellung der Scanner entlang der z_T -Achse austritt. Wie in Abbildung 7.11 gezeigt, kann der zu bestimmende Messbereich eines Trackermoduls vereinfacht als ein Volumenkörper in Form einer Pyramide angenommen werden, wobei die Spitze der Pyramide den Koordinatenursprung des Trackermoduls repräsentiert. Die Grundfläche der Pyramide stellt eine Messfläche A_T des Trackermoduls auf einer Ebene E_A im Raum dar, welche orthogonal zu der z_T -Achse liegt. Die Größe dieser Fläche ist eine Funktion der maximalen Drehwinkel $(\varphi_{x\max}, \varphi_{y\max})$ sowie dem Abstand ℓ_z zum Koordinatenursprung entlang der z_T -Achse. Der Zusammenhang kann in folgender Form dargestellt werden:

$$A_T(\ell_z) = 4 \cdot x_A \cdot y_A = 4 \cdot \tan \varphi_{x\max} \cdot \tan \varphi_{y\max} \cdot \ell_z^2. \quad (7.50)$$

Es ist zu erkennen, dass die Messfläche mit zunehmendem Abstand ℓ_z quadratisch steigt. Aus der berechneten Fläche sowie dem Abstand ℓ_z kann das Messvolumen V_T

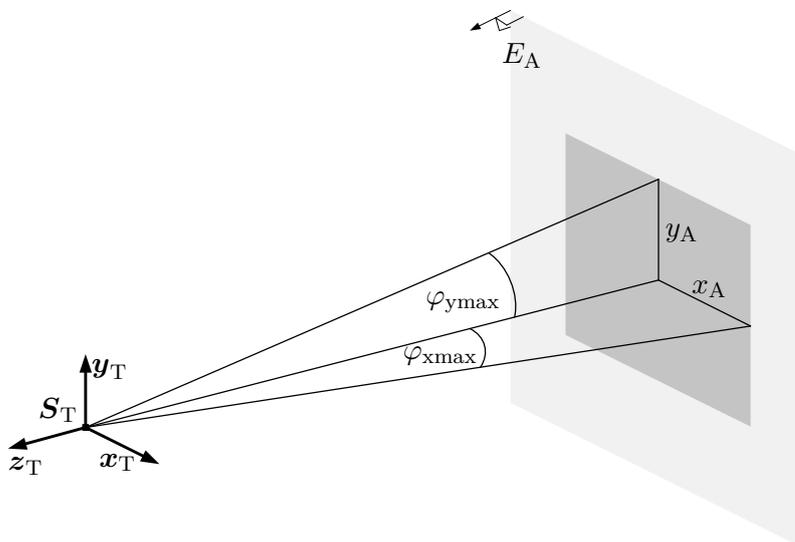


Abbildung 7.11:
Der Messbereich des Trackermoduls

eines Trackermoduls wie folgt bestimmt werden [7]:

$$V_T(\ell_z) = \frac{1}{3}\ell_z \cdot A_T(\ell_z). \quad (7.51)$$

Dieses beträgt vom Ursprung bis zu einer angenommenen Messfläche im Abstand von $\ell_z = 1 \text{ m}$ und den maximal erlaubten Drehwinkeln $\varphi_{x\max,y\max} = 30^\circ$ rund $0,44 \text{ m}^3$. Der Messbereich, in dem der Messreflektor vom Trackermodul verfolgt werden kann, wird wie folgt berechnet:

$$V_M(\ell_z) = V_T(\ell_z) - V_T(1 \text{ m}), \quad \ell_z \geq 1 \text{ m}. \quad (7.52)$$

Für bspw. $\ell_z = 2 \text{ m}$ beträgt das Messvolumen vom Trackermodul nach Gleichung (7.52) rund $1,34 \text{ m}^3$. Die Gleichung (7.52) zeigt deutlich, dass der Messbereich, in dem der Messreflektor messen kann, durch den Abstand ℓ_z signifikant beeinflusst wird.

7.6.2 Messbereich des MLTS

Vier Trackermodule werden im Raum zur Messung des Messreflektors aufgestellt. Jedes Trackermodul verfügt über einen lokalen Messbereich, der durch seine Drehwinkel begrenzt wird. Aufgrund der Tatsache, dass jedes Trackermodul an einer Position im Raum ortsfest steht, ergeben sich somit vier unterschiedliche lokale Messbereiche. Da der Messreflektor gemeinsam von vier Trackermodulen gemessen werden soll, ist der globale Messbereich des MLTS die Schnittmenge der vier lokalen Messbereiche. Somit ist der überlagerte globale Messbereich deutlich kleiner als ein lokaler Messbereich. Abbildung 7.12 stellt den gemeinsamen Messbereich zwischen zwei Trackermodule dar, welcher aufgrund der unterschiedlichen Standorte im Raum entsteht. Es ist zu erkennen, dass der gemeinsame Messbereich kleiner wird, wenn der Abstand zwischen den Standorten der Trackermodule zunimmt. Wie beim Mess-

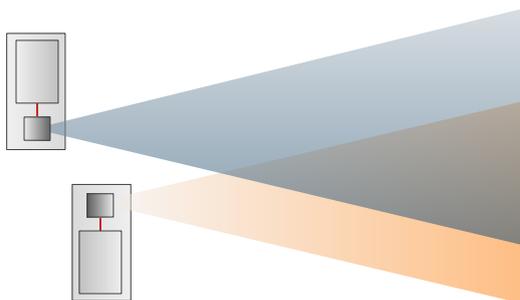


Abbildung 7.12:
Gemeinsamer Messbereich zwischen zwei Trackermodulen in der Ebenedarstellung

bereich eines Trackermoduls werden die lokalen Messflächen der Trackermodule im Raum untersucht, um Aussagen über die globale Messfläche zu treffen. Hierfür werden zunächst die Messflächen von zwei Trackermodulen betrachtet, welche gemeinsam in einem x-y-Koordinatensystem aufgetragen werden. Abbildung 7.13 veranschaulicht den Sachverhalt. Dabei liegt der Mittelpunkt der Messfläche A_{T_1} im Ursprung und der Mittelpunkt der Messfläche A_{T_2} hat die Koordinaten (x_2, y_2) . Alle Seiten der Messflächen werden in Abhängigkeit der Drehwinkel sowie des Abstandes berechnet, wobei diese in Bezug auf das x-y-System als Koordinaten angegeben werden. Dadurch können die Seiten x_g und y_g der gemeinsamen Messfläche in folgender Form angegeben werden:

$$x_g(\ell_z) = |\min(x_{\max 1}, x_{\max 2}) - \max(x_{\min 1}, x_{\min 2})| \quad (7.53)$$

$$y_g(\ell_z) = |\min(y_{\max 1}, y_{\max 2}) - \max(y_{\min 1}, y_{\min 2})|. \quad (7.54)$$

Aus Gleichungen (7.53) und (7.54) ergibt sich für die gemeinsame Messfläche:

$$A_g(\ell_z) = x_g(\ell_z) \cdot y_g(\ell_z). \quad (7.55)$$

Eine Berechnung des gemeinsamen Messbereichs ist damit möglich. Der Messbereich, in dem der Messreflektor gemeinsam von beiden Trackermodulen gemessen werden kann, hat die Form eines Pyramidenstumpfs [7]. Das gemeinsame Messvolumen der

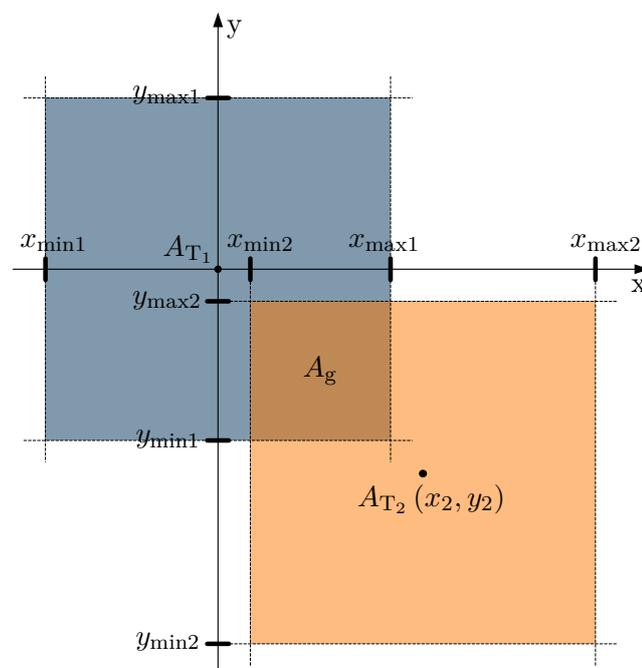


Abbildung 7.13: Die gemeinsame Messfläche als Schnittmenge der lokalen Messflächen

Trackermodule kann ab dem Abstand $\ell_z \geq 1 \text{ m}$ wie folgt berechnet werden:

$$V_g(\ell_z) = \frac{\ell_z - 1 \text{ m}}{3} \cdot \left(A_g(\ell_z) + A_g(1 \text{ m}) + \sqrt{A_g(\ell_z) \cdot A_g(1 \text{ m})} \right), \quad \ell_z \geq 1 \text{ m}. \quad (7.56)$$

Analog zu den Gleichungen (7.53), (7.54), (7.55) und (7.56) kann der globale Messbereich für das MLTS in Abhängigkeit der Standorte der Trackermodule gefunden werden.

8 Kalibrierung

Die Kenntnisse über Systemparameter sowie Standortparameter der Trackermodule haben einen großen Einfluss auf die Berechnung der TCP-Position, sowohl für ein einzelnes Trackermodul als auch für das gesamte MLTS. Eine direkte Ermittlung aller Parameter durch experimentelle Messung am Aufbau ist aufgrund der in den Zielstellungen dieser Arbeit geforderten Positionsgenauigkeit nicht realisierbar. Bisher wurden in der Forschung verschiedene Kalibriermethoden zur Schätzung der Systemparameter und der Standortparameter [56, 57, 85, 90] immer getrennt betrachtet, da kommerzielle Lasertracker meistens nur als Einzelsystem arbeiten und somit nur deren zugehörigen Systemparameter geschätzt werden müssen. Spezielle Aufbauten wie in [42, 85] wiederum benötigen lediglich eine Schätzung der Standortparameter. Aus den Anforderungen muss also ein geeigneter Kalibrieralgorithmus für das aufgebaute MLTS entwickelt werden, der sowohl die System- als auch die Standortparameter indirekt schätzt. Darüber hinaus sollen in dem Algorithmus beide Schätzmethoden miteinander verknüpft werden. Der folgende Abschnitt stellt zunächst einen Gesamtüberblick über die in der Literatur erarbeiteten Kalibrieralgorithmen vor. Hierbei werden nur Schätzmethoden behandelt, die für das aufgebaute MLTS relevant sind. Auf Basis dieser Grundlagen wird ein Kalibrieralgorithmus für das MLTS entwickelt, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen.

8.1 Stand der Forschung

8.1.1 Systemparameter

Nachfolgend werden das Distanzverfahren und das Punkt-Distanzverfahren zur Identifikation der Systemparameter vorgestellt. Die Kalibrierung der Systemparameter unter Verwendung eines Trackermoduls war ein Kernthema in der Arbeit von Wachten [90]. Auf Basis des in Abschnitt 7.1 hergeleiteten Modells sind 16 Systemparameter zu identifizieren. Zunächst wurde das Modell auf Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit überprüft, um redundante und überflüssige Systemparameter zu entfernen.

Nach einer Sensitivitätsanalyse auf Grundlage der Taylorentwicklung wurde die Anzahl der Systemparameter n_P von 16 auf 13 reduzieren. Diese sind in Tabelle 8.1 aufgelistet. Als Kalibriermethode wurde ein Distanzverfahren für die Identifikation der Systemparameter unter Verwendung des hergeleiteten Modells (Abschnitt 7.1) vorgeschlagen. Hierzu wurden mit Hilfe eines externen Referenzmesssystems verschiedene Punkte in Form eines Würfels im Raum angefahren, welche durch das Trackermodul verfolgt und dabei die Winkel sowie die interferometrische Länge gemessen wurden. Anschließend wurden aus den gemessenen Daten des Trackermoduls die gefahrenen Distanzen berechnet und mit den gemessenen Abständen vom Referenzmesssystem verglichen. Aus diesen Unterschieden konnte mittels einer Gütefunktion der optimale Parametervektor geschätzt werden.

Tabelle 8.1: Systemparameter nach [90]

Parameterbeschreibung	Name	n_P
Ursprung des Lasers	\mathbf{P}_0	2
Richtung des Lasers	\mathbf{r}_0	2
Abstand der Drehachse zur Spiegelebene 1	k_1	1
Normalvektor Spiegel 1	\mathbf{n}_1	2
Abstand Drehachsen	d	1
Drehachse 2	\mathbf{v}_2	1
Abstand der Drehachse zur Spiegelebene 2	k_2	1
Normalvektor Spiegel 2	\mathbf{n}_2	2
Initiallänge	ℓ_0	1

Eine weitere Methode zur Schätzung der Systemparameter ist das Punkt-Distanzverfahren, welche nach Mayer in [57] beschrieben wurde. Das vorgestellte Messsystem besteht aus zwei Trackermodulen, welches ausschließlich durch Winkelmessungen die TCP-Position an jedem beliebigen Punkt im Raum mit der Methode der Triangulation bestimmt. Mit dem Punkt-Distanzverfahren können sowohl alle Systemparameter der zwei Trackermodule als auch die Transformationsparameter identifiziert werden (siehe Tabelle 8.2). Hierbei werden an verschiedenen, definierten Messpositionen im Raum die Winkelwerte der Trackermodule aufgenommen. Die gemessenen Winkelinformationen werden dann in das hergeleitete Modell aus Abschnitt 7.2 eingesetzt, um daraus die TCP-Positionen des jeweiligen Trackermoduls zu bestimmen. Ein Kriterium für die Schätzung der Parameter ist der TCP-Positionsvergleich zwischen den Trackermodulen an jedem Messpunkt. Darüber hinaus sind zwei Messpositionen zur Berechnung einer Distanz auszuwählen, die dann mit einer vorgegebenen Referenz-

renzdistanz verglichen wird. Aus der Distanz- sowie den Positionsdifferenzen können, wie beim Distanzverfahren, mittels einer aufgestellten Zielfunktion alle Parameter im Messsystem geschätzt werden.

Tabelle 8.2: Parameter nach Mayer

Parameterbeschreibung	Name	n_P
Systemparameter von T_1	\mathbf{p}_{T_1}	12
Systemparameter von T_2	\mathbf{p}_{T_2}	12
Standortparameter	$\begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{T}_2 \end{matrix} \mathbf{l}$	3
Orientierungsparameter	$\begin{matrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{matrix} \mathbf{O}$	3

Distanzverfahren

Das Verfahren beruht auf dem Vergleich von Punktabständen. Die Abstände werden zum einen aus Punkten generiert, die ein externes Referenzmesssystem zur Verfügung stellt, zum anderen aus denen, die das Trackermodul berechnet. Da die jeweiligen Punkttrajektorien in unterschiedlichen Koordinatensystemen vorliegen, können sie nicht direkt miteinander verglichen werden. Es ist aber möglich, nur die einzelnen Distanzen zwischen den Raumpunkten zu bewerten, da diese unabhängig von deren Lage in beiden Koordinatensystemen gleich sind (siehe Abbildung 8.2). Die gesuchten Systemparameter des Modells werden während der Optimierungsphase dann solange variiert, bis die Distanzmessungen zwischen dem Trackermodul und dem Referenzmesssystem übereinstimmen.

Für die Kalibrierung wird der Messreflektor am Referenzmesssystem fixiert, das eine Trajektorie im Raum abfahren kann und als Referenz für das Trackermodul dient. Dabei begrenzt die Genauigkeit des Referenzmesssystems die der Trackermodule und damit die Bestimmbarkeit der Systemparameter. Die Trajektorien werden der Referenz vorgegeben und abgefahren, bspw. innerhalb einer Würfelstruktur. Das Trackermodul misst dann an jedem Messpunkt zwei Winkel und eine Längenänderung.

Der Vorteil des Distanzverfahrens ist, dass aus wenigen Messpunkten viele Bedingungen generiert werden können, was die Zeitdauer für die Messwertaufnahme reduziert. Für eine Maximierung der Bedingungen sollten daher möglichst alle Distanzen zwischen allen Messpunkten berücksichtigt werden. Von einem Startpunkt aus werden die verschiedenen Punkte angefahren, deren Abstände zueinander im Koordinatensystem des Referenzmesssystems gegeben sind. Dabei ist die Genauigkeit des Messsystems

ausschlaggebend. Die Anzahl der Distanzbedingungen ist ein wichtiges Kriterium für den anschließenden Schätzalgorithmus, welcher beispielhaft mit neun Messpunkten in Abbildung 8.1 gezeigt wird. Ausgehend vom Messpunkt 1 werden alle Distanzen zu den anderen acht Messpunkten berechnet. Somit ergeben sich für diesen insgesamt acht Distanzbedingungen. Anschließend werden vom Messpunkt 2 aus wieder die Distanzen zu den verbleibenden sieben Messpunkten ermittelt. So wird verfahren, bis alle Messpunkte durchlaufen wurden. Der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Distanzbedingungen n_B und der Anzahl der Messpunkte n_M lässt sich durch die Beziehung

$$n_B = \frac{n_M \cdot (n_M - 1)}{2} \quad (8.1)$$

beschreiben. Unter Verwendung von $n_M = 9$ Messpunkten können nach Gleichung (8.1) bereits 36 Bedingungen erzeugt werden, mit $n_M = 27$ Punkten bereits 351 Distanzwerte.

Abbildung 8.2 veranschaulicht den Vergleich der Distanzen in verschiedenen Koordinatensystemen zwischen zwei Messpunkten. Durch die Messung der Winkel und der Längenänderungen werden in Bezug auf das \mathbf{S}_T -System des Trackermoduls die Positionen ${}^{\mathbf{S}_T}\mathbf{P}_i = [{}^{\mathbf{S}_T}P_{xi}, {}^{\mathbf{S}_T}P_{yi}, {}^{\mathbf{S}_T}P_{zi}]^T$ und ${}^{\mathbf{S}_T}\mathbf{P}_j = [{}^{\mathbf{S}_T}P_{xj}, {}^{\mathbf{S}_T}P_{yj}, {}^{\mathbf{S}_T}P_{zj}]^T$ als Funktion der Systemparameter berechnet. Anschließend wird die euklidische Distanz

$$\begin{aligned} {}^{\mathbf{S}_T}d_{ij}(\mathbf{p}_T) &= \left\| {}^{\mathbf{S}_T}\mathbf{P}_i - {}^{\mathbf{S}_T}\mathbf{P}_j \right\| \\ &= \sqrt{({}^{\mathbf{S}_T}P_{xi} - {}^{\mathbf{S}_T}P_{xj})^2 + ({}^{\mathbf{S}_T}P_{yi} - {}^{\mathbf{S}_T}P_{yj})^2 + ({}^{\mathbf{S}_T}P_{zi} - {}^{\mathbf{S}_T}P_{zj})^2} \end{aligned} \quad (8.2)$$

ermittelt. Werden mehrere Messpunkte im Raum abgefahren, so lassen sich alle Distanzen im \mathbf{S}_T -System nach Gleichung 8.2 wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} {}^{\mathbf{S}_T}d_b(\mathbf{p}_T) &= \left\| \mathbf{P}_i(\mathbf{p}_T, \varphi_{x1}, \varphi_{y1}, \varphi_{xi}, \varphi_{yi}, \Delta\ell) - \mathbf{P}_j(\mathbf{p}_T, \varphi_{x1}, \varphi_{y1}, \varphi_{xj}, \varphi_{yj}, \Delta\ell) \right\|, \\ i &= 1 \dots (n_M - 1), j = (i + 1) \dots n_M, b = 1 \dots n_B. \end{aligned} \quad (8.3)$$

In Gleichung (8.3) beschreiben die Parameter φ_{x1} und φ_{y1} den Drehwinkel der Galvanometer-Scanner an dem Punkt, wo das Interferometer auf den Wert Null zurück

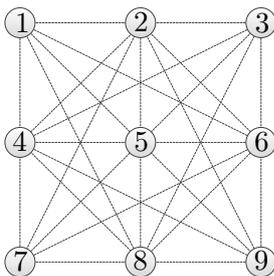
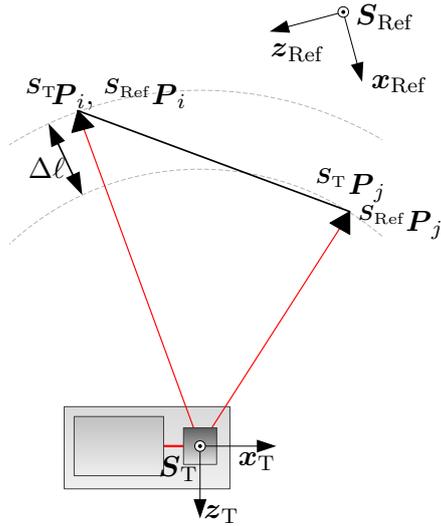


Abbildung 8.1:

Generierung der Kalibrierbedingungen: alle Distanzen zwischen den neun Messpunkten einer Ebene werden verwendet

**Abbildung 8.2:**

Abstand zwischen zwei Punkten in verschiedenen Koordinatensystemen; Darstellung in der x-z-Ebene

gesetzt wird. Analog zu Gleichung 8.2 wird aus den vom Referenzmesssystem bestimmten Positionen $\mathbf{s}_{\text{Ref}}\mathbf{P}_i = [\mathbf{s}_{\text{Ref}}P_{xi}, \mathbf{s}_{\text{Ref}}P_{yi}, \mathbf{s}_{\text{Ref}}P_{zi}]^T$ und $\mathbf{s}_{\text{Ref}}\mathbf{P}_j = [\mathbf{s}_{\text{Ref}}P_{xj}, \mathbf{s}_{\text{Ref}}P_{yj}, \mathbf{s}_{\text{Ref}}P_{zj}]^T$ die Referenzdistanz wie folgt berechnet:

$$\mathbf{s}_{\text{Ref}}d_{ij} = \left\| \mathbf{s}_{\text{Ref}}\mathbf{P}_i - \mathbf{s}_{\text{Ref}}\mathbf{P}_j \right\| \quad (8.4)$$

$$i = 1 \dots (n_M - 1), j = (i + 1) \dots n_M, b = 1 \dots n_B.$$

Die Distanzen aus den Gleichungen 8.3 und 8.4 werden miteinander verglichen. Dadurch ist es möglich, ein Gütemaß zwischen den Distanzen in beiden Systemen zu bilden. Die Gütefunktion Q bewertet die quadrierte Differenz der Distanzen für jede Bedingung zwischen dem Referenzmesssystem und dem Trackermodul über alle Bedingungen n_B und kann durch die folgende Form ausgedrückt werden:

$$Q(\mathbf{p}_T) = \sum_{b=1}^{n_B} (\mathbf{s}_{\text{Ref}}d_b - \mathbf{s}_T d_b(\mathbf{p}_T))^2. \quad (8.5)$$

Da das Modell nichtlinear ist, wird ein nichtlineares Optimierungsverfahren verwendet. Es ist zu beachten, dass die Wahl des Startparametervektors bei dieser Art von Lösungsverfahren einen großen Einfluss auf die Konvergenz und die Geschwindigkeit des Verfahrens hat.

Punkt-Distanzverfahren

Das Punkt-Distanzverfahren stammt ursprünglich aus der Photogrammetrie [48–50], welche als Messverfahren zur Bestimmung der Orientierung und Form eines Objekts anhand der Koordinaten im dreidimensionalen Raum definiert ist. Das Verfahren beruht auf dem Vergleich der an jedem Messpunkt berechneten TCP-Position der

Trackermodule in einem gemeinsamen Koordinatensystem, welches in zwei Kriterien unterteilt ist.

Das erste Kriterium beinhaltet die Differenzenbildung für jede berechnete TCP-Position zwischen T_1 und T_2 . Hierzu werden zunächst eine bestimmte Anzahl n_M TCP-Positionen im Raum entworfen, die dann für die Kalibrierung angefahren werden sollen. Zu jeder dieser Positionen erfolgt anschließend die Winkelmessungen der zwei Trackermodule, welche dann auf Basis der Gleichungen (7.19) und (7.20) aus Abschnitt 7.2 für die Berechnung der TCP-Positionen im jeweiligen lokalen Koordinatensystem verwendet werden. Nach Gleichung (7.21) werden die berechneten Positionskoordinaten von T_2 in T_1 transformiert, um daraus die Differenz

$$\mathbf{c}_{T_1 T_2} = \mathbf{s}_{T_2}^1 \mathbf{g}_2 \left(\mathbf{p}_{T_2}, \mathbf{s}_{T_2}^1 \mathbf{l}, \mathbf{s}_{T_2}^1 \mathbf{O} \right) - \mathbf{s}_{T_1}^1 \mathbf{g}_2 \left(\mathbf{p}_{T_1} \right) \quad (8.6)$$

für jede angefahrne TCP-Position zu bilden. In Gleichung (8.6) ist zu erkennen, dass $\mathbf{s}_{T_1}^1 \mathbf{g}_2$ und $\mathbf{s}_{T_2}^1 \mathbf{g}_2$ Funktionen der Systemparameter des jeweiligen Trackermoduls sind. Des Weiteren wird die Differenz zusätzlich durch die Transformationsparameter von \mathbf{S}_2 zu \mathbf{S}_1 beeinflusst, die außer den Systemparametern geschätzt werden müssen. Es sei nochmal erwähnt, dass die Absolutlänge der Trackermodule für jede TCP-Position berechnet wird, da das Verfahren für ein System ohne Interferometer ausgelegt ist. Im Idealfall, wenn alle Parameter bekannt sind, ist die Differenz $\mathbf{c}_{T_1 T_2}$ für jeden Punkt Null. Ist dies nicht der Fall, so können alle Parameter auf Basis der Gleichung (8.6) so lange variieren, bis der Betrag der Differenz $\mathbf{c}_{T_1 T_2}$ minimal wird. Dies kann als Gütefunktion wie folgt aufgestellt werden:

$$Q_1 = \sum_{j=1}^{n_M} (\|\mathbf{c}_{T_1 T_2 j}\|)^2. \quad (8.7)$$

Ein zweites Kriterium wird noch hinzugefügt, um die Kalibrierung der Transformationsparameter $(\mathbf{s}_{T_2}^1 \mathbf{l}, \mathbf{s}_{T_2}^1 \mathbf{O})$ zu ermöglichen. Zwischen zwei Messpositionen (\mathbf{P}_{TCP} und \mathbf{P}'_{TCP}) wird eine Distanz aus den Winkelinformationen sowie den Systemparameter der Trackermodule berechnet, um sie mit der Referenzdistanz d_{Ref} zu vergleichen. Das zweite Kriterium hat daher die folgende Form:

$$Q_2 = (\|\mathbf{P}_{\text{TCP}} - \mathbf{P}'_{\text{TCP}}\| - d_{\text{Ref}})^2. \quad (8.8)$$

Werden Gleichungen (8.7) und (8.8) zusammengefasst, so ergibt sich die vollständige Gütefunktion wie folgt:

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (8.9)$$

8.1.2 Standortparameter

Die Kalibrierung der Standortparameter des MLTS beinhalten sowohl die Schätzung der Standortkoordinaten jedes Trackermoduls im Raum sowie deren Initiallänge und war Gegenstand der Arbeit von Takasuji [84–86] (siehe Tabelle 8.3). Die von Takasuji beschriebene Kalibrierungsmethode benötigt im Unterschied zu der Kalibrierung der Systemparameter kein Referenzmesssystem. Denn mit einem zusätzlichen Trackermodul bei einem bereits bestehenden Messsystem mit drei Trackermodulen werden redundante Längenmessungen ermöglicht. Das System kann demnach nur mit Hilfe seiner eigenen Messergebnisse unter Verwendung der Tri- bzw. Multilateration die Standortparameter selbst schätzen. Im Folgenden wird das Selbst-Kalibrierverfahren vorgestellt.

Tabelle 8.3: Schätzparameter nach Takasuji

Parameterbeschreibung	Name	n_P
Standortparameter	$\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \mathbf{l}_3, \mathbf{l}_4$	6
Initiallänge	$T_1 \ell_0, T_2 \ell_0, T_3 \ell_0$	3

Selbst-Kalibrierverfahren

Es seien somit vier Lasertracker gegeben, deren Positionen in einem kartesischen Koordinatensystem $\mathbf{l}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$, $i = 1 \dots 4$ sind. Die Absolutlängen zu beliebigen Messpunkten sei ℓ_{ij} , die Initiallänge zu Beginn einer Messung sei $T_i \ell_0$. Die von einem Trackermodul i während einer Messung aufgenommenen Längenänderungen seien mit $\Delta \ell_{ij}$ bezeichnet. Die Anzahl der unbekanntenen Variablen an jedem Messpunkt ist drei (x_{TCP} -, y_{TCP} -, z_{TCP} -Koordinaten des Messreflektors), während vier Messwerte von den Trackermodulen aufgenommen werden. Somit existiert ein redundanter Messwert für jeden Messpunkt. Die relevante Absolutlänge ℓ_{ij} aus der Initialdistanz und den Messwerten des i -ten Trackers kann nach Gleichung (7.29) durch

$$\ell_{ij} = T_i \ell_0 + \Delta \ell_{ij} \quad (8.10)$$

beschrieben werden. Andererseits kann die Absolutlänge auch durch die euklidische Norm zwischen i -tem Trackermodul und j -tem Messpunkt unter Anwendung der Multilateration bestimmt werden (siehe Gleichungen (7.30) - (7.33)):

$$\ell_{ij} = \sqrt{(x_{TCPj} - x_i)^2 + (y_{TCPj} - y_i)^2 + (z_{TCPj} - z_i)^2}, \text{ mit } i = 1 \dots 4. \quad (8.11)$$

Sind die Standortparameter sowie die Initiallängen exakt bekannt, so müssen die aus den Gleichungen (8.10) und (8.11) gewonnenen Längenangaben identisch sein. Sind sie es nicht, so ist davon auszugehen, dass die Parameter inkorrekt sind und angepasst werden müssen. Hierzu soll die Zielfunktion Q als Quadratsumme der Differenzen ℓ_{ij} für alle Trackermodule und alle Messpunkte minimiert werden:

$$Q = \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{i=1}^4 \left(\sqrt{(x_{\text{TCP}j} - x_i)^2 + (y_{\text{TCP}j} - y_i)^2 + (z_{\text{TCP}j} - z_i)^2} - (T_i \ell_0 + \Delta \ell_{ij}) \right)^2. \quad (8.12)$$

Hierbei sei n_M die Anzahl der Messpunkte. Die Anzahl der in Gleichung (8.12) vorhandenen unbekannt Parameter ist 16, vier für die Initiallängen und zwölf für jeweils drei Koordinaten der vier Trackermodule. Wird ein reduziertes Koordinatensystem, wie es in Abschnitt 7.3 beschrieben wurde, verwendet, so reduziert sich die Anzahl der benötigten Standortparameter für die Trackermodule auf sechs. In [84] wird vorgeschlagen, die in Gleichung 8.12 hergeleitete Zielfunktion weiter zu vereinfachen, indem das Messprinzip der Trilateration angewendet wird. Es soll aus den drei gewählten Trackermodulen (bspw. T_1 – T_3) die TCP-Position berechnet werden. Dadurch ist auch möglich, die Initiallänge des verbleibenden Trackermoduls T_4 in Abhängigkeit der zu schätzenden Parameter zu bestimmen:

$$\begin{aligned} T_4 \ell_0 &= \sqrt{(x_{\text{TCP}0} - x_4)^2 + (y_{\text{TCP}0} - y_4)^2 + (z_{\text{TCP}0} - z_4)^2} \\ x_{\text{TCP}0} &= \frac{T_1 \ell_0^2 - T_2 \ell_0^2 + x_2^2}{2 \cdot x_2} \\ y_{\text{TCP}0} &= \frac{T_1 \ell_0^2 - T_3 \ell_0^2 + x_3^2 + y_3^2 - 2 \cdot x_3 \cdot x_{\text{TCP}0}}{2 \cdot y_3} \\ z_{\text{TCP}0} &= \sqrt{T_1 \ell_0^2 - x_{\text{TCP}0}^2 - y_{\text{TCP}0}^2}. \end{aligned} \quad (8.13)$$

Mit Hilfe der Gleichung 8.13 und der berechneten TCP-Position durch die Trilateration kann der vom Interferometer gemessene Längenwert von T_4 an jedem Messpunkt bestimmt werden. Es ergibt sich eine neue Gütefunktion mit nur noch einer Summe über alle Messpunkte:

$$Q = \sum_{j=1}^{n_M} \left(\sqrt{(x_{\text{TCP}j} - x_4)^2 + (y_{\text{TCP}j} - y_4)^2 + (z_{\text{TCP}j} - z_4)^2} - T_4 \ell_0 - \Delta \ell_{4j} \right)^2. \quad (8.14)$$

Durch die Berechnung der Initiallänge von T_4 reduziert sich die Anzahl der unbekannt Parameter bezüglich der Entfernungen zu Beginn einer Messung von vier auf drei. Die Zielfunktion nach Gleichung (8.14) kann mit Hilfe eines nicht linearen

Optimierungsalgorithmus numerisch minimiert werden. Hierbei werden, ausgehend von einem Startvektor, die Parameter solange variiert, bis der quadratische Fehler zwischen den Distanzwerten minimal ist. Dabei muss die Anzahl an Messpunkten n_M größer sein als die Anzahl der unbekannt Parameter, da die Minimierung nur mit einem überbestimmten Gleichungssystem funktioniert.

Aufgrund der Tatsache, dass sich der Einsatz der Wurzelfunktion in der Numerik als schwierig erweist, wird anstelle der Zielfunktion nach Gleichung (8.14) eine neue Definition angestrebt:

$$Q = \sum_{j=1}^{n_M} \left((x_{\text{TCP}j} - x_4)^2 + (y_{\text{TCP}j} - y_4)^2 + (z_{\text{TCP}j} - z_4)^2 - (T_4 \ell_0 + \Delta \ell_{4j})^2 \right)^2. \quad (8.15)$$

Die Zielfunktion nach Gleichung (8.15) enthält keine Wurzel mehr, die Distanzmessung des verbleibenden Trackermoduls wird daher quadratisch bewertet.

8.1.3 Zusammenfassung der vorgestellten Kalibrierverfahren

Das **Distanzverfahren** ermöglicht die Schätzung der Systemparameter für jedes Trackermodul. Dabei kann durch das eingesetzte Referenzmesssystem der vollständige Messbereich vom Trackermodul abgedeckt werden. Da die Distanzen unabhängig von den Transformationsparametern miteinander verglichen werden, ist keine Koordinatentransformation bei der Erstellung der Zielfunktion erforderlich. Mit wenigen Punkten im Raum können daraus eine Vielfalt der Distanzbedingungen für die numerische Optimierung (Minimierung der Zielfunktion) erzeugt werden, dies reduziert den zeitlichen Kalibrieraufwand und somit die entstehenden Kosten für die Kalibrierung. Bei diesem Verfahren ist die Genauigkeit der Parameter jedoch von dem eingesetzten Referenzmesssystem abhängig. Die Präzision des Trackermoduls wird also durch das Referenzmesssystem vorgegeben. Bei der Durchführung der Optimierung werden sehr genaue Startparameter benötigt. In [90] haben die 13 Startparameter einen Fehler von maximal 0,1 %. Des Weiteren wird bei diesem Verfahren die Winkelmessung als ideal angenommen.

Das **Punkt-Distanzverfahren** erlaubt die Schätzung der Systemparameter ohne Referenzmesssystem. Dies wird durch das Hinzufügen eines zusätzlichen Trackermoduls sowie einer einzigen Referenzdistanz ermöglicht. Somit können in einem Schritt Systemparameter von zwei Trackermodulen sowie deren Transformationsparameter gleichzeitig geschätzt werden. Das Verfahren benötigt lediglich Winkelmessungen der Trackermodule, da kein Interferometer verwendet wird. Der vollständige Messbe-

reich für jedes Trackermodul kann mit diesem Verfahren nicht abgedeckt werden, da dieser aufgrund der Überlagerung der Koordinatensysteme (Abschnitt 7.5) zwischen den Trackermodulen limitierend ist. Des Weiteren steigt die Komplexität der aufgestellten Zielfunktion sowie deren Optimierung, da in einem Schritt für zwei Trackermodule insgesamt 30 Parameter geschätzt werden müssen. Auch bei dem Optimierungsvorgang werden Startparameter benötigt, die nah an ihrem wahren Wert liegen. Schließlich muss bei diesem Verfahren die Nichtlinearität des Winkelsensors berücksichtigt werden.

Das **Selbst-Kalibrierverfahren** schätzt die Standortparameter sowie die unbekannte Initillänge ohne Verwendung eines Referenzmesssystems. Die Kalibrierung erfolgt nur mit Hilfe der vier relativen Messlängen. Hierbei werden sechs Parameter für die Standorte der Trackermodule sowie drei Initillängen durch eine bestimmte Anzahl von Längenmessungen im Raum identifiziert. Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass die Längenänderungen im Strahlablesystem, welche durch die Rotation der Spiegel hervorgerufen wird, nicht vorhanden sind und somit keine Änderung der Auftreffpunkte auf dem Spiegel vorliegt. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Standortparameter lediglich einmal identifiziert werden müssen. Hingegen müssen die drei unbekanntes Initillängen zu Beginn jeder Messung neu ermittelt werden, da die Interferometer vor einer Messung auf den Wert Null zurücksetzen werden.

8.1.4 Weiterentwicklung der Kalibrieralgorithmen

Aus den vorgestellten Kalibrierverfahren stellt sich die Frage, wie die Algorithmen zur Schätzung der Parameter für das aufgebaute MLTS kombiniert werden müssen, damit die Berechnung der TCP-Position unter Anwendung der Multilateration die höchste Genauigkeit erreicht. D.h. die Schätzung soll in einzelnen Schritten wie in der Literatur erfolgen oder alternativ, d.h. alle Parameter werden in einem Kalibriervorgang geschätzt. Um diese Problematik zu klären, müssen Zusammenhänge der aufgestellten Zielfunktionen analysiert werden. Anhand der Analyse ist eine Verbindung zwischen Schätzung der Systemparameter sowie der Transformationsparameter (Standort- und Orientierungsparameter) zu finden.

Zunächst wird die Zielfunktion aus dem Selbstkalibrierverfahren (Gleichung (8.15)) betrachtet. Diese Funktion stellt den Zusammenhang zwischen den zu schätzenden Transformationsparametern sowie aller vier Längenänderungen zu jeder Punktmesung dar. Sie ist jedoch nur gültig, wenn die relative Bewegung des Messreflektors

tatsächlich durch die Interferometer fehlerfrei gemessen wird und die Auftreffpunkte auf dem Spiegel sich nicht ändern. Wie in Abschnitt 7.1.3 beschrieben wurde, existiert jedoch eine durch den Strahlengang verursachte Messabweichung, die durch eine interferometrische Korrektur $e_K(\varphi, \mathbf{p}_T)$ beseitigt werden muss, wie es in Gleichung (7.16) gezeigt wurde. Dieser Wert ist wiederum eine Funktion der Systemparameter sowie der Drehwinkel des jeweiligen Trackermoduls. Wird nun die Gleichung (8.15) um den Korrekturwert $e_K(\varphi, \mathbf{p}_T)$ und den Auftreffpunkt auf dem Spiegel erweitert, so entsteht eine neue Zielfunktion für die Selbstkalibrierung, die wie folgt definiert ist:

$$\begin{aligned} {}_{T_4}Q &= \sum_{j=1}^{n_M} \left((x_{TCPj} - {}_{T_4}S_G P_{2xj})^2 + (y_{TCPj} - {}_{T_4}S_G P_{2yj})^2 + (z_{TCPj} - {}_{T_4}S_G P_{2zj})^2 - \ell_4^2 \right)^2 \\ \ell_4 &= {}_{T_4}\ell_0 + \Delta\ell_{4j} - {}_{T_4}e_{Kj}. \end{aligned} \tag{8.16}$$

Die neu definierte Zielfunktion zeigt grundsätzlich, dass sowohl die Systemparameter als auch die Transformationsparameter des MLTS mit dem Selbstkalibrierverfahren ohne Referenzmesssystem geschätzt werden können. Für das MLTS müssen gemäß den vorgestellten Literaturquellen insgesamt 69 Parameter identifiziert werden. Die hohe Anzahl der Parameter führt zum einen zu einer steigenden Komplexität in den aufgestellten Gleichungen und zum anderen zu einem höheren zeitlichen Aufwand bei der Optimierung, die aber lediglich einmal durchgeführt werden muss. Jedoch sollen die ausgewählten Startparameter sehr nah bei ihrem wahren Wert liegen, da bei 69 Parameter enorm viele Kombinationen der Parameter existieren, die zu einem lokalen Minimum führen können. Des Weiteren muss bei diesem Verfahren die Nichtlinearität des Winkelsensors betrachtet werden, da diese für die Berechnung des Korrekturterms sowie des Auftreffpunkts verwendet wird und somit einen großen Einfluss auf die Schätzung der Systemparameter hat.

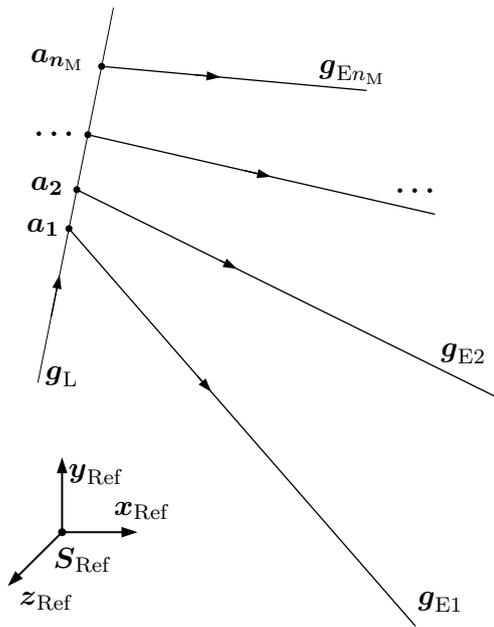
Im Folgenden wird eine Kalibrierstrategie vorgestellt, welche alle Parameter systematisch identifiziert. Hierbei werden sowohl numerische als auch analytische Methoden verwendet. Die Identifikation der Parameter ist in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase wird auf die Kalibrierung eines einzelnen Trackermoduls eingegangen. Für eine erfolgreiche Optimierung ist die Wahl der Startwerte entscheidend. Hierzu wird eine analytische Methode vorgestellt, welche die Parameter systematisch mithilfe eines Referenzsystems ermittelt (Abschnitt 8.2). Nach der Bestimmung der Startparameter wird die Nichtlinearität des Winkelsensors untersucht, welche dann als mathematische Funktion modelliert wird (Abschnitt 8.3). Die Parameter des Winkelmodells sowie die Systemparameter werden mit dem Distanzverfahren

für alle vier Trackermodule identifiziert. Auf Basis der geschätzten Parameter wird anschließend die Längenkorrektur analysiert (Abschnitt 8.4). In dieser Phase werden für vier Trackermodule insgesamt 48 Systemparameter ermittelt, welche wiederum als Startwerte für die Selbst-Kalibrierung dienen.

In der zweiten Phase wird auf die Selbst-Kalibrierung eingegangen, wobei mit einem Kalibriervorgang sowohl die System- als auch die Transformationsparameter (Standort- und Orientierungsparameter) ermittelt werden sollen. Dabei soll untersucht werden, ob der Selbst-Kalibrieralgorithmus für das MLTS angewendet werden kann oder ob zusätzliche Kalibrierbedingungen eingeführt werden müssen. Des Weiteren werden die Anordnungen der Trackermodule im Raum sowie die verschiedenen Kalibrieranordnungen (Anzahl der Messpunkte, Anordnung der Messpunkte etc.) untersucht. Ebenso wird der Einfluss des Korrekturterms sowie der berechneten Auftreffpunkte auf die Ermittlung der Koordinaten analysiert. Es soll hier die Frage geklärt werden, wie stark der Fehler in der Längenkorrektur auf die Koordinaten des MLTS wirkt (Abschnitt 8.6). Im Anschluss werden die entwickelten Kalibrieralgorithmen am experimentellen Aufbau getestet und validiert (Kapitel 9).

8.2 Identifikation der Systemparameter

In diesem Abschnitt wird eine Identifikationsmethode mit Hilfe eines 3-D-Referenzmesssystems entwickelt, die alle Systemparameter der Trackermodule systematisch auf Basis der analytischen Geometrie berechnet. Bei dieser Methode wird der Strahlengang im Gegensatz zum Abschnitt 7.1.2 vom Messreflektor bis zur Laserquelle sequentiell untersucht. Dabei wird der Strahl nicht dem Reflektor nachgeführt, und die Spiegel der Scanner werden gezielt mit einem Spannungsbetrag angesteuert. Die komplexe mathematische Beschreibung im Strahlengang zwischen einfallendem und austretendem Laserstrahl bei beiden Spiegeln wird durch eine Geradenschar (Regelflächen) ersetzt, wodurch der austretende Laserstrahl nur noch als eine vereinfachte Funktion vom einfallenden Strahl zu betrachten ist. In Abbildung 8.3 ist eine solche Geradenschar an Spiegel 2 dargestellt. Hier ist der einfallende Laserstrahl eine unbekannte Leitgerade \mathbf{g}_L , welche vom ersten Spiegel auf dem zweiten Spiegel trifft. Zu jedem Punkt dieser Leitgerade existiert eine „Erzeugende“ Gerade, welche als $\mathbf{g}_{E1} \dots \mathbf{g}_{En_M}$ in der Abbildung zu sehen ist. Die erzeugende Geraden entstehen durch Rotation des Spiegels 2 und sind nicht schneidend und nicht parallel zueinander. Sie schneiden lediglich die Leitgerade jeweils an den Punkten $\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_{n_M}$, die als Auftreffpunkte auf den zweiten Spiegel repräsentiert werden. Mit Hilfe des 3-D-Messgerätes

**Abbildung 8.3:**

Geradenschar des Laserstrahls bei der Reflexion auf Spiegel 2

werden die erzeugenden Geraden gemessen und anhand dieser Geraden können die Auftreffpunkte $\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_{n_M}$ berechnet werden. Auf Grundlage der ermittelten Auftreffpunkte werden sowohl die Leitgerade \mathbf{g}_L als auch die Systemparameter vom Spiegel 2 im \mathbf{S}_{Ref} -System identifiziert. Auf die gleiche Art und Weise werden Systemparameter vom ersten Spiegel sowie Orts- und Richtungsvektor der Laserquelle ermittelt. In diesem Fall wird nur der Spiegel 1 durch das Umschalten eines bestimmten Spannungsbetrags rotiert. Der Laserstrahl zwischen Laserquelle und Spiegel 1 stellt die unbekannte Leitgerade \mathbf{g}_L dar. Der Laserstrahl zwischen Spiegel 1 und Spiegel 2 sind die erzeugenden Geraden, die wiederum mit Hilfe des 3-D-Messgerätes gemessen werden.

8.2.1 Auftreffpunkte von Spiegel 2

Eine Gerade im Raum ist im Allgemeinen durch einen Orts- sowie Richtungsvektor mit

$$\mathbf{g} : \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} + t \cdot \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (8.17)$$

in Parameterform beschrieben, wobei der bei dieser Methode verwendete Richtungsvektor ein Einheitsvektor ist. Mit der Darstellung aus Gleichung (8.17) werden die Koordinaten (x, y, z) der Gerade \mathbf{g} in Abhängigkeit des Parameters t angegeben. Jede

Koordinate ist somit eine Funktion von t , die linear unabhängig ist. Wird bspw. die Gleichung der z -Koordinate nach t umgestellt und diese dann in den Gleichungen der x - bzw. y -Koordinate eingesetzt, so ergeben sich zwei Funktionen, die in Abhängigkeit der z -Koordinate wie folgt lauten:

$$x(z) = P_x - \underbrace{\frac{P_z \cdot r_x}{r_z}}_{n_x} + \underbrace{\frac{r_x}{r_z}}_{m_x} \cdot z \quad (8.18)$$

$$y(z) = P_y - \underbrace{\frac{P_z \cdot r_y}{r_z}}_{n_y} + \underbrace{\frac{r_y}{r_z}}_{m_y} \cdot z. \quad (8.19)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (8.18), (8.19) ist zu erkennen, dass die transformierten Funktionen nur lösbar sind, wenn die Komponente r_z nicht den Wert Null annimmt. Diese Funktionen werden verwendet, um die erzeugende Gerade \mathbf{g}_E sowie die Leitgerade \mathbf{g}_L in Koordinatenform wie folgt darzustellen:

$$\mathbf{g}_{Ej} : \begin{matrix} x_j = n_{xj} + m_{xj} \cdot z_j \\ y_j = n_{yj} + m_{yj} \cdot z_j \end{matrix}, \quad \mathbf{g}_L : \begin{matrix} x_j = b_x \cdot z_j + c_x \\ y_j = b_y \cdot z_j + c_y \end{matrix}, \quad j = 1 \dots n_M. \quad (8.20)$$

Der Parameter n_M repräsentiert die Anzahl der gemessenen erzeugenden Geraden. Die Parameter $(n_{xj}, n_{yj}, m_{xj}, m_{yj})$ in Gleichung (8.20) werden durch das 3-D-Messgerät bestimmt. Zu jeder j -ten Messung existiert ein Auftreffpunkt $\mathbf{a}_j = [x_j, y_j, z_j]^T$ auf dem Spiegel, der gleichzeitig den Schnittpunkt zwischen der Leitgerade sowie der j -ten erzeugende Gerade entspricht. Dabei sind die Parameter $(b_x, b_y, c_x$ und $c_y)$ die gesuchten Größen der Leitgerade. Der Schnittpunkt für jeden Auftreffpunkt kann als Gleichungssystem wie folgt aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} n_{xj} + m_{xj} \cdot z_j &= b_x \cdot z_j + c_x \\ n_{yj} + m_{yj} \cdot z_j &= b_y \cdot z_j + c_y. \end{aligned} \quad (8.21)$$

Das Gleichungssystem verfügt über fünf unbekannte Parameter $(b_x, c_x, b_y, c_y, z_j)$ sowie zwei Gleichungen. Mit jedem weiteren Auftreffpunkt wird im Gleichungssystem zusätzlich eine neue z -Koordinate der j -ten Messung als Parameter hinzugefügt, jedoch können zwei neue Gleichungen aufgestellt werden. Die Anzahl der Gleichungen sowie der Parameter im Gleichungssystem sind identisch, wenn vier erzeugende Geraden durch das 3-D-Messgerät gemessen werden. Somit ergeben sich nach Gleichung (8.21) bei vier Messungen acht Parameter $(b_x, b_y, c_x, c_y, z_1, z_2, z_3, z_4)$, die mit acht Gleichungen gelöst werden müssen. Die Parameter werden analytisch bestimmt. Nach wenigen Rechenschritten und Umformungen kann die z -Koordinate für den ersten Auftreff-

punkt als Funktionen der vier erzeugenden Geraden in einem Gleichungssystem in folgender Form beschrieben werden:

$$\frac{N_{Z1} + M_{Z1} \cdot z_1}{N_{N1} + z_1} = \frac{N_{Z2} + M_{Z2} \cdot z_1}{N_{N2} + z_1} \quad (8.22)$$

mit

$$N_{Z1} = n_{x3} \cdot (n_{y1} - n_{y2}) + n_{x1} \cdot (n_{y2} - n_{y3}) + n_{x2} \cdot (-n_{y1} + n_{y3})/i_1 \quad (8.23a)$$

$$N_{Z2} = n_{x4} \cdot (n_{y1} - n_{y2}) + n_{x1} \cdot (n_{y2} - n_{y4}) + n_{x2} \cdot (-n_{y1} + n_{y4})/i_2 \quad (8.23b)$$

$$M_{Z1} = -(m_{y1} - m_{y3}) \cdot (n_{x2} - n_{x3}) + (m_{x1} - m_{x3}) \cdot (n_{y2} - n_{y3})/i_1 \quad (8.23c)$$

$$M_{Z2} = -(m_{y1} - m_{y4}) \cdot (n_{x2} - n_{x4}) + (m_{x1} - m_{x4}) \cdot (n_{y2} - n_{y4})/i_2 \quad (8.23d)$$

$$N_{N1} = -(m_{y2} - m_{y3}) \cdot (n_{x1} - n_{x3}) + (m_{x2} - m_{x3}) \cdot (n_{y1} - n_{y3})/i_1 \quad (8.23e)$$

$$N_{N2} = -(m_{y2} - m_{y4}) \cdot (n_{x1} - n_{x4}) + (m_{x2} - m_{x4}) \cdot (n_{y1} - n_{y4})/i_2 \quad (8.23f)$$

$$i_1 = m_{x3} \cdot (-m_{y1} + m_{y2}) + m_{x2} \cdot (m_{y1} - m_{y3}) + m_{x1} \cdot (-m_{y2} + m_{y3}) \quad (8.23g)$$

$$i_2 = m_{x4} \cdot (-m_{y1} + m_{y2}) + m_{x2} \cdot (m_{y1} - m_{y4}) + m_{x1} \cdot (-m_{y2} + m_{y4}). \quad (8.23h)$$

Wird die linke Seite der Gleichung (8.22) von der rechten Seite subtrahiert und anschließend vereinfacht, so entsteht eine nichtlinear quadratische Funktion der z_1 -Koordinate in folgender Form:

$$0 = w_2 \cdot z_1^2 + w_1 \cdot z_1 + w_0 \quad (8.24)$$

mit

$$w_2 = M_{Z1} - M_{Z2} \quad (8.25a)$$

$$w_1 = -M_{Z2} \cdot N_{N1} + N_{Z1} + (M_{Z1} - 1) \cdot N_{Z2} \quad (8.25b)$$

$$w_0 = N_{Z2} \cdot (N_{Z1} - N_{N1}). \quad (8.25c)$$

Die z_1 -Koordinate in Gleichung (8.24) kann mit Hilfe einer quadratischen Ergänzung [7] gelöst werden. Jedoch existiert bei dieser Methode kein eindeutiges Ergebnis, da zwei Lösungen für die z_1 -Koordinate entstehen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die z_1 -Koordinate mit mehr als vier Messungen mittels linearer Regression [94] zu lösen. Demnach werden z_1^2 und z_1 als konstante Parameter betrachtet, das Regressionsmodell hat daher die folgende Form:

$$\mathbf{p}_z = (\mathbf{D}^T \cdot \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \cdot \mathbf{y} \quad (8.26)$$

mit

$$\mathbf{p}_Z = \begin{bmatrix} z_1^2 \\ z_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} w_{2_1} & w_{1_1} \\ \vdots & \vdots \\ w_{2_M} & w_{1_M} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} w_{0_1} \\ \vdots \\ w_{0_M} \end{bmatrix}.$$

Die Lösung der z_1 -Koordinate wird für die Berechnung der sieben verbleibenden Parameter $(b_x, b_y, c_x, c_y, z_2, z_3, z_4)$ verwendet. Mit der vorgestellten Methode werden sowohl die Auftreffpunkte auf dem Spiegel als auch die Leitgerade identifiziert. Hierbei entspricht die ermittelte Leitgerade der Geraden \mathbf{g}_1 aus Gleichung (7.8), welche bereits im Abschnitt 7.1.2 beschrieben wurde. Somit kann aus der Ermittlung der Auftreffpunkte angenommen werden, dass der Richtungsvektor \mathbf{r}_1 der Geraden \mathbf{g}_1 gegeben ist. Dieser beschreibt den einfallenden Laserstrahl von Spiegel 1 auf Spiegel 2 und wird daher im nächsten Abschnitt verwendet, um den Normalvektor \mathbf{n}_2 des zweiten Spiegels zu berechnen.

8.2.2 Normalvektor von Spiegel 2

Der Normalvektor \mathbf{n}_2 ist ein Einheitsvektor, der orthogonal auf der Spiegeloberfläche vom Spiegel 2 steht (siehe Abbildung 8.4). Er kann auch wie folgt geschrieben werden:

$$\mathbf{n}_2 = \begin{bmatrix} n_{2x} & n_{2y} & n_{2z} \end{bmatrix}^T. \quad (8.27)$$

Die Komponenten vom Normalvektor werden bei der Initialstellung berechnet, d.h. wenn der Drehwinkel vom zweiten Spiegel die Nullstellung annimmt. Zu dieser Stellung ($\varphi_y = 0$) wird die Richtung des aus dem zweiten Spiegel austretenden Laserstrahls durch das 3-D-Messgerät gemessen, welche bereits im Abschnitt 7.1.2 als ein Vektor \mathbf{r}_2 bezeichnet wurde. Mit der Kenntnis der ein- sowie ausgehenden Richtungsvektoren ($\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$) können die Komponenten des Normalvektors \mathbf{n}_2 nach

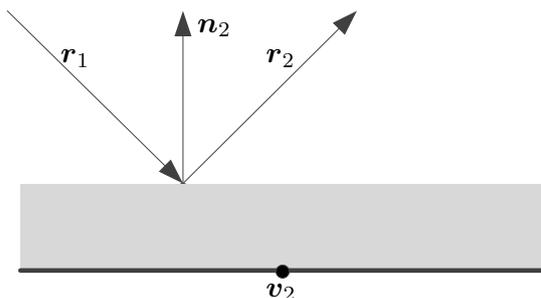


Abbildung 8.4:
Darstellung des Normalvektors

Gleichung (7.11) als nichtlineares Gleichungssystem geschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} n_{2x} \cdot (-n_{2x} \cdot r_{1x} - n_{2y} \cdot r_{1y} - n_{2z} \cdot r_{1z}) \\ n_{2y} \cdot (-n_{2x} \cdot r_{1x} - n_{2y} \cdot r_{1y} - n_{2z} \cdot r_{1z}) \\ n_{2z} \cdot (-n_{2x} \cdot r_{1x} - n_{2y} \cdot r_{1y} - n_{2z} \cdot r_{1z}) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} r_{2x} - r_{1x} \\ r_{2y} - r_{1y} \\ r_{2z} - r_{1z} \end{bmatrix}. \quad (8.28)$$

Wird das Gleichungssystem in Gleichung (8.28) analytisch gelöst, so existieren für jede Komponente des Normalvektors zwei Ergebnisse. Jedoch kann durch Plausibilitätsüberprüfung das falsche Ergebnis ausgeschlossen werden.

8.2.3 Drehachse und Normalabstand von Spiegel 2

Der Vektor \mathbf{v}_2 ist ein Einheitsvektor und beschreibt die Richtung der Drehachse von Spiegel 2 im Raum. Mit der Identifikation des Normalvektors sowie der Auftreffpunkte ist es nun möglich, die Spiegeloberfläche von Spiegel 2 als eine Ebene vollständig zu beschreiben. Diese ist in Abbildung 8.5 als \mathbf{E}'_1 mit den Parametern \mathbf{a}_1 und \mathbf{n}_{21} dargestellt.

Zwischen der Drehachse \mathbf{v}_2 und \mathbf{E}'_1 besteht ein Zusammenhang, der durch den Normalabstand k_2 beschrieben wird. Dabei liegt die Drehachse \mathbf{v}_2 in Ebene \mathbf{E}_1 , welche den gleichen Normalvektor wie \mathbf{E}'_1 besitzt. Dementsprechend ist \mathbf{E}_1 parallel zu \mathbf{E}'_1 und kann wie folgt angegeben werden:

$$\mathbf{E}_1 : \mathbf{n}_{21} \cdot \left(\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T - (\mathbf{a}_1 - k_2 \cdot \mathbf{n}_{21}) \right) = 0. \quad (8.29)$$

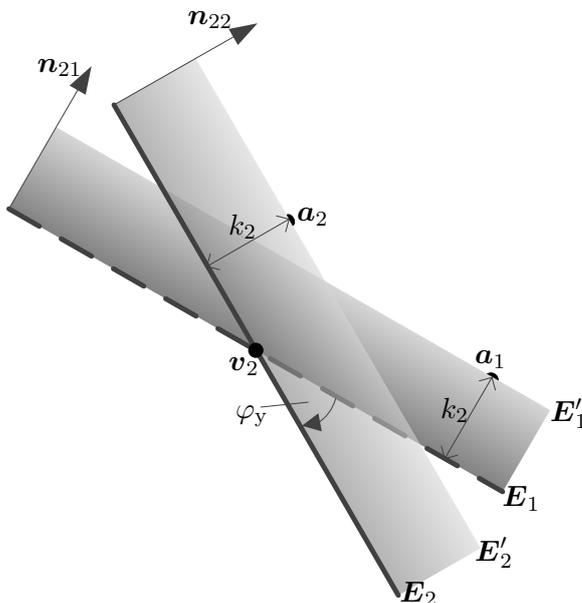


Abbildung 8.5:

Normalabstand zwischen Drehachse und Spiegeloberfläche

Die Drehachse sowie der Normalabstand können ermittelt werden, indem \mathbf{E}_1 um einen bestimmten Winkel um die Drehachse rotiert wird. Bei der Rotation entsteht eine neue Ebene \mathbf{E}_2 , die \mathbf{E}_1 schneidet (siehe Abbildung 8.5). Dabei ist die Schnittgerade zwischen \mathbf{E}_1 und \mathbf{E}_2 die Drehachse, die den Richtungsvektor \mathbf{v}_2 enthält. Zur Bestimmung dieser Parameter werden drei Ebenen benötigt, die in folgender Form gegeben sind:

$$\mathbf{E}_1 : \mathbf{n}_{21} \cdot \left(\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T - (\mathbf{a}_1 - k_2 \cdot \mathbf{n}_{21}) \right) = 0 \quad (8.30)$$

$$\mathbf{E}_2 : \mathbf{n}_{22} \cdot \left(\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T - (\mathbf{a}_2 - k_2 \cdot \mathbf{n}_{22}) \right) = 0 \quad (8.31)$$

$$\mathbf{E}_3 : \mathbf{n}_{23} \cdot \left(\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T - (\mathbf{a}_3 - k_2 \cdot \mathbf{n}_{23}) \right) = 0. \quad (8.32)$$

Aus den Kombinationen $\mathbf{E}_1\mathbf{E}_2$ und $\mathbf{E}_1\mathbf{E}_3$ werden

$$\mathbf{g}_{E12}(k_2) = \mathbf{P}_{E12} + t \cdot \mathbf{r}_{E12} \quad (8.33)$$

$$\mathbf{g}_{E13}(k_2) = \mathbf{P}_{E13} + t \cdot \mathbf{r}_{E13} \quad (8.34)$$

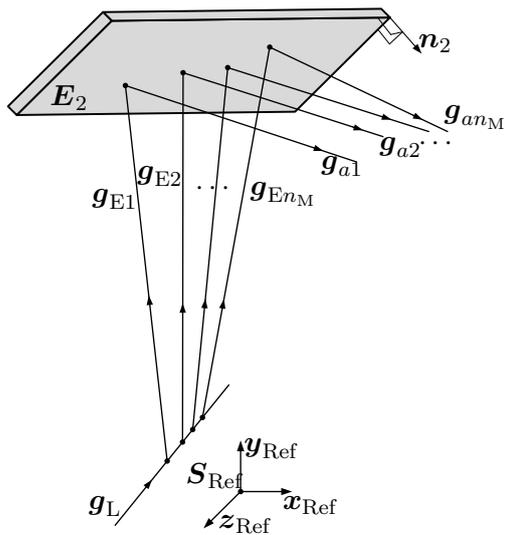
berechnet, die wiederum Funktionen von k_2 sind. Da beide Geraden die Drehachse beschreiben, sind sie identisch. Aus dieser Bedingung erfolgt die Berechnung der Parameter k_2 , indem der Ortsvektor \mathbf{P}_{E12} aus Gleichung (8.33) in Gleichung (8.34) eingesetzt wird. Nach der Berechnung von k_2 kann \mathbf{v}_2 in folgender Form angegeben werden:

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{r}_{E12} = \mathbf{r}_{E13} = \begin{bmatrix} v_{2x} & v_{2y} & v_{2z} \end{bmatrix}^T. \quad (8.35)$$

Die Komponenten von Spiegel 2 sind somit vollständig berechnet. Sie werden als gegebene Größe für den nächsten Abschnitt verwendet, um die Parameter von Spiegel 1 zu identifizieren.

8.2.4 Auftreffpunkte von Spiegel 1

Die Ermittlung der Auftreffpunkte von Spiegel 1 erfolgt in der gleichen Weise wie bei Spiegel 2. Hierbei kennzeichnet die unbekannte Leitgerade \mathbf{g}_L die Gerade \mathbf{g}_0 zwischen Laserquelle und Spiegel 1. Durch die Rotation des Spiegels 1 entsteht zu jedem Punkt der Leitgerade eine erzeugende Gerade, wie in Abbildung 8.6 dargestellt. Die erzeugenden Geraden beschreiben den Verlauf des Laserstrahls von Spiegel 1 zu Spiegel 2. Es ist darauf hinzuweisen, dass Spiegel 2 bei dieser Ermittlung im Ruhezustand ist. Er wirkt lediglich als eine Reflexionsebene \mathbf{E}_2 und ermöglicht dadurch eine indirekte Messung der erzeugenden Geraden. Mit Hilfe des Messgerätes werden die

**Abbildung 8.6:**

Darstellung des Spiegels 2 als Reflexionsebene

ausgehenden Geraden gemessen, welche die erzeugenden Geraden nach der Reflexion an Spiegel 2 repräsentieren. Demnach können die Auftreffpunkte auf Spiegel 2 durch die Methode der Schnittpunktberechnung zwischen Ebene E_2 sowie ausgehenden Geraden wie nach 7.1.2 berechnet werden. Die Richtungsvektoren der erzeugenden Geraden sind aus dem Normalvektor von Spiegel 2 und den Richtungsvektoren der gemessenen Geraden wie nach Gleichung (8.28) zu berechnen.

Nachdem die erzeugenden Geraden ermittelt wurden, erfolgt die Identifikation der unbekanntes Leitgerade sowie der benötigten Auftreffpunkte auf Spiegel 1. Hierzu wird ein Gleichungssystem wie nach Gleichung (8.21) aufgestellt, das wie nach Gleichung (8.26) die z -Koordinaten der Auftreffpunkte sowie die Parameter der unbekanntes Leitgerade ermittelt.

8.2.5 Parameter von Spiegel 1

Spiegel 1 verfügt über einen Normalenvektor \mathbf{n}_1 , der orthogonal zur Drehachse \mathbf{v}_1 steht. Zwischen Spiegeloberfläche und Drehachse \mathbf{v}_1 existiert ein Normalabstand, der entsprechend Abbildung 7.4 als k_1 gekennzeichnet ist. Die Vektoren \mathbf{n}_1 , \mathbf{v}_1 sowie k_1 werden auf die gleiche Art und Weise wie bei Spiegel 2 ermittelt.

8.2.6 Ursprung und Richtung des Laserstrahls

Wie bereits beschrieben, entspricht die identifizierte Leitgerade aus Abbildung 8.6 der Gerade g_0 . Somit sind Ursprungsort \mathbf{P}_0 sowie Richtungsvektor \mathbf{r}_0 des Laserstrahls bekannt.

8.2.7 Abstand der Drehachsen

Durch die Ermittlungen der Parameter von beiden Spiegeln sind die Drehachsen vom Strahlablesystem als Geradengleichung ($\mathbf{g}_{v_1}, \mathbf{g}_{v_2}$) im Raum angegeben. Diese wurden bei der Berechnung des Normalabstandes (k_1, k_2) als Schnittgerade zweier Ebenen ermittelt. Die Geraden zur Beschreibung der Drehachsen sind nicht schneidend und nicht parallel zueinander und können durch ihre Richtungsvektoren $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ sowie Stützvektoren $\mathbf{P}_{v_1}, \mathbf{P}_{v_2}$ in folgender Form beschrieben werden:

$$\mathbf{g}_{v_1} = \mathbf{P}_{v_1} + t \cdot \mathbf{v}_1 \quad (8.36)$$

$$\mathbf{g}_{v_2} = \mathbf{P}_{v_2} + t \cdot \mathbf{v}_2. \quad (8.37)$$

Um den gesuchten Abstand d zwischen den Drehachsen zu berechnen, wird ein Vektor $\mathbf{n}_{v_1v_2}$ aus den Richtungsvektoren (vgl. Gleichungen (8.36), (8.37)) durch das Kreuzprodukt gebildet. Somit ergibt sich aus $\mathbf{n}_{v_1v_2}$ und den Stützvektoren $\mathbf{P}_{v_1}, \mathbf{P}_{v_2}$

$$d = \frac{|(\mathbf{P}_{v_1} - \mathbf{P}_{v_2}) \cdot \mathbf{n}_{v_1v_2}|}{|\mathbf{n}_{v_1v_2}|}. \quad (8.38)$$

8.2.8 Koordinatentransformation

Alle Vektoren befinden sich nach der Identifikation im \mathbf{S}_{Ref} -System vom 3-D-Messgerät. Diese müssen nun in das \mathbf{S}_{T} -System (vgl. Abschnitt 7.1.1) vom Trackermodul transformiert werden. Hierzu wird die Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\mathbf{S}_{\text{Ref}}, \mathbf{S}_{\text{T}})$ wie nach Gleichung (7.22) verwendet, um die Transformation zwischen \mathbf{S}_{Ref} und \mathbf{S}_{T}

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\text{T}} & \mathbf{y}_{\text{T}} & \mathbf{z}_{\text{T}} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\mathbf{S}_{\text{Ref}}, \mathbf{S}_{\text{T}}) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.39)$$

zu berechnen. Da die Koordinatenachsen $\mathbf{x}_{\text{T}}, \mathbf{y}_{\text{T}}, \mathbf{z}_{\text{T}}$ vom Trackermodul in \mathbf{S}_{Ref} gegeben sind, wird die Gleichung (8.39) nach den Drehwinkeln ($\mathbf{s}_{\text{Ref}}^{\text{T}} \alpha, \mathbf{s}_{\text{Ref}}^{\text{T}} \beta, \mathbf{s}_{\text{Ref}}^{\text{T}} \gamma$) umgestellt. Zu den transformierten Vektoren ergeben sich fünf Einheitsvektoren ($\mathbf{n}_2, \mathbf{v}_2, \mathbf{n}_1, \mathbf{v}_1, \mathbf{r}_0$), deren Komponenten allgemein jeweils durch zwei Parameter (α, β) mit Hilfe von sphärischen Koordinaten angegeben werden. Dabei beschreibt α in Abbildung 8.7 den Winkel zwischen der $\mathbf{z}_{\text{T}}\text{-}\mathbf{x}_{\text{T}}$ -Ebene und β den Winkel zwischen der $\mathbf{y}_{\text{T}}\text{-}\mathbf{z}_{\text{T}}$ -Ebene. Demnach lässt sich ein Vektor \mathbf{n} durch den Zusammenhang zwischen kartesischen und sphärischen Koordinaten nach Abbildung 8.7 allgemein wie folgt

erklären:

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_{e1} \\ n_{e2} \\ n_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \beta \cdot \sin \alpha \\ \cos \beta \\ \sin \beta \cdot \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (8.40)$$

Sind die Komponenten (n_{e1}, n_{e2}, n_{e3}) gegeben, so können die Parameter

$$\beta = \arccos n_{e2}, \quad \alpha = \arcsin \frac{n_{e1}}{\sin \beta} \quad (8.41)$$

durch die Komponenten (n_{e1}, n_{e2}) berechnet werden. Die Komponente n_{e3} wird zur Überprüfung der resultierenden Ergebnisse verwendet.

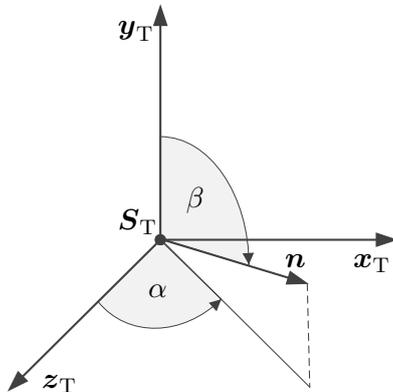


Abbildung 8.7:

Allgemeine Darstellung eines Vektors \mathbf{n} in sphärischen Koordinaten

8.2.9 Parameter und Konstanten

Die durch das 3-D-Messgerät ermittelten Systemparameter können nun als Startparameter für die Optimierung nach dem Distanzverfahren verwendet werden. Es stellt sich die Frage, ob alle Parameter in die Optimierung eingesetzt werden sollen oder ob sich ein Parameter durch einen anderen ersetzen lässt, bzw. ob es Konstanten unter den Parametern gibt. Eine Konstante ist ein Parameter, der nicht kalibriert werden muss, da er durch einen festen Wert vor der Kalibrierung angegeben wird. Die kalibrierten Parameter beschreiben die Anfangsstellung der Winkel ($\varphi_x, \varphi_y = 0$).

Es sei hier nochmals erwähnt, dass der Laserstrahl zwischen seinem Ursprungsort und dem Auftreffpunkt \mathbf{P}_1 auf Spiegel 1 (vgl. Abbildung 7.4) durch den Vektor \mathbf{P}_0 sowie den Richtungsvektor \mathbf{r}_0 angegeben ist. Beide Vektoren bilden die Gerade \mathbf{g}_0 . Wird der Laserstrahl jedoch vom Auftreffpunkt \mathbf{P}_1 aus bis zu seinem Ursprungsort \mathbf{P}_0 betrachtet, so lässt sich die Gerade \mathbf{g}_0 durch den Auftreffpunkt \mathbf{P}_1 sowie den Richtungsvektor \mathbf{r}_0 mit geändertem Vorzeichen in Parameterform wie folgt

beschreiben:

$$\mathbf{g}_0 : \begin{bmatrix} P_{0x} \\ P_{0y} \\ P_{0z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1x} \\ P_{1y} \\ P_{1z} \end{bmatrix} - t \cdot \begin{bmatrix} r_{0x} \\ r_{0y} \\ r_{0z} \end{bmatrix}. \quad (8.42)$$

Werden nun die Parameter (α_L, β_L) für den Richtungsvektor \mathbf{r}_0 wie nach Gleichung (8.40) eingesetzt und Gleichung (8.42) nach der Koordinatenform (vgl. Gleichungen (8.18), (8.19)) umgestellt, so ergeben sich die Koordinaten für den Ursprungsort vom Laserstrahl wie folgt:

$$P_{0x}(P_{0z}) = P_{1x} + \frac{\sin \beta_L \cdot \sin \alpha_L}{\sin \beta_L \cdot \cos \alpha_L} \cdot P_{1z} - \frac{\sin \beta_L \cdot \sin \alpha_L}{\sin \beta_L \cdot \cos \alpha_L} \cdot P_{0z} \quad (8.43)$$

$$P_{0y}(P_{0z}) = P_{1y} + \frac{\cos \beta_L}{\sin \beta_L \cdot \cos \alpha_L} \cdot P_{1z} - \frac{\cos \beta_L}{\sin \beta_L \cdot \cos \alpha_L} \cdot P_{0z}. \quad (8.44)$$

Hier ist zu erkennen, dass die Koordinaten (P_{0x}, P_{0y}) Funktionen von der Koordinate P_{0z} sind. Somit ist die Koordinate P_{0z} des Ursprungsorts eine konstante Größe und kann vor der Kalibrierung beliebig vorgegeben werden. Die Koordinaten (P_{0x}, P_{0y}) und die Winkel (α_L, β_L) sind Optimierungsparameter und müssen geschätzt werden.

Die Richtung der Drehachse \mathbf{v}_1 von Spiegel 1 ist durch die Parameter $(\alpha_{v_1}, \beta_{v_1})$ gekennzeichnet. Nach Gleichung (7.2) ist \mathbf{v}_1 orthogonal zu \mathbf{y}_T . Um diese Bedingung zu erfüllen, muss β_{v_1} den Wert $\pi/2$ annehmen. Somit ist β_{v_1} eine Konstante. Die Drehachse liegt demnach in der \mathbf{z}_T - \mathbf{x}_T -Ebene. Zwischen \mathbf{z}_T und \mathbf{v}_1 existiert eine Verdrehung, die durch den Parameter α_{v_1} geschätzt werden muss.

Der Normalvektor \mathbf{n}_1 von Spiegel 1 wird durch die Parameter α_{n_1} und β_{n_1} beschrieben. Seine Richtung zeigt bei Anfangsstellung ($\varphi_x = 0$) in die negative \mathbf{x}_T -Achse. Bei der Identifikation wurde vereinfacht angenommen, dass die Achse des Spiegels mit der Drehachse zusammenfällt. Somit sei der Normalvektor \mathbf{n}_1 orthogonal zum Richtungsvektor der Drehachse \mathbf{v}_1 . Es soll jedoch bei der Kalibrierung davon ausgegangen werden, dass der Normalvektor nicht ideal orthogonal zu der Drehachse liegt. Daher gehen beide Parameter in die Optimierung ein.

Die Richtung der Drehachse \mathbf{v}_2 von Spiegel 2 fällt mit der \mathbf{x}_T -Achse vom Koordinatensystem des Trackermoduls zusammen. Diese kann angegeben werden, wenn α_{v_2} und β_{v_2} den Wert $\pi/2$ annehmen. Somit sind beide Parameter von Spiegel 2 Konstanten, die nicht geschätzt werden müssen.

Der Normalvektor \mathbf{n}_2 , dessen Komponenten durch die Parameter α_{n_2} und β_{n_2} berechnet werden, sei vereinfacht orthogonal zu der Richtung der Drehachse \mathbf{v}_2 angenommen.

Er zeigt in die negative Richtung der z_T -Achse. Auch wie beim Normalvektor von Spiegel 1 gehen beide Parameter mit in die Optimierung ein.

Die skalaren Größen wie Abstand der Drehachsen d , Normalabstand zwischen Drehachse und Spiegeloberfläche (k_1, k_2) sind durch den mechanischen Aufbau vom Ablenkensystem gegeben und für jedes Trackermodul verschieden. Diese Größen müssen daher in der Optimierung berücksichtigt werden.

Die Initillänge ℓ_0 ist eine wichtige Größe für die Berechnung der TCP-Position, da sie den unbekanntem Anfangsabstand zwischen Spiegel 2 und Messreflektor beim Rücksetzen des Interferometers beschreibt. Somit ist ℓ_0 ein Parameter, der in die Optimierung eingeht.

Die Systemparameter sind in Tabelle 8.4 zusammengefasst. Durch die Identifikation der Startparameter ergeben sich, wie bereits in der Literatur [90] vorgestellt, insgesamt dreizehn Parameter, die für die Berechnung der TCP-Position eines einzelnen Trackermoduls (vgl. Tabelle 8.1) verwendet werden.

Tabelle 8.4: Zu kalibrierende Systemparameter für ein Trackermodul

Parameterbeschreibung	Name
Ursprung des Laserstrahls	P_{0x}, P_{0y}
Richtung des Laserstrahls	α_L, β_L
Richtung der Drehachse von Spiegel 1	α_{v1}
Normalvektor von Spiegel 1	α_{n1}, β_{n1}
Abstand der Drehachse zur Spiegelebene 1	k_1
Abstand der Drehachsen	d
Abstand der Drehachse zur Spiegelebene 2	k_2
Normalvektor von Spiegel 2	α_{n2}, β_{n2}
Initillänge	ℓ_0

Zu den Systemparametern gehören vier Konstanten, die durch feste Werte vor der Optimierung gegeben sind. Diese sind in Tabelle 8.5 aufgeführt.

Tabelle 8.5: Konstanten für ein Trackermodul

Konstantenbeschreibung	Name	Werte
Ursprung des Lasers	P_{0z}	0 mm
Richtung der Drehachse von Spiegel 1	β_{v1}	$\pi/2$ rad
Richtung der Drehachse von Spiegel 2	α_{v2}, β_{v2}	$\pi/2$ rad

8.3 Simulative Untersuchung der Spannungs-Winkelkennlinie

Zur Kalibrierung der Systemparameter werden Winkelinformationen von beiden Scannern benötigt. Wie in Abschnitt 4.2.3 bereits erwähnt, wird der Winkel durch einen Winkelencoder am Scanner in Form von elektrischen Signalen gemessen, welche als analoge Spannungssignale am Ausgang der Treiberelektronik zur Verfügung stehen. Laut Datenblatt entspricht eine Stellspannung von $\pm 10\text{ V}$ einen mechanischen Winkel von $\pm 15^\circ$. Allerdings ist sie mit einer Nichtlinearität von $0,2\%$ angegeben. Unter der Nichtlinearität von einem Sensor ist zu verstehen, dass die tatsächliche Sensorkennlinie von einer Referenzgeraden im Mittel über den spezifischen Messbereich abweicht. Eine Vernachlässigung der Nichtlinearität würde für die verwendete Winkelkennlinie bedeuten, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Winkel φ und Stellwert u_S besteht, der mit einem Proportionalitätsfaktor k_φ wie folgt beschrieben ist:

$$\varphi(u_S) = k_\varphi \cdot u_S. \quad (8.45)$$

Aufgrund der Vernachlässigung der Nichtlinearität würde bei der Kalibrierung eine lineare Winkelkennlinie entstehen, die von der tatsächlichen Kennlinie verschieden ist. Dies führt zum einen zu einer nicht korrekten Schätzung der Systemparameter und zum anderen zu einer ungenauen Korrektur der interferometrischen Messabweichung (vgl. Abschnitt 7.1.3) sowie zur ungenauen Berechnung der Auftreffpunkte. Dadurch wird die Positionsgenauigkeit sowohl für ein einzelnes Trackermodul als auch für das Gesamtsystem stark verringert. Aus diesem Grund können die bereits ermittelten Faktoren (k_{φ_x} , k_{φ_y}) aus Abschnitt 6.1.1 nicht für die Kalibrierung verwendet werden.

Eine Analyse der Nichtlinearität ist somit essentiell, um die gestellte Anforderung nach der Genauigkeit zu erfüllen. Das Ziel ist daher, die tatsächliche Winkelkennlinie des Scanners im gesamten Arbeitsbereich abzubilden. Anhand der Untersuchungen werden Winkelmodelle aufgestellt, deren Parameter gemeinsam mit den Systemparametern kalibriert werden.

In Abbildung 8.8a ist eine simulierte Winkelkennlinie als Beispiel dargestellt, die mit einer Nichtlinearität von 2% zufällig generiert wurde. Hierbei veranschaulicht die Abszissenachse den Spannungsbereich und die Ordinatenachse stellt den entsprechenden Winkelbereich in Grad dar. Es ist zu erkennen, dass die Kennlinie quasi-linear ist. Eine Nichtlinearität ist in der Abbildung kaum zu sehen. Wird jedoch hingegen die Ableitung dieser Winkelkennlinie nach dem Stellwert betrachtet

(siehe Abbildung 8.8b, blau), so ist der nichtlineare Verlauf, der die Kalibrierung signifikant beeinflusst, deutlich zu erkennen. Dieser unterscheidet sich sehr stark von der linear approximierten Kennlinie (orange), welche bereits durch die Gleichung (8.45) mit dem Anstieg k_φ gezeigt wurde.

Es sei hier nochmals erwähnt, dass der Winkelencoder zwar die Rotation der Scannerspiegel als elektrisches Spannungssignal erfasst, jedoch existiert kein exakter Zusammenhang zwischen dem gemessenen Spannungssignal und dem eingestellten Winkel. Eine exakte Beschreibung der Nichtlinearität in der Ableitung der Winkelkennlinie nach Abbildung 8.8b ist somit in der Realität nicht gegeben. Eine direkte Messung der Winkelkennlinie durch ein Referenzwinkelmeßsystem ist nur bedingt möglich, da der Winkelencoder mit der Rotationsachse des Scanners durch eine mechanische Konstruktion fest verbunden ist. Des Weiteren können keine tatsächlichen Signale vom Encoder abgegriffen werden, da die Signale direkt mit der mitgelieferten Treiberelektronik verkabeln sind. Ein solcher Messaufbau ist somit sehr aufwendig und soll daher vermieden werden.

Wird die Winkelkennlinie infolgedessen als eine Systemantwort von einem unbekanntem Prozess betrachtet, so kann sie durch ein nichtlineares Winkelmodell abgebildet werden. Hierfür ist der Stellwert u_s die Eingangsgröße des Modells, welche als Messwerte direkt zur Verfügung steht. Die Ausgangsgröße φ wird durch die Parameter vom Winkelmodell in Abhängigkeit der Eingangsgröße berechnet. Im Folgenden

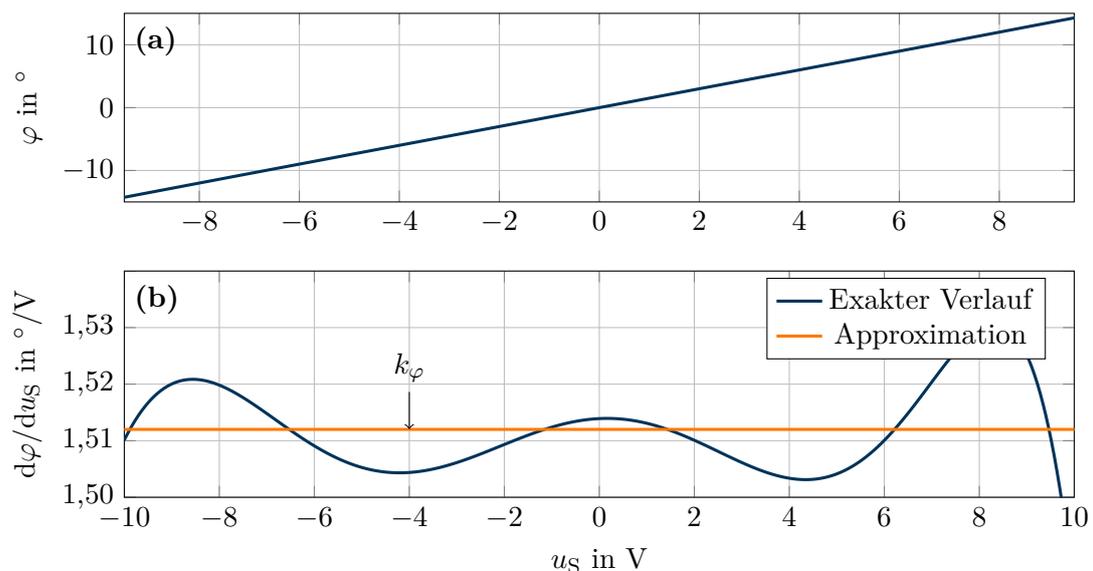


Abbildung 8.8: Die simulierte Winkelkennlinie mit einer Nichtlinearität vom 2%
 (a) Kennlinieverlauf; (b) Ableitung der Kennlinie nach dem Stellwert

werden zur Lösung der dargestellten Kennlinien-Problematik zwei Modellansätze vorgestellt, welche die Ableitung der Winkelkennlinie verwenden. Dabei wird die Winkelkennlinie zum einen durch eine Polynomfunktion und zum anderen durch mehrere konstante Anstiege approximiert.

8.3.1 Modellierung der Winkelkennlinie durch Polynomfunktion

Die nichtlineare Funktion in der Ableitung der Winkelkennlinie kann in Form einer Polynomfunktion wie folgt modelliert werden:

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi}{du_S} &= \sum_{i=0}^n k_{\varphi i} \cdot u_S^i \\ &= k_{\varphi 0} + k_{\varphi 1} \cdot u_S + \dots + k_{\varphi(n-1)} \cdot u_S^{n-1} + k_{\varphi n} \cdot u_S^n, \quad n \geq 0.\end{aligned}\tag{8.46}$$

Hierbei sind $k_{\varphi n}, k_{\varphi(n-1)}, \dots, k_{\varphi 1}, k_{\varphi 0}$ die Koeffizienten der Funktion und n stellt die Ordnung der Polynomfunktion dar. Die Winkelkennlinie kann durch das Integrieren der Polynomfunktion nach dem Stellwert u_S in Gleichung 8.46 ermittelt werden:

$$\begin{aligned}\varphi(u_S) &= \int \frac{d\varphi}{du_S} \cdot du_S \\ &= k_{\varphi 0} \cdot u_S + \frac{1}{2} \cdot k_{\varphi 1} \cdot u_S^2 + \dots + \frac{1}{n} \cdot k_{\varphi(n-1)} \cdot u_S^n + \frac{1}{n+1} \cdot k_{\varphi n} \cdot u_S^{n+1}.\end{aligned}\tag{8.47}$$

Der Einsatz der Winkelfunktion nach Gleichung (8.47) erfordert die Kenntnisse deren Koeffizienten. Diese können gemeinsam mit den Systemparametern durch das vorgestellte Distanzverfahren unter Verwendung eines 3-D-Referenzmesssystems identifiziert werden. Dabei stellt die Ordnung der Winkelfunktion die Anzahl der zu ermittelnden Parameter dar. Eine höhere Ordnung bedeutet somit gleich eine genauere Approximation der Kennlinie. Es muss jedoch bei der Kalibrierung beachtet werden, dass die Stellwerte im ganzen Stellbereich gleichmäßig verteilt sind.

8.3.2 Modellierung der Winkelkennlinie durch segmentweise konstante Gradienten

Im Unterschied zu der Polynomfunktion wird bei dieser Methode die Ableitung der Winkelkennlinie in Abhängigkeit des Stellbereichs ($u_{S\max} = \pm 10\text{ V}$) in mehrere Segmente mit konstantem Anstieg aufgeteilt. Jedem Segment der Kennlinie wird ein Proportionalitätsfaktor k_{φ} zugeordnet. Es sei dabei erwähnt, dass die modellierte Winkelkennlinie durch seinen Nullpunkt ($u_S = 0, \varphi = 0$) verläuft. Somit kann der

negative und positive Stellbereich unabhängig voneinander betrachtet werden. Der Zusammenhang zwischen dem Stellbereich und der Länge der Segmente u_{Seg} ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$u_{\text{Seg}} = \frac{u_{\text{Smax}}}{n_k}. \quad (8.48)$$

In Gleichung (8.48) stellt der Parameter n_k die Anzahl der verwendeten Proportionalitätsfaktoren und somit die Anzahl der Segmente für die approximierte Kennlinie dar. Mit $m_D = \lceil |u_S| \div u_{\text{Seg}} \rceil$ erfolgt eine ganzzahlige Division des Stellwerts durch der Segmentlänge. Dadurch kann der Winkel als Funktion des Stellwerts sowie der Proportionalitätsfaktoren $(k_{\varphi i}^+, k_{\varphi i}^-)$ wie folgt dargestellt werden:

$$\varphi(u_S) = \begin{cases} + \left(\sum_{i=1}^{m_D} k_{\varphi i}^+ \cdot u_{\text{Seg}} + k_{\varphi(m_D+1)}^+ \cdot (|u_S| - m_D \cdot u_{\text{Seg}}) \right) & \text{für } u_S > 0 \\ 0 & \text{für } u_S = 0 \\ - \left(\sum_{i=1}^{m_D} k_{\varphi i}^- \cdot u_{\text{Seg}} + k_{\varphi(m_D+1)}^- \cdot (|u_S| - m_D \cdot u_{\text{Seg}}) \right) & \text{für } u_S < 0. \end{cases} \quad (8.49)$$

In Abbildung 8.9 ist die Approximation der Ableitung der Winkelkennlinie nach Gleichung (8.49) dargestellt, welche in zehn gleiche Segmente und somit zehn Anstiege aufgeteilt wurde. Die zehn Anstiege stellen im idealen Fall den Mittelwert des exakten Verlaufes des jeweiligen Segments dar. Dadurch ergeben sich zwischen dem exakten Verlauf sowie der approximated Kennlinie immer noch Abweichungen, die aber im Vergleich zu der Approximation in Abbildung 8.8b deutlich geringer sind. Es ist auch zu erkennen, dass der Bereich eines aufgeteilten Segments mit steigender Anzahl der Segmente kleiner wird. Dies erhöht die Genauigkeit der Winkelkennlinie und wirkt sich signifikant auf die Kalibriergüte aus.

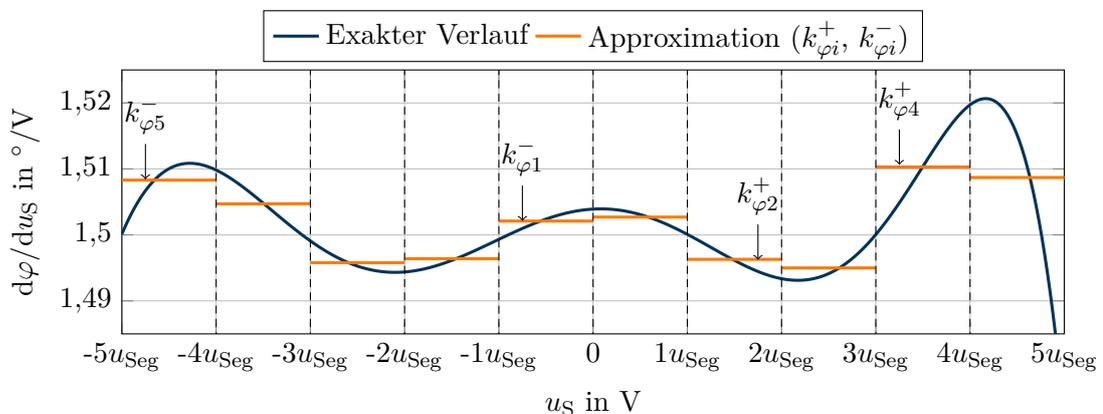


Abbildung 8.9: Approximation der Ableitung der Winkelkennlinie durch mehrere Proportionalitätsfaktoren

8.3.3 Simulation und Bewertung der vorgestellten Winkelmodelle

Um die Leistungsfähigkeit der Winkelmodelle hinsichtlich der Kalibriergüte bei der Identifikation der Systemparameter zu bewerten, wird ein Kalibriervorgang der Systemparameter mit dem jeweiligen vorgestellten Winkelmodell nach dem Distanzverfahren simuliert. Hierbei sollen die 13 Systemparameter gemeinsam mit den Winkelparametern durch einen Optimierungsalgorithmus in Matlab/Simulink identifiziert werden, wobei jedes der beiden Winkelmodelle mit zehn Parametern approximiert wird. Somit ergeben sich für die Optimierung insgesamt 33 ($13 + 2 \cdot 10$) Parameter. Im Folgenden werden die einzelnen Simulationsschritte erläutert.

Aufbereitung der Messwerte für die Optimierung

Für jeden Scanner wird eine exakte Winkelkennlinie auf Basis dessen Ableitung als Polynom höherer Ordnung approximiert. Die Ableitungen sind in Abbildung 8.10 (blau) dargestellt. Damit die Eingangsgrößen für die Kalibrierung berechnet werden können, sind TCP-Messpunkte im Raum zu erstellen. Hierfür werden insgesamt 144 Messpunkte in einem Abstand von 100 mm zum Trackermodul simuliert, welche in Form eines um die z_T -Achse gedrehten Quaders im Raum liegen (siehe Abbildung 8.11). In [87] wurde bereits gezeigt, dass die Verteilung der Messpunkte in Form einer Quaderstruktur sehr gute Ergebnisse für die Kalibrierung erzielt. Ein Quader eignet sich als Referenzgeometrie, da der Einfluss in allen Dimensionsrichtungen der einzelnen Parameter erfasst werden können. Die Auswahl der Anzahl der Messpunkte

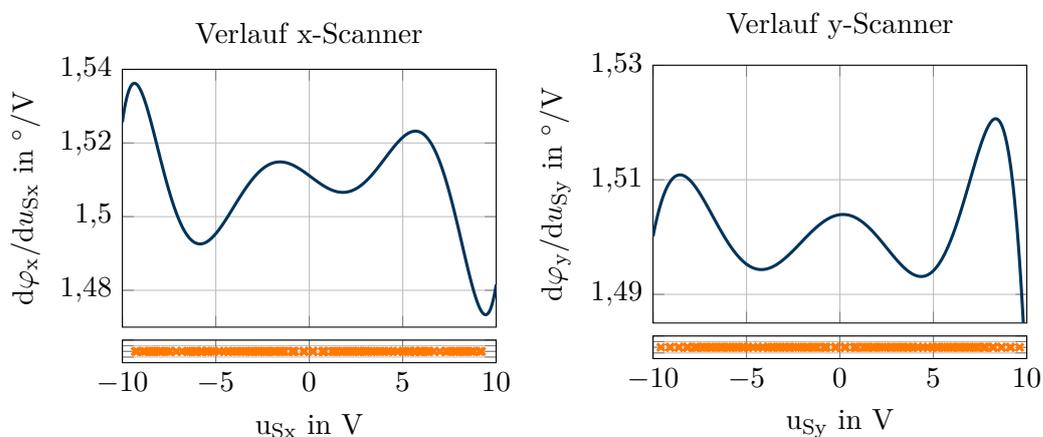


Abbildung 8.10: Die simulierte Ableitung der Winkelkennlinie (blau) sowie die daraus berechneten Stellwerte (orange) für die Kalibrierung

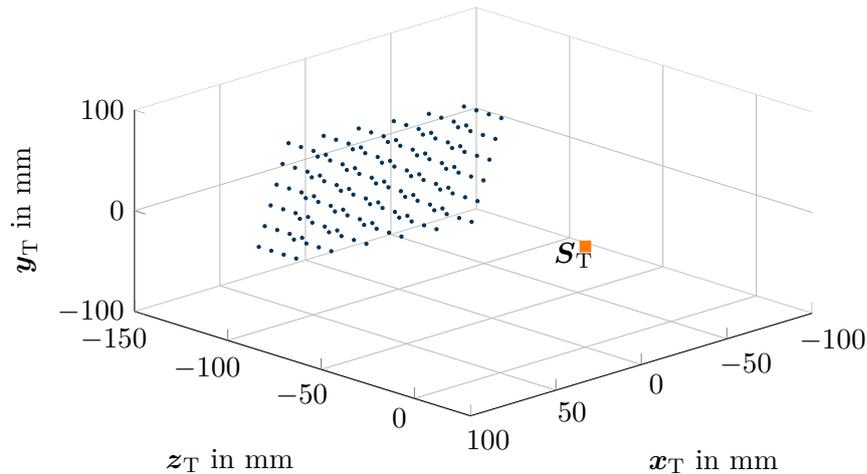


Abbildung 8.11: Simulierte Messpunkte im Raum, $n_M = 144$

sowie des Abstands zwischen dem Quader und dem Trackermodul resultiert aus [90]. Mit den generierten Messpunkten sowie den exakten Winkelkennlinien werden die benötigten Stellwerte der Scanner sowie die korrigierte Messlänge des Interferometers an jedem Messpunkt berechnet. Dabei wird das in Abschnitt 7.1 hergeleitete Modell mit einem vorgegebenen Parametersatz herangezogen. Die eingestellten Stellwerte der Scanner, welche bei dieser Kalibrierung verwendet werden, sind in Abbildung 8.10 (orange) dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind die Stellwerte durch den entworfenen Quader im gesamten Stellbereich verteilt. Dies ist bei der Kalibrierung notwendig, da zum einen der Gesamtbereich der Winkelkennlinie approximiert wird und zum anderen die Genauigkeit der zu identifizierenden Systemparameter dadurch erhöht wird.

Generierung der Startparameter

Für die Optimierung sind 33 Startwerte zu erzeugen, welche von den als wahr angenommenen Parametern abweichen sollen. Die Startwerte der Systemparameter werden in einem Bereich von $e_A = \pm 1\%$ um die wahren Systemparameter zufällig erzeugt.

Bei der Approximation der Winkelkennlinie durch eine Polynomfunktion wird der Startwert des Koeffizienten $k_{\varphi 0}$ auf den vom Hersteller angegebenen Mittelwert ($1,5^\circ/\text{V}$) gesetzt. Alle andere Startwerte der Koeffizienten sind gleich Null zu setzen.

Alle Startwerte der Winkelparameter bei der Approximation der Winkelkennlinie durch segmentweise konstante Gradienten werden ebenfalls auf die Herstellerangabe festgelegt.

Optimierung der Parameter

Die Optimierung der Parameter erfolgt in Matlab® [55]. Hierbei wird die Global Optimization Toolbox [54] zur Schätzung der Parameter verwendet. Die Lösung der aufgestellten Gütefunktion aus Gleichung (8.5) erfolgt durch einen nicht-linearen Optimierer mit Beschränkungen, der auf dem Gradientenverfahren beruht. Hierzu wird der lokale Optimierer `lsqnonlin` zur Lösung der nicht linearen Gütefunktion eingesetzt. Die Lösung erfolgt, ausgehend von einem Startparametervektor, iterativ. Die Beschränkungen der Parameter können in Form von Vektoren für Unter- und Obergrenzen angegeben werden. Zusätzlich steht eine Reihe von Funktionen bereit, die das Verhalten des Optimierers beeinflussen. Der Aufruf der Funktionen erfolgt mittels des Befehls `optimset`. Im Folgenden werden die wichtigsten Funktionen aufgelistet:

- **Algorithm:** `gauss-newton`
- **TolFun:** Abbruchkriterium für die Gütefunktion
- **TolX:** Abbruchkriterium für Parametervektor
- **MaxIter:** Maximale Anzahl an Iterationen
- **Jacobian:** Bereitstellung eines vom Nutzer erstellten Gradienten, kann der Gradient analytisch abgeleitet werden, so ist dieser einer numerischen Differenzierung vorzuziehen.

Da für jeden Startparametervektor eine Lösung der Parameter existiert, kann nicht davon ausgegangen werden, dass diese der globalen Lösung entspricht. Daher wird der globale Optimierer `Multistart` mit dem lokalen Solver `lsqnonlin` kombiniert. Der globale Optimierer erzeugt zufällig innerhalb der vorgegebenen Beschränkungen mehrere verschiedene Startparametervektoren, welche durch den lokalen Optimierer nacheinander zur Schätzung der Parameter verwendet werden. Die daraus ermittelten Lösungen werden hinsichtlich der Güte miteinander verglichen. Die Lösung mit dem kleinsten Gütewert wird als die globale Lösung betrachtet.

Nach Gleichungen (8.1) und (8.2) werden aus den 144 generierten Messpunkten 10296 Distanzwerte berechnet, welche als Referenz-Distanzmaße bei der Optimierung verwendet werden. Während der Optimierung variiert der Optimierer die 33 Parameter so lange, bis die Summe der quadratischen Distanzfehler zwischen den aus den generierten Messpunkten sowie den vom Trackermodul berechneten Distanzwerten über allen der 10296 Bedingungen minimal wird. Dieser Sachverhalt kann durch die Kalibriergüte Q_D sowie das Residuum der Distanzfehler R_D wie nach Gleichung (8.5)

aufgestellt werden:

$$Q_D = \sum_{i=1}^{n_B} (R_{Di})^2. \quad (8.50)$$

Abbildung 8.12 stellt das Residuum R_D über die 10296 Bedingungen nach zehn Optimierungen mit den verschiedenen Startwerten dar. Hierbei werden die Residuen den jeweils verwendeten Winkelmodellen gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass der Distanzfehler unter der Verwendung der Polynomfunktion im Vergleich zu der stückweisen linearen Approximation $(k_{\varphi_i}^+, k_{\varphi_i}^-)$ deutlich größer ist. Der Mittelwert des Residuums \bar{R}_D sowie dessen zweifache Standardabweichung σ_D werden zum Vergleich herangezogen, wobei diese wie folgt berechnet werden:

$$\bar{R}_D = \frac{1}{n_B} \sum_{i=1}^{n_B} R_{Di} \quad (8.51)$$

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{1}{n_B - 1} \sum_{i=1}^{n_B} (R_{Di} - \bar{R}_D)^2}. \quad (8.52)$$

Der Distanzfehler liegt bei der Polynomfunktion 10.-Ordnung über alle Bedingungen bei $0,4 \mu\text{m} \pm 70,0 \mu\text{m}$, hingegen liegt dieser bei der stückweise linearen Approximation $(k_{\varphi_i}^+, k_{\varphi_i}^-)$ bei $0,1 \mu\text{m} \pm 37,2 \mu\text{m}$. Der Grund, weshalb die Kalibrierung der 33 Parameter durch die Approximation $(k_{\varphi_i}^+, k_{\varphi_i}^-)$ zum besseren Ergebnis führt, wird in Abbildung 8.13 durch die Darstellung der Ableitung der Winkelkennlinie zwischen dem exakten und dem kalibrierten Verlauf verdeutlicht. Es ist zu erkennen, dass die kalibrierten Stützstellen bei der stückweisen Approximation $(k_{\varphi_i}^+, k_{\varphi_i}^-)$ immer im Bereich des exakten Verlaufs liegen. Hingegen kann die kalibrierte Kennlinie der Polynomfunktion den

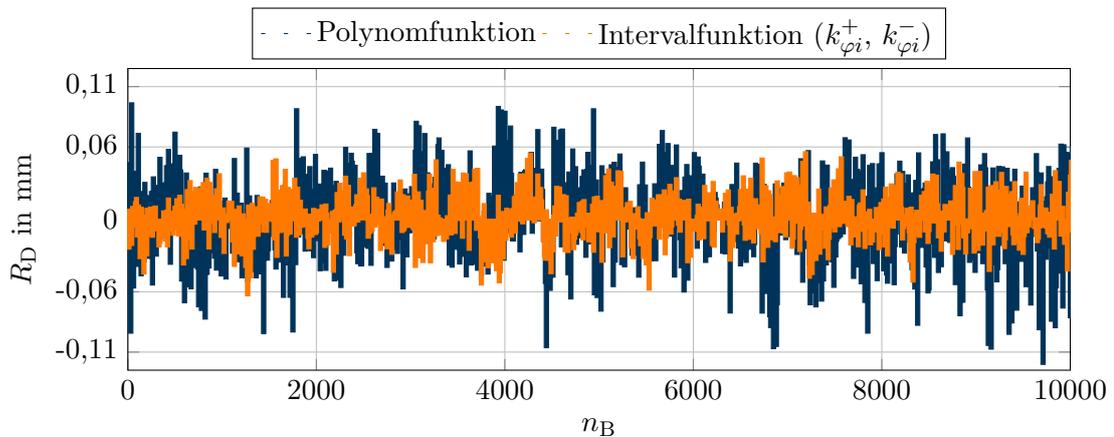


Abbildung 8.12: Distanzfehler zwischen den generierten Messpunkten sowie den vom Trackermodul berechneten Messpunkten nach der Optimierung über $n_B = 10296$ Bedingungen

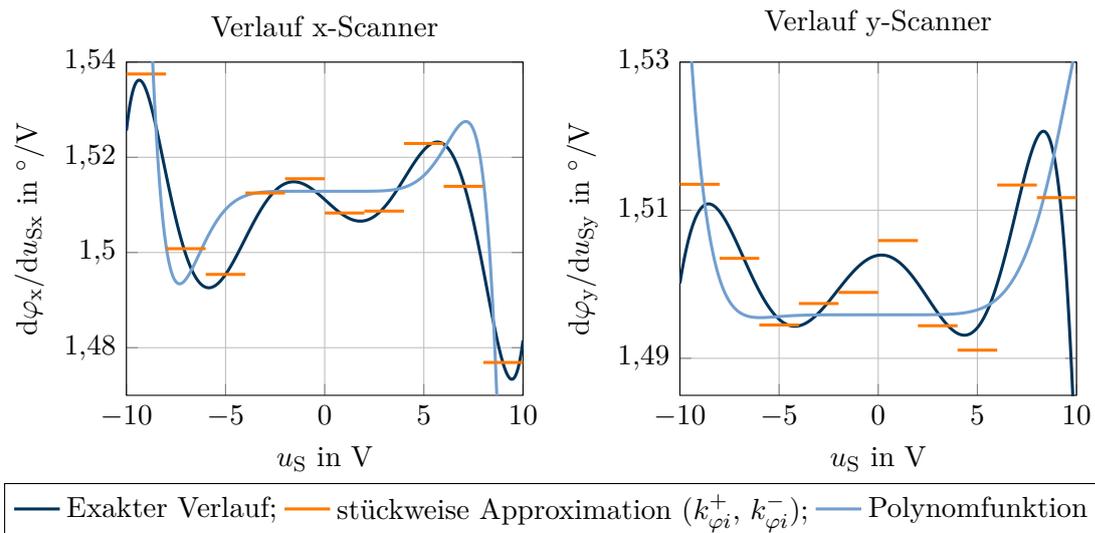


Abbildung 8.13: Vergleich der Ableitungen der Winkelkennlinie nach der Kalibrierung

exakten Verlauf nicht abbilden. Besonders an den Randbereich der Stellwerte weicht sie stark vom exakten Verlauf ab. Demnach ist die Modellierung der Winkelkennlinie durch segmentweise konstante Gradienten gegenüber der Polynomfunktion bei der Kalibrierung der Systemparameter vorzuziehen.

8.4 Simulative Untersuchung der Längenkorrektur

Wie bereits in Abschnitt 7.1.3 erläutert, soll die zusätzliche Längenmessung des Interferometers im Strahlengang durch den hergeleiteten Korrekturterm nach Gleichung (7.16) kompensiert werden. Dies erfordert sowohl Kenntnisse über die kalibrierten Systemparameter als auch über die Parameter des Winkelmodells. Die interferometrische Messabweichung hat besonders bei der Multilateration einen starken Einfluss auf die Genauigkeit der 3-D-Position und soll daher weitgehend eliminiert werden. Hierbei stellt sich die Frage, wie gut und wie genau der auf Basis der kalibrierten Parameter berechnete Korrekturterm gegenüber der „wahren“ interferometrischen Messabweichung ist. Es soll hierzu wieder die aus Abschnitt 8.3.3 erstellte Simulationsumgebung verwendet werden. In Abbildung 8.14 sind die generierten Längenmessungen des Interferometers e_L im Strahlablesystem über alle 144 Messpunkte dargestellt, welche im Folgenden in Abhängigkeit des zuvor im Abschnitt 8.3.2 vorgestellten Winkelmodells sowie der Anzahl der vorgegebenen Messpunkte bei der Kalibrierung der Systemparameter untersucht werden.

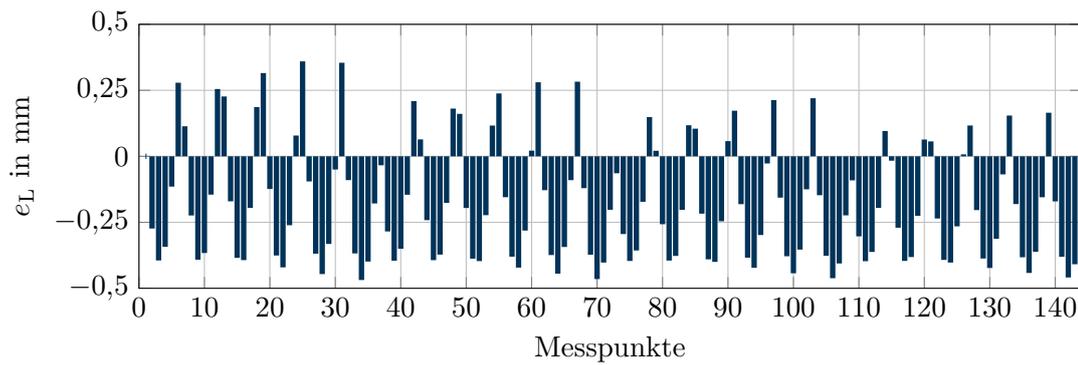


Abbildung 8.14: Die simulierte fehlerbehaftete Längenmessung des Interferometers über alle Messpunkte

8.4.1 Längenkorrektur in Abhängigkeit des Winkelmodells

Das Winkelmodell ist dadurch gekennzeichnet, dass die Ableitung der Winkelkennlinie durch mehrere Stützstellen im gesamten Stellbereich approximiert wird. Dabei gilt, dass je mehr Stützstellen verwendet werden, desto genauer ist die Approximation der Kennlinie. Dies führt bei der Kalibrierung zu einer Erhöhung der Schätzgenauigkeit der Systemparameter und somit zur Reduzierung des Gütewertes. Dadurch kann sich die Genauigkeit der Längenkorrektur signifikant verbessern. Es soll daher die Längenkorrektur in Abhängigkeit von der Anzahl der im Winkelmodell eingesetzten Stützstellen n_k untersucht werden. Bei dieser Untersuchung wird eine Restabweichung e_R definiert, welcher die Differenz zwischen dem berechneten Korrekturwert e_K nach der Kalibrierung sowie der wahren interferometrischen Messabweichung e_L beschreibt. Im Idealfall soll die Restabweichung über allen Messpunkten Null sein. Tabelle 8.6 stellt den Gütewert Q sowie die Restabweichung e_R in Abhängigkeit von der Anzahl der Stützstellen n_k für jedes Winkelmodell nach zehn Kalibrierdurchläufen dar.

Tabelle 8.6: Gütewert Q , Residuum R_D und Restabweichung der Längenkorrektur e_R in Abhängigkeit der Anzahl der Stützstellen n_k nach der Kalibrierung über 10296 Distanzbedingungen, Abweichung der Startwerte $e_A = \pm 1\%$

n_k	Q in mm^2	R_D in mm	e_R in mm
1	44,815	$-2,196 \cdot 10^{-4} \pm 0,132$	$-0,136 \pm 0,222$
2	24,950	$-2,505 \cdot 10^{-4} \pm 0,098$	$-0,049 \pm 0,066$
4	18,451	$-1,476 \cdot 10^{-5} \pm 0,085$	$-0,028 \pm 0,069$
10	0,557	$1,587 \cdot 10^{-5} \pm 0,015$	$-0,007 \pm 0,015$
20	0,030	$1,022 \cdot 10^{-6} \pm 0,003$	$-0,0002 \pm 0,002$

Es ist zu sehen, dass sowohl der Gütewert als auch die Restabweichung mit steigender Anzahl der Stützstellen deutlich sinkt. Werden die Systemparameter ausschließlich mit einem linearen Winkelmodell ($n_k = 1$) kalibriert, so verbleibt eine Restabweichung bei der Längenkorrektur von rund $-136 \mu\text{m} \pm 222 \mu\text{m}$. Im Vergleich dazu, wenn die Systemparameter gemeinsam mit einem Winkelmodell kalibriert werden, welches 20 Stützstellen hat, so liegt dieser bei rund $0,2 \mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$. Dies zeigt somit deutlich, dass die Modellierung der Winkelkennlinie die Kalibrierung der Systemparameter sowie die Längenkorrektur ausschlaggebend beeinflusst.

Im Weiteren soll der Einfluss der Längenkorrektur auf die Abweichungen zwischen Startparameter und vorgegebenen Systemparameter untersucht werden. Hierbei werden die Abweichungen der Startwerte zu den vorgegebenen Systemparametern um das 10-Fache erhöht. Tabelle 8.7 zeigt das Ergebnis nach zehn Optimierungen. Es ergibt sich zu den Kalibrierergebnissen aus Tabelle 8.6 hinsichtlich des Gütewertes sowie des Residuums des Distanzfehlers im Wesentlichen kein großer Unterschied. Wird hingegen die Längenkorrektur betrachtet, so liegt die Restabweichung für $n_k = 20$ bei rund $-9 \mu\text{m} \pm 18 \mu\text{m}$. Dabei weichen insbesondere die nach der Kalibrierung geschätzten Systemparameter von den vorgegebenen sehr stark ab. Im Gegensatz zu den Systemparametern konnten die Parameter des Winkelmodells sehr gut geschätzt werden. Diese zeigen im Wesentlichen keinen Unterschied zu den vorgegebenen Winkelstützstellen.

Die Untersuchung zeigt damit deutlich, dass der Optimierer auch bei stark abweichenden Startwerten der Systemparameter einen nicht korrekten Parametersatz finden kann, welcher jedoch eine sehr geringe Güte hat. Es gibt also mehrere Kombinationen der Parameter, welche zu einer geringeren Kalibriergüte führen und somit die aufgestellte Zielfunktion erfüllen. Jedoch lässt sich von einer geringen Kalibriergüte nicht

Tabelle 8.7: Gütewert Q , Residuum R_D und Restabweichung der Längenkorrektur e_R in Abhängigkeit von der Anzahl der Stützstellen n_k nach der Kalibrierung über 10296 Distanzbedingungen, Abweichung der Startwerte $e_A = \pm 10\%$

n_k	Q in mm^2	R_D in mm	e_R in mm
1	44,001	$-2,596 \cdot 10^{-4} \pm 0,130$	$-0,114 \pm 0,224$
2	24,884	$-2,798 \cdot 10^{-5} \pm 0,098$	$0,002 \pm 0,095$
4	18,360	$2,006 \cdot 10^{-5} \pm 0,084$	$-0,041 \pm 0,067$
10	0,558	$1,598 \cdot 10^{-5} \pm 0,015$	$0,038 \pm 0,082$
20	0,030	$1,333 \cdot 10^{-8} \pm 0,003$	$-0,009 \pm 0,018$

auf die Korrektheit der Längenkorrektur schließen. Es soll daher bei der Kalibrierung des einzelnen Trackermoduls beachtet werden, dass die Startwerte gut gewählt sind, damit die Längenkorrektur vollständig berechnet werden kann.

Bei dieser Untersuchung kann festgestellt werden, dass der verwendete Optimierer für die Kalibrierung der Systemparameter geeignet ist, wenn die Startwerte der Parameter nicht stark von den gesuchten Parametern abweichen. Sollen die geschätzten Systemparameter in die Berechnung der Multilateration eingehen, so ist eine erneute Kalibrierung aller Systemparameter notwendig, wobei die aus der Kalibrierung eines einzelnen Trackermoduls geschätzten Parameter als Startwerte verwendet werden sollen. Darüber hinaus ist ein Winkelmodell mit mindestens 20 Stützstellen zu verwenden, damit die Schätzgenauigkeit der Systemparameter erhöht wird.

8.4.2 Längenkorrektur in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte

Im vorherigen Abschnitt wurde die Längenkorrektur in Abhängigkeit der Anzahl der Stützstellen des Winkelmodells bei konstanter Anzahl von Messpunkten untersucht. Die Anzahl der Messpunkte n_M ist ein Maß für die Schätzgenauigkeit der Systemparameter sowie der Parameter des Winkelmodells. Werden zu wenig Messpunkte bei der Kalibrierung verwendet, so kann es passieren, dass die Winkelkennlinie nicht gut genug approximiert wird. Dies wirkt sich wiederum auf die Genauigkeit der Systemparameter aus und führt somit zu einer Verschlechterung der Längenkorrektur.

Es soll daher untersucht und festgestellt werden, wie viele Messpunkte bei der Kalibrierung notwendig sind, damit die Restabweichung zwischen dem durch die kalibrierten Parameter berechneten Korrekturwert sowie dem tatsächlichen interferometrischen Messfehler minimal wird. Hierzu sollen die in Abhängigkeit der Anzahl der Messpunkte kalibrierten Parameter nach der Optimierung durch 100 Referenzpositionen hinsichtlich der Güte sowie der Längenkorrektur validiert werden. Es sei dabei erwähnt, dass die 100 Referenzpositionen, auch wie bei den zur Kalibrierung verwendeten Messpunkten, in Form eines um die z_T -Achse gedrehten Quaders im Raum liegen und die Stellwerte der Scanner im gesamten Stellbereich verteilt sind. Somit ist davon auszugehen, dass die Umgebungsbedingungen bei der Validierung der Parameter ähnlich denen bei der Kalibrierung sind.

Tabelle 8.8 präsentiert die aus der Validierung resultierenden Simulationsergebnisse an 100 Referenzpositionen in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte n_M . Es ist zu erkennen, dass der Gütewert über alle 100 Referenzpositionen bei steigender

Tabelle 8.8: Simulationsergebnisse mit den kalibrierten Parametern in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte an 100 Referenzpositionen im Raum, Abweichung der Startwerte $e_A = \pm 1\%$

n_M	Q in mm^2	R_D in mm	e_R in mm
27	2,813	$-0,005 \pm 0,047$	$0,003 \pm 0,009$
64	0,267	$0,006 \pm 0,007$	$0,002 \pm 0,007$
125	0,037	$-0,002 \pm 0,004$	$-0,002 \pm 0,002$
216	0,030	$-0,001 \pm 0,004$	$2,775 \cdot 10^{-5} \pm 0,0007$

Anzahl der Messpunkte n_M signifikant sinkt. Somit hat also die Anzahl der zur Kalibrierung verwendeten Messpunkte einen großen Einfluss auf die Güte. Werden die Restabweichungen bei der Längenkorrektur betrachtet, so sinkt diese in Abhängigkeit der verwendeten Messpunkte. Bei $n_M = 27$ beträgt die Restabweichung rund $3\ \mu\text{m} \pm 9\ \mu\text{m}$. Bei einer Erhöhung der Messpunkte nimmt die Restabweichung deutlich ab. Dieser Wert liegt bei $n_M = 216$ deutlich unter $\pm 1\ \mu\text{m}$.

8.5 Erweiterung des Punkt-Distanzverfahrens

Das in Abschnitt 7.2 vorgestellte Messverfahren der Triangulation zur Berechnung der TCP-Position mittels zweier Trackermodule benötigt die Kenntnisse über deren Transformationsparameter, welche durch das in Abschnitt 8.1.1 vorgestellte Punkt-Distanzverfahren identifiziert werden sollen. Dabei werden die vom Trackermodul berechnete TCP-Positionen an jedem Messpunkt in einem gemeinsamen Koordinatensystem miteinander verglichen. Hierfür kann das Koordinatensystem von Trackermodul T_1 als globales Koordinatensystem definiert werden. Somit ergeben sich für die verbleibenden drei Trackermodule insgesamt 18 Transformationsparameter, die durch den in Abschnitt 8.3.3 vorgestellten nichtlinearen Optimierer in Bezug auf das Koordinatensystem von T_1 identifiziert werden sollen. Zusätzlich dazu, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde, sollen die 48 Systemparameter erneut mit in die Kalibrierung eingehen. Hierfür wird die Gütefunktion aus Gleichung (8.7) herangezogen, wobei diese aufgrund des im Trackermodul eingesetzten Interferometers modifiziert werden muss. Durch das Interferometer steht ein Längenmesswert zu jedem Messpunkt zur Verfügung, der nun mit in die Schätzung der Transformations- sowie der Systemparameter eingehen soll. Unter Verwendung der Gleichung 7.29 wird für jedes Trackermodul die Absolutlänge zwischen dem Auftreffpunkt auf Spiegel 2 und dem Messreflektor in Abhängigkeit von der interferometrischen Längenmessung

berechnet. Die Initiallängen $\mathbf{l}_0 = [T_1 \ell_0, T_2 \ell_0, T_3 \ell_0, T_4 \ell_0]^T$ werden wiederum durch die Gleichung (7.27) nur einmal berechnet, und zwar an dem Punkt, wo das Interferometer des jeweiligen Trackermoduls seinen Längenmesswert zurücksetzt ($\Delta \ell_i = 0$).

Da die Initiallängen aus der Kombination zweier Trackermodule mit der Messmethode der Triangulation ermittelt werden, ergeben sich für jedes Trackermodul drei berechnete Initiallängen, die im Idealfall identisch sein müssen. Diese Längen weichen aber aufgrund der ungenauen Winkelmessungen voneinander ab und sollen daher gemittelt werden. Somit ergibt sich

$$T_1 \ell_0 = \frac{T_1 T_2 \ell_0 + T_1 T_3 \ell_0 + T_1 T_4 \ell_0}{3} \quad (8.53)$$

$$T_2 \ell_0 = \frac{T_2 T_1 \ell_0 + T_2 T_3 \ell_0 + T_2 T_4 \ell_0}{3} \quad (8.54)$$

$$T_3 \ell_0 = \frac{T_3 T_1 \ell_0 + T_3 T_2 \ell_0 + T_3 T_4 \ell_0}{3} \quad (8.55)$$

$$T_4 \ell_0 = \frac{T_4 T_1 \ell_0 + T_4 T_2 \ell_0 + T_4 T_3 \ell_0}{3}. \quad (8.56)$$

Für die Optimierung wird ein weiteres Kriterium zu denen aus Gleichung (8.7) eingeführt, um den Unterschied der drei berechneten Initiallängen für jedes Trackermodul zu minimieren. Demnach kann das neue Kriterium wie folgt definiert werden:

$$\begin{aligned} Q_3 = & ((T_1 T_2 \ell_0 - T_1 T_3 \ell_0) + (T_1 T_2 \ell_0 - T_1 T_4 \ell_0) + (T_1 T_3 \ell_0 - T_1 T_4 \ell_0))^2 \\ & + ((T_2 T_1 \ell_0 - T_2 T_3 \ell_0) + (T_2 T_1 \ell_0 - T_2 T_4 \ell_0) + (T_2 T_3 \ell_0 - T_2 T_4 \ell_0))^2 \\ & + ((T_3 T_1 \ell_0 - T_3 T_2 \ell_0) + (T_3 T_1 \ell_0 - T_3 T_4 \ell_0) + (T_3 T_2 \ell_0 - T_3 T_4 \ell_0))^2 \\ & + ((T_4 T_1 \ell_0 - T_4 T_2 \ell_0) + (T_4 T_1 \ell_0 - T_4 T_3 \ell_0) + (T_4 T_2 \ell_0 - T_4 T_3 \ell_0))^2. \end{aligned} \quad (8.57)$$

Somit ändert sich das Gütekriterium nach Gleichung (8.7) wie folgt:

$$\begin{aligned} Q = & \sum_{j=1}^{n_M} \left((\|\mathbf{c}_{T_1 T_2 j}\|)^2 + (\|\mathbf{c}_{T_1 T_3 j}\|)^2 + (\|\mathbf{c}_{T_1 T_4 j}\|)^2 \right) \\ & + \sum_{j=1}^{n_M} \left((\|\mathbf{c}_{T_2 T_3 j}\|)^2 + (\|\mathbf{c}_{T_2 T_4 j}\|)^2 + (\|\mathbf{c}_{T_3 T_4 j}\|)^2 \right) \\ & + (\|\mathbf{P}_{TCP} - \mathbf{P}'_{TCP}\| - d_{Ref})^2 + Q_3. \end{aligned} \quad (8.58)$$

In Tabelle 8.9 sind die zu schätzenden Transformations- und die Systemparameter dargestellt. Durch die oben gezeigten Berechnung müssen die Initiallängen nicht geschätzt werden. Das modifizierte Punkt-Distanzverfahren soll ausschließlich für die Messmethode der Triangulation verwendet werden. Auf eine Untersuchung hinsichtlich

Tabelle 8.9: Die zu kalibrierenden Transformations- und Systemparameter

Parameterbeschreibung	Name	n_P
Systemparameter	$\mathbf{p}_{T_1}, \mathbf{p}_{T_2}, \mathbf{p}_{T_3}, \mathbf{p}_{T_4}$	48
Standortparameter	$\mathbf{s}_{T_2}^1 \mathbf{l}, \mathbf{s}_{T_3}^1 \mathbf{l}, \mathbf{s}_{T_4}^1 \mathbf{l}$	9
Orientierungsparameter	$\mathbf{s}_2^1 \mathbf{O}, \mathbf{s}_3^1 \mathbf{O}, \mathbf{s}_4^1 \mathbf{O}$	9

der Kalibrierung soll hier verzichtet werden, da im Folgenden die Selbst-Kalibrierung analysiert wird. Aus den Ergebnissen der Selbst-Kalibrierung können Rückschlüsse auf die Kalibrierung mit dem Punkt-Distanzverfahren gezogen werden.

8.6 Simulative Untersuchung des Selbst-Kalibrierverfahrens

Im Folgenden wird die Kalibrierung für das MLTS untersucht. Es werden zunächst die Standorte der Trackermodule im Raum festgelegt, wobei das globale \mathbf{S}_G -System im Ursprung des lokalen \mathbf{S}_1 -Systems liegt. Da das Messvolumen jedes Trackermoduls durch seinen maximalen Drehwinkel begrenzt ist, muss dies bei der Wahl der Standorte beachtet werden. Wie in Abschnitt 7.6.2 gezeigt wurde, ergibt sich das Messvolumen des MLTS aus den überlagerten Messvolumina der einzelnen Trackermodule. Somit sollen die Trackermodule sehr nah beieinander liegen, damit der überlagerte Arbeitsbereich möglichst groß bleibt.

In Tabelle 8.10 sind die Standorte der Trackermodule für die Simulation angegeben. Dabei beträgt der Messabstand zwischen der Messfläche und dem Trackermodul T_4 entlang der z_G -Achse 1000 mm. Die verbleibenden Trackermodule haben einen Abstand von rund 1050 mm zur Messfläche entlang der z_G -Achse. Bei dieser Standort-Konfiguration erreicht das MLTS eine Messfläche von rund $1,03 \text{ m}^2$ ($1130 \times 910 \text{ mm}^2$), welche als überlagerte Messfläche in Abbildung 8.15 zu sehen ist. Die in der Tabelle vorgegebenen Standortparameter sollen in der Simulation identifiziert werden. Das dabei aufgespannte Koordinatensystem wird durch die Standorte der Trackermodule definiert. Im Unterschied zu der Herleitung in Abschnitt 7.3 bildet der Ursprung des \mathbf{S}_1 - und \mathbf{S}_2 -Systems die \mathbf{y}_G -Achse. Durch die Standorte der drei Trackermodule (T_1, T_2, T_3) wird die \mathbf{x}_G - \mathbf{y}_G -Ebene aufgespannt und mit dem Standort des vierten Trackermoduls wird das Koordinatensystem \mathbf{S}_G eindeutig definiert. Es sei

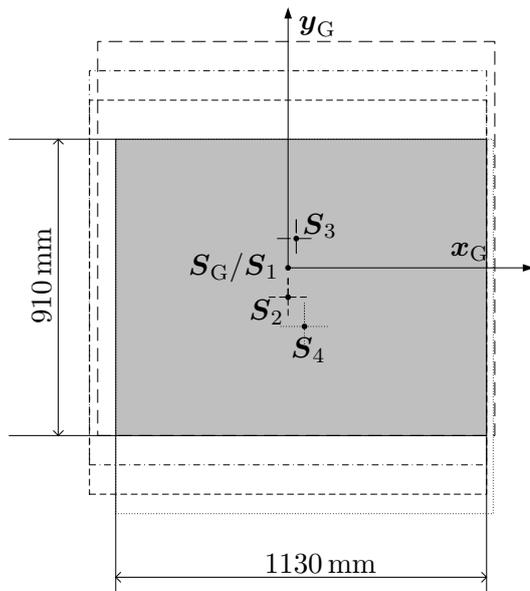


Tabelle 8.10: Die Standorte der Trackermodule im MLTS-Koordinatensystem

Standorte	x/mm	y/mm	z/mm
l_1	0	0	0
l_2	0	-90	0
l_3	25	90	0
l_4	50	-180	50

Abbildung 8.15: Die überlagerte Messfläche des MLTS in Abstand von 1000 mm in negativer z_G -Richtung

dabei erwähnt, dass sich der Messreflektor in negativer z_G -Richtung befindet. Um die Funktionsfähigkeit des Kalibrieralgorithmus für das MLTS zu demonstrieren, sollen zunächst die Standortparameter sowie die Initiallängen unter idealen Bedingungen identifiziert werden. Anschließend sollen alle Parameter in Abhängigkeit der Längenkorrektur bzw. der Systemparameter untersucht werden.

8.6.1 Selbst-Kalibrierung unter idealen Bedingungen

Unter idealen Bedingungen ist zu verstehen, dass die zusätzliche Wegstrecke im Strahlableitensystem für jedes Trackermodul vollständig berechnet werden kann und die Auftreffpunkte in dem jeweiligen lokalen Koordinatensystem bekannt sind. Darüber hinaus sind Orientierungsparameter und Winkelkennlinie gegeben, welche die Transformation der Auftreffpunkte zwischen den lokalen S_i -Systemen und dem globalen S_G -System ermöglicht. Die simulierten gemessenen Längen der Interferometer sind fehlerfrei.

Es sollen die sechs Standortparameter p_S sowie die drei Initiallängen $[_{T_1}l_0, _{T_2}l_0, _{T_3}l_0]^T$ der Trackermodule in einem Abstand von 1050 mm zum S_G -System kalibriert werden. Hierbei wird die aufgestellte Gütefunktion (siehe Gleichung (8.16)) zur Schätzung der Standortparameter sowie der Initiallängen verwendet. Aus den gemessenen Längen der Interferometer von den Trackermodulen (T_1, T_2, T_3) werden die TCP-Position zu

jedem Messpunkt im Raum mit dem modifizierten Messverfahren der Trilateration berechnet (siehe Gleichungen (7.45), (7.46), (7.47)). Daraufgehend wird die TCP-Position in Gleichung (7.47) eingesetzt, um das Residuum

$$\begin{aligned} {}_{T_4}R &= (x_{TCP} - {}_{T_4}S_G P_{2x})^2 + (y_{TCP} - {}_{T_4}S_G P_{2y})^2 + (z_{TCP} - {}_{T_4}S_G P_{2z})^2 - \ell_4^2 \\ \ell_4 &= {}_{T_4}\ell_0 + \Delta\ell_4 - {}_{T_4}e_K \end{aligned} \quad (8.59)$$

für das vierte Trackermodul zu bilden. Aus dem Residuum des einzelnen Messpunktes wird wiederum die gesamte Gütefunktion

$${}_{T_4}Q = \sum_{j=1}^{n_M} ({}_{T_4}R_j)^2 \quad (8.60)$$

berechnet. Für die Simulation der Kalibrierung werden TCP-Positionen im Raum generiert, die sich in Form eines Quaders befinden. Dabei beträgt das Messvolumen des Quaders $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$. Dieses Messvolumen entspricht dem Verfahrbereich des verwendeten 3-D-Messgeräts, welches später bei der experimentellen Validierung zur Messwertaufnahme eingesetzt wird. Es sei hier darauf hingewiesen, dass das 3-D-Messgerät bei dieser Simulation lediglich zur Messwertaufnahme und nicht zur Kalibrierung der Parameter verwendet wird. Soll der Messbereich hinsichtlich der Kalibrierung vergrößert werden, so sind weitere TCP-Positionen an verschiedenen Standorten zu generieren, deren Messvolumen dem des 3-D-Messgeräts entsprechen. Dies stellt in der Realität die Verschiebung des 3-D-Messgeräts an einen anderen Standort dar.

Es stellt sich zunächst die Frage, wie viele Messpunkte im Raum aufgenommen werden sollen, damit die Schätzung der neun Parameter nach Tabelle 8.3 konvergiert. Aufgrund der Tatsache, dass die Anzahl der zur Kalibrierung verwendeten Gleichungen größer als die Anzahl der unbekannt Parameter sein muss, sollen hier mehr als neun Messpunkte im Raum aufgenommen werden. In Abbildung 8.16 sind vier Konfigurationen mit unterschiedlicher Anzahl an generierten Messpunkten (n_M) dargestellt, welche in einem Abstand von 1050 mm zum Ursprung von S_G stehen.

Für die Optimierung wird wiederum die Global Optimization Toolbox von Matlab in Kombination mit dem lokalen Optimierer `lsqnonlin` verwendet. Hierbei werden die Startwerte der zu schätzenden Parameter so vorgegeben, dass sie sich um den bei dieser Simulation vorgegebenen Parametervektor mit einer Standardabweichung von $\sigma = 50 \text{ mm}$ befinden. Dies entspricht einem Bereich in der Realität, der gut experimentell auszumessen ist.

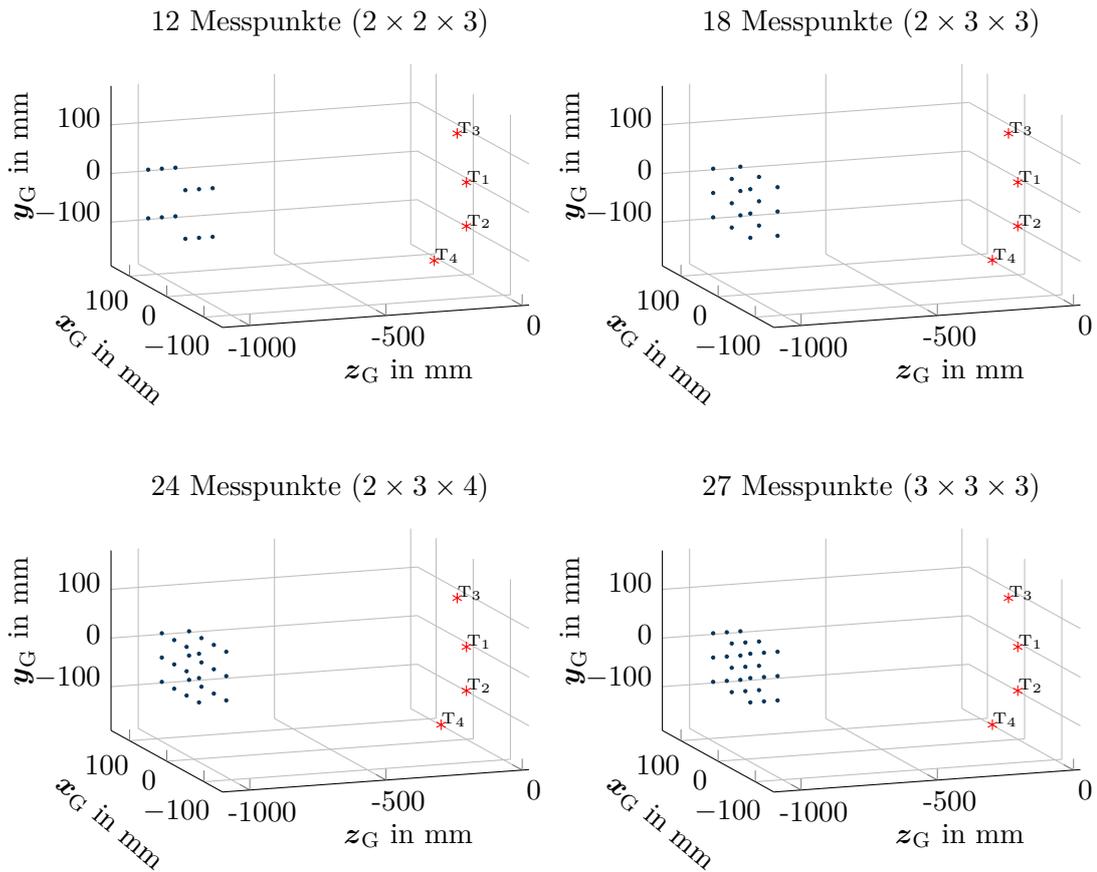


Abbildung 8.16: Darstellung der Messpunkte als Gitterstruktur im Raum; Punktverteilung in der jeweiligen Achse ($x_G \times y_G \times z_G$)

In Tabelle 8.11 sind die Simulationsergebnisse der Kalibrierung im Abstand von 1050 mm und 2050 mm zu sehen. Hierbei wurde zur Auswertung neben dem Gütewert ein Kalibrierfehler

$$e_P = \sum_{j=1}^{n_P} (|p_j - \hat{p}_j|) \quad (8.61)$$

definiert, der als die Summe der Betragsdifferenzen zwischen den vorgegebenen Parametern sowie den geschätzten Parametern nach der Kalibrierung berechnet wird. Es ist zu erkennen, dass die Kalibrierung mit 12 Messpunkten bei beiden Abständen nicht erfolgreich war. Der Algorithmus konvergiert erst ab 18 Messpunkte. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Gütewert bei beiden Abständen sehr gering ist. Wird jedoch der Kalibrierfehler betrachtet, so ist dieser beim Abstand von 1050 mm deutlich geringer als beim Abstand von 2050 mm. Dies zeigt, dass der Optimierer einen Parametersatz finden kann, welcher einen sehr guten Gütewert aufzeigt, jedoch weichen die kalibrierten Parameter von den vorgegebenen Parametern ab. Dies zeigt sich auch hinsichtlich der Anzahl der zu verwendenden Messpunkte. Bei 27 Messpunkten zeigen sich bei beiden Simulationen sehr gute Ergebnisse. Für eine

Tabelle 8.11: Simulationsergebnisse mit den kalibrierten Parametern in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte sowie des Abstandes zum \mathbf{S}_G im Raum

(a) Abstand zum \mathbf{S}_G : 1050 mm			(b) Abstand zum \mathbf{S}_G : 2050 mm		
n_M	Q in mm^2	e_P in mm	n_M	Q in mm^2	e_P in mm
12	$4,277 \cdot 10^{-7}$	292,7	12	$5,999 \cdot 10^{-4}$	509,61
18	$3,323 \cdot 10^{-21}$	$1,846 \cdot 10^{-05}$	18	$8,726 \cdot 10^{-11}$	75,465
24	$3,096 \cdot 10^{-20}$	$4,179 \cdot 10^{-05}$	24	$6,304 \cdot 10^{-11}$	57,91
27	$7,578 \cdot 10^{-21}$	$9,512 \cdot 10^{-08}$	27	$4,374 \cdot 10^{-20}$	$2,252 \cdot 10^{-4}$

sichere Konvergenz der Zielfunktion sollte daher die Anzahl der zu verwendenden Messpunkte um das drei- bis vierfache größer sein als die Anzahl der zu schätzenden Parameter. Tabelle 8.12 stellt die Parameterwerte vor und nach der Kalibrierung dar.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass der vorgestellte Selbst-Kalibrieralgorithmus mit den modifizierten Gleichungen in der Lage ist, die Standorte der Trackermodule sowie die Initillängen ohne Referenzmesssystem zu identifizieren. Dies trifft sowohl für Entfernung 1050 mm, als auch 2050 mm zum Ursprung des \mathbf{S}_G zu. Es soll jedoch in sehr geringem Abstand kalibriert werden, um eine hohe Schätzgenauigkeit der Parameter zu erzielen.

Tabelle 8.12: Parameterwerte vor und nach der Selbst-Kalibrierung; Abstand zum \mathbf{S}_G : 1050 mm

	Startwert [mm]	Sollwert [mm]	Schätzwert [mm]	Sollwert – Schätzwert $1 \cdot 10^{-8}$ [mm]
$T_1 l_0$	1141,426	1103,865	1103,865	1,949
$T_2 l_0$	1150,786	1113,225	1113,225	3,386
$T_3 l_0$	1138,699	1101,138	1101,138	1,009
y_2	-1,087	-90	-90	0,188
x_3	113,913	25	25	0,217
y_3	178,913	90	90	0,0003
x_4	138,913	50	50	0,806
y_4	-91,087	-180	-180	1,557
z_4	138,913	50	50	0,395

8.6.2 Selbst-Kalibrierung unter Berücksichtigung der Initillängen und der Transformationsparameter

Die Verdrehung der Koordinatenachsen von S_i - und S_G -System zueinander wird durch die Orientierungsparameter beschrieben. Diese ermöglichen die Transformation der Auftreffpunkte vom jeweiligen lokalen S_i -System in das globale S_G -System. Es sollen in diesem Abschnitt neben den bereits untersuchten Initillängen sowie den Standortparametern die 12 Orientierungsparameter ($S_1^G \mathbf{O}$, $S_2^G \mathbf{O}$, $S_3^G \mathbf{O}$, $S_4^G \mathbf{O}$) bei der Selbst-Kalibrierung betrachtet werden. Somit steigt die Anzahl der Schätzparameter von 9 auf 21. Hierzu werden die Parameter durch ein vorgegebenes Messgitter ($4 \times 4 \times 4$) mit 64 Messpunkten in einem Abstand von 1050 mm zum Ursprung des S_G -Systems identifiziert, wobei die Systemparameter sowie die Winkelkennlinie der Trackermodule vorgegeben werden. Die Standorte der Trackermodule sowie der Messpunktverteilung im Raum sind aus Abschnitt 8.6.1 zu entnehmen.

Das Ergebnis der Simulation nach der Optimierung ist in Abbildung 8.17a als das Residuum des Längenvergleichs vom vierten Trackermodul nach Gleichung (8.59) über 64 Messpunkte dargestellt. Dabei liegt $t_4 R$ bei rund $-0,019 \mu\text{m} \pm 0,334 \mu\text{m}$. Eine globale Lösung konnte nach mehrmaligen Optimierungsdurchläufen durch das

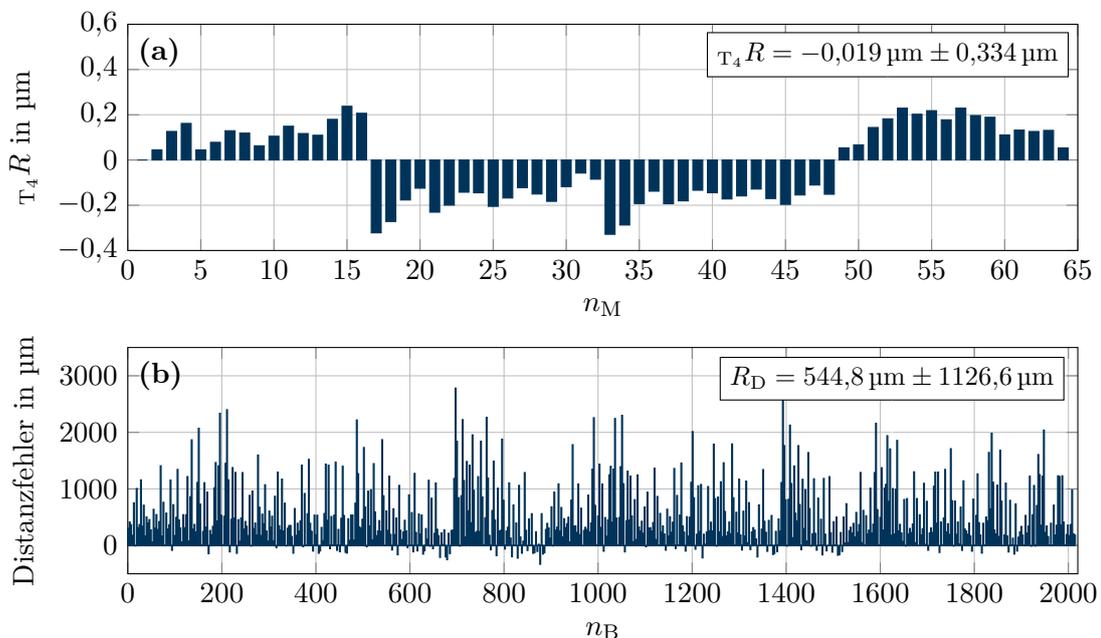


Abbildung 8.17: Simulationsergebnis unter Berücksichtigung der Transformationsparameter; (a) Residuum vom vierten Trackermodul über 64 Messpunkte im Raum; (b) Distanzfehler zwischen den generierten sowie den von MLTS berechneten Distanzen nach der Kalibrierung

Hinzufügen der Orientierungsparameter nicht gefunden werden. Es stellt sich dabei die Frage, wie sich der kalibrierte Parametersatz auf die Berechnung der Distanzen zwischen den Punkten auswirkt. Hierzu werden aus den vom MLTS kalibrierten 64 TCP-Positionen 2016 Distanzwerte wie nach Gleichung (8.2) berechnet, welche dann mit den von den vorgegebenen Messpunkten berechneten Distanzwerten verglichen werden. Abbildung 8.17b zeigt die Distanzfehler über alle Distanzbedingungen (siehe Gleichung (8.1)). Dabei liegt der Distanzfehler bei rund $544,8 \mu\text{m} \pm 1126,6 \mu\text{m}$ und ist somit im Vergleich zum Residuum aus Abbildung 8.17a deutlich höher. Auch der kalibrierte Parametersatz weicht stark von den vorgegebenen Parametern ab, insbesondere die Initiallängen zeigen eine Abweichung im zweistelligen mm-Bereich. Obwohl das Residuum unter $1 \mu\text{m}$ liegt, sind die Distanzfehler mit den kalibrierten Parametern um das 1000-Fache höher. Die Orientierungsparameter haben einen signifikanten Einfluss auf die Selbst-Kalibrierung und es zeigt sich somit, dass die aufgestellte Zielfunktion zur Selbst-Kalibrierung der Transformationsparameter und der Initiallängen nicht ausreichend ist.

Es soll daher ein zweites Kriterium, wie nach Gleichung (8.5), auf Basis der Distanzfehler hinzugefügt werden, welches den Einfluss der Orientierungsparameter minimiert. Dabei werden Referenzdistanzen mit den vom MLTS berechneten Distanzen verglichen. Demnach kann die aufgestellte Zielfunktion aus Gleichung 8.60 wie folgt erweitert werden:

$${}_{T_4}Q = \sum_{j=1}^{n_M} ({}_{T_4}R_j)^2 + \sum_{i=1}^{n_B} (R_{Di})^2. \quad (8.62)$$

Im Weiteren wird die Schätzung der 21 Parameter mit der erweiterten Gütefunktion untersucht. Dabei bleiben die Simulationseinstellungen zu den im vorherigen Abschnitt verwendeten unverändert. Die Gütefunktion wird lediglich um den Distanzvergleich zwischen Referenzmesssystem- sowie MLTS erweitert. Somit kommen zusätzlich zu den 64 Längenvergleichen 2016 Distanzvergleiche hinzu, welche durch die 21 Parameter minimiert werden sollen. Abbildung 8.18a stellt das Simulationsergebnis mit der erweiterten Gütefunktion dar. Das Residuum (${}_{T_4}R = 9,239 \cdot 10^{-6} \mu\text{m} \pm 0,003 \mu\text{m}$) konnte im Vergleich zu dem aus Abbildung 8.17a verringert werden. In Abbildung 8.18b ist zu sehen, dass die Distanzfehler deutlich verringert wurden. Das Residuum des Distanzfehlers liegt bei $-7,252 \cdot 10^{-5} \mu\text{m} \pm 0,009 \mu\text{m}$. Auch die kalibrierten Parameter sind nah an ihren vorgegebenen Werten. Dies zeigt somit deutlich, dass ein Referenzmesssystem zur Kalibrierung aller Parameter des MLTS essentiell notwendig ist. Die Kombination zwischen den Distanzvergleichen mit einem Referenzmesssystem

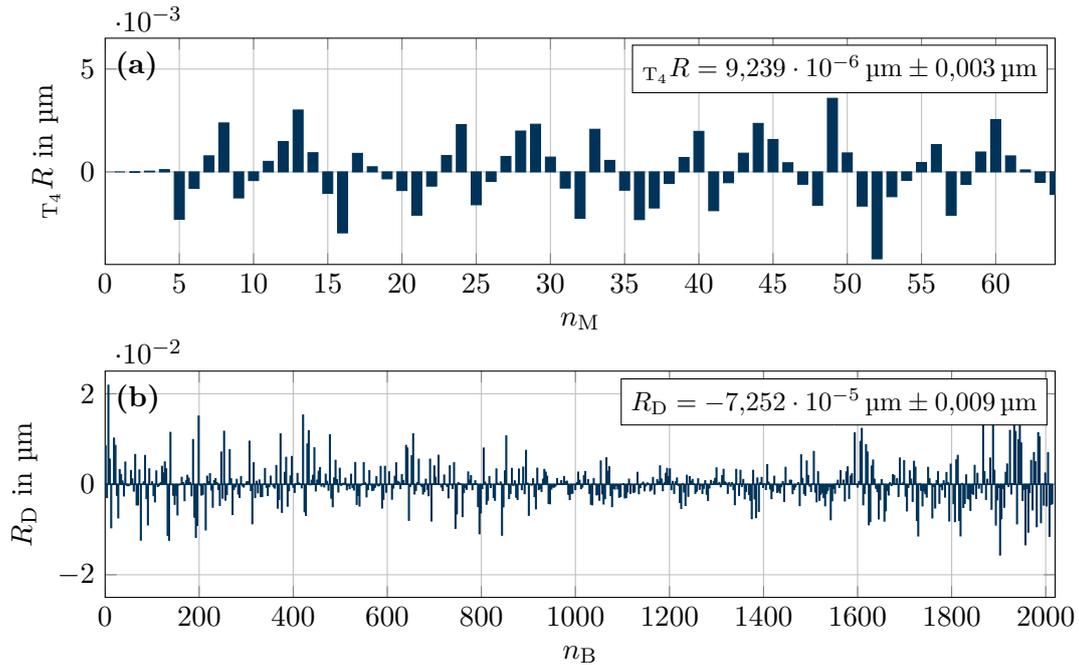


Abbildung 8.18: Simulationsergebnis mit der erweiterten Gütefunktion unter Berücksichtigung der Referenzdistanzen; **(a)** Residuum vom vierten Trackermodul über 64 Messpunkte im Raum; **(b)** Residuum zwischen den Referenzdistanzen sowie den von MLTS berechneten Distanzen nach der Kalibrierung

sowie den relativen Längenvergleichen bei dem Selbst-Kalibrieralgorithmus zeigt ein deutlich verbessertes Ergebnis.

Validierung der kalibrierten Parameter

Die gesuchten 21 Parameter wurden mit 64 Punkten in einem Messvolumen von $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ ermittelt. Dabei beträgt der laterale Abstand vom Zentrum des Messvolumens zum Ursprung des \mathcal{S}_G -Systems rund 1050 mm. Es stellt sich die Frage, ob der lokal gefundene Parametersatz auf andere Positionen in Raum angewendet werden kann oder ob erneut alle Parameter in einem größeren Messvolumen geschätzt werden müssen. Hierzu soll der kalibrierte Parametersatz an vier verschiedenen Positionen (P1, P2, P3, P4) mit jeweils gleichem Messvolumen wie bei der kalibrierten Position validiert werden, wobei für jede Position ein Messgitter mit 64 Messpunkten entworfen wird. Aus den an jeder Position generierten 64 Messpunkten werden wiederum 2016 Distanzen berechnet, welche dann mit den vom MLTS berechneten Distanzen verglichen werden. Die zur Kalibrierung und zur Validierung verwendeten Positionen sind in Abbildung 8.19 dargestellt. Alle Positionen haben den gleichen lateralen Abstand zum Ursprung des \mathcal{S}_G -Systems.

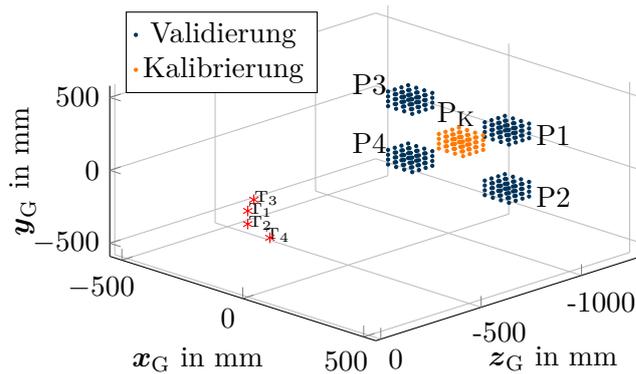


Abbildung 8.19: Die in der Simulation zur Kalibrierung und Validierung verwendeten Messpunkte

Tabelle 8.13:

Validierungsergebnisse nach der Simulation

Position	R_D in μm
P _K	$-7 \cdot 10^{-5} \pm 0,009$
P1	$0,036 \pm 0,196$
P2	$-0,024 \pm 0,166$
P3	$0,047 \pm 0,346$
P4	$-0,015 \pm 0,187$

Tabelle 8.13 zeigt die Validierungsergebnisse mit dem kalibrierten Parametersatz. Es ist zu sehen, dass die zweifache Standardabweichung an den vier validierten Positionen in den gleichen Dimensionen liegen. Werden diese aber mit der zur Kalibrierung verwendeten Position verglichen, so ist die Standardabweichung um Faktor 100 schlechter. Es soll daher bei der Kalibrierung berücksichtigt werden, dass zur Schätzung der Parameter mehrere Messpunkte an verschiedenen Positionen im Raum aufgenommen werden müssen, damit ein globaler Parametersatz gefunden werden kann.

8.6.3 Kalibrierung des MLTS mit 69 Parametern

Im vorherigen Abschnitt wurde für die Simulation angenommen, dass die Winkelkennlinie sowie die 48 Systemparameter bekannt sind. Somit konnten die Auftreffpunkte sowie die Längenkorrektur für jedes Trackermodul vollständig und fehlerfrei berechnet werden. Dies führt wiederum zu einer sehr guten Schätzung der Transformationsparameter sowie der Initiaillängen. Wie bereits in Abschnitt 8.4.1 erläutert wurde, kann es bei der Kalibrierung eines Trackermoduls mehrere lokale Lösungen der Systemparameter geben, welche zu einer sehr guten Kalibriergüte führen, obwohl die Berechnung der Längenkorrektur nicht vollständig richtig ist. Aus diesem Grund müssen die Systemparameter jedes Trackermoduls erneut mit den Transformationsparametern sowie den Initiaillängen geschätzt werden. In dieser Simulation sollen insgesamt 69 Parameter (48 Systemparameter, 18 Transformationsparameter und 3 Initiaillängen) in einem Kalibriervorgang identifiziert werden. Die Anordnungen der Trackermodule sowie die Messpunktverteilung im Raum sind in Abbildung 8.20 dargestellt. Um einen möglichst globalen Parametersatz zu finden, werden die Messpunkte an 24

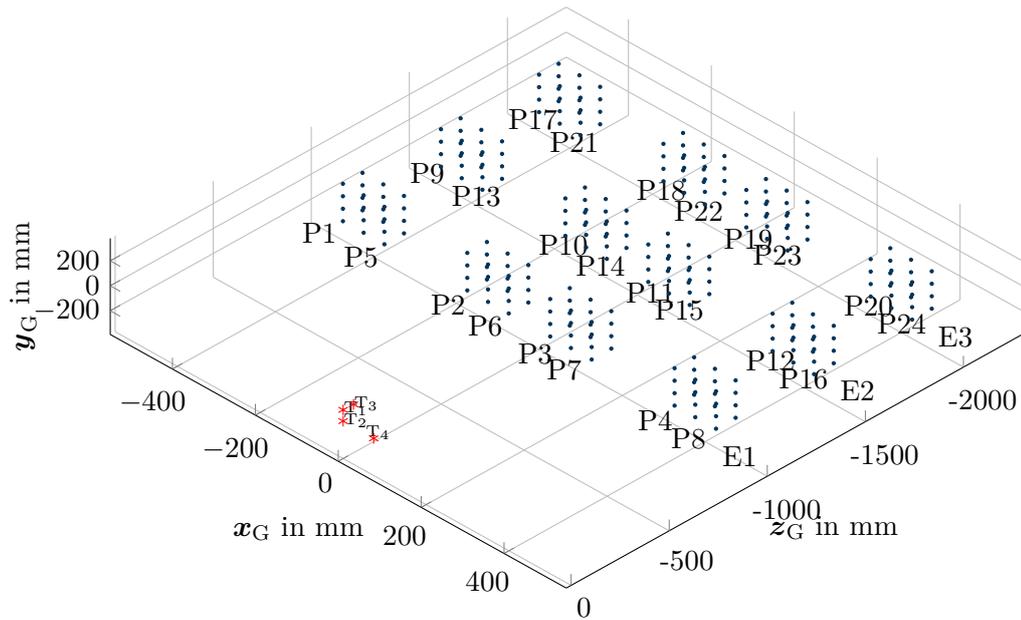


Abbildung 8.20: Die zur Kalibrierung der 69 Parameter verwendeten Messpunkte an 24 verschiedenen Messorten im Raum

verschiedenen Messorten ($4 \times 2 \times 3$) im Raum entworfen. An jedem Messort wird wiederum ein Messgitter mit 12 Messpunkten ($2 \times 2 \times 3$) in einem Messvolumen von $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ generiert, um daraus die notwendigen relativen Längen sowie die Stellwerte der Trackermodule für den Kalibriervorgang zu berechnen. Dabei wird die in Abbildung 8.11 vorgestellte Winkelkennlinie für die Umrechnung zwischen Winkel- und Stellwert verwendet. Die 24 Messorte (P1 ... P24) liegen in einem Messvolumen von $1000 \times 300 \times 1000 \text{ mm}^3$ und sind in drei Ebenen (E1, E2, E3) im Raum aufgeteilt, wobei in jeder Ebene 8 Messorte zu finden sind. Die Ebenen haben einen Abstand von 500 mm in lateraler Richtung zueinander und E1 hat einen lateralen Abstand von 1000 mm zum Ursprung des \mathcal{S}_G -Systems. Aus den 24 Messorten ergeben sich insgesamt 288 Messpunkte für die Selbst-Kalibrierung. Zusätzlich werden in jedem Messort aus den 12 Messpunkten 66 Distanzen berechnet, welche als zweites Kriterium, wie nach Gleichung (8.62), für die Kalibrierung der 69 Parameter verwendet werden. Es ergeben sich bei 24 Messorten insgesamt 1584 Distanzen.

Für die Optimierung werden die Systemparameter sowie die Winkelkennlinie jedes Trackermoduls mit dem Distanzverfahren, wie in Abschnitt 8.4 vorgestellt, im Voraus kalibriert. Der durch die Schätzung generierte Parametersatz wird als Startwert in dieser Simulation eingesetzt, wobei die mit jeweils 20 Stützstellen kalibrierten Winkelkennlinien zur Berechnung der Längenkorrekturen sowie der Auftreffpunkte verwendet werden. Abbildung 8.21 stellt das Residuum des Längenvergleichs vom vierten Trackermodul über 288 Messpunkte nach der Optimierung dar. Hierbei be-

trägt das Residuum $\tau_4 R = -0,010 \mu\text{m} \pm 0,672 \mu\text{m}$. Die zweifache Standardabweichung des Residuums ist im Vergleich zu der aus Abbildung 8.18a um Faktor 100 schlechter. Dies zeigt somit deutlich, dass die Systemparameter sowie die approximierten Winkelkennlinien signifikanten Einfluss auf die Kalibrierung des MLTS haben.

Im Weiteren sollen die vom MLTS berechneten Distanzen mit den vorgegebenen Distanzen an den 24 Messorten betrachtet werden. Das Residuum des Distanzvergleichs (R_D) nach der Optimierung ist in Tabelle 8.14 und in Abbildung 8.22 dargestellt. Dabei beträgt R_D über 24 Messorte $0,072 \mu\text{m} \pm 6,290 \mu\text{m}$ und ist somit bei der zweifachen Standardabweichung um Faktor 10 schlechter als im Vergleich zum $\tau_4 R$. Besonders starke Distanzabweichungen sind an den Messorten (P1, P4, P5 und P8) zu sehen. Diese Positionen befinden sich im Randbereich der ersten Ebene, welche einen lateralen Abstand von 1000 mm zum Ursprung des \mathcal{S}_G -Systems hat. In diesem Bereich müssen die x-Scanner des Strahlablensystems einen großen Stellwertbereich von $\pm 6 \text{ V}$ bis zu $\pm 8 \text{ V}$ realisieren, was einem optischen Winkel von $\pm 18^\circ$ bis $\pm 24^\circ$ entspricht.

Die Hauptursache der starken Distanzabweichungen an den Messorten (P1, P4, P5 und P8) liegt in den mit 20 Stützstellen approximierten Winkelkennlinien der Trackermodule. Da die Approximation die vorgegebene Winkelkennlinie nicht exakt wiedergeben kann, existiert somit zwischen den Kennlinien eine Abweichung, welche mit zunehmendem Stellwert wächst. Diese Abweichung geht wiederum in die Berechnung der Längenkorrektur sowie der Auftreffpunkte bei der Kalibrierung der Parameter ein und führt somit zu einer falschen Berechnung der TCP-Positionen und der Distanzen. Dies hat wiederum zur Folge, dass die Parameter falsch geschätzt werden. Dabei gilt: je größer die Winkelabweichung, desto größer sind die Abweichungen bei der Distanz- und TCP-Positionsbestimmung. Dies soll durch den Vergleich der Standardabweichung zwischen den Messorten (P4 & P8) und den Messorten (P12 & P16) gezeigt werden. Die Messorte (P12 & P16) befinden sich

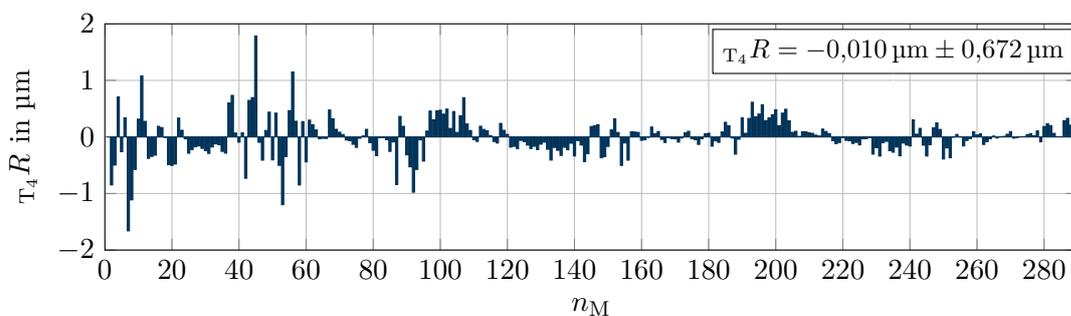


Abbildung 8.21: Residuum des Längenvergleichs von T_4

Tabelle 8.14: Residuum des Distanzvergleichs an 24 Messorten

$R_D = (\bar{R}_D \pm 2 \cdot \sigma_D) / \mu\text{m}$					
E1		E2		E3	
P1	$0,903 \pm 7,562$	P9	$-0,834 \pm 4,163$	P17	$0,282 \pm 4,274$
P2	$-0,130 \pm 1,907$	P10	$-0,084 \pm 1,526$	P18	$-0,547 \pm 1,105$
P3	$-0,625 \pm 1,175$	P11	$-0,573 \pm 1,775$	P19	$-0,458 \pm 1,730$
P4	$1,468 \pm 19,810$	P12	$-0,612 \pm 6,298$	P20	$0,538 \pm 4,908$
P5	$0,817 \pm 8,759$	P13	$-0,660 \pm 3,613$	P21	$0,267 \pm 4,449$
P6	$0,501 \pm 1,791$	P14	$0,223 \pm 1,461$	P22	$-0,086 \pm 1,073$
P7	$-0,099 \pm 2,043$	P15	$0,256 \pm 1,173$	P23	$0,385 \pm 1,145$
P8	$0,095 \pm 13,540$	P16	$-0,479 \pm 6,067$	P24	$1,182 \pm 4,571$
$\sum_{P1}^{P8} : 0,366 \pm 9,522$		$\sum_{P9}^{P16} : -0,347 \pm 3,861$		$\sum_{P17}^{P24} : 0,195 \pm 3,488$	
$\sum_{P1}^{P24} : 0,072 \pm 6,290$					

im Randbereich an der zweiten Ebene in positiver \boldsymbol{x}_G -Richtung (siehe Abbildung 8.20) und liegen 500 mm hinter den Messorten (P4 & P8). Aufgrund der größeren Entfernung zum Ursprung des \boldsymbol{S}_G -Systems ist der Stellwertbereich der x-Scanner an den Messorten (P12 & P16) geringer als an den Messorten (P4 & P8). Dieser liegt im Bereich von 4 V bis 6 V. Wird die zweifache Standardabweichung an diesen Messorten betrachtet, so liegt diese im einstelligen μm -Bereich und ist somit deutlich kleiner im Vergleich zu den Messorten (P4 & P8). Analog hierzu können die Messorte (P1 & P5) mit den Messorten (P9 & P13) verglichen werden. Zum Schluss sollen alle Positionen der drei Ebenen miteinander verglichen werden. In Tabelle 8.14 ist zu sehen, dass das Residuum des Distanzvergleichs in der ersten Ebene größer ist als in der zweiten und dritten Ebene. Aus der Simulation kann geschlussfolgert werden, dass mit dem vorgestellten Kalibrieralgorithmus ein Parametersatz ermittelt werden kann, welcher zu einer Standardabweichung im einstelligen μm -Bereich führt. Dabei ist zu beachten, dass die zur Kalibrierung verwendeten Messpunkte im gesamten Messvolumen verteilt sind. Weiterhin sollte der Abstand zwischen den Messpunkten und den Trackermodulen möglichst groß gewählt werden, damit der Einfluss der Winkel reduziert wird.

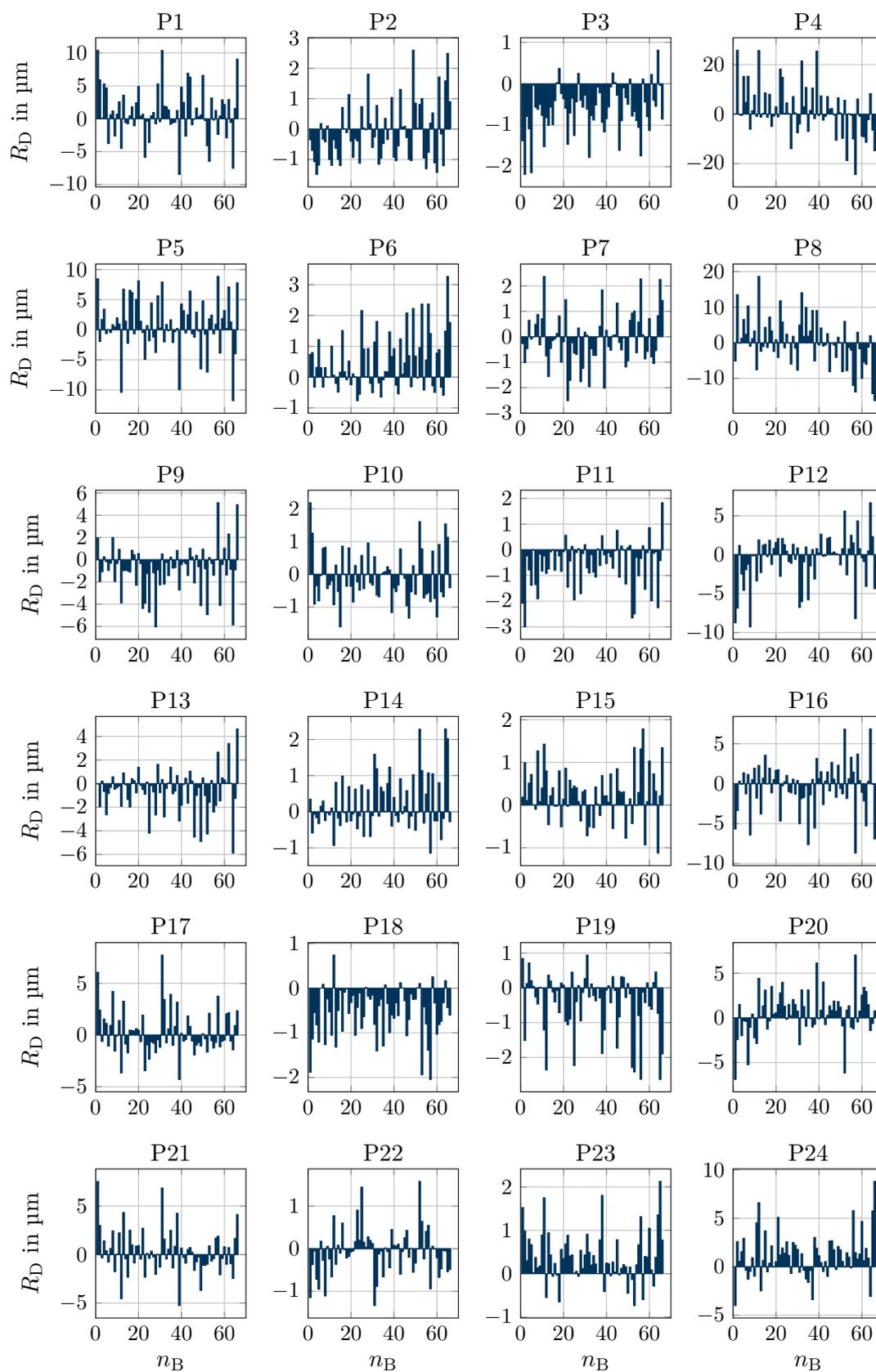


Abbildung 8.22: Residuum des Distanzfehlers an 24 Messorten im Raum

9 Kalibrier- und Messergebnisse, Leistungsfähigkeit der Algorithmen

9.1 Positionsmessung der Linearachsen des 3-D-Messgerätes

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, ist ein 3-D-Messgerät zur Kalibrierung der Parameter am experimentellen Aufbau notwendig. Das in diese Arbeit verwendete Messgerät besteht aus drei separaten Linearachsen (HPS-170) [73], die nahezu orthogonal aufeinander stehen. Jede Achse hat einen Verfahrbereich von 100 mm und verfügt über ein Längenmesssystem, welches eine Positionsauflösung von 0,2 μm erreicht. In Tabelle 9.1 sind die wichtigsten technischen Daten der Linearachse zusammengefasst.

Sollen die drei Achsen zur Messung von kartesischen Koordinaten im Raum verwendet werden, müssen diese exakt orthogonal zueinander stehen, da sonst Abweichungen, wie in [76,90] beschrieben auftreten. Die Kalibrierung des 3-D-Messgerätes hinsichtlich der Abweichungen erfordert ein zusätzliches Referenzsystem und ist mit hohem zeitlichen Aufwand verbunden. Deshalb sollen bei der Kalibrierung nicht die 3-D-Koordinaten des Messgerätes verwendet werden, sondern es wird lediglich die eindimensionale Position der einzelnen Linearachsen betrachtet.

Tabelle 9.1: Technische Daten (HPS-170), aus [73]

Verfahrbereich	100 mm
Positionsauflösung	0,2 μm
Wiederholgenauigkeit (Bi-direktional)	$\pm 1 \mu\text{m}$
Ebenheit/Geradheit	$\pm 1 \mu\text{m}$
Rollwinkel	$\pm 25 \mu\text{rad}$
Gierwinkel	$\pm 40 \mu\text{rad}$

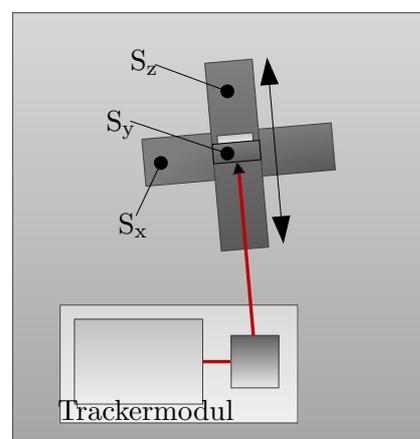
Diese dienen dann als Referenzdistanzen für die Schätzung der Parameter. Durch diese Vereinfachung hat jede Linearachse nur noch die Unsicherheit entlang der Bewegungsachse als Freiheitsgrad. Diese kann durch eine interferometrische Referenzmessung überprüft werden.

Es sollen die Positionen im Verfahrbereich der Linearachse mit einem vom Trackermodul verwendeten Interferometer gemessen werden. Hierzu muss das 3-D-Messgerät zum austretenden Laserstrahl des Trackermoduls ausgerichtet sein. Abbildung 9.1 veranschaulicht die Referenzmessung der Linearachse. Hierbei sind S_x , S_y und S_z die Linearachsen des 3-D-Messgerätes, wobei S_z auf S_x steht. S_y wiederum steht auf S_z . An der S_y -Linearachse wird der Messreflektor angebracht. In dieser Anordnung soll bspw. der Verfahrbereich der S_z -Linearachse gemessen werden. Durch den in Kapitel 5 vorgestellten Suchalgorithmus trifft der Laserstrahl auf das Zentrum des Messreflektors. In diesem Zustand wird die Regelung der Strahlnachführung ausgeschaltet, wobei die Stellwerte der Galvanometer-Scanner als konstante Offsets gehalten werden. Somit wird ein Strahlverlust im ausgeschalteten Regelbetrieb verhindert.

Damit der Bewegungsbereich der Linearachse entlang der interferometrischen Achse gemessen werden kann, muss der austretende Laserstrahl von der Anfangs- bis zur Endposition der Linearachse stetig im Zentrum des Messreflektors bleiben. Dies erfolgt einerseits durch die Justierung des vom Galvanometer-Scanner abgelenkten Laserstrahls zu der S_z -Bewegungsachse und andererseits durch die Justierung des 3-D-Messgerätes zur Richtung des Laserstrahls. Die Justierung wird durch ein Regelalgorithmus automatisiert und solange ausgeführt, bis die Richtung des Laserstrahls parallel zu der S_z -Bewegungsachse ausgerichtet ist.



(a) Messaufbau



(b) Prinzipbild

Abbildung 9.1: Experimentelle Anordnung zur Positionsmessung der Linearachsen

Nach der Justierung wird das Interferometer an der Anfangsposition der Linearachse auf den Wert Null zurückgesetzt. Es werden 200 äquidistante Positionen im Abstand von 0,5 mm entlang der S_z -Bewegungsachse bis zur Endposition gefahren. Dabei werden an jeder Position 100 interferometrische Längenwerte aufgenommen und gemittelt, welche dann mit der von der S_z -Achse gefahrenen Position verglichen werden. Der Messvorgang wird zehnmal wiederholt. Analog zu der Messung der S_z -Achse erfolgen die Messungen der S_x - und der S_y -Achse.

Abbildung 9.2 stellt die Abweichung zwischen den von der Linearachse gefahrenen und den vom Interferometer gemessenen Positionen dar. Es ist zu erkennen, dass die Abweichung zwischen Anfangs- und Endposition unter $10\ \mu\text{m}$ liegt. Die größte Abweichungen sind bei der S_z -Achse zu sehen. Die Abweichungen der Achsen werden als Korrekturkennlinie hinterlegt und für die Kalibrierung verwendet.

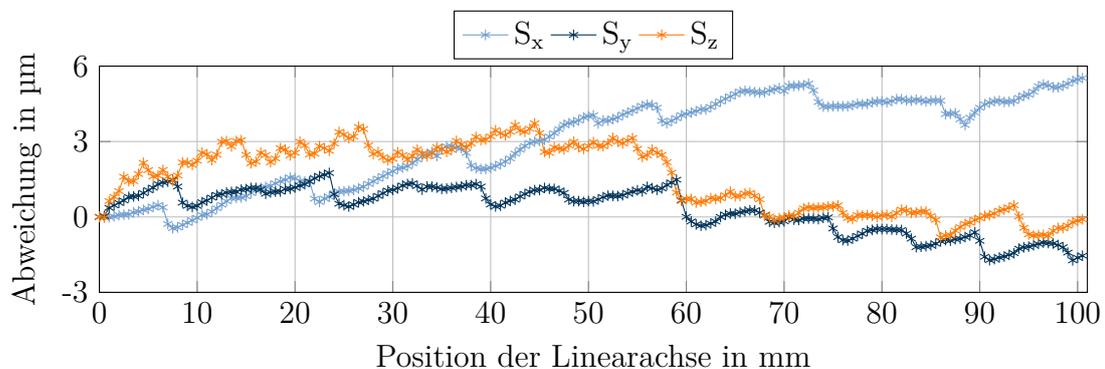


Abbildung 9.2: Gemessene Positionsabweichungen der Linearachsen

9.2 Kalibrierung des Trackermoduls

Im Folgenden werden die Kalibrierergebnisse des Trackermoduls vorgestellt. Es werden für alle vier Trackermodule nacheinander die Systemparameter und die Parameter der Winkelmodelle mithilfe des Distanzverfahrens durch jeweils einen Kalibriervorgang ermittelt. Abbildung 9.3 veranschaulicht die Kalibrieranordnung. Da, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, das 3-D-Messgerät nicht als solches, sondern als drei nicht-orthogonale Linearachsen betrachtet wird, muss die Messwertaufnahme gegenüber der in Abschnitt 8.3.3 beschriebenen modifiziert werden. Es werden nicht die absoluten Positionen der Messpunkte betrachtet, sondern lediglich die Distanzen von Punkten, die sich nur im Stellwert einer einzigen Linearachse unterscheiden. Die Messwerte werden zunächst in einer x-y-Ebene angeordnet. Dabei werden 5 S_x -Positionen (siehe Abbildung 9.3b, P1x-P5x) angefahren. An jeder wird die S_y -

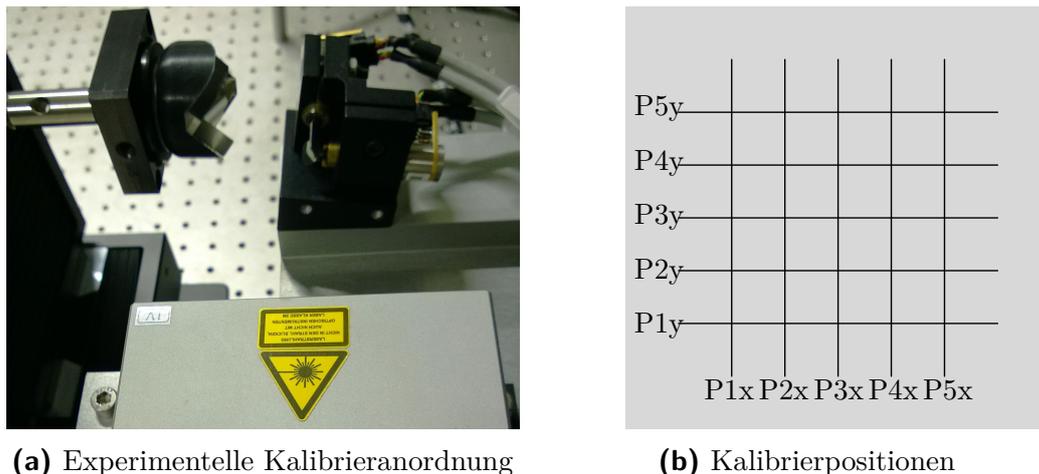


Abbildung 9.3: Kalibrieranordnung des Trackermoduls

Linearachse über ihren kompletten Arbeitsbereich (0 mm bis 100 mm) verfahren und dabei werden jeweils 101 Messpunkte aufgenommen. Ebenfalls werden an 5 S_y -Positionen (P1y-P5y) jeweils 101 Messpunkte entlang der S_x -Richtung aufgenommen. Somit ergeben sich nach Gleichung (8.1) an jeder dieser 10 Positionen 5050 Distanzbedingungen.

Die beschriebene S_x - S_y -Ebene befindet sich in einem lateralen Abstand von 50 mm zum Trackermodul, sodass der Stellbereich von $\pm 9,4$ V sowohl für den x- als auch für den y-Scanner abgedeckt wird. In einem Abstand von 150 mm wird eine identische Ebene aus Messpunkten gebildet. Zusätzlich werden 101 Messpunkte entlang der S_z -Achse aufgenommen. Damit ergeben sich insgesamt 106050 Distanzbedingungen für die Kalibrierung

Abbildung 9.4 zeigt das Residuum des Distanzvergleichs über alle Bedingungen nach der Optimierung beispielhaft für Tracker 1. Hierzu wurden in einem Kalibriervorgang die Initillänge, die 12 Systemparameter sowie die 40 Parameter der Winkelmodelle identifiziert. Das Residuum R_D beträgt $-0,006 \mu\text{m} \pm 3,458 \mu\text{m}$. In Abbildung 9.5

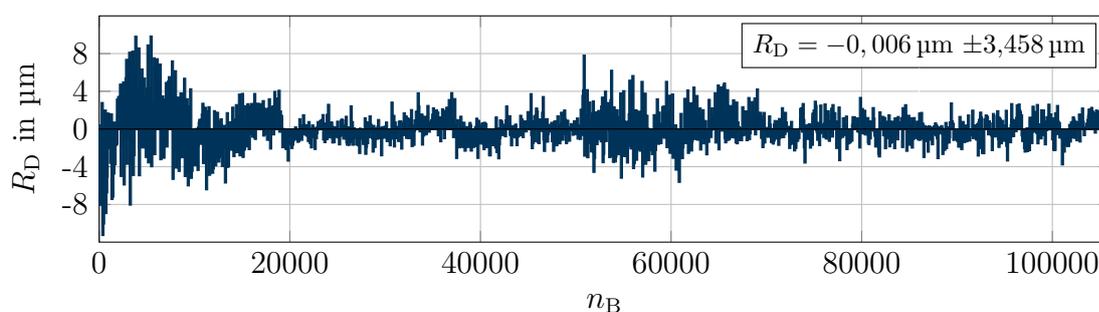


Abbildung 9.4: Distanzvergleich als Residuum mit Referenzmesssystem

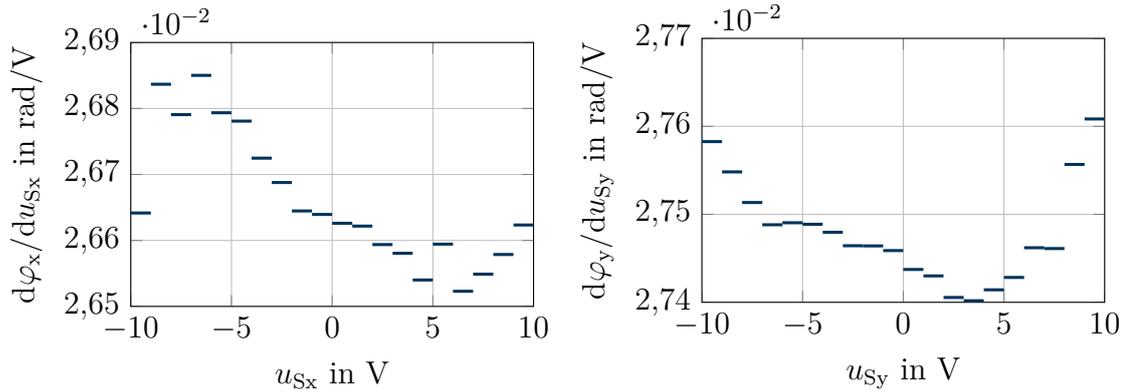


Abbildung 9.5: Kalibrierte Stützstellen der Ableitung der Winkelkennlinie für den x- bzw. y-Scanner; $n_k = 20$

ist die Approximation der Ableitung der Winkelkennlinie für den x- als auch für den y-Scanner mit jeweils 20 Stützstellen dargestellt. Eine Nichtlineariät in beiden Kennlinien ist deutlich zu erkennen. Diese werden hinterlegt und für die Kalibrierung des MLTS im nächsten Abschnitt verwendet. Tabelle 9.2 zeigt die Systemparameter repräsentativ für ein Trackermodul vor und nach der Kalibrierung.

Tabelle 9.2: Parameterwerte vor und nach der Kalibrierung

Parameter/Einheit	untere Schranke	Startwert	Schätzwert	obere Schranke
P_{0y}/mm	-9	-6	-6,746	9
P_{0z}/mm	-4	-2	-0,975	4
k_1/mm	0,001	0,541	0,794	1
d/mm	-10	-7,823	-6,938	-3
k_2/mm	0,001	0,541	0,746	1
ℓ_0/mm	30	60	44,117	100
$\alpha_L/^\circ$	88	89,645	90,409	91
$\beta_L/^\circ$	88	89,730	89,738	91
$\alpha_{v_1}/^\circ$	-2	-0,023	0,310	2
$\alpha_{n_1}/^\circ$	265	270,030	270,7	275
$\beta_{n_1}/^\circ$	43	45,669	45,306	46
$\alpha_{n_2}/^\circ$	177	179,207	179,166	182
$\beta_{n_2}/^\circ$	135	138,865	136,036	145

9.3 Kalibrierung des MLTS mit dem Messverfahren der Multilateration

In diesem Abschnitt werden die Kalibrierergebnisse des MLTS unter Verwendung des Messverfahrens der Multilateration vorgestellt, wobei in einem Kalibriervorgang 69 Parameter ermittelt werden sollen. Hierzu werden die aus dem vorherigen Abschnitt kalibrierten Systemparameter der vier Trackermodule als Startwerte verwendet. Des Weiteren werden die Längenkorrektur sowie die Auftreffpunkte mit den kalibrierten Winkelkennlinien berechnet.

Dabei soll die Kalibrieranordnung aus Abschnitt 8.6.3 experimentell mit 24 Messorten in einem Messvolumen von $1000 \times 300 \times 1000 \text{ mm}^3$ untersucht werden. Jede Position hat wiederum ein Messvolumen von $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ und entspricht dem maximalen Verfahrbereich der Linearachsen in jeder Richtung. Im Unterschied zu der Simulation werden an jeder Position 12 Messpunkte ($2 \times 2 \times 3$) für die Selbst-Kalibrierung und 18 Messpunkte für den Distanzvergleich entworfen. Die 18 Messpunkte sind wiederum auf die S_x -, S_y - und S_z -Linearachsen aufgeteilt, wobei diese, wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, der horizontalen, vertikalen und lateralen Richtung entsprechen. Somit fährt jede Linearachse 6 Positionen (0 mm bis 100 mm) in 20 mm Schritt entlang seiner Bewegungsachse. Wie nach Gleichung (8.1) können aus den gefahrenen Positionen 15 Distanzen berechnet werden. Diese Distanzen werden dann mit den vom MLTS berechneten Distanzen verglichen. Somit ergeben sich für die Kalibrierung pro Position 12 Längenvergleiche und 45 Distanzvergleiche in allen drei Richtungen.

Die Standorte der Trackermodule liegen, wie in Tabelle 8.10 gezeigt, bei dieser Kalibrieranordnung sehr nahe beieinander. Dadurch konnte ein großes überlagertes Messvolumen in Abstand von 1000 mm zum Ursprung des S_G -Systems realisiert werden. Die erste experimentelle Untersuchung zeigt jedoch, dass mit der gewählten Aufstellung der Trackermodule im Vergleich zur Simulation keine guten Ergebnisse erzielt werden konnten. Der Einfluss der Längenkorrektur wirkt sich signifikant auf die Berechnung der Koordinaten aus. Hierbei zeigen die Residuen sowohl bei dem Längen- als auch bei dem Distanzvergleich an manchen der 24 Messorte Abweichungen im zweistelligen μm -Bereich, besonders an den Messorten, welche die größte Entfernung zum Ursprung des MLTS haben. Dies konnte in der Simulation nicht eindeutig gezeigt werden und widerspricht der Analyse, dass die Kalibrierergebnisse mit zunehmender Distanz bei gleichbleibendem Messvolumen besser werden, da die verwendeten Stellbereiche der Galvanometer-Scanner kleiner werden, was wiederum

zu einer verbesserten Berechnung der Längenkorrektur führt. Um den Zusammenhang zwischen der Längenkorrektur sowie der Entfernung bei der Kalibrierung zu zeigen, wird im Folgenden kurz auf die Berechnung der Koordinaten bei dem Messverfahren der Multilateration eingegangen. Es soll der Einfluss der Längenkorrektur beispielhaft für die x_{TCP} -Koordinate

$$x_{\text{TCP}} = \frac{\ell_1^2 - \ell_2^2 + x_2^2}{2 \cdot x_2} \quad (9.1)$$

gemäß Gleichung (7.34) gezeigt werden.

9.3.1 Einfluss der Längenkorrektur auf die Berechnung der Koordinaten

Nach Gleichung (7.34) werden zur Berechnung der x_{TCP} -Koordinate die quadrierten Absolutlängen von T_1 und T_2 verwendet. Dabei geht die Standortposition x_2 mit ein. Es wird angenommen, dass die Absolutlänge ℓ_2 und die Standortposition x_2 fehlerfrei sind. Somit ist die Genauigkeit der Koordinate nur noch von der quadrierten Absolutlänge ℓ_1^2 abhängig. Im Idealfall, wenn die Längenkorrektur vollständig berechnet werden kann, so ist die Restabweichung ${}_{T_1}e_R$ der Längenkorrektur für T_1 gleich Null. Ist dies nicht der Fall, so kann der Zusammenhang zwischen der Absolutlänge sowie der Restabweichung der Längenkorrektur für T_1 wie folgt aufgestellt werden:

$$(\ell_1 + {}_{T_1}e_R)^2 = \ell_1^2 + 2 \cdot \ell_1 \cdot {}_{T_1}e_R + {}_{T_1}e_R^2. \quad (9.2)$$

Wird hier ${}_{T_1}e_R = 1 \mu\text{m}$ und $\ell_1 = 1000 \text{ mm}$ eingesetzt, so ergibt sich:

$$(\ell_1 + {}_{T_1}e_R)^2 = 1000,001^2 \text{ mm}^2 = 1000002,000001 \text{ mm}^2. \quad (9.3)$$

Wird die Differenz

$$(\ell_1 + {}_{T_1}e_R)^2 - \ell_1^2 = 1000002,000001 \text{ mm}^2 - 1000000 \text{ mm}^2 = 2,000001 \text{ mm}^2 \quad (9.4)$$

zwischen dem wahren Wert und dem korrigierten Wert betrachtet, so liegt diese bei $2,000001 \text{ mm}^2$. In diesem Beispiel bewirkt eine Restabweichung von $1 \mu\text{m}$ eine Erhöhung der Restabweichung in der Berechnung der Koordinaten um rund das 2000-fache, denn durch den Term $2 \cdot \ell_1 \cdot {}_{T_1}e_R$ in Gleichung (9.2) wird die Restabweichung mit der Absolutlänge skaliert. Diese wächst durch die aufgestellte quadrierte Gleichung proportional mit zunehmender Absolutlänge und verfälscht somit die Berechnung der x_{TCP} -Koordinate um ein Vielfaches von der eigentlichen Abweichung. Eine einzige

Möglichkeit, die skalierte Restabweichung zu reduzieren, liegt in der Veränderung der Aufstellorte der Trackermodule, denn nach Gleichung (7.34) kann die skalierte Restabweichung durch die Wahl der Standortposition x_2 , welche im Nenner der Gleichung steht, verkleinert werden. Dies erfolgt, wenn T_2 weit von T_1 entfernt ist. Es zeigt sich somit, dass eine nahe Zusammenstellung der Trackermodule zu keinem guten Kalibrierergebnis führen kann, da eine kleine Restabweichung in der Berechnung der Längenkorrektur zu einer erhöhten Abweichung in der Berechnung der Koordinaten führt. Im Vergleich zum Winkelfehler geht diese Abweichung in die Kalibrierung viel stärker ein. Aus diesem Grund soll der Abstand zwischen den aufgenommenen Messpunkten und den Trackermodulen so gering wie möglich gewählt werden.

9.3.2 Auswahl der Standortposition und Kalibrierung

Es soll nun die Standortposition der Trackermodule, wie nach Tabelle 8.10 gezeigt, für die Kalibrierung der 69 Parameter verändert werden, um damit die Wirkung der Abweichungen auf die Längenkorrektur zu untersuchen. Es ist jedoch zu beachten, dass wenn die Standorte der Trackermodule weit voneinander entfernt sind, das überlagerte Messvolumen signifikant verkleinert wird. Abbildung 9.6 und Tabelle 9.3 zeigen die neu gewählten Standorte der Trackermodule, welche aus einem Kompromiss zwischen Messvolumen und Restabweichung der Längenkorrektur gewählt wurden. Abbildung 9.7 veranschaulicht die Anordnung der Trackermodule

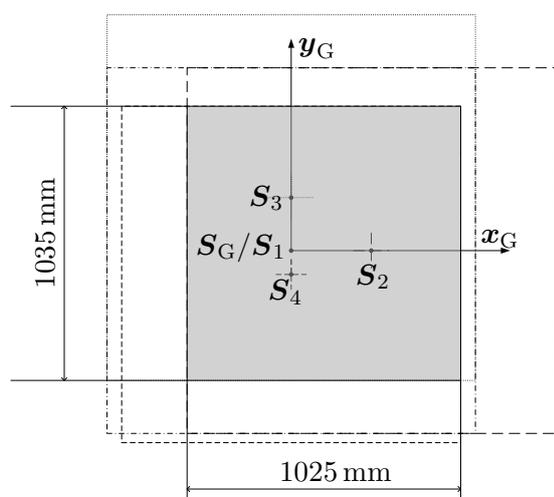


Abbildung 9.6: Die überlagerte Messfläche des MLTS im Abstand von 1200 mm in negativer z_G -Richtung

Tabelle 9.3: Die Standorte der Trackermodule im MLTS-Koordinatensystem bei der experimentellen Kalibrierung

Standort	x/mm	y/mm	z/mm
l_1	0	0	0
l_2	300	0	0
l_3	0	200	0
l_4	0	-90	-175



Abbildung 9.7: Die Aufstellung der Trackermodule für die Kalibrierung des MLTS

am experimentellen Aufbau. Bei dieser Standortkonfiguration erreicht das MLTS in einem Abstand von 1000 mm zur Messfläche nicht das geforderte Messvolumen von $1000 \times 1000 \times 1000 \text{ mm}^3$. Daher wird der Abstand zwischen MLTS und Messfläche auf 1200 mm erhöht. Die überlagerte Messfläche beträgt somit $1025 \times 1035 \text{ mm}^2$. Es sollen nun in einem Messvolumen von $1000 \times 300 \times 1000 \text{ mm}^3$ im Abstand von 1200 mm die Parameter geschätzt werden. Die Messorte entsprechen der in Abbildung 8.20 gezeigten Anordnung. Dabei werden, wie in Abschnitt 9.3 beschrieben, an jedem Messort 30 Messpunkte aufgenommen. Es ergeben sich für die Kalibrierung aus den 720 Messpunkten insgesamt 720 Bedingungen für den Längenvergleich und 1080 Bedingungen für den Distanzvergleich mit den drei Linearachsen.

Abbildung 9.8 zeigt das Residuum des Längenvergleichs zwischen der von T_4 gemessenen Interferometerlänge und der vom MLTS für T_4 berechneten Interferometerlänge. Hierbei liegt das Residuum des Längenvergleichs über 720 Messpunkte bei $-0,144 \mu\text{m} \pm 1,720 \mu\text{m}$.

Tabelle 9.4 stellt die Kalibrierergebnisse der 69 Parameter als Residuum des Distanzvergleichs an den 24 Messorten dar. Zwischen E1 und E2 ergeben sich bei dem Residuum über alle Messorte keine nennenswerten Unterschiede. Die zweifache Standardabweichung liegt in beiden Ebenen um den Bereich $\pm 5 \mu\text{m}$. Somit konnte der Einfluss der

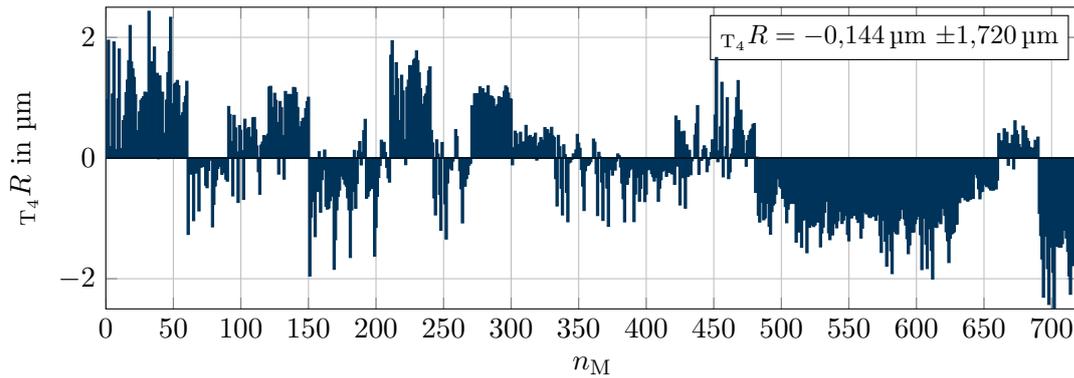
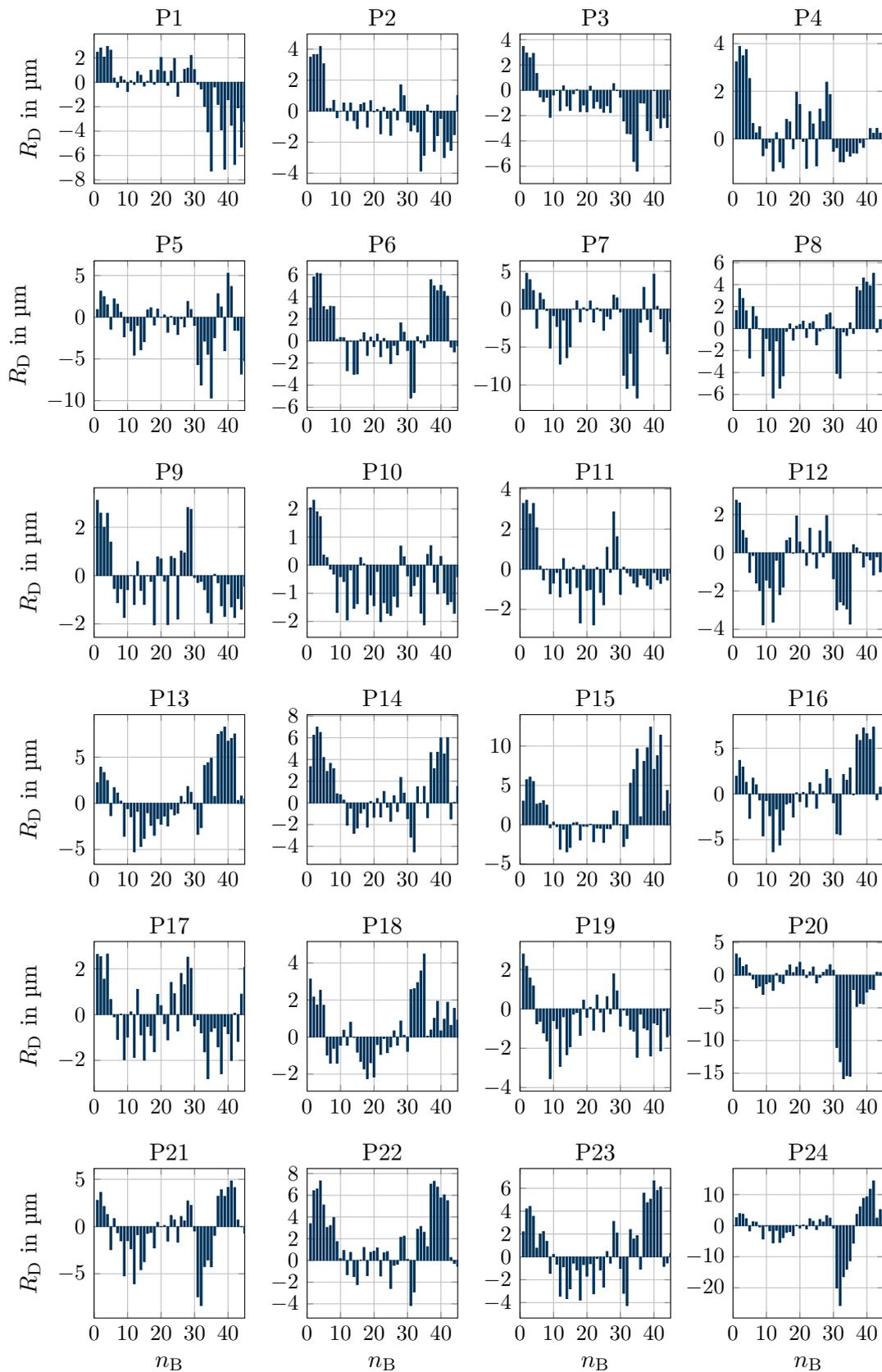


Abbildung 9.8: Residuum des Längenvergleichs vom T_4

skalierten Restabweichung der Längenkorrektur in E2 durch die gewählten Standortpositionen der Trackermodule reduziert werden. Wird E3 mit E1 und E2 verglichen, so ist die zweifache Standardabweichung in E3 höher. Diese liegt bei rund $7,7 \mu\text{m}$. Das Residuum aller drei Ebenen liegt hier bei rund $0,038 \mu\text{m} \pm 7,324 \mu\text{m}$. Abbildung 9.9 veranschaulicht das Residuum des Distanzvergleichs an den 24 Messorten.

Tabelle 9.4: Residuum des Distanzvergleichs an 24 Messorten

$R_D = (\bar{R}_D \pm 2 \cdot \sigma_D) / \mu\text{m}$					
E1		E2		E3	
P1	$-0,531 \pm 5,136$	P9	$-0,117 \pm 2,815$	P17	$-0,100 \pm 2,942$
P2	$-0,136 \pm 3,554$	P10	$-0,547 \pm 2,252$	P18	$0,457 \pm 3,193$
P3	$-1,107 \pm 3,964$	P11	$-0,089 \pm 2,887$	P19	$-0,592 \pm 2,591$
P4	$0,427 \pm 2,750$	P12	$-0,562 \pm 3,233$	P20	$-1,941 \pm 9,539$
P5	$-1,052 \pm 6,198$	P13	$0,744 \pm 7,112$	P21	$-0,486 \pm 6,240$
P6	$0,850 \pm 5,649$	P14	$1,086 \pm 5,762$	P22	$1,819 \pm 6,034$
P7	$-1,669 \pm 7,816$	P15	$2,241 \pm 8,225$	P23	$0,595 \pm 5,849$
P8	$0,098 \pm 5,266$	P16	$0,447 \pm 6,683$	P24	$-0,830 \pm 14,917$
$\sum_{P1}^{P8} : -0,390 \pm 5,450$		$\sum_{P9}^{P16} : 0,401 \pm 5,576$		$\sum_{P17}^{P24} : -0,135 \pm 7,706$	
$\sum_{P1}^{P24} : 0,038 \pm 7,324$					

**Abbildung 9.9:** Residuum des Distanzvergleichs R_D

9.4 Kalibrierung des MLTS mit dem Messverfahren der Triangulation

Im Weiteren werden die Kalibrierergebnisse des MLTS unter Verwendung des Messverfahrens der Triangulation vorgestellt. Da die Initiallänge bei diesem Messverfahren mithilfe von zwei Trackermodulen berechnet wird, reduziert sich die Zahl der geschätzten Parameter von 69 auf 66 (siehe Tabelle 8.9). Die Kalibrieranordnung sowie die Verteilung der Messpunkte im Raum ist dem Abschnitt 9.3 zu entnehmen. Hierzu wird die aufgestellte Zielfunktion nach Gleichung (8.58) für die Optimierung verwendet. Somit ergeben sich bei 720 Messpunkten insgesamt 4320 Bedingungen für die Berechnung der normierten Positionsdifferenz zwischen den Trackermodulen und 1080 Bedingungen für den Distanzvergleich.

Tabelle 9.5 stellt das Residuum des Distanzvergleichs an den 24 Messorten nach der Optimierung unter Verwendung des Messverfahrens der Triangulation dar. Hierbei liegt der Wert des Residuums über allen 24 Messorten bei rund $7,121 \mu\text{m} \pm 39,503 \mu\text{m}$.

Tabelle 9.5: Residuum des Distanzvergleichs an den 24 Messorten, Triangulation

$R_D = (\bar{R}_D \pm 2 \cdot \sigma_D) / \mu\text{m}$					
E1		E2		E3	
P1	$-0,640 \pm 44,368$	P9	$-5,504 \pm 39,521$	P17	$-7,276 \pm 26,566$
P2	$0,271 \pm 11,299$	P10	$-1,826 \pm 9,343$	P18	$-5,238 \pm 14,963$
P3	$4,676 \pm 30,822$	P11	$6,365 \pm 29,644$	P19	$-0,061 \pm 8,553$
P4	$15,442 \pm 65,482$	P12	$13,425 \pm 53,153$	P20	$4,728 \pm 32,611$
P5	$17,892 \pm 57,449$	P13	$12,235 \pm 43,171$	P21	$6,577 \pm 42,070$
P6	$12,339 \pm 38,517$	P14	$7,679 \pm 27,693$	P22	$9,456 \pm 36,498$
P7	$10,268 \pm 32,857$	P15	$13,278 \pm 22,814$	P23	$11,144 \pm 30,032$
P8	$16,027 \pm 37,749$	P16	$17,130 \pm 32,361$	P24	$12,506 \pm 50,934$
$\sum_{P1}^{P8} : 9,534 \pm 44,461$		$\sum_{P9}^{P16} : 7,848 \pm 37,300$		$\sum_{P17}^{P24} : 3,980 \pm 35,456$	
$\sum_{P1}^{P24} : 7,121 \pm 39,503$					

Zur Erinnerung: Das Residuum unter Verwendung des Messverfahrens der Multilateration liegt bei rund $0,038 \mu\text{m} \pm 7,324 \mu\text{m}$. Werden die zweifachen Standardabweichungen der beiden Messverfahren miteinander verglichen, so liegt die Standardabweichung bei der Triangulation um etwa Faktor 5 höher als bei der Multilateration. Dies zeigt deutlich, dass das Triangulationsverfahren im untersuchten Messvolumen unterlegen ist.

Wird das Residuum der drei Ebenen bei diesem Messverfahren betrachtet, so sinkt es mit zunehmender Entfernung zum Ursprung des MLTS. Dies liegt daran, dass die Winkelauslenkung der Galvanometer-Scanner mit zunehmender Entfernung bei gleich bleibendem Messvolumen kleiner werden und somit auch kleinere Winkelfehler verursachen. Bei diesem Messverfahren wirken Winkelfehler signifikant auf die Berechnung der Koordinaten.

In Abbildung 9.10 ist das Residuum der normierten Positionsdivergenz zwischen den Trackermodulen nach der Optimierung dargestellt. Der Mittelwert des Residuums liegt bei rund $111,661 \mu\text{m}$. Abbildung 9.11 stellt das Residuum des Distanzvergleichs über alle Positionen dar.

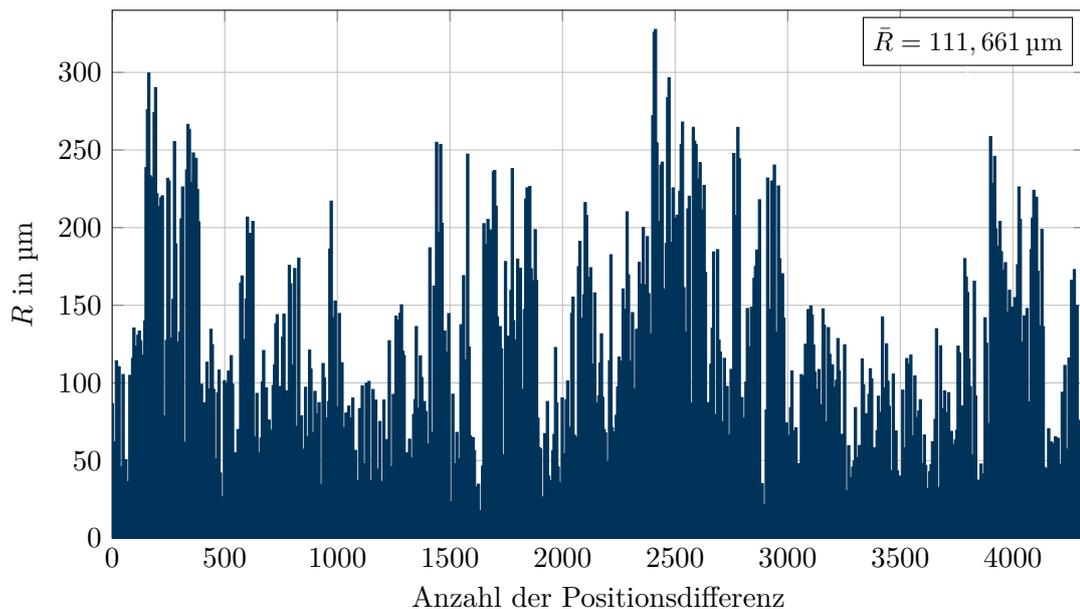


Abbildung 9.10: Normierte Positionsdivergenz zwischen den Trackermodulen

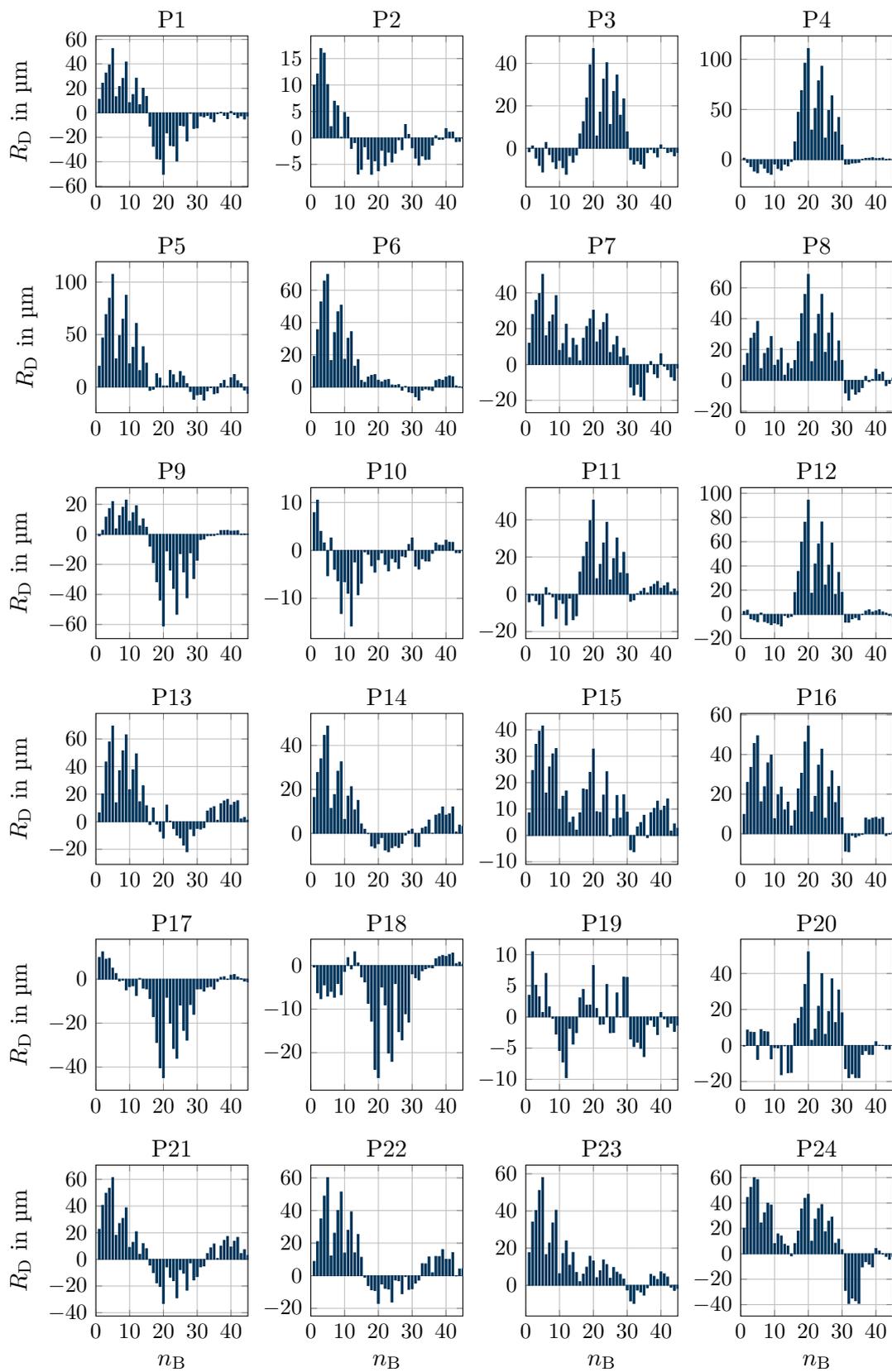


Abbildung 9.11: Residuum des Distanzvergleichs R_D der Triangulation

9.5 Experimentelle Validierung der Parameter

Im vorherigen Abschnitt wurde an den 24 Messorten jeweils ein Parametersatz für das Messverfahren der Triangulation sowie der Trilateration durch die vorgestellten Kalibriermethoden ermittelt.

Es soll im Folgenden die Korrektheit der Parameter an beliebigen Punkten im festgelegten Messvolumen von $1000 \times 300 \times 1000 \text{ mm}^3$ durch die Validierungsmessung bewertet werden. Hierzu werden, wie bei der Kalibrierung, 18 Messpunkte an jeder der 24 Messorte verwendet, um die von den Linearachsen gefahrene Distanzen mit den vom MLTS berechneten Distanzen innerhalb eines Messortes zu vergleichen. Es sei dabei erwähnt, dass die bei der Validierung gefahrenen 18 Messpunkte nicht den bei der Kalibrierung verwendeten entsprechen. Somit liegen zwischen der Kalibrierung und der Validierung unterschiedlichen Datensätze vor. Jede Linearachse soll 6 Positionen (0 mm bis 100 mm) in 20 mm Schritt entlang einer Bewegungsachse anfahren. Diese dienen als Referenzdistanzen, welche dann mit den vom MLTS berechneten Distanzen verglichen werden. Dabei wird die Distanzabweichung e_D zwischen Linearachse und MLTS betrachtet, welche zuvor bei der Kalibrierung als das Residuum des Distanzvergleichs definiert wurde.

Tabelle 9.6 stellt das Ergebnis der Validierung mit dem Messverfahren der Multilateration dar. In dieser Tabelle sind die Distanzabweichungen an den 24 Messorten dargestellt. Die Distanzabweichungen in den drei Ebenen liegen alle unter $10 \mu\text{m}$. Die Distanzabweichung über alle 24 Messorten liegt bei der Validierung bei $-1,226 \mu\text{m} \pm 7,678 \mu\text{m}$ und somit im Rahmen des Residuums der Kalibrierung ($R_D = 0,038 \mu\text{m} \pm 7,324 \mu\text{m}$; siehe Tabelle 9.4).

Tabelle 9.7 zeigt das Ergebnis der Validierung mit dem Messverfahren der Triangulation. Auch hier zeigen die Distanzabweichungen an den drei Ebenen im Vergleich zu dem Residuum der Kalibrierung (siehe Tabelle 9.5) keinen großen Unterschied. Mit dem kalibrierten Parametersatz liegt die Distanzabweichung über allen 24 Messorten bei $2,828 \mu\text{m} \pm 35,231 \mu\text{m}$. Zur Erinnerung: Das Residuum bei der Kalibrierung liegt bei $7,121 \mu\text{m} \pm 39,503 \mu\text{m}$. Somit ist die zweifache Standardabweichung bei der Validierungsmessung um etwa $5 \mu\text{m}$ kleiner als bei der Kalibrierung. Abbildungen 9.12 und 9.13 veranschaulichen die Distanzabweichungen an den 24 Messorten.

Tabelle 9.6: Distanzabweichung bei der Validierungsmessung an den 24 Messorten unter Verwendung des Messverfahrens der Multilateration

$e_D = (\bar{e}_D \pm 2 \cdot \sigma_D) / \mu\text{m}$					
E1		E2		E3	
P1	$-1,312 \pm 4,751$	P9	$-1,224 \pm 3,040$	P17	$-1,126 \pm 2,757$
P2	$-2,36 \pm 5,504$	P10	$-1,442 \pm 3,043$	P18	$-0,751 \pm 2,759$
P3	$-2,389 \pm 5,341$	P11	$-1,391 \pm 3,296$	P19	$-2,040 \pm 4,841$
P4	$-1,585 \pm 3,452$	P12	$-3,647 \pm 7,128$	P20	$-3,575 \pm 12,424$
P5	$-2,006 \pm 4,974$	P13	$-0,720 \pm 7,010$	P21	$-1,178 \pm 6,370$
P6	$-2,711 \pm 9,300$	P14	$0,878 \pm 4,248$	P22	$1,520 \pm 5,810$
P7	$-1,947 \pm 7,071$	P15	$1,507 \pm 5,666$	P23	$-0,135 \pm 4,381$
P8	$-1,042 \pm 3,886$	P16	$-3,669 \pm 8,033$	P24	$-2,323 \pm 15,867$
$\sum_{P1}^{P8} : -1,919 \pm 5,848$		$\sum_{P9}^{P16} : -1,213 \pm 6,478$		$\sum_{P17}^{P24} : -1,201 \pm 8,612$	
$\sum_{P1}^{P24} : -1,226 \pm 7,678$					

Tabelle 9.7: Distanzabweichung bei der Validierungsmessung an den 24 Messorten unter Verwendung des Messverfahrens der Triangulation

$e_D = (\bar{e}_D \pm 2 \cdot \sigma_D) / \mu\text{m}$					
E1		E2		E3	
P1	$-3,516 \pm 36,125$	P9	$-10,627 \pm 32,266$	P17	$-4,678 \pm 21,042$
P2	$-3,425 \pm 13,838$	P10	$-6,89 \pm 12,973$	P18	$-5,920 \pm 13,194$
P3	$1,220 \pm 27,577$	P11	$-0,196 \pm 24,941$	P19	$-2,109 \pm 13,033$
P4	$9,910 \pm 62,088$	P12	$7,455 \pm 44,119$	P20	$-3,929 \pm 33,604$
P5	$9,853 \pm 50,043$	P13	$2,405 \pm 42,443$	P21	$4,604 \pm 40,605$
P6	$9,421 \pm 38,529$	P14	$4,670 \pm 18,954$	P22	$8,804 \pm 27,404$
P7	$7,068 \pm 30,453$	P15	$9,013 \pm 17,651$	P23	$6,179 \pm 27,734$
P8	$13,338 \pm 34,415$	P16	$11,701 \pm 33,057$	P24	$3,495 \pm 39,630$
$\sum_{P1}^{P8} : 5,484 \pm 40,567$		$\sum_{P9}^{P16} : 2,194 \pm 33,351$		$\sum_{P17}^{P24} : 0,806 \pm 30,436$	
$\sum_{P1}^{P24} : 2,288 \pm 35,231$					

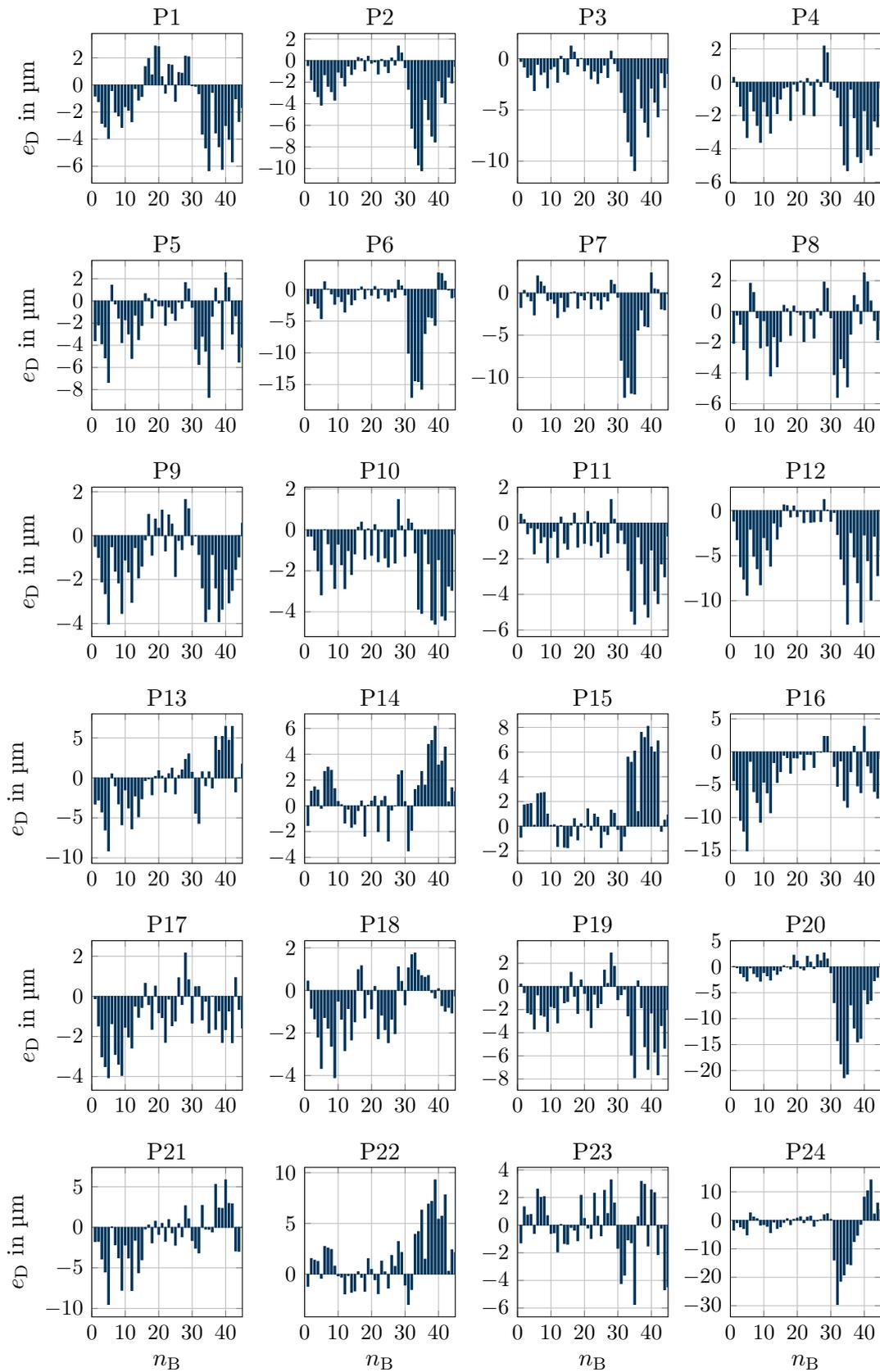


Abbildung 9.12: Distanzabweichung e_D bei der Validierung unter Verwendung des Messverfahrens der Multilateration

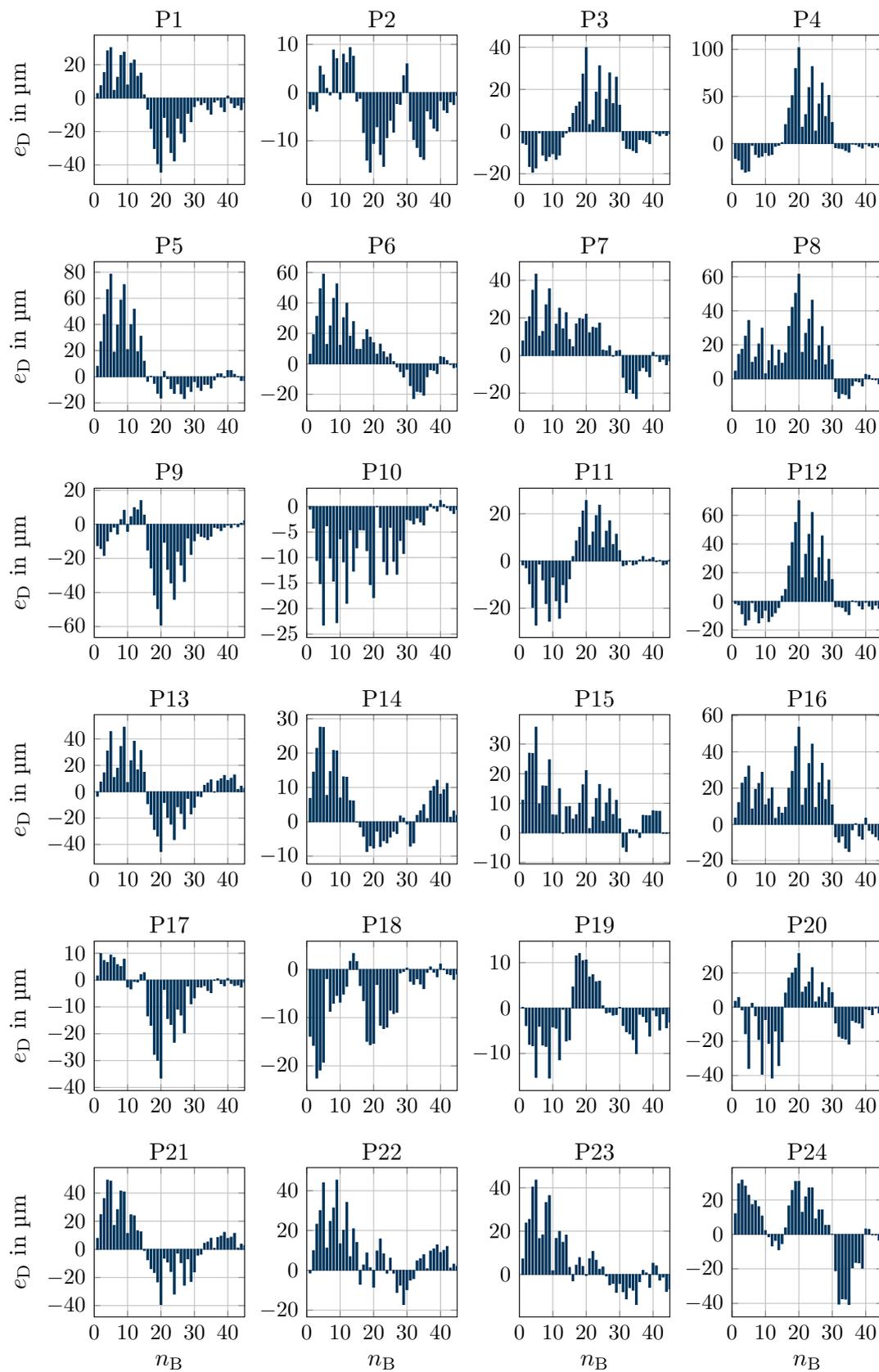
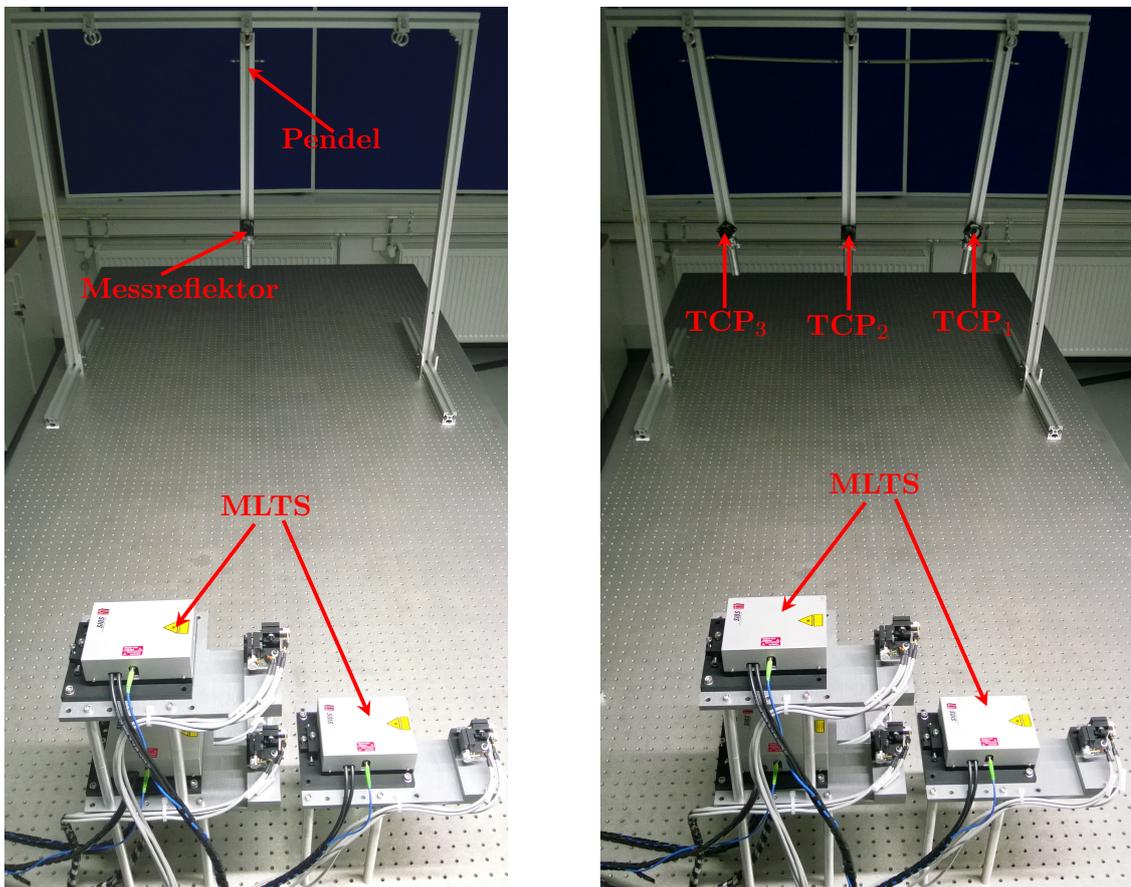


Abbildung 9.13: Distanzabweichung e_D bei der Validierung unter Verwendung des Messverfahrens der Triangulation

9.6 Leistungsfähigkeit der Algorithmen

In diesem Abschnitt soll die Leistungsfähigkeit der in den vorherigen Kapiteln entwickelten Algorithmen hinsichtlich der Dynamik und der Präzision an mehreren beweglichen Messobjekten gezeigt werden. Die dazugehörigen experimentellen Aufbauten sind in Abbildung 9.14 dargestellt. Für den ersten Test soll das MLTS einen an einem freibeweglichen Pendel angebrachten Messreflektor autonom finden, diesen dann verfolgen und gleichzeitig dessen 3-D-Koordinaten messen (siehe Abbildung 9.14a). Für den zweiten Test soll das MLTS gleichzeitig mehrere bewegliche Messobjekte (TCP_1 , TCP_2 , TCP_3) verfolgen und von einem TCP zum andern im dynamischen Betrieb wechseln (siehe Abbildung 9.14b). Im Folgenden werden die experimentellen Untersuchungsergebnisse an den Aufbauten vorgestellt.



(a) Aufbau zum Test der Kommunikation und der Dynamik

(b) Aufbau zum Test der Dynamik in Kombination mit der Präzision

Abbildung 9.14: Experimenteller Aufbau zur Bewertung der Algorithmen; Im Vordergrund: Das MLTS mit den Trackermodulen T_1 bis T_4 ; Im Hintergrund: Das bewegliche Pendelsystem sowohl mit einem Pendel, als auch mit drei Pendeln

9.6.1 Test der Lokalisierung und Kommunikation

In Kapitel 5 wurde bereits erläutert, dass ein Suchalgorithmus in Form einer Spirale zur Lokalisierung verwendet wird. Darüber hinaus ist eine Kommunikation zwischen den Trackermodulen aufgebaut, sodass eine beschleunigte Suche stattfinden kann. Für die Lokalisierung wird ein Zustand ($T_i u_{\text{Sum}}$, $i = 1 \dots 4$) in Abhängigkeit des Summensignals der 4QD eingeführt, welcher angibt, ob der Laserstrahl des Trackermoduls sich außerhalb ($T_i u_{\text{Sum}} = 0$) oder innerhalb ($T_i u_{\text{Sum}} = 1$) des Messreflektors befindet. Jedes Trackermodul sucht in einer Suchzeit von 10 s zunächst den Messreflektor (siehe Abbildung 9.14a) autonom in seinem Arbeitsbereich. In Abbildung 9.15 ist der Zustandsverlauf der vier Trackermodule während der Suchzeit von 4 s bis 8 s dargestellt. Es ist zu sehen, dass $T_1 u_{\text{Sum}}$ nach etwa 5,1 s auf 1 springt. Nach ungefähr 6,7 s wird auch $T_2 u_{\text{Sum}}$ 1. Zu diesem Zeitpunkt wird die Kommunikation des MLTS eingeschaltet und diese teilt die globale TCP-Position an den noch nicht gefundenen Trackermodulen weiter. Es ist zu erkennen, dass die Zustände von $T_3 u_{\text{Sum}}$ und $T_4 u_{\text{Sum}}$ im gleichen Zeitpunkt wie $T_2 u_{\text{Sum}}$ 1 wechseln. Dies zeigt deutlich, dass der entwickelte Algorithmus sehr effizient ist und die Suchzeit während der Lokalisierungsphase verkürzt.

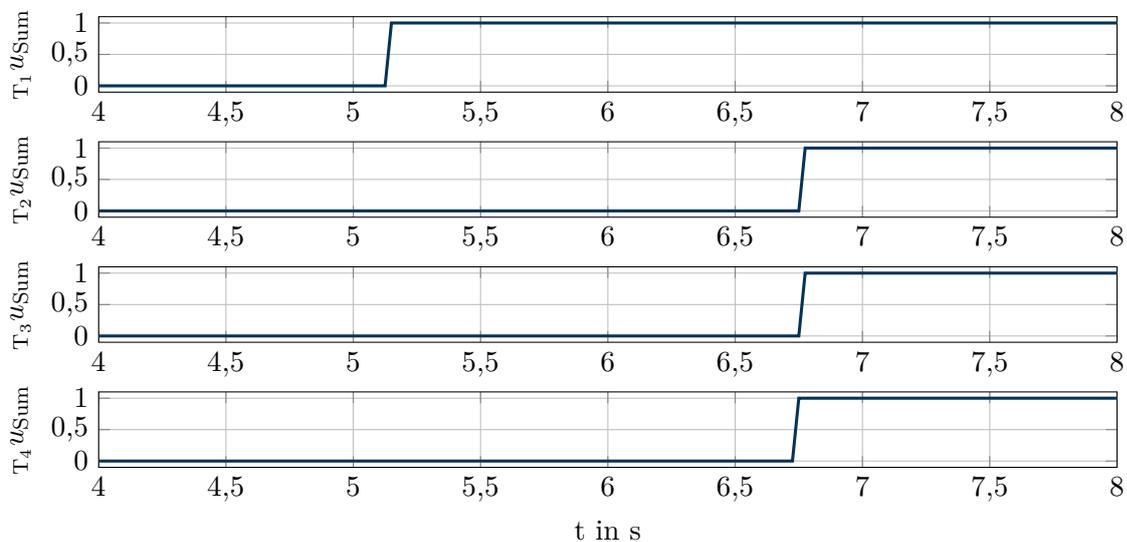


Abbildung 9.15: Zustandssignal der Trackermodule bei der Lokalisierung mithilfe der Kommunikation

9.6.2 Test der Dynamik

In Kapitel 6 wurde für die Verfolgung des Messreflektors ein modellbasierter Regler mit Störgrößenaufschaltung (SGA) entworfen, welcher aus zwei dezentralen Regelkrei-

sen besteht. Dabei wurde gezeigt, dass das Trackermodul ein Messobjekt mit einer Verfahrgeschwindigkeit von $0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ verfolgen kann, wobei die von einem externen Sensor gemessene Geschwindigkeitsinformation zur Störgrößenaufschaltung zurückgeführt wurde. Dadurch konnte der in der 4QD entstehende Regelfehler deutlich verkleinert werden. In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, dass die Verfahrgeschwindigkeit des Messreflektors aus der vom Trackermodul gemessenen TCP-Position abgeleitet werden kann und diese dann zur Störgrößenaufschaltung verwendet wird (siehe Abbildung 9.14a). Hierzu wird die TCP-Position des Messreflektors über das Messverfahren der Triangulation berechnet. Aus der gemessenen TCP-Position wird durch zeitlich diskrete Differenzierung die Verfahrgeschwindigkeit ermittelt. Die hierzu benötigten Transformationsschritte von 3-D- auf 1-D-Koordinaten sind [7] zu entnehmen. In Abbildung 9.16a ist der Verlauf der Verfahrgeschwindigkeit des Messreflektors bei der Pendelbewegung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die maximale Amplitude

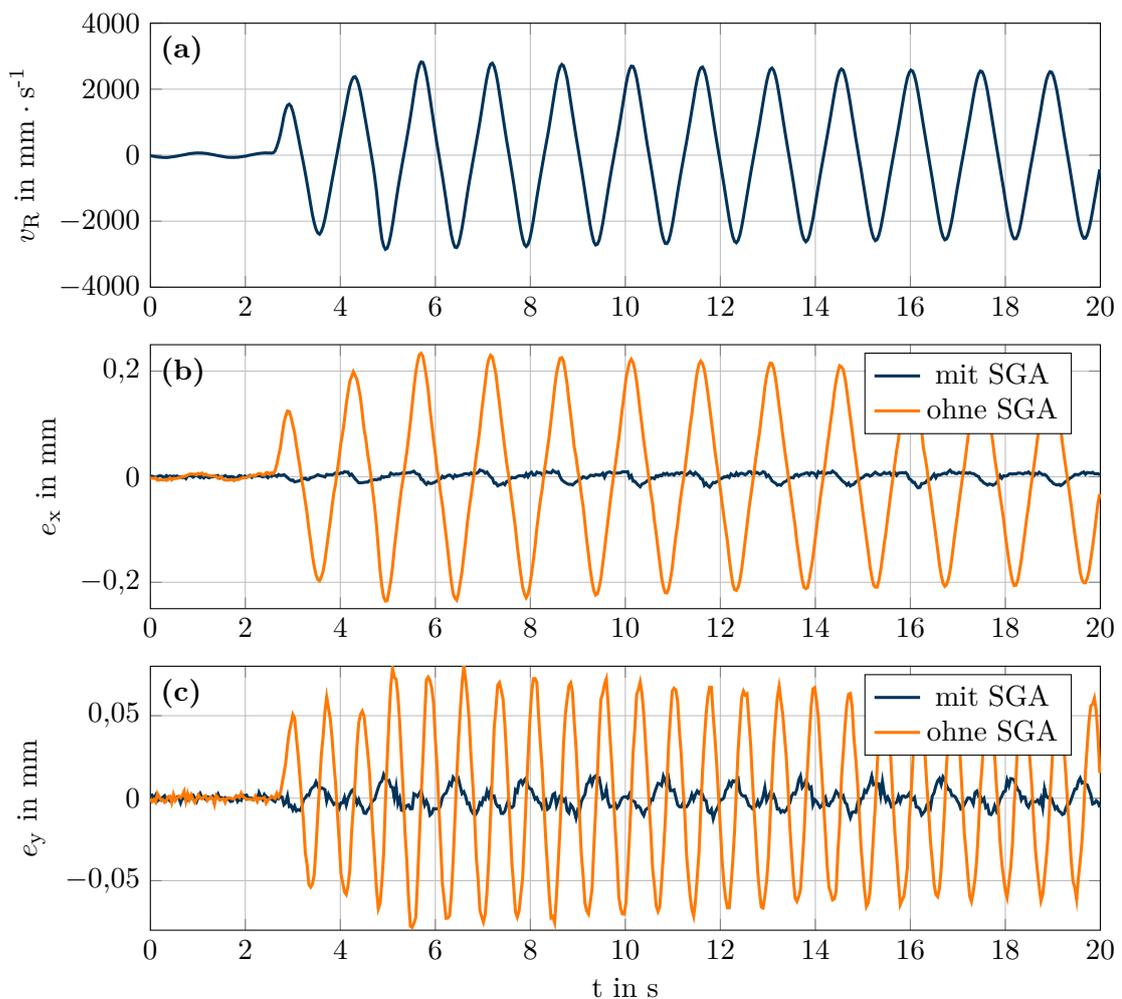


Abbildung 9.16: Signalverlauf bei Test der Dynamik; (a) Der aus der Positionsberechnung abgeleitete Geschwindigkeitsverlauf des Messreflektor; (b) Regelfehler der x_{4QD} -Achse; (c) Regelfehler der y_{4QD} -Achse

der Geschwindigkeit etwa $\pm 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ beträgt. Die Geschwindigkeitsinformation des Messreflektors wird in das Koordinatensystem der 4QD transformiert, welche dann zur SGA verwendet wird. Die Abbildungen 9.16b und 9.16c veranschaulichen den Regelfehler in der 4QD mit und ohne SGA. Es ist zu erkennen, dass der Regelfehler durch das zurückgeführte Geschwindigkeitssignal deutlich reduziert wird. Bei der $x_{4\text{QD}}$ -Achse beträgt der Maximalwert des Regelfehlers mit der Störgrößenaufschaltung rund $\pm 0,015 \text{ mm}$ und ist somit um etwa Faktor 15 kleiner als bei der Regelung ohne SGA. Auch bei der $y_{4\text{QD}}$ -Achse konnte der Regelfehler um Faktor 5 verringert werden.

9.6.3 Test der Dynamik und der Präzision

In diesem Abschnitt soll die Kombination aus erreichbarer Dynamik und Präzision des MLTS gezeigt werden. Dabei soll das MLTS drei bewegliche Messreflektoren (TCP_1 , TCP_2 , TCP_3) gleichzeitig verfolgen und messen. Abbildung 9.14b zeigt den erweiterten Versuchsaufbau. Zur Initialisierung zeigen zunächst T_1 sowie T_3 auf TCP_1 und T_2 sowie T_4 auf TCP_2 . Dadurch ist eine Berechnung der TCP-Position mit dem Messverfahren der Triangulation für TCP_1 und TCP_2 möglich. Anschließend suchen T_3 und T_4 durch Stellgrößenvorgabe den Messreflektor TCP_3 . Nach der Lokalisierung wird dessen Position durch T_3 und T_4 berechnet. Somit kann jedem Trackermodul ein Messreflektor zugewiesen werden, dessen TCP-Position in einem globalen Koordinatensystem berechnet und an die Kommunikation weitergeleitet wird.

Um die Dynamik und die Präzision des MLTS zu zeigen, soll das Trackermodul T_4 im Abstand von 1 s über die Information der Kommunikation von einem Messreflektor zum anderen in einer geordneten Reihenfolge wechseln. Bei dieser Untersuchung schwingen die Messreflektoren um ihre Ruhelage. Dabei verfolgen T_1 den Messreflektor TCP_1 , T_2 den Messreflektor TCP_2 und T_3 den Messreflektor TCP_3 . Abbildung 9.17 veranschaulicht die Stellgrößenverläufe der Trackermodule ($_{T_1}u_S$, $_{T_2}u_S$ und $_{T_3}u_S$) von 0 s bis 5,5 s am jeweiligen Messreflektor. Es ist bei allen drei Messreflektoren zu erkennen, dass die Auslenkung des x-Scanners deutlich größer ist als die des y-Scanners. Ebenso ist das unterschiedliche Frequenz- und Amplitudenverhalten der drei Messreflektoren zu sehen.

In Abbildung 9.18 ist der Signalverlauf von T_4 dargestellt, welcher bei dieser Untersuchung von TCP_3 über TCP_2 auf TCP_1 und in umgekehrter Reihenfolge zurück springen soll. Abbildung 9.18a zeigt den Verlauf des Zustandssignals vom T_4 beim

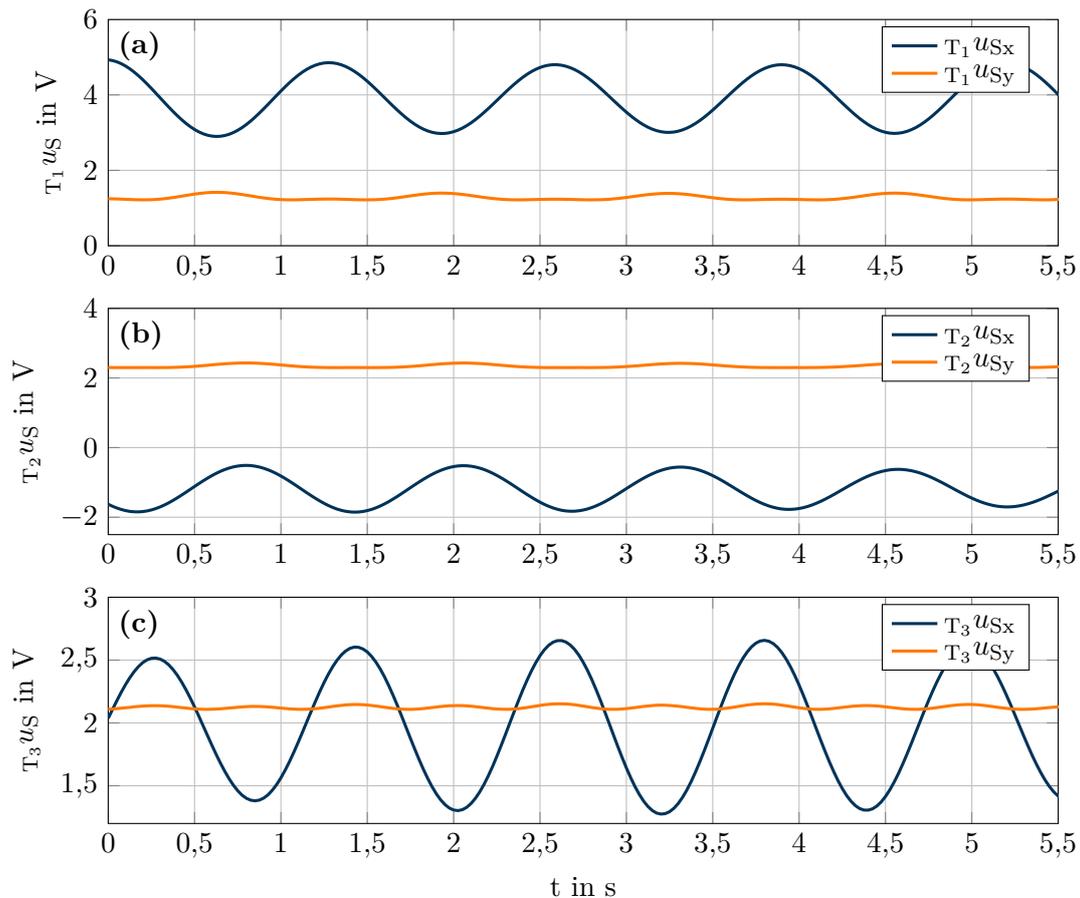


Abbildung 9.17: Stellgrößenverläufe der Trackermodule bei der Verfolgung der drei Messreflektoren; (a) T_1 am TCP₁; (b) T_2 am TCP₂; (c) T_3 am TCP₃

TCP-Wechsel von 0 s bis 5,5 s. Es ist zu erkennen, dass der Zustand zum Zeitpunkt des TCP-Wechsels kurz auf 0 zurück geht und innerhalb von 10 ms wieder auf 1 springt. In Abbildung 9.18b sind die Stellgrößen des Galvanometer-Scanners von T_4 beim geordneten TCP-Wechsel dargestellt. Dabei zeigen die Stellgrößen zum Zeitpunkt des TCP-Wechsels eine sprunghafte Änderung. Auch zu sehen sind die Stellgrößenänderungen innerhalb der Verweildauer am jeweiligen TCP. Dies zeigt deutlich, dass der Laserstrahl gezielt von einem TCP zum andern in kürzester Zeit wechseln kann, da einerseits die Trackermodule hinreichend dynamisch sind und andererseits die Positionsbestimmung mit nur einem Trackermodul sowie die Kommunikation so genau ist, dass ein schneller gezielter Wechsel des Messreflektors möglich ist.

Die experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass sich das entwickelte MLTS sowohl durch seine hohe Dynamik als auch seine hohe Genauigkeit auszeichnet. Es kann gleichzeitig die TCP-Position mehrerer Kinematiken in einem großen Arbeits-

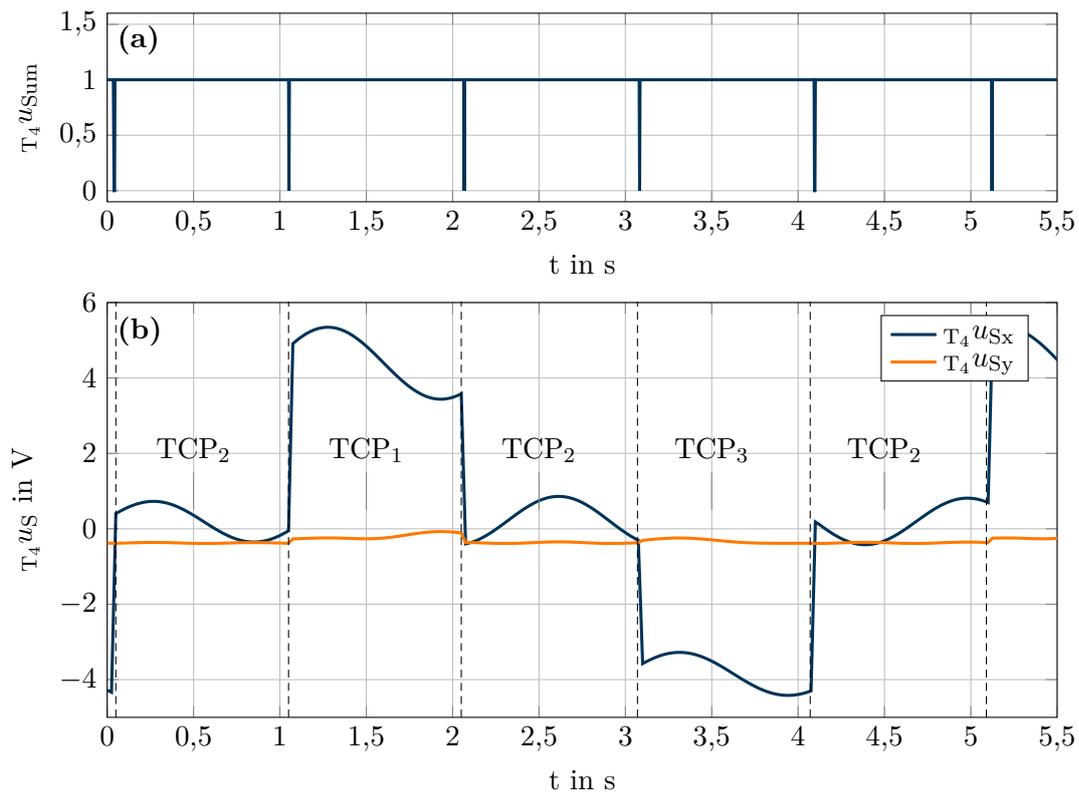


Abbildung 9.18: Signalverlauf des T_4 bei geordneten TCP-Wechsel; **(a)** Verlauf des Zustandssignals von T_4 ; **(b)** Der Verlauf der Stellgrößen von T_4 beim sprunghaften TCP-Wechsel

bereich global messen und ggf. von einem TCP zum anderen springen. So kann der zu verfolgende Messreflektor bei einem plötzlichen Strahlabbruch oder bei einem Ausfall eines Trackermoduls weiterhin durch ein anderes Trackermodul verfolgt und gemessen werden. Das MLTS als übergeordnetes 3-D-Messsystem ist hervorragend für dynamische Anwendungen in einem Automatisierungsprozess geeignet. Ein mögliches Szenario für einen Einsatz des MLTS in einem Automatisierungsprozess wird im Ausblick beschrieben.

10 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde erstmalig das Konzept eines Multi-Lasertracker-Systems mit Interferometern und Galvanometer-Scannern sowohl durch Anwendung des Messverfahrens der Triangulation als auch der Multilateration realisiert. Das entwickelte optische Messsystem besteht aus vier Trackermodulen und ist in der Lage, die 3-D-Koordinaten mehrerer Messobjekte in einem globalen Koordinatensystem mit sehr hoher Präzision berührungslos zu messen.

In Kapitel 2 wurde auf den komplexen Aufbau eines Lasertracker-Systems, insbesondere die elementaren mechatronischen und optischen Komponenten, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, eingegangen. Der Überblick über die auf dem Markt etablierten Lasertracker-Systeme zeigt, dass die kommerziellen Lasertracker-Systeme aufgrund der hohen Anschaffungskosten und der Überdimensionierung in ihrem Aufbau als 3-D-Positionssensor für hoch-dynamische Anwendungen in einem geschlossenen Regelkreis nicht geeignet sind.

In Kapitel 3 wurden die Ziele für diese Arbeit erstellt und das zu entwickelnde MLTS spezifiziert. Die Aufgabenschwerpunkte lagen zum einen im Aufbau eines Multisensorsystems und dessen Signalverarbeitungshardware für die experimentellen Untersuchungen und zum anderen im Entwurf der notwendigen Algorithmen für die Lokalisierung des Messobjektes, die Regelung der Strahlnachführung, die Berechnung der TCP-Position und die Kalibrierung sowohl für ein Trackermodul als auch für das MLTS.

In Kapitel 4 wurde detailliert auf den experimentellen Aufbau des Gesamtsystems eingegangen, welcher aus verschiedenen modularen Komponenten zusammengesetzt ist und sich besonders durch seine kompakte Bauweise, geringen Abmessungen, hohe Messauflösung sowie hohe Dynamik auszeichnet.

Der Fokus des 5. Kapitels war der Entwurf eines Algorithmus zur Lokalisierung des Messreflektors. Drei verschiedene Suchstrategien (Rechteck-, Spiral- und Zufallssuche) wurden hinsichtlich der Suchdauer sowie der Belastung der Drehantriebe untersucht und gegenübergestellt. Dabei stellt die Suchspirale den besten Kompromiss zwischen

geringer Belastung der Drehantriebe sowie gleichmäßiger Suchpunktverteilung im Raum dar. Der Nachteil des wachsenden Abstands zwischen den Abtastpunkten mit zunehmender Entfernung wurde durch die Erweiterung des Algorithmus um einen Phasen- und einen Zeitversatz behoben. Der Algorithmus ersetzt hierbei das am Aufbau fehlende Kamerasystem und ermöglicht dem Trackermodul die Lokalisierung des Messreflektors autonom im gesamten Arbeitsraum. Im zweiten Teil dieses Kapitels wurde auf den Kommunikationsalgorithmus zwischen den Trackermodulen eingegangen. Dieser ermöglicht eine beschleunigte Lokalisierung des Messreflektors bei Nutzung aller vier Trackermodule. Sobald zwei Trackermodule den Messreflektor gefunden haben, wird mittels Triangulation die TCP-Position des Messreflektors im globalen Koordinatensystem berechnet. Durch eine Koordinatentransformation und den mithilfe eines inversen Strahlengangmodells berechneten Stellgrößen können sich die verbliebenen Trackermodule direkt auf den Messreflektor ausrichten. Die experimentellen Ergebnisse in Kapitel 9 zeigen, dass die Suchdauer des MLTS durch die Kommunikation deutlich verkürzt wurde.

Hauptbestandteil des 6. Kapitels war die Modellierung der Gesamtstrecke und der Entwurf der Strahlnachführregelung. Um einen geeigneten Regler hinsichtlich der Stabilität sowie der Dynamik entwerfen zu können, wurden die Komponenten der Regelstrecke wie die Treiberelektronik des Galvanometer-Scanners, der Strahlengang vom Ablenkspiegel bis zum Zentrum des Messreflektors sowie die Bewegung des Messreflektors modelliert.

Darauf aufbauend erfolgte der analytische Reglerentwurf. Ein linearer zeitdiskreter Regler mit Ausgangsrückführung, dessen Parameter modellbasiert mit der Methode der Polvorgabe berechnet werden, wurde zur Regelung der Strahlnachführung verwendet. Mit dem entworfenen Regler konnte der Regelfehler im stationären Zustand vollständig beseitigt werden. Jedoch verbleibt bei einer Bewegung des Messreflektors ein Regelfehler, welcher proportional zur Verfahrgeschwindigkeit des Messobjektes wächst. Um die Stabilität des Regelkreises im dynamischen Betrieb zu gewährleisten, wurde die Erhöhung der Abtastzeit und die Störgrößenaufschaltung zur Reduzierung des Regelfehlers vorgeschlagen. Die experimentellen Untersuchungen in diesem Kapitel haben gezeigt, dass beide Methoden zu einer Verbesserung der Regelgüte im dynamischen Betrieb beitragen. Hierbei konnte ein Messobjekt mit einer Verfahrgeschwindigkeit von bis zu $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sicher verfolgt werden. Bei der Störgrößenaufschaltung wird jedoch vorausgesetzt, dass die Verfahrgeschwindigkeit des Messobjektes zu jedem beliebigen Zeitpunkt messbar ist. Dies ist in der Praxis nicht immer der Fall. Daher wurde in Kapitel 9 die Verfahrgeschwindigkeit des Messobjektes aus der vom Trackermodul berechneten TCP-Position abgeleitet und

für die Störgrößenaufschaltung verwendet.

In Kapitel 7 wurden die 3-D-Messverfahren der Triangulation und der Tri- bzw. Multilateration vorgestellt. Neben der Herleitung der TCP-Berechnungsmodelle wurden in diesem Kapitel die Beziehungen zwischen den Koordinatensystemen erläutert und der Messbereich sowohl für ein Trackermodul als auch für das gesamte MLTS untersucht. Es wurde ein TCP-Berechnungsmodell, welches den Strahlverlauf vom Laserursprung bis zum Zentrum des Messreflektors beschreibt, mithilfe der analytischen Geometrie in Abhängigkeit der Systemparameter hergeleitet. Dabei wurde die Abweichung, welche durch die zusätzliche interferometrische Längenmessung aufgrund von sich ändernden Auftreffpunkten auf den Spiegeln verursacht wird, korrigiert. Das Problem der unbekanntem Initiallänge wurde durch redundante Messungen, unter Anwendung des Messverfahrens der Triangulation, mithilfe eines zweiten Trackermoduls gelöst. Durch das zweite Trackermodul steigt auch die Anzahl der Parameter überproportional, da außer den Systemparametern beider Trackermodule zusätzliche Transformationsparameter (Standort- und Orientierungsparameter) zwischen den Koordinatensystemen zu bestimmen sind.

Im Weiteren wurde in Kapitel 7 auf die Berechnung der TCP-Position durch die Längenmessungen (das Messverfahren der Tri- bzw. Multilateration) eingegangen, welches dem Messverfahren der Triangulation hinsichtlich der Genauigkeit deutlich überlegen ist. Unter Verwendung der drei Trackermodule (Trilateration) konnte kein eindeutiges TCP-Berechnungsmodell hergeleitet werden. Erst durch das Hinzufügen eines vierten Trackermoduls (Multilateration) zeigt das Messverfahren eine eindeutige Lösung in der Berechnung der 3-D-Koordinaten. Damit das Messverfahren der Multilateration auf das in dieser Arbeit entwickelte MLTS angewendet werden kann, musste das hergeleitete TCP-Berechnungsmodell modifiziert werden, damit dies sowohl die Änderung der Auftreffpunkte auf den Spiegeln als auch die dadurch verursachte interferometrische Längenänderung im Strahlengang berücksichtigt. Die Anwendung dieses Messverfahrens stellt den Hauptfokus dieser Arbeit dar und erfordert die Kenntnisse über die Initiallängen, die Transformationsparameter zwischen globalen und lokalen Koordinatensystem sowie aller Systemparameter der Trackermodule. Demnach ergeben sich bei der Anwendung des Messverfahrens der Multilateration für das MLTS insgesamt 69 Parameter, welche durch die in Kapitel 8 vorgestellte Kalibriermethoden identifiziert werden müssen.

Für ein Trackermodul sind insgesamt 12 Systemparameter sowie eine Initiallänge durch ein Kalibrierverfahren zu identifizieren. Dabei wurde das Distanzverfahren, welches auf dem Vergleich zwischen den vom Trackermodul und den von einem

3-D-Messgerät berechneten Punktabständen beruht, zur indirekten Identifikation der Parameter verwendet. Dadurch konnte eine Gütefunktion zur Optimierung der Parameter aufgestellt werden. Es konnte simulativ gezeigt werden, dass von einer guten Lösung der Zielfunktion nicht zwangsläufig auf die Korrektheit der dabei identifizierten Systemparameter geschlossen werden kann. Die Wahl der Startwerte ist also entscheidend für eine erfolgreiche Optimierung. Aus diesem Grund wurde eine neue Identifikationsmethode mithilfe eines 3-D-Messgerätes entwickelt, welche die Systemparameter auf Basis der analytischen Geometrie berechnet und als Startwerte für die Optimierung zur Verfügung stellt. Die entwickelte Methode ermöglicht eine direkte Berechnung aller Systemparameter und zeigt einen tiefen Einblick in das Systemverhalten des verwendeten Strahlablesystems. Die nichtlineare Winkelkennlinie der Galvanometer-Scanner, welche ebenfalls Einfluss auf die Längskorrektur hat, wurde durch 20 konstante Anstiege approximiert, welche dann gemeinsam mit den Systemparametern durch die Kalibrierung des Trackermoduls identifiziert werden. Im Weiteren wurde die Kalibrierung des MLTS unter Verwendung des modifizierten Messverfahrens der Multilateration untersucht, wobei mit einem Kalibriervorgang alle 69 Parameter identifiziert werden sollen. Dabei konnte der in der Literatur beschriebene Selbst-Kalibrieralgorithmus nicht erfolgreich angewendet werden. Die dabei aufgestellte Gütefunktion ist nicht ausreichend und eindeutig für die Schätzung der Parameter. Aus diesem Grund wurde eine weitere Kalibrierbedingung hinzugefügt, welche den Distanzvergleich zwischen den von einem Referenzmessgerät vorgegebenen Distanzen und den vom MLTS berechneten Distanzen darstellt. Die Simulation der Kalibrierung hat gezeigt, dass mit der modifizierten Gütefunktion eine Schätzung der 69 Parameter möglich ist. Dabei liegt die zweifache Standardabweichung des Distanzvergleichs im einstelligen μm -Bereich.

In Kapitel 9 wurde die Kalibrier- und Messergebnisse am experimentellen Aufbau gezeigt. Als Referenzmessgerät wurden drei Linearachsen verwendet. Alle vier Trackermodule wurden kalibriert, um die Systemparameter sowie die Parameter des Winkelmodells zu erhalten. Dabei lag das Residuum bei $-0,006 \mu\text{m} \pm 3,458 \mu\text{m}$. Anschließend wurden die Kalibrierergebnisse des MLTS mit dem Messverfahren der Multilateration an 24 Messorten in einem Messvolumen von $1000 \times 300 \times 1000 \text{ mm}^3$ demonstriert. Dabei wurde gezeigt, dass die Restabweichung der Längskorrektur mit der Entfernung der Trackermodule skaliert. Um den Einfluss zu kompensieren, wurde die Standortanordnung der Trackermodule verändert. Hierbei lag die zweifache Standardabweichung des Distanzvergleichs an den 24 gewählten Messorten bei rund $7 \mu\text{m}$. Bei der Kalibrierung des MLTS mit dem Messverfahren der Triangulation bei gleicher Anordnung lag die zweifache Standardabweichung bei rund $40 \mu\text{m}$. Mit einer

Validierungsmessung wurde gezeigt, dass die ermittelten Parameter allgemein gültig sind.

Zum Schluss dieses Kapitels wurde auf die Leistungsfähigkeit der Algorithmen eingegangen. Zudem konnte die Kommunikation zwischen den Trackermodulen erfolgreich getestet werden. Auch die geforderte Verfahrgeschwindigkeit des Messreflektors konnte mit $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ deutlich übertroffen werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Störgrößenaufschaltung auch bei Kinematiken ohne Geschwindigkeitssensor erfolgreich angewendet werden kann. Zuletzt wurde die Präzision des MLTS untersucht. Hierbei konnte das Trackermodul von einem Target zum anderen im dynamischen Betrieb springen. Dies zeigt somit deutlich, dass das aufgebaute MLTS die geforderte Dynamik in Kombination mit der Genauigkeit als Rückführsensor in einem geschlossenen Regelkreis erfüllt.

Ausblick

Echtzeitregelung eines Roboters ohne Winkelmessung

Wie bereits in der Einführung erläutert wurde, können berührungslose optische 3-D-Messsysteme als Positionssensor zur Echtzeitregelung von Robotern bzw. Werkzeugmaschinen verwendet werden. So kann in Zukunft das in dieser Arbeit entwickelte MLTS, welches sich durch seine Dynamik in Kombination mit hoher Genauigkeit auszeichnet, in einem geschlossenen Regelkreis integriert werden. Dies ermöglicht sogar bei der Regelung eines Roboters auf die präzise Winkelmessungen in den einzelnen Achsen zu verzichten. Die geometrischen Fehler in den Achsen haben dann keinen Einfluss auf die 3-D-Koordinaten des Endeffektors. Abbildung 10.1 veranschaulicht einen solchen Regelkreis. Wird ein Messreflektor am Endeffektor des Roboters angebracht, so kann das MLTS dessen Position mit sehr hoher Ge-

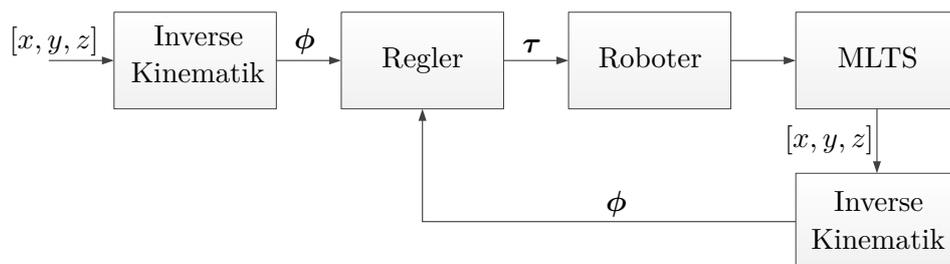


Abbildung 10.1: Regelung eines Roboters mit einem Trackermodul

nauigkeit messen. Ähnlich wie ein Mensch mit seinen Augen die Bewegung seines Arms kontrolliert, kann ein Roboter nur durch die Beobachtung der TCP-Position geregelt werden. Durch Einsatz der inversen Kinematik können die Messergebnisse des MLTS, also die TCP-Position, in die zugehörigen Gelenkwinkel umgerechnet werden. Mithilfe der berechneten Winkel kann ein Zustandsregler die Stellgröße aktualisieren. Zur Bahnplanung wird ebenfalls die inverse Kinematik eingesetzt, so dass die Soll-Trajektorie in kartesischen Koordinaten anstatt in Winkeln angegeben werden kann. Die ersten simulativen Ergebnisse zu dieser Studie zeigen, dass der Einsatz des MLTS vorteilhaft für die Genauigkeit des Roboters ist. Die ausführliche Arbeit zu diesem Thema ist [18, 59, 61] zu entnehmen.

Einsatz des MLTS in einem Automatisierungsprozess

Die Besonderheit des aufgebauten MLTS ist die hohe Dynamik in Kombination mit der hohen Genauigkeit bei gleichzeitigen Messungen mehrerer TCP-Positionen. Dies soll in Zukunft in der flexiblen Fertigungsautomatisierung als ein übergeordnetes 3-D-Messsystem eingesetzt werden. Ein mögliches Anwendungsszenarium für den Einsatz des MLTS in einem Automatisierungsprozess ist in Abbildung 10.2 dargestellt. Die Trackermodule werden am Rand des Arbeitsprozesses platziert, um die Position der Kinematiken wie Industrieroboter, Bearbeitungsmaschinen mit Werkzeugen, Flurförderfahrzeuge etc. zu messen. Hierbei kann der Arbeitsbereich des Automatisierungsprozesses flexibel gestaltet werden. Jedes Trackermodul ist zur Messung einer bestimmten Kinematik zugeordnet, welche sich im Arbeitsbereich beliebig bewegen soll. Dies kann aber auch flexibel gestaltet werden, so dass die Trackermodule von einem Ziel zum anderen wechseln sollen. Alle Trackermodule sind miteinander vernetzt und können die Position der Kinematiken in einem globalen Koordinatensystem untereinander austauschen. Durch diese Informationen kann eine flexible und präzise Ausrichtung der Maschinen untereinander mit deutlich verkürzten Rüstzeiten automatisiert erfolgen. Die Maschinen selbst sind somit auch durch das übergeordnete Messsystem miteinander vernetzt und sind so in der Lage, miteinander zu arbeiten. Dadurch können parallele Bearbeitungsprozesse für alle Maschinen entworfen werden. Die bisherige in einem Prozess angewendete Zykluszeit für jede Maschine kann aufgehoben werden, da alle Maschinen kontinuierlich durch das übergeordnete Messsystem geregelt werden. Dies ermöglicht eine flexible Produktion von Bauteilen bis zur Losgröße 1. Soll ein anderes Bauteil bearbeitet werden, so muss keine neue Ausrichtung der Maschinen zueinander erfolgen, es muss lediglich die spezifisch programmierte Ablaufsteuerung für dieses Bauteil verändert werden. Dies

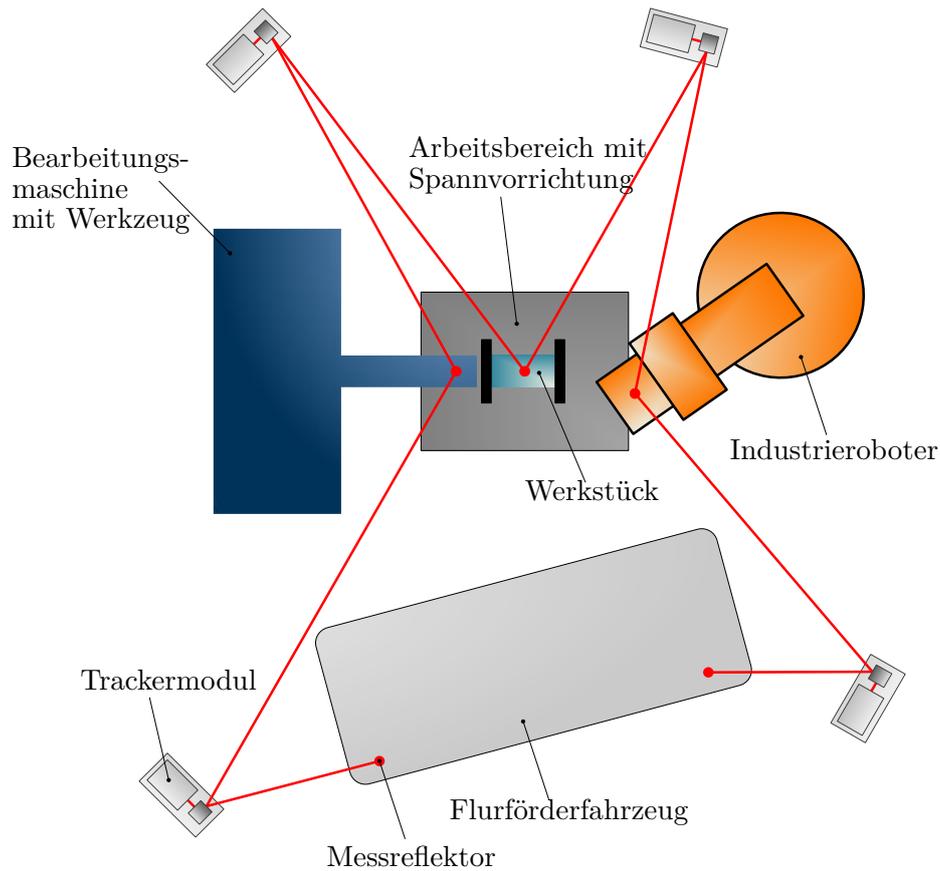


Abbildung 10.2: Einsatz des entwickelten MLTS in einem flexiblen Automatisierungsprozess

kann bereits beim Entwurf des Bauteils mitberücksichtigt werden. Somit können ohne Programmierungsaufwand an den einzelnen Maschinen unterschiedliche Bauteile nacheinander bzw. parallel mit höchster Präzision bearbeitet werden.

Das Anwendungsszenario zeigt, dass das hier entwickelte MLTS neue Lösungskonzepte in der Fertigungsautomatisierung bietet, welche der traditionellen Herangehensweise weitaus überlegen sind. Dies kann in Zukunft die Grundlage für die Vernetzung sowie die intelligente Kommunikation von leistungsstarken Multisensor- und Multiaktorsystemen in einer flexiblen „smarten“ Fabrik (SmartFactory) darstellen.

Literaturverzeichnis

- [1] AIRBUS: *A350 XWB*.
www.airbus.com, Abruf: 2013
- [2] AMTHOR, A. : *Modellbasierte Regelung von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen*.
Bd. 1179. Düsseldorf : VDI Verl, 2010
- [3] AUTOMATED PRECISION INC.: *Lasertracker*.
www.apisensor.com, Abruf: 2013
- [4] B+B THERMO-TECHNIK GMBH: *Feuchte-/Temperaturfühler*.
www.bb-sensors.com, Abruf: 19.11.2013
- [5] BOENSCH, G. ; POTULSKI, E. ; DECKER, J. E. ; BROWN, N. : Fit for Edlen formulae to measure values of the refractive index of air. In: *SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*, SPIE, 1998 (SPIE Proceedings), S. 62–67
- [6] BRIDGES R. ; HOFFER, J. M.: *Absolute distance meter that measures a moving retroreflector*. FARO Technologies, Inc. 2006. – Patentschrift
- [7] BRONSTEJN, I. N.: *Taschenbuch der Mathematik*. 8. Frankfurt am Main : Deutsch, 2012
- [8] BÜCHNER, H.-J. ; JÄGER, G. : A novel plane mirror interferometer without using corner cube reflectors. In: *Measurement science and technology* 17 (2006), Nr. 4, S. 746–752
- [9] BÜCHNER, H.-J. ; MANDRYKA, V. ; JÄGER, G. : Design and investigation of an optical standing-wave interferometer for displacement measurements. In: *Physics and applications of optoelectronic devices* (2004), S. 57–65
- [10] BÜCHNER, H.-J. ; STIEBIG, H. ; MANDRYKA, V. ; BUNTE, E. ; JÄGER, G. : An optical standing-wave interferometer for displacement measurements. In: *Measurement science and technology* 14 (2003), Nr. 3, S. 311–316
- [11] CAMBRIDGE TECHNOLOGY: *VMplus, Improved Third Generation Motors*.
www.camtech.com/index.php?option=com_content&view=article&id=

- 87&Itemid=75, Abruf: 2013
- [12] COOPER, M. A. R.: *Modern theodolites and levels*. BSP Professional Books, 1987
- [13] DEPENTHAL, C. : *Entwicklung eines zeitreferenzierten 4-D- Kalibriersystems für kinematische optische Messsysteme*. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2008
- [14] DONTSOV, D. ; SCHOTT, W. ; JÄGER, G. ; BÜCHNER, H.-J. ; GERHARDT, U. : Fibre-coupled homodyne interferometer for vibration analysis. In: *Photonics in measurement* (2004), S. 93–99
- [15] DONTSOV, D. : *Homodyninterferometer zur berührungslosen Schwingungsanalyse*. Ilmenau : Univ.-Bibliothek Ilmenau, 2003
- [16] DSPACE: *Produkte*.
www.dspace.com/de/gmb/home/products.cfm, Abruf: 2013
- [17] EDMUND OPTICS: *Aluminum Retroreflector*.
www.edmundoptics.de/optics, Abruf: 2013
- [18] EICHHORN, M. ; AMENT, C. ; NGUYEN, T. T.: Modelling of the 4-axis kinematic manipulator airarm driven by pneumatic muscle actuators. In: *2009 IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, S. 1301–1307
- [19] ELMIGER, A. ; CHAPERON, F. : *Geodätische Messtechnik*. ETH Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Departement Geodätische Wissenschaften, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, 1996
- [20] ETALON: *LaserTRACER*.
<http://www.etalon-ag.com/index.php/de/produkte/lasertracer>, Abruf: 18.10.2013
- [21] FANUC: *Industrieroboter*.
www.fanucrobotics.de, Abruf: 2013
- [22] FARO: *Lasertracker Vantage*.
www.faro.com, Abruf: 2013
- [23] FEINDT, E.-G. : *Regeln mit dem Rechner*. 2. München [u.a.] : Oldenbourg, 1994
- [24] FISCHER, G. : *Lineare Algebra*. 17. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010
- [25] FÖLLINGER, O. : *Optimale Regelung und Steuerung*. 3. München and Wien : Oldenbourg, 1994
- [26] FÖLLINGER, O. ; DÖRRSCHEIDT, F. ; KLITTICH, M. : *Regelungstechnik*. 8. Heidelberg : Hüthig, 1994

- [27] FÖRSTNER, G. : *Genauigkeit der optischen Streckenmessung mit Theodolit und Basislatte*. Verl. d. Bayer. Akad. d. Wissensch and Beck in Komm, 1955
- [28] GERHARDT, U. : *Signalverarbeitung in der interferenzoptischen Meß- und Sensortechnik*. ISLE, 1997
- [29] HAMAMATSU: *Si PIN photodiode*.
www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s5980_etc_kpin1012e04.pdf, Abruf: 24.02.2013
- [30] HARTWIG, G. : *Eigenschaftsvergleich verschiedener Materialien*. 1. Bad Saulgau : Leuze, 2008
- [31] HAUSOTTE, T. : *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen - Geräte für hochpräzise makro- bis nanoskalige Oberflächen- und Koordinatenmessungen*. Techn. Univ. Ilmenau, 2010. – Habilitation
- [32] HAUSOTTE, T. : *Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. Ilmenau : Verl. ISLE, 2002
- [33] HEXAGON METROLOGY: *Leica Absolute Tracker AT402*.
www.hexagonmetrology.de, Abruf: 2013
- [34] HYGROSENS INSTRUMENTS GMBH: *Drucksensormodul*.
www.hygroSENS.com
- [35] INDUSTRIEANZEIGER: *Ready for Kleb off*.
http://www.industrieanzeiger.de/automation/-/article/32571342/37533783/Ready-for-Kleb-off/art_co_INSTANCE_0000/maximized/
- [36] INGENSAND, H. : *Einführung in die geodätische Messtechnik*. Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie, 2010
- [37] INSTITUT FÜR MIKROSYSTEMTECHNIK: *IMTEK*.
www.imtek.de, Abruf: 07.10.2013
- [38] J. H. GILBY ; G. A. PARKER: Laser tracking system to measure robot arm performance. In: *Sensor Review* (1982), S. 180–184
- [39] JÄGER, E. : *Industrial Ethernet*. Heidelberg : Hüthig, 2009
- [40] KAM, L. ; HOCKEN, R. ; HAYNES L.: Robot performance measurements using automatic laser techniques. In: *Workshop on Robot Standards* (1985)
- [41] KINDER, T. : *Beiträge zur Absoluten Distanzinterferometrie mit variabler synthetischer Wellenlänge (VSW-ADI)*. Universität Greifswald, 2004. – Dissertation
- [42] KNIEL, K. : *Ein Beitrag zur Entwicklung eines laserinterferometrischen Trackingsys-*

- tems für die Genauigkeitssteigerung in der Koordinatenmesstechnik.* Bd. 53. Bremerhaven : Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss, 2007
- [43] KONDAXAKIS, P. ; KASDERIDIS, S. ; TRAHANIAS, P. : A multi-target tracking technique for mobile robots using a laser range scanner. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, S. 3370–3377
- [44] KONRADIN VERLAG R. KOHLHAMMER GMBH: *Laser Tracker korrigiert im Flugzeugbau die exakte Position von Robotern.*
www.qe-online.de/home/-/journal_content/56/12275/778651, Abruf: 08.08.2013
- [45] KRAUTSCHNEIDER, R. ; KELM, A. : Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Messsystems iGPS. In: *VDVmagazin* (2007), Nr. 3/07, S. 186–192
- [46] KRZYSZEK, P. : *Theoretische und experimentelle Genauigkeitsuntersuchungen für ein optisches Positionsmesssystem zur hochgenauen Vermessung von bewegten Objekten.* Bd. 363. Bayerische Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C.H. Beck, 1990
- [47] KUKA: *Knickarmroboter.*
www.kuka-robotics.com/de, Abruf: 12.08.2013
- [48] LUHMAN, T. : *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie.* Bd. 645. München : Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, 2010
- [49] LUHMANN, T. : *Nahbereichsphotogrammetrie.* Heidelberg : Wichmann, 2000
- [50] LUHMANN, T. : *Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis.* Heidelberg : Wichmann, 2002
- [51] LUNZE, J. : *Regelungstechnik 1.* 9. Berlin : Springer Berlin, 2012
- [52] MANDRYKA, V. : *Entwicklung, Aufbau und Untersuchung eines Stehende-Wellen-Interferometers.* Techn. Univ. Ilmenau, 2009. – Dissertation
- [53] MATERIALSGATE: *Erster Spatenstich: Neues Forschungszentrum für Faserverbundwerkstoffe in Stade.*
<http://www.materialsgate.de/de/msearch.html?display=news&search=faserverbundwerkstoffe>, Abruf: 28.02.2014
- [54] MATHWORKS: *Global Optimization Toolbox.*
<http://www.mathworks.de/de/products/global-optimization/>, Abruf: 10.03.2014
- [55] MATHWORKS: *Matlab/Simulink.*

- <http://www.mathworks.de/>, Abruf: 09.09.2013
- [56] MAYER, J. ; CLOUTIER, G. ; FORTIN, C. : Quadrilateration and measurement site identification with dual scanning axis laser tracking interferometers. In: *Measurement* 20 (1997), Nr. 3, S. 171–187. – ISSN 02632241
- [57] MAYER, J. ; PARKER, G. : A portable instrument for 3-D dynamic robot measurements using triangulation and laser tracking. In: *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* 10 (1994), Nr. 4, S. 504–516. – ISSN 1042–296X
- [58] MEIER, D. : *Verfahren und Messgerät zur Messung eines Absolutdistanzwertes*. Leica Geosystems AG. 2006. – Patentschrift
- [59] MEISTER, A. : *Anwendung von Multi-Lasertracker Systemen bei modellbasierter Mehrgrößenregelung eines seriellen Roboters durch Verwendung der inversen Kinematik*. Techn. Univ. Ilmenau, 2011. – Diplomarbeit
- [60] NATIONAL INSTRUMENTS: *PXI-Plattform*.
<http://www.ni.com/pxi/d/>, Abruf: 18.10.2013
- [61] NGUYEN, T. T. ; AMENT, C. ; EICHHORN, M. : A nonlinear control design of the 4-axis kinematic manipulator AirArm driven by pneumatic muscle actuators. In: *2009 IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, S. 2341–2347
- [62] NGUYEN, T. T. ; AMTHOR, A. ; AMENT, C. : High precision laser tracker system for contactless position measurement. In: *2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, S. 97–102
- [63] NGUYEN, T. T. ; AMTHOR, A. ; AMENT, C. : Communication of the multi laser tracker system used as position feedback sensor. In: *SPIE Eco-Photonics 2011*, SPIE Proceeding, 2011, S. 806512–806512–12
- [64] NGUYEN, T. T. ; AMTHOR, A. ; AMENT, C. : Algorithm for a high precision contactless measurement system. In: *ACTA IMEKO, The IMEKO Online Journal* 2 (2013), Nr. 2, S. 3–12
- [65] NGUYEN, T. T. ; AMTHOR, A. ; ZSCHAECK, S. ; LAMBECK, S. : Model based control of a linear stage using a contactless optical sensor system. In: *2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, S. 409–414
- [66] NGUYEN, T. T. ; NGUYEN, Q. T. ; AMTHOR, A. ; AMENT, C. : Control of a multi laser tracker system used as a position feedback sensor. In: *Proceedings of the IASTED International conference on Modelling, Identification and Control*, 2010, S. 132–137
- [67] NGUYEN, T. T. ; WEISS HEIKO ; AMTHOR, A. ; AMENT, C. : Identifikationsverfahren für optische Messsysteme. In: *GMA-Fachausschuss 1.30, Modellbildung, Identifikation und Simulation in der Automatisierungstechnik* (2013), S. 63–64

- [68] NGUYEN, T. T. ; AMTHOR, A. ; SPRINGER, M. ; AMENT, C. : Nonlinear modelling and identification of a high precision laser tracking system. In: *2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, 2012, S. 54–59
- [69] NIKON METROLOGY: *Produkte, iGPS*.
www.nikonmetrology.com/de_EU/Produkte, Abruf: 2013
- [70] PAPULA, L. : *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 4. Braunschweig : Vieweg, 2001
- [71] PEAKTECH: *Prüf- und Messtechnik*.
<http://www.peaktech.de/>, Abruf: 18.10.2013
- [72] PFEIFER, T. : *Fertigungsmesstechnik*. 2. Oldenbourg, 2001
- [73] PI MICOS: *Motion Control, Linear Stages*.
<http://www.pimicos.com/web2/en/1,0,000,mc.html>, Abruf: 2013
- [74] POLLINGER, F. ; MEINERS-HAGEN, K. ; ABOU-ZEID, A. : Absolutlängen mittels Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometrie. In: *PTP-Mitteilungen 120* (2010), Nr. 2, S. 105–109
- [75] PREMIUM AEROTEC: *Produkte, Flugzeugstrukturen*.
www.premium-aerotec.com/Flugzeugstrukturen.html, Abruf: 2013
- [76] RAHNEBERG, I. : *Untersuchungen zu optischen Mehrkomponentenmesssystemen*. 2013
- [77] RIETDORF, A. : *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*. Bd. 582. Verl. der Bayer. Akad. der Wiss., 2005
- [78] SCHILLING, R. J.: *Fundamentals of robotics*. Upper Saddle River and New Jersey : Prentice Hall, op. 1990
- [79] SCHULZ, G. : *Regelungstechnik*. Berlin : Springer, 1995
- [80] SIOS MESSTECHNIK GMBH: *Miniaturinterferometer*.
www.sios.de/DEUTSCH/PRODUKTE/SP_dt_2008.pdf, Abruf: 2013
- [81] SIOS MESSTECHNIK GMBH: *Stabilisierter He-Ne-Laser*.
www.sios.de/DEUTSCH/PRODUKTE/SL-02_dt_2007.pdf, Abruf: 2013
- [82] SPRINGER, M. : *Entwurf eines modellbasierten Zustandsreglers für ein Lasertrackermodul*. Techn. Univ. Ilmenau, 2012. – Bachelorarbeit
- [83] SPRINGER, M. : *Entwurf, Implementierung und Untersuchung eines Algorithmus zur Bestimmung des radialen Abstands zwischen einem Lasertrackermodul und einem*

- Retroreflektor*. Techn. Univ. Ilmenau, 2013. – Masterarbeit
- [84] TAKATSUJI, T. ; GOTO, M. ; KIRITA, A. ; KUROSAWA, T. ; TANIMURA, Y. : The relationship between the measurement error and the arrangement of laser trackers in laser trilateration. In: *Measurement Science and Technology* 11 (2000), Nr. 5, S. 477–483. – ISSN 0957–0233
- [85] TAKATSUJI, T. ; GOTO, M. ; KUROSAWA, T. ; TANIMURA, Y. ; KOSEKI, Y. : The first measurement of a three-dimensional coordinate by use of a laser tracking interferometer system based on trilateration. In: *Measurement Science and Technology* 9 (1998), Nr. 1, S. 38–41. – ISSN 0957–0233
- [86] TAKATSUJI, T. ; KOSEKI, Y. ; GOTO, M. ; KUROSAWA, T. : Restriction on the arrangement of laser trackers in laser trilateration. In: *Measurement Science and Technology* 9 (1998), Nr. 8, S. 1357–1359. – ISSN 0957–0233
- [87] TOLKS, C. : *Untersuchungen zur Bestimmung der dreidimensionalen Position eines Messobjektes durch ein berührungsloses Multi-Lasertracking Messsystem*. Techn. Univ. Ilmenau, 2011. – Diplomarbeit
- [88] UNBEHAUEN, H. : *Regelungstechnik*. 15. Wiesbaden : Vieweg + Teubner
- [89] VERLAG MODERNE INDUSTRIE GMBH: *Präzise durch Lasertracker*.
www.fertigung.de/2013/05/praezise-durch-lasertracker, Abruf: 2013
- [90] WACHTEN, C. : *Entwicklung eines Lasertrackersystems mit Galvanometerscanner zur 3D-Positionsbestimmung*. Bd. 4. Der Andere Verl, 2009
- [91] WALLACH, W. ; ALLEN, C. : *Moral machines*. Oxford : Oxford Univ. Press, 2009
- [92] WEILAND, F. : *Ultraschall-Preformmontage zur Herstellung von CFK- Luftfahrtstrukturen*. Kaiserslautern : Institut für Verbundwerkstoffe, 2013
- [93] WERLE, P. : *Verfahren zur Anordnung zur Absolutinterferometrie mit durch Diodenlaser erzeugter Strahlung*. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. 1995. – Patentschrift
- [94] WERNSTEDT, J. : *Experimentelle Prozessanalyse*. 1. Berlin : Verl. Technik, 1989
- [95] WURMUS, J. : *Stabilisierung von He-Ne-Lasern für die interferenzoptische Meßtechnik*. Ilmenau : ISLE, 2004
- [96] ZIMMERMANN, U. ; ORTWIG, H. : *Regelungstechnik für Ingenieure und Praktiker*. Aachen : Shaker, 2011