

**Beitrag zur Verbesserung der
Genauigkeitskenngrößen von Großmanipulatoren
im Mehrmedieneinsatz
mit Hilfe der digitalen Photogrammetrie**

vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Marc Bachmann
geboren am 20. April 1970 in Bremen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. Haferkamp
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H.-K. Tönshoff

Tag der Promotion: 06.01.2000

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstofftechnik der Universität Hannover.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. Haferkamp, dem Direktor des Institutes für Werkstoffkunde, gilt mein besonderer Dank für die Unterstützung und Förderung der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Gietzelt, dem Leiter des Instituts für Energietechnik, sei an dieser Stelle für die Leitung des Promotionsverfahrens gedankt. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. K. Tönshoff, dem Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und spanende Werkzeugmaschinen der Universität Hannover, für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des ersten Koreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Selenz, Mitglied des Vorstandes der Engineering + Design AG, danke ich für die Übernahme des zweiten Koreferates, für die freundliche fachliche und persönliche Unterstützung mit vielen sehr wertvollen Anregungen über den Umfang dieser Arbeit hinaus.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Fr.-W. Bach, dem Inhaber des Lehrstuhls für Werkstofftechnologie der Universität in Dortmund, in seiner früheren Funktion als Leiter des Bereiches Technologie der Werkstoffe am Institut für Werkstoffkunde, danke ich für die Anregung der Arbeit sowie für die fachliche Unterstützung.

Allen Mitarbeitern des Institutes für Werkstoffkunde, insbesondere der Fachgruppen Decomissioning und Mobile Systemträger danke ich für die konstruktiven Anregungen und die tatkräftige Unterstützung. Besonders hervorheben möchte ich meine Kollegen Reiner Schwieger und Matthias Blaschke und die wissenschaftlichen Hilfskräfte Hasso Tatter, Tobias Munko und Michael Seydel, die mit ihrem Einsatz entscheidend zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Freundin für ihr Verständnis und ihre große Unterstützung.

Abstract

Die Effizienz von Fertigungsprozessen hängt eng mit dem Grad ihrer Automatisierung zusammen. Die Automatisierung der Herstellung von Großkomponenten im Stahlbau, Schwermaschinenbau, Schiffbau und zukünftig in der Bauindustrie scheitert unter anderem an der Verfügbarkeit kostengünstiger Roboter mit ausreichenden Arbeitsräumen bei gleichzeitig hoher, durch den Fertigungsprozeß definierter Genauigkeit.

Vergleichbare Problemstellungen ergeben sich bei Fernhantierungsprozessen an großtechnischen Anlagen in extremer Umgebung. Hier wird erheblicher Aufwand getrieben, um die notwendigen Fernhantierungsgeräte mit der geforderten Genauigkeit auszustatten.

Dies gilt, wenn spezifische Handhabungsgeräte große Arbeitsräume abdecken sollen, auch Industrieroboter mit ihren vergleichsweise beschränkten Arbeitsräumen zeigen jedoch hinsichtlich ihrer Genauigkeitskenngrößen erhebliches Verbesserungspotential. Dies wird insbesondere dann bedeutsam, wenn die Handhabungsanwendung nicht am Objekt selbst eingelernt, sondern mit Hilfe von Offline-Techniken programmiert wird.

Hohe Anforderungen an die Genauigkeit und die Geschwindigkeit der Handhabungsaufgabe einerseits, der konstruktive Aufwand zur Verbesserung der Genauigkeit, zur Reduktion der Masse und die daraus entstehenden Kosten andererseits beschreiben den Zielkonflikt.

Am Beispiel eines neunachsigen Großmanipulators wird mit der Bereitstellung eines mathematischen Werkzeugs zur kinematischen Kalibrierung und durch den Einsatz der für großvolumige Arbeitsräume in fertigungstechnischer Umgebung fortentwickelten digitalen Photogrammetrie und der Rückkopplung daraus gewonnener, entkoppelter Positionswerte eine Lösung realisiert, die zur Verbesserung der Genauigkeitskenngrößen in für thermische Füge- und Trennverfahren ausreichender Beträge führt. Hierbei wird das photogrammetrische Meßsystem durch einen neuartigen Ansatz erweitert, der es ermöglicht die photogrammetrische Vermessung in Mehrmedienanwendungen, d.h. beispielsweise an Atmosphäre und unter Wasser sowie durch die bewegte Wasseroberfläche hindurch durchzuführen.

Schlagworte: Photogrammetrie, Mehrmedienphotogrammetrie, Fernhantierung, Manipulator, Roboter, Genauigkeit, Positionsgenauigkeit, Wiederholgenauigkeit

abstract

The efficiency of production processes is closely related to their degree of automation. The automation of production of large components in the areas of steel construction, heavy engineering, shipbuilding and soon in the building & construction industry fails among other things on the availability of cost-effective robots with sufficient workspace with a concurrent strong degree of accuracy defined by the requirements of the production process.

Comparable problems arise in the case of remote handling in technical facilities in an extreme environment. For this a significant effort is conducted to equip the necessary remote handling tools with the required accuracy.

This applies, when specific devices of handling tools have to cover large work areas, but even industrial robots with their comparatively limited workspaces show considerable potential for improvement in regard to their parameters of accuracy. This becomes particularly significant when the handling process is not taught on the object itself, but rather is programmed with the help of offline techniques. High demands on the accuracy and the speed of the handling process on one hand, the constructive effort for enhancement of the accuracy, for the reduction of mass and the consequential incurred costs on the other hand describe the conflict of objectives.

By the example of a large size manipulatorsystem with nine axis a solution is realized with the provision of a mathematical tool for kinematics calibration and by employment of digital photogrammetry, developed of the photogrammetric system for extensive work space in a industrial environment and the regeneration of the gained, decoupled position data, that leads to the improvement of the parameters of accuracy sufficient for use in thermal cutting and welding techniques. Here the photogrammetric system is extended by a new approach, that enables photogrammetry for applications through media boundaries i.e. between atmosphere and water and in addition through moving media boundaries as for example water waves.

keywords: photogrammetry, two media photogrammetry, remote handling, manipulator, roboter, accuracy

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung.....	1
2	Stand von Wissenschaft und Technik in der digitalen Photogrammetrie.....	4
2.1	Entwicklung der Photogrammetrie.....	4
2.1.1	Entwicklung der Mehrmedienphotogrammetrie.....	5
2.1.2	Abriß aktueller Anwendungen der Photogrammetrie.....	6
2.2	Mathematische und optische Grundlagen.....	7
2.2.1	Optische Abbildung.....	8
2.2.1.1	Modell der idealen optischen Abbildung.....	8
2.2.1.2	Reale optische Abbildung.....	8
2.2.2	Positionsbestimmung von Raumpunkten aus Stereobildern durch den räumlichen Vorwärtsschnitt.....	10
2.2.3	Digitale Bildmeßtechnik.....	12
2.2.3.1	Digitale Bildakquisition.....	13
2.2.4	Geometrische Kalibrierung und Orientierung.....	15
2.2.4.1	Einfluß innerer Effekte auf die geometrische Leistungsfähigkeit.....	16
2.2.4.2	Einfluß äußerer Effekte auf die geometrische Leistungsfähigkeit.....	17
2.2.5	Kameramodell.....	18
2.2.5.1	Kamerakonstante und Hauptpunktlage.....	18
2.2.5.2	Verzeichnung und Affinität.....	19
2.2.5.3	Einsatz der Bündelausgleichung zur Bestimmung von Kameraparametern.....	20
2.3	Hardwareprofil des verwendeten Photogrammetriesystems.....	21
2.4	Mehrmedien-Photogrammetrie.....	23
2.4.1	Unterteilung mehrmedienphotogrammetrischer Anordnungen.....	23
2.4.2	Brechungsmodell in der Zweimedien-Photogrammetrie.....	24
2.4.2.1	Modellvoraussetzungen.....	24
2.4.2.2	Brechungsmodell für die ebene Phasengrenze.....	24
2.4.2.3	Allgemeines Modell für gekrümmte Phasengrenzen.....	27
2.4.2.4	Auftreten mehrerer Brechungsbilder.....	31
2.4.3	Optische Eigenschaften des Wassers.....	31

3	Verfahrensentwicklung zur Mehrmedienphotogrammetrie bei dynamisch gekrümmter Phasengrenze	36
3.1	Objektpunktbestimmung bei ebener Grenzfläche	36
3.1.1	Strahlverfolgung zur Positionsbestimmung (ray-tracing)	37
3.1.2	Berücksichtigung der Brechung als radiale Verzeichnung	39
3.2	Objektpunktbestimmung bei gekrümmter Grenzfläche	40
3.2.1	Oberflächenmodellierung	40
3.2.2	Berechnung des Brechungspunktes an gekrümmten Oberflächen	42
3.2.3	Bestimmung der gebrochenen Bildvektoren.....	43
3.2.4	Verfahren zur Erfassung der Wasseroberfläche.....	44
3.2.5	Modell zur Oberflächenerfassung mittels direkter Reflexion	46
3.3	Meßaufbau zur Mehrmedienphotogrammetrie	48
3.3.1	Kalibrierung und Orientierung des Meßaufbaus.....	49
3.3.1.1	Bestimmung des Grenzflächenkoordinatensystems.....	49
3.3.1.2	Bestimmung der Anordnung der Lichtquellen.....	50
3.3.2	Ermittlung der Oberflächenparameter	51
3.3.2.1	Näherungsweise Ermittlung der Oberflächennormalen	52
3.3.2.2	Ermittlung der Oberflächenauslenkungen.....	53
3.3.2.3	Rekursive Parameterverbesserung	56
4	Manipulatorträgersystem (MTS)	57
4.1	Beschreibung des Manipulatorsystems in seinem Uraufbau.....	58
4.2	Beschreibung des Manipulatorsystems in seinem aktuellen Aufbau.....	59
4.3	Arbeitsraum des Großmanipulators.....	61
4.4	Untersuchung der Genauigkeit des Großmanipulators	62
4.4.1	Definition der Genauigkeitskenngößen	62
4.4.2	Bestimmung der Genauigkeitskenngößen durch Theodolitenmessungen	66
4.4.3	Kinematische Beschreibung des Systems	69
4.4.3.1	Klassifizierung der Fehlerursachen.....	73
4.4.3.2	Berücksichtigung der Dimensionierungsfehler.....	74
4.4.3.3	Berücksichtigung der Elastizität	75
4.4.3.4	Berücksichtigung von Getriebenachgiebigkeit und -spiel	76
4.4.3.5	Ermittlung des resultierenden Fehlers	77
4.4.4	Identifikation der kinematischen Parameter mittels FEM-Analyse	78
4.4.4.1	Stützen und Schienen.....	79
4.4.4.2	Brücke.....	80
4.4.4.3	Mast	82
4.4.4.4	Resultierende theoretische Genauigkeit.....	84
4.4.4.5	Folgerung.....	85

4.5	Qualifikation des Großmanipulators für den Unterwassereinsatz	86
4.6	Steuerungsarchitektur/ Steuerungsentwurf.....	88
4.6.1	Steuerungskonzepte für Industrieroboter	89
4.6.2	Marktgängige Systemarchitekturen	92
4.6.3	Beschreibung der MTS-Steuerung	94
4.6.4	Integration externer Sensorik	95
4.6.4.1	Hardwarezugang zur MTS-Steuerung	97
4.6.4.2	Softwarezugang	97
4.6.5	Ausblick auf Nutzung der Photogrammetriedaten zur Lageregelung des MTS	98
5	Anwendung des digitalen Photogrammetriesystems	99
5.1	Genauigkeitskenngrößen des Photogrammetriesystems	99
5.2	Anwendung des Photogrammetriesystems an Atmosphäre.....	99
5.2.1	Mobiler Nahbereichsmeßaufbau	99
5.2.1.1	Beschreibung des mobilen Nahbereichsmeßaufbaus	100
5.2.1.2	Bestimmung der erzielbaren Genauigkeit im mobilen Aufbau.....	101
5.2.2	Meßaufbau für erweiterten Arbeitsraum	104
5.2.2.1	Beschreibung des Meßaufbaus für erweiterten Arbeitsraum	104
5.2.2.2	Bestimmung der erzielbaren Genauigkeit.....	107
5.2.3	Weiterentwickelter Meßaufbau für erweiterten Arbeitsraum.....	111
5.3	Anwendung des photogrammetrischen Mehrmedienverfahrens	112
5.3.1	Beschreibung des Mehrmedienmeßaufbaus.....	112
5.3.2	Bestimmung der erzielbaren Genauigkeit	113
6	Inbetriebnahme des Gesamtsystems.....	116
6.1	Implementation des Photogrammetriesystems in die Robotersteuerung	116
6.1.1	Verbesserung der Positionsgenauigkeit auf der Basis rückgeführter Weltkoordinaten	117
6.1.2	Erhöhung der Positionsgenauigkeit auf der Basis rückgeführter Relativkoordinaten.....	120
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	122
8	Literatur.....	125

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
\bar{a}_G	Verschiebung K^* gegenüber dem Ursprung	
\bar{l}	LED-Position	
\bar{n}	Normalenvektor	
\bar{p}	Bildvektor	
\bar{d}	Ortsvektor des Gelenkes	
\bar{r}	Verbindungsvektor P_R - LED	
\bar{x}	Gegenstandsvektor zum Objekt	
$A_1 \dots A_3$	Polynomkoeffizienten der Verzeichnungskorrektur	
A_i	Transformationsmatrix	
a_j	Längenparameter der DH-Notation	[mm]
b	Bildweite	[mm]
B_1, B_2	Polynomkoeffizienten der Verzeichnungskorrektur	
b_{lin}, b_{rot}	Antriebs-, Getriebespiel	[mm], [°]
c	Objekt-Abstand zum Lot durch O	[mm]
C_1, C_2	Polynomkoeffizienten der Verzeichnungskorrektur	
c_i	nominelle Kamerakonstante	[mm]
c_K	berechnete Kamerakonstante	[mm]
c_M	Lichtausbreitungsgeschwindigkeit im Medium	[m/s]
d	Abweichung	[mm]
\bar{d}	Positionsgenauigkeit	[mm]
d_j	Längenparameter der DH-Notation	[mm]
d_{max}	maximale Positionsabweichung	[mm]
dr_{sym}	radialsymmetrische Verzeichnungskorrektur	[mm]
dx_{aff}, dy_{aff}	Affinitäts- und Nichtorthogonalitätskorrektur	[mm]
dx_{asy}, dy_{asy}	radialasymmetrische und tangentielle Verzeichnungskorrektur	[mm]
dx_{sym}, dy_{sym}	radialsymmetrische Verzeichnungskorrektur	[mm]
E	Elastizitätsmodul	[N/mm ²]
f	Brennweite	[mm]

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
F	Kraft	[N]
G	Transformationsmatrix Welt zur Grenzfläche	
g	Gegenstandsweite	[mm]
G_i	Transformationsmatrix Welt zur Tangentialebene	
h	Kamerahöhe bzw. Lichtquellenhöhe	[mm]
I	Flächenträgheitsmoment	[mm ⁴]
k	Blendenzahl	
k_G	Steifigkeit der Führungs- und Antriebselemente	[Nm/°], [N/mm]
k_x	Steifigkeitskoeffizient eines Gliedes	[1/Nmm ²]
l	Lichtquellenabstand	[mm]
l_1	Schienenhöhe des MTS	[mm]
l_2	Schienenspannweite des MTS	[mm]
l_b	Abstand der Brückenträger	[mm]
l_f	Radstand des Fahrwerks der Brücke	[mm]
l_{fk}	Radstand des Fahrwerks der Unterkatze	[mm]
l_j	Längenangabe der Manipulatorkinematik	[mm]
l_s	Abstand der MTS-Stützen	[mm]
m	Polynomgrad	
M	Moment	[Nm]
n_M	Brechungsindex eines Mediums	
n_W	Brechungsindex des Wassers	
p_i	Polynomkoeffizient	
P_S	Positionsstrebweite	[mm]
$P_{S,sum}$	summierte Positionsstrebweite	[mm]
q	generalisierte Koordinate	
q_j	variabler Parameter der DH-Notation	[mm]
r	Radialabstand eines Punktes zum Lot durch O	[mm]
r_0	Parameter der Verzeichnungskurve	
s	Standardabweichung	[mm]
S	Salzgehalt	[‰]
T	Temperatur	[°C]

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
t	Wassertiefe	$[mm]$
t_i	Integrationszeit	$[s]$
U	Umkehrspanne	$[mm]$
u, v, w	lokale Koordinaten	$[mm]$
$w_{x,i}$	Auslenkung der Achse i in Richtung x	$[mm]$
Z_j	Knotenmatrix	
z_x, z_y	partielle Ableitungen der Oberflächenfunktion	

griechische Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
α, β	Ebenenwinkel	$[^\circ]$
α_i	Winkelparameter der DH-Notation	$[^\circ]$
Δu	translatorisches Führungs- und Übertragungsspiel	$[mm]$
Δw	nichtgeometrischer Fehler	$[mm]$
$\Delta \xi$	rotatorisches Führungs- und Übertragungsspiel	$[^\circ]$
ε	Winkel zwischen Bildstrahl und Flächennormalen	$[^\circ]$
φ	Einfallswinkel zum Lot durch Projektionszentrum O	$[^\circ]$
λ	Wellenlänge	$[mm]$
λ_j, μ_j	Vektorfaktoren	
$\theta_{hor}, \theta_{ver}$	horizontaler bzw. vertikaler Bildwinkel	$[^\circ]$
θ_j	Winkelparameter der DH-Notation	$[^\circ]$
ρ	Dichte	$[g/mm^3]$
τ	Winkel zwischen Bild- und Hauptstrahl	$[^\circ]$
ω, φ, κ	Kameraorientierungen bzgl. X, Y, Z	$[^\circ]$
ξ	Verdrehwinkel einer Achse	$[^\circ]$

Kurzzeichen	Bezeichnung
AP	Austrittspupille
B	Bildebene
EP	Eintrittspupille
H'	Bildhauptpunkt
H_i	Objektiv-Hauptebenen
$K(X, Y, Z)$	Weltkoordinatensystem
K_i	Knotenpunkt i
M_O	Meßort
OA	optische Achse
O_i	Projektionszentrum
P	Objektpunkt
p'	Bildpunkt
P_R	Reflexionspunkt

Indizierung	Bezeichnung
0	Nullebene
$1...9$	Trägersystemachsen
$'$	Kamerakoordinaten
$*$	Grenzflächenkoordinaten
B	Brechung
BB	Biegebalken
gem	Theodolitenmeßwert
i	Kamera-Indizierung
jk	LED-Indizierung
lm	Gitter-Indizierung
O	Kamera
$phot$	Photogrammetriemeßwert
R	Reflexion

Indizierung	Bezeichnung
<i>red</i>	reduziert auf relevante Anteile
<i>theo</i>	theoretisch
<i>w</i>	Wasser

Abkürzung	Bezeichnung
<i>A/D</i>	Analog / Digital
<i>CAN</i>	contoller area network
<i>CCD</i>	charge coupled device
<i>CCIR</i>	Comité Consultativ International des Radiocommunication
<i>CMOS</i>	complementary metaloxide semiconductor
<i>DH</i>	Denavit-Hartenberg-Notation
<i>DSE AT</i>	Digitale Servo Elektronik
<i>DWK</i>	Deutsche Gesellschaft für Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen mbH
<i>EIA</i>	Electronics Industries Association
<i>FEM</i>	Finite Elemente Methode
<i>FEMO</i>	fernhandlungsgerechte Modultechnik
<i>IR</i>	Industrieroboter
<i>LED</i>	light emitting diode
<i>MFC</i>	Multifunktionskarte
<i>MTS</i>	Manipulatorträgersystem
<i>RDW</i>	Resolver-Digital-Wandler
<i>SNR</i>	signal to noise ratio, Signal/Rausch-Verhältnis
<i>UW</i>	unter Wasser
<i>WAW</i>	Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Der Einsatz von Robotern und Manipulatoren ist vielfältig motiviert. So zwingt einerseits der Kostendruck infolge der durch die Globalisierung der Märkte verschärften Konkurrenzsituation zu weitreichenden Rationalisierungs- und damit Automatisierungsmaßnahmen bei gleichzeitig gesteigerten Qualitätsanforderungen, andererseits führt die Notwendigkeit der Humanisierung der Arbeit und der Minimierung der Belastung des Bedienpersonals bei Anwendungen mit erhöhtem Gefahrenpotential zum Bedarf an qualifizierten Fernhantierungstechniken.

Dies schlägt sich in durchgängigen Automatisierungskonzepten durch den Trend zur Vermeidung des arbeits-, zeit- und damit kostenintensiven Teach-In-Betriebs und zur verstärkten Nutzung von Simulations- und offline-Programmiersystemen unter Verwendung von CAD-Datenbasen des Roboters, des Werkstücks und des Arbeitsraumes nieder.

In automatisierten Anwendungen lassen sich auf diesem Wege Stillstandszeiten vermeiden, Arbeitszyklen infolge optimierter Bewegungsabläufe und der Synchronisation mit benachbarten Prozessen beschleunigen und die Flexibilität der Anwendung durch zügiges Einbinden neuer Produktvarianten aus bestehenden CAD-Datenbasen erhöhen. Die so erzielte Steigerung der Produktivität und die damit einhergehende Senkung der Kosten tragen neben der schnellen Verfügbarkeit des Produktes und der Flexibilisierung der automatisierten Anwendung für kundenspezifische Produktvarianten zur Erfüllung des übergeordneten Ziels der Kundenzufriedenheit und zu einer Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit bei.

Gesundheitsbeeinträchtigende Umgebungsbedingungen, wie sie beispielsweise bei Inspektions-, Montage- und Demontageprozessen zur Revision, Reparatur und zum Rückbau kerntechnischer Anlagen oder Anlagen der chemischen Industrie auftreten, verhindern längere Aufenthaltszeiten am Werkstück. Dies macht Fernhantierungsmaßnahmen auf der Basis offline, d. h. am simulierten Modell programmierter Bewegungsabläufe erforderlich.

Sowohl in der automatisierten Fertigung als auch in Fernhantierungsanwendungen besteht häufig die Notwendigkeit, die Genauigkeitskenngößen von Robotern und Manipulatoren zu verbessern. Während im Teach-In-Betrieb die meist hinreichende Wiederholgenauigkeit (Positionsstreuung) die bestimmende Kenngröße ist, wird bei der Verwendung von offline-Programmiersystemen die absolute Positionsgenauigkeit des Handhabungssystems relevant, die häufig um eine Größenordnung ungünstiger ist. Zudem treten Genauigkeitsverluste durch Abweichungen in der Positionierung und Maßhaltigkeit des Werkstückes vom CAD-Modell auf.

In besonderer Weise gilt dies für Großmanipulatoren, wie sie zur Automatisierung im Schiffbau, im Schwermaschinenbau und für Fernhantierungsaufgaben in kerntechnischen Anlagen eingesetzt werden und deren Verwendung zukünftig in der Bauindustrie

zu erwarten ist [1], [2], [3], [4]. Fertigungsungenauigkeiten, Getriebenachgiebigkeiten und Strukturelastizitäten an den kinematischen Gliedern sowie Wärmedehnung wirken sich aufgrund der Baugröße in verstärktem Maße aus. Sie können mit vertretbarem Aufwand nicht in ausreichendem Maß vermindert werden und entziehen sich teilweise einer deterministischen Beschreibung und damit der für die kinematische Kalibrierung notwendigen mathematischen Modellierung.

Um die Positionsgenauigkeit solcher Geräte zu verbessern, ist es daher notwendig, die Abweichung des den Prozeß führenden Endeffektors von der erwünschten Raumlage zu ermitteln und als Korrekturwert rückzukoppeln. Am Beispiel eines im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Großmanipulators, der aus einem dreiachsigen Portal und einem darunter montierten sechsachsigen Industrieroboter besteht, wird eine Maßnahme zur Erzielung einer erhöhten Positionsgenauigkeit aufgezeigt. Als räumliches Meßwerkzeug wird die digitale Photogrammetrie genutzt.

Die Photogrammetrie ist ein Verfahren zur Vermessung von Objekten nach Lage und Form. Dabei werden die Messungen nicht direkt am Objekt, sondern indirekt auf Bildern des Objektes vorgenommen. Diese können als Photos oder, bei der digitalen Photogrammetrie, als Videobilder vorliegen.

Die rasante Entwicklung der Sensoren zur Bilderfassung sowie der bildverarbeitenden Komponenten bezüglich steigender Auflösung, beschleunigter Verarbeitung und sinkendem Preis eröffnet die Möglichkeit des kostengünstigen Einsatzes der digitalen Photogrammetrie in statischen und zunehmend auch in dynamischen industriellen Überwachungs- und Fertigungsprozessen. Das Verfahren soll im Rahmen dieser Arbeit auf seine Nutzbarkeit in großtechnischen Automatisierungs- und Fernhantierungsaufgaben überprüft und zur Verbesserung der Genauigkeitskenngrößen eines Großmanipulators fortentwickelt werden.

Das Verfahren arbeitet berührungslos, ohne Rückwirkung auf das Meßobjekt und aus der Distanz, so daß die durch den Manipulator geführten Prozesse keine Einschränkung erfahren. Die Anforderungen bezüglich der Positionsgenauigkeit des Endeffektors sind dabei durch die Gewährleistung der Prozeßsicherheit und definierter Prozeßparameter z. B. der Trennverfahren Plasmaschmelzschneiden und autogenes Brennschneiden sowie des Fügeverfahrens MIG/MAG-Schweißen, die in den genannten Anwendungen verwendet werden, mit $\pm 1\text{mm}$ gegeben [5]. Diese Positionsgenauigkeit soll innerhalb eines durch einen Würfel mit 4000mm Kantenlänge beschriebenen Arbeitsraumes erreicht werden, der die typische Größenordnung von Automatisierungs- und Fernhantierungsanwendungen im Schiffbau bzw. in der Kerntechnik darstellt.

Ein bedeutsamer Teil biologischer, geologischer und zunehmend auch technischer Vorgänge findet unter Wasser statt. So werden Produktions-, Fertigungs- und Zerlegeverfahren im Hinblick auf die Minimierung gesundheitsgefährdender, luftgetragener Emissionen unter Wasser verlegt. Der Großmanipulator soll im Rahmen der Arbeit durch

die Entwicklung einer Schutzhülle für den Unterwassereinsatz qualifiziert werden. Zielsetzung ist, den applizierten Standardindustrieroboter für Unterwasserinspektions-, -zerlege- und -fügeprozesse nutzbar zu machen und so gegenüber der Verwendung kostenintensiver Spezialmanipulatoren zu einer Wirtschaftlichkeitssteigerung bei Unterwasserfernhandlungs- und fertigungsvorgängen beizutragen. Gleichzeitig werden für diese Anwendungen weitere Vorteile des Serienproduktes Industrieroboter, wie die Verfügbarkeit, der Bedienkomfort, etablierte Simulations- und offline-Programmiersysteme nutzbar. Mit der Erweiterung des Einsatzbereiches des betrachteten Großmanipulators auf den Unterwasserbereich wird in die Implementation der Photogrammetrie der Mehrmedienfall einbezogen. Dieser ist ist dadurch gekennzeichnet, daß das abbildende Lichtstrahlenbündel außerhalb der Kamera die Grenzen zwischen Phasen unterschiedlicher optischer Brechung durchtritt.

Mit Hilfe eines zu entwickelnden Grundlagenansatzes soll der Fall betrachtet werden, daß das Eintauchen der Photogrammetriekameras aufgrund von Kosten- und Zeitdruck, zur Vermeidung der Beeinflussung des Meßobjektes, etwaiger Kontamination der Meßeinrichtung oder des Meßobjektes oder aufgrund des spezifischen Meßaufbaus vermieden werden muß. Unter diesen Umständen liegt eine durch Wasserwellen beschriebene, dynamisch gekrümmte Phasengrenze vor.

Da der Einsatz des Verfahrens nicht auf Wasser beschränkt ist, sondern an alle klaren Medien angepaßt werden kann, wird hiermit für die photogrammetrische Form- und Lagevermessung ein weiter Bereich von Anwendungen beispielsweise in der chemischen Industrie, in der Verfahrenstechnik, in der Wasserwirtschaft und im Schiffbau erschlossen. Zudem erfolgt als Bestandteil des Verfahrens die optische Vermessung der Topographie der Flüssigkeitsoberfläche, wodurch weitere Nutzungsgebiete in wissenschaftlichen und technischen Anwendungen gegeben sind.

2 Stand von Wissenschaft und Technik in der digitalen Photogrammetrie

2.1 Entwicklung der Photogrammetrie

Die geschichtliche Entwicklung der Photogrammetrie beginnt um 1850 mit der terrestrischen Meßtischphotogrammetrie, die zuerst von Laussedat mit der Ermittlung von Objektkoordinaten durch Vorwärtsschnitt aus zwei photographischen Aufnahmen zur Kartographie von Teilen von Paris verwendet wurde. Etwa zeitgleich setzte Meydenbauer die Photogrammetrie erstmals erfolgreich zur Vermessung von Bauwerken und Kunstdenkmälern ein [6]. Mit der Fortentwicklung der Ballonfahrt wurde die Auswertung von Luftphotographien, beispielsweise 1859 durch Tournachon für die Vorbereitung der Schlacht von Solferino (Napoleon III) verwendet. Die analytische Bestimmung von Geländepunkten aus dem Vorwärtsschnitt zweier Ballonaufnahmen gelang 1903 erstmals Finsterwalder [7].

Mit der Einführung der Stereophotogrammetrie durch Pulfrich und die Erfindung und Fortentwicklung des Stereoautographen wurde 1909 das direkte Zeichnen von Grundriß- und Höhenlinien aus photographischen Aufnahmen möglich. Dies war die Grundlage der Entwicklung stetig verbesserter Aufnahme- und Auswertegeräte durch renommierte Firmen und ging mit der Entwicklung theoretischer Auswerteverfahren, wie dem Verfahren der systematischen gegenseitigen Orientierung (1945), der Entwicklung der Methode der numerischen Orientierung sowie der Einführung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate in die Photogrammetrie einher [8].

Bis dahin aufgrund des vergleichsweise großen Aufwandes kaum betriebene analytische photogrammetrische Auswertverfahren etablierten sich um 1950 mit dem Aufkommen der elektronischen Datenverarbeitung. So formulierte Schmid die Lösung photogrammetrischer Grundaufgaben mit Hilfe der Matrizenrechnung, und es entstanden große Bündelblockausgleichsprogramme für die analytische Aerotriangulation [9]. Anstelle optisch-mechanischer Komponenten wurden in der Folge in die Auswertegeräte immer häufiger Prozeßrechner integriert.

Mit den ersten satellitengetragenen Kameras wurde es notwendig, Bilder in digitale Formate zu übersetzen, um sie übertragen zu können. Dies führte schließlich zur digitalen Bildakquisition und brachte die Einbindung der digitalen Bildverarbeitung mit sich, deren Entwicklung die gegenwärtige digitale Photogrammetrie kennzeichnet.

Die Anwendung filmbasierter Kameras hat einen großen zeitlichen Verzug zwischen der Bildakquisition und der Erlangung der Auswertungsergebnisse zur Folge. Mit der Einführung der digitalen Bildakquisition und -auswertung entstehen durch den Übergang zur Echtzeitverarbeitung der Meßgrößen bei hohen Bildfolgefrequenzen neue, zunehmend ingenieurtechnische Nutzungsbereiche der Photogrammetrie, z. B. in der Prozeßüberwachung und -regelung. Anwendungsbeispiele werden im Abschnitt 2.1.2 gegeben.

2.1.1 Entwicklung der Mehrmedienphotogrammetrie

Durchtritt ein Lichtstrahl auf seinem Weg vom Objekt zum Objektiv der Meßkamera Medien unterschiedlicher optischer Brechungskoeffizienten, so spricht man von Mehrmedienphotogrammetrie.

Erste theoretische Ansätze in der Mehrmedienphotogrammetrie hinsichtlich geometrischer Zusammenhänge und mathematischer Formulierungen gehen auf Arbeiten von Zaar und Rinner aus dem Jahr 1948 zurück [10], [11]. Aus der gleichen Zeit stammt der Vorschlag von Lacmann, die Unterwasserphotogrammetrie für die Herstellung von Meeresbodenkarten aus Luftbildern zu nutzen [12]. Trotz dieser Impulse stagnierte die Entwicklung in diesem Bereich der Photogrammetrie in den folgenden zwanzig Jahren weitgehend, wenn man von vereinzelt praktischen Anwendungen zur aerophotogrammetrischen Erfassung von Gewässerböden und Wassertiefen absieht [13], [14], [15].

Erst in der zweiten Hälfte der sechziger Jahre fand die Thematik der Mehrmedienphotogrammetrie durch die Entwicklung geeigneter Aufnahmesysteme für die Unterwasserphotogrammetrie wieder verstärktes Interesse in der Fachwelt. Wasserdichte und druckfeste Gehäuse, bemannte Unterwasserfahrzeuge und spezielle Optiken für Unterwasserkameras wurden verfügbar [16]. Parallel dazu gelangten Beleuchtungseinrichtungen [17], [18], [19] und spezielle Filmemulsionen für die Unterwasserphotogrammetrie zur Einsatzreife [20], [21].

Die photogrammetrische Auswertung erfolgte bis zu diesem Zeitpunkt mit analogen Verfahren. Eine Besonderheit bei der Rekonstruktion der Aufnahmesituation stellt die Verwendung eines Auswertegerätes mit optischer Projektion einschließlich Unterwasserzeichentisch dar [22]. Mit der Entwicklung digitaler Rechner folgten analog zu Abschnitt 2.1 rechnerische Lösungsvorschläge [23]. Über die analytische Auswertung von Zweimedienaufnahmen berichteten erstmals Konecny und Masry 1970 [24]. Ausführliche analytische und numerische Untersuchungen zur Einzelbildorientierung und zur Orientierung von Stereobildpaaren finden sich bei Höhle, Rinner und Girndt [25], [26], [27]. Funktionale Ansätze unter Berücksichtigung sphärischer Trennflächen bei der Orientierung von Einzelbildern stellten Rinner und Höhle / Okamoto 1972 vor [28].

Die Folgezeit war durch ein verhaltenes Interesse an der Mehrmedienphotogrammetrie gekennzeichnet, bis 1980 durch die Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung eine Arbeitsgruppe mit den Themenschwerpunkten Küstenvermessung mit luftbildphotogrammetrischen Mitteln, Vermessung von Objekten mittels Unterwasserphotogrammetrie und Mehrmedienphotogrammetrie im industriellen Bereich gegründet wurde.

Dies war motiviert durch Erkundungs- und Vermessungsaufgaben im Zusammenhang mit der Erschließung von Rohstoffressourcen, neuen Anwendungen im Rahmen der Überwachung von Förderplattformen und Pipelines sowie wachsender Bedeutung ökolo-

gischer Fragestellungen [29]. Im Bereich der Meereswissenschaften stieg das Interesse an der geometrischen Erfassung und kontinuierlichen Beobachtung von Kleinformen in Gewässern [30], [31].

In der Unterwasserphotogrammetrie werden als Aufnahmekammern Unterwasserkameras und spezielle Gehäusekammern eingesetzt [31], [32], [33], [34]. Das Problem der Kalibrierung unter Wasser wird eingehend bei [33] behandelt. Zur Bestimmung der Strahlenbündelgeometrie und zur Orientierung der Strahlenbündel dienen häufig räumlich gegliederte, transportable Paßpunktgestelle [29], [30], [32]. Hinsichtlich des Instrumentariums für die Auswertung ist die Tendenz erkennbar, kompakte, modular aufgebaute Systeme einzusetzen. Komparator bzw. Digitalisiertablett, Rechner und Plotter bilden die wesentlichen Bausteine solcher Systeme [29], [32], [34]. Die genannten Arbeiten benutzen als mathematischen Ansatz zur Auswertung vornehmlich die projektive Transformation oder die relative Orientierung mit anschließender Maßstabsanpassung. Mittels zusätzlicher bildfehlerbeschreibender Funktionen wird verschiedentlich versucht, Abweichungen von der zentralperspektivischen Abbildung, die durch Filmverzug und -unebenheiten, Objektivverzeichnung und lichtbrechende Einflüsse im Objektraum verursacht werden, zu erfassen. Ein Überblick zum Thema Unterwasserphotogrammetrie findet sich bei Newton [35].

Im Bereich der aerophotogrammetrischen Vermessung von Flachwassergebieten zum Zweck der Meeresbodenerfassung und der Wassertiefenbestimmung ist insbesondere der Fragestellung nachgegangen worden, wie sich die Approximation der lichtbrechenden Wasseroberfläche als Ebene auf die Rekonstruktionsgenauigkeit des Aufnahmeobjektes auswirkt [36], [37], [38]. Vorschläge zur Modellierung einer wellenförmigen, lichtbrechenden Fläche stammen von Okamoto [39], [40].

2.1.2 Abriß aktueller Anwendungen der Photogrammetrie

Die Photogrammetrie hat sich zu einem wichtigen Werkzeug der Ingenieurmeßtechnik und anderer Disziplinen entwickelt. Es finden sich zahlreiche Anwendungen in den Bereichen:

- Architektur, Bauingenieurwesen, Denkmalpflege, Archäologie,
- Maschinen-, Anlagen-, Schiff-, Fahrzeug-, und Flugzeugbau,
- Hydrodynamik, Wasserbau, Schifffahrt, Fischereiwirtschaft,
- Geologie,
- Medizin, Anthropologie, Sport- und Arbeitswissenschaft,
- Kriminaltechnik, Unfallrekonstruktion und
- Material- und Werkstoffprüfung.

Die Hauptaufgabe im industriellen, maschinenbaulichen Bereich ist die Bestimmung von Maß-, Form- und Lagetoleranzen an Werkstücken, Werkzeugen und Vorrichtungen sowie technischen Bauwerken. So wird die Photogrammetrie beispielsweise zur Vermessung des Traggerüsts von Schwebbahnen [41], zur Maß- und Formkontrolle von

Gußteilen [42], zur Erfassung von Deformationen im Automobilbau [43], zur Maßkontrolle von Großbauteilen im Schiffbau [44], zur Vermessung der Deformation an Schiffen [45], [46] und zur Vermessung von Schaufelradbaggern [47] genutzt.

Weitere maschinenbauliche Anwendungen, bei denen lichtbrechende Flächen im Objektraum zu berücksichtigen sind und demnach ein Mehrmedienfall vorliegt, ergeben sich, wenn Aufnahmeobjekte sich in unzugänglichen, abgeschlossenen Räumen befinden und nur von außen z. B. durch Glasfenster beobachtet werden können. Praktische Beispiele dazu finden sich in der Elementarteilchenphysik bei der Auswertung von Blaskammeraufnahmen [48], in Untersuchungen zum Strömungsverhalten von Flüssigkeiten in Glaskanälen [49], [50] sowie bei Vermessungsaufgaben in kerntechnischen Anlagen zur Dokumentation [51] und zur Vermessung der Formveränderung von Brennelementen aufgrund thermischer Belastung [52], [53].

Im Bereich der Schifffahrt und der Hydromechanik seien beispielhaft die Bestimmung der Schiffsabdrift durch Querströmungen [54] sowie tracergestützte Strömungsmessungen in fließendem Wasser erwähnt [55].

Die genannten Anwendungen verwenden weitgehend analoge, filmbasierte Photogrammetrie mit dem damit einhergehenden zeitlichen Verzug zwischen Aufnahme und Meßergebnis.

Mit der durch den Einsatz digitaler Kameras und leistungsfähiger gewordenen Bilderfassungs- und -verarbeitungstechnik befindet sich, verglichen mit der filmbasierten Photogrammetrie, eine flexible und schnelle Vermessungstechnik in der Entwicklung, mit der auch zeitkritische Prozesse beobachtet werden können. So sind als aktuelle Entwicklungen digitaler Photogrammetrie beispielsweise bekannt:

- die Vermessung von Knochengeometrien während Hüftoperationen [56],
- die Vermessung der Geometrie bewegter Karosserien in der Automobilmontage [57] und
- die Vermessung von Schiffsblechen in der Außenhautfertigung von Fracht- und Fahrgastschiffen [58].

2.2 Mathematische und optische Grundlagen

Das photographische Bild kann mit ausreichender Genauigkeit als Zentralperspektive des abgebildeten Objekts betrachtet werden [59]. Dies ermöglicht die Zuordnung eines Bildstrahls zwischen Bildpunkt, Aufnahmezentrum und Objektpunkt entlang dessen sich die räumliche Position des Objektes befindet. Da ein Strahl eine Lösungsschar liefert, erlaubt ein einzelnes Bild die Rekonstruktion der räumlichen Lage der Objektpunkte nur dann, wenn mindestens eine Koordinate bekannt ist. Das räumliche Ausmessen photographischer Bilder nach der dreidimensionalen Lage ist nur dann möglich, wenn das Objekt von mindestens zwei verschiedenen Aufnahmeorten aus photographiert wird. Jeder Objektpunkt kann dann durch den Schnitt mindestens zweier Bildstrahlen

bestimmt werden. Das zu diesem Zweck angewandte mathematische Verfahren wird als räumlicher Vorwärtsschnitt bezeichnet. Es wird im Abschnitt 2.2.2 vorgestellt.

2.2.1 Optische Abbildung

2.2.1.1 Modell der idealen optischen Abbildung

Der idealen optischen Abbildung entspricht eine Zentralperspektive, wie sie im Modell als Abbildung in einer Lochkamera angenommen werden kann (Abbildung 1). Diese enthält ein unendlich kleines, kreisförmiges Loch als Projektionszentrum O . Die Kamerarückwand bei Filmkameras bzw. der Sensorchip bei digitalen Kameras bestimmt die Bildebene B . Die Senkrechte zur Bildebene B durch das Projektionszentrum O definiert die optische Achse OA . Der Schnittpunkt der optischen Achse OA und der Bildebene B bestimmt den Bildhauptpunkt H' . Der Abstand $H'O$ entlang der optischen Achse wird als Kamerakonstante c bezeichnet.

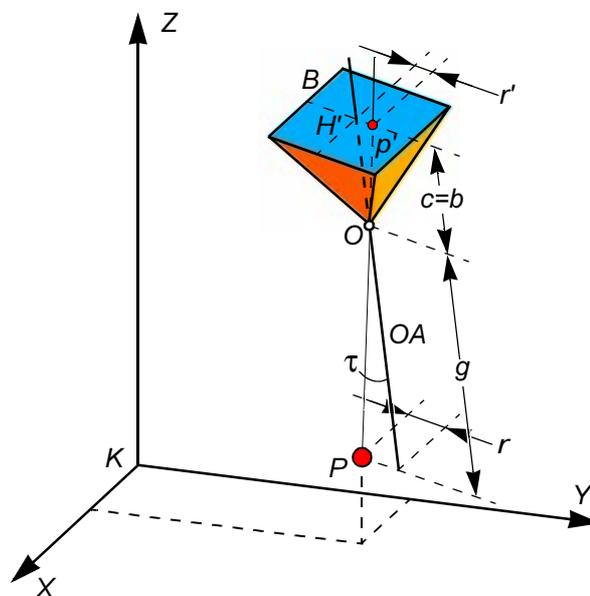


Abbildung 1: Zentralperspektive (Lochkamera)

Ein Objektpunkt P wird dann im Schnittpunkt des Strahls PO und der Bildebene B im Punkt p' abgebildet. Für die Entfernung r' eines Bildpunktes p' vom Bildhauptpunkt H' gilt als Bildfunktion

$$r' = c \cdot \tan(\tau). \quad (\text{Gl. 1})$$

2.2.1.2 Reale optische Abbildung

Reale Meßkameras sind entgegen diesem Modell keine Lochkameras, sondern aufgrund der lichtstärkeren Abbildung mit aus einem Linsensystem bestehenden Objektiven bestückt. Die Abbildung eines Objektpunktes P durch ein Objektiv nach p' in der Bildebene geschieht mittels eines Strahlenkegels, welcher durch den Durchmesser der Öffnungsblende des Objektivs begrenzt ist. Die Scharfabbildung eines Punktes P mit der Gegenstandsweite g erfolgt bei gegebener Brennweite f des Linsensystems in der Bild-

weite b . Bei Verwendung einer einfachen Linse wird die Scharabbildung durch die Linsengleichung 2 beschrieben

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (\text{Gl. 2})$$

Die idealisierten Verhältnisse der strahlenoptischen Abbildung durch Objektive sind der Abbildung 2 zu entnehmen. Innerhalb einer Optik werden zwei parallele Hauptebenen H_1 und H_2 definiert, die dadurch bestimmt sind, daß sie sich 1:1 aufeinander abbilden. Auf ihnen liegen (für Luft-Glas-Luft-Verhältnisse) die Knotenpunkte K_1 und K_2 , wobei die Lage von K_1 und K_2 durch einen Zentralstrahl definiert ist, der ungebrochen, d. h. mit $\tau = \tau'$ durch die Optik gelangt. Das scheinbare Bild der Blende im Objektpunkt P wird als Eintrittspupille EP bezeichnet, analog wird die Austrittspupille AP definiert. Die Knotenpunkte K_1 und K_2 fallen in der idealisierten Optik mit der Mitte der Eintrittspupille EP bzw. der Austrittspupille AP zusammen. Die Verbindungsgerade durch EP und AP ist die optische Achse, deren Schnittpunkt mit der Bildebene im idealisierten Fall den Bildhauptpunkt H' beschreibt [60].

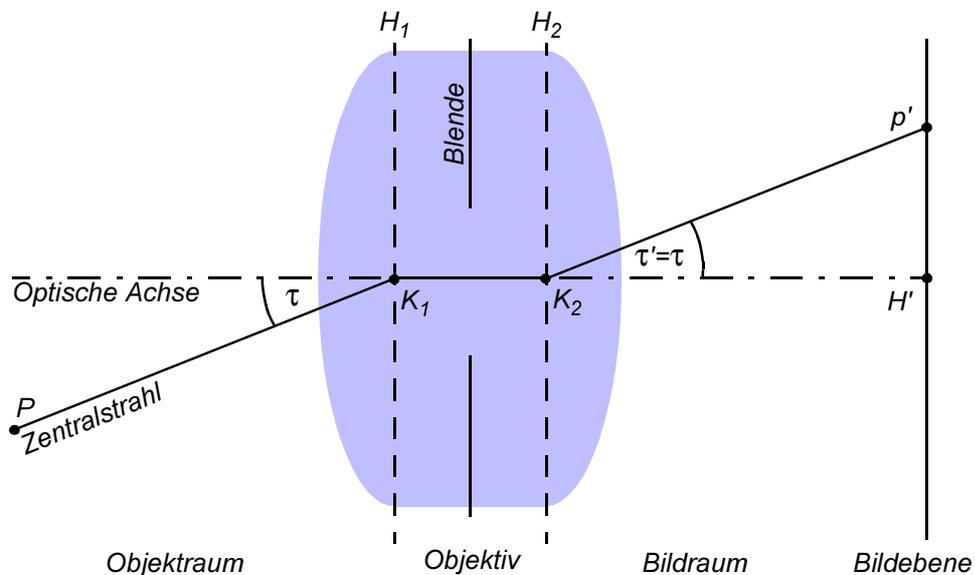


Abbildung 2: idealisierte strahlenoptische Abbildung durch ein Objektiv

Die reale Optik weicht von der idealisierten infolge von Fertigungstoleranzen im mechanischen Aufbau des Linsensystems, bei den Schliffkurven der Linsen, als Auswirkung von Temperaturschwankungen oder mechanischen Einflüssen ab. Davon ausgehend, daß die Bildebene nicht senkrecht auf der optischen Achse steht, daß die Mitte der Eintrittspupille EP nicht mit dem Knotenpunkt K_1 zusammenfällt und daß die Bildweite nicht der theoretischen Kamerakonstante entspricht, definiert man zur Kalibrierung der Optik gemäß Abbildung 3 einen auf der Bildebene senkrecht stehenden Hauptstrahl durch die Mitte der Eintrittspupille EP .

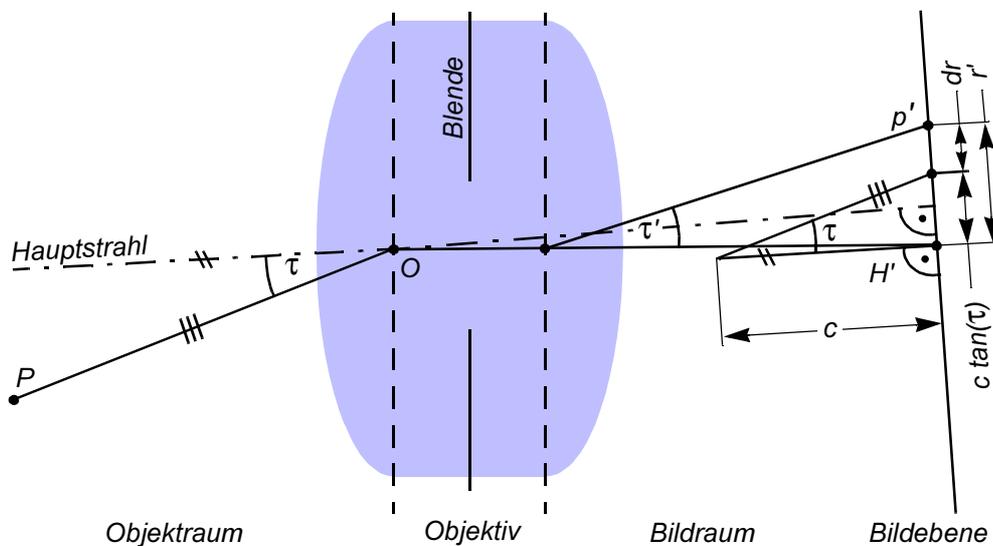


Abbildung 3: radiale Verzeichnung

Seine Abbildung auf der Bildebene beschreibt den Hauptpunkt H' . Da der Winkel τ eines einfallenden Strahles in der Mitte der Eintrittspupille bezüglich des Hauptstrahls definiert wird, gilt in der realen Optik $\tau \neq \tau'$. Gemäß der Abbildung 3 ergibt sich damit für die Abbildung eines Punktes P nach p' unter Berücksichtigung der radialen Verzeichnung [60]

$$r' = c \cdot \tan(\tau) + dr. \quad (\text{Gl. 3})$$

Die bei realen Optiken aufgrund von inneren und äußeren Einflüssen entstehenden Bildfehler sind beschrieben durch die Parameter

- der Hauptpunktlage,
- der radialsymmetrischen Verzeichnung,
- der radialasymmetrischen Verzeichnung und
- der tangentialen Verzeichnung.

Sie müssen bei meßtechnischen Anwendungen berücksichtigt werden. Diesem Zweck dient die Kalibrierung des Meßsystems, auf die im Abschnitt 2.2.4 näher eingegangen wird.

2.2.2 Positionsbestimmung von Raumpunkten aus Stereobildern durch den räumlichen Vorwärtsschnitt

Der räumliche Vorwärtsschnitt stellt in dieser Arbeit die Standardmethode dar, um aus Videobildern die Koordinaten von Raumpunkten zu rekonstruieren. Der Vorwärtsschnitt basiert auf einem Aufbau, wie er Abbildung 4 zu entnehmen ist. Die Koordinaten zweier Kameras mit den Projektionszentren O_1 und O_2 in einem übergeordneten Weltkoordinatensystem K mit X , Y , Z sind bekannt und durch die Ortsvektoren \vec{x}_{O_i} beschrieben. Die Koordinaten des Objektpunktes P_i im Weltkoordinatensystem K sind gesucht.

Die Kameras verfügen über die internen Koordinatensysteme K'_j mit X'_j, Y'_j, Z'_j und dem Ursprung in O_1 bzw. O_2 . Die Auswertung der Film- oder Sensorinformation liefert die Position der Abbildung eines Punktes P_i innerhalb des Kamerakoordinatensystems der jeweiligen Kamera. Die Abbildung in der Bildebene erfolgt als Negativ. Spiegelt man diese in der X' - Y' -Ebene des Kamerakoordinatensystems, so erhält man mit dem Durchstoßpunkt des P_i abbildenden Strahls durch die gespiegelte Bildebene die Positivabbildung des Punktes P_i . Diese ist innerhalb des Kamerakoordinatensystems X'_j - Y'_j - Z'_j beschrieben durch den Vektor \vec{p}'_i . Die mit den skalaren Faktoren λ_i multiplizierten Vektoren \vec{p}'_i sind gleichbedeutend mit dem abbildenden Strahl und bezeichnen die Lage des Punktes P_i in Kamerakoordinaten.

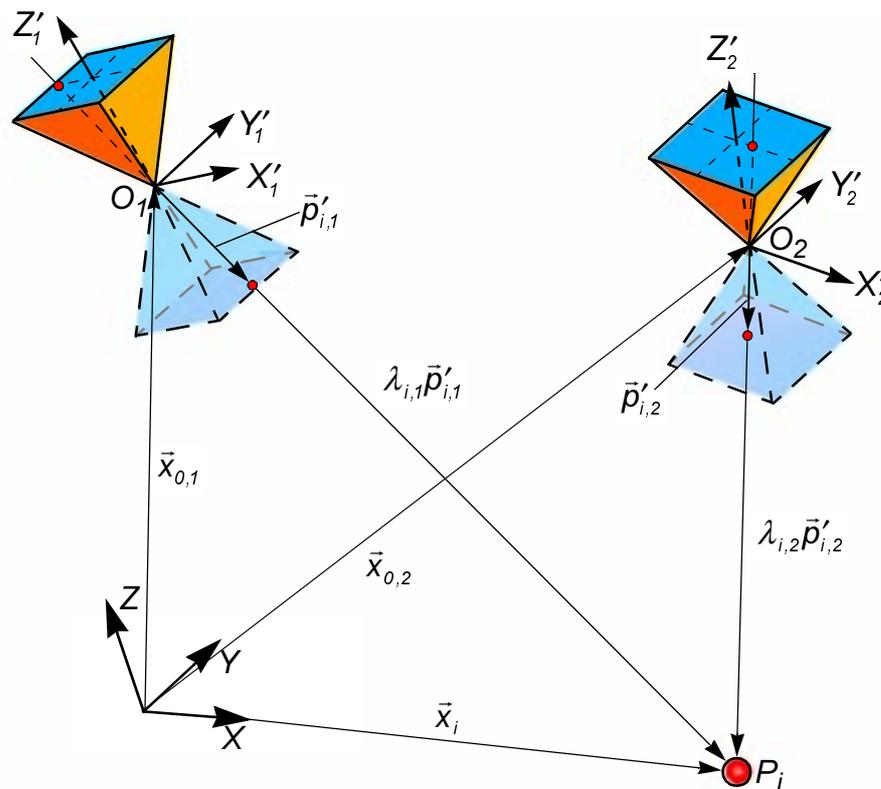


Abbildung 4: räumlicher Vorwärtsschnitt

Für die Lösung des räumlichen Vorwärtsschnittes gilt dann:

$$\vec{x}_i = \vec{x}_{0,1} + \lambda_{i,1} \cdot A_1^T \cdot \vec{p}'_{i,1} = \vec{x}_{0,2} + \lambda_{i,2} \cdot A_2^T \cdot \vec{p}'_{i,2}, \quad (\text{Gl. 4})$$

wobei A_j Transformationsmatrizen von dem Welt- in das Bildkoordinatensystem darstellen. Da A_j eine orthogonale Abbildungsmatrix ist, führen die Transponierten A_j^T zu einer Transformation von dem Bild- in das Weltkoordinatensystem. Die Transformationsmatrizen errechnen sich mit den Bezeichnungen nach den Abbildungen 4 und den Rotationswinkeln des Ursprunges O_j um X, Y und Z mit ω, φ bzw. κ zu:

$$A_j = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa \\ -\cos \varphi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cdot \cos \varphi & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 5})$$

Mit der Kamerakonstante c lässt sich Gleichung 4 dann schreiben:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X_{0,1} \\ Y_{0,1} \\ Z_{0,1} \end{bmatrix} + \lambda_{i,1} \cdot A_1^T \cdot \begin{bmatrix} X'_{i,1} \\ Y'_{i,1} \\ -c_1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} X_{0,2} \\ Y_{0,2} \\ Z_{0,2} \end{bmatrix} + \lambda_{i,2} \cdot A_2^T \cdot \begin{bmatrix} X'_{i,2} \\ Y'_{i,2} \\ -c_2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (Gl. 6)$$

Nach der Transformation mit

$$\vec{p} = A^T \cdot \vec{p}' = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (Gl. 7)$$

geht die Gleichung 4 unter Vereinfachung der Indizierung über in

$$\vec{x} = \vec{x}_{0,1} + \lambda_1 \cdot \vec{p}_1 = \vec{x}_{0,2} + \lambda_2 \cdot \vec{p}_2, \quad (Gl. 8)$$

ausgeschrieben:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X_{0,1} \\ Y_{0,1} \\ Z_{0,1} \end{bmatrix} + \lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} X_{0,2} \\ Y_{0,2} \\ Z_{0,2} \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (Gl. 9)$$

Nach dem Lösen des in Gleichung 9 formulierten Gleichungssystems nach λ_j mit $w_j = c_j$ führt Einsetzen zur Position von P_j .

Diese Idealvorstellung wird in der Realität nicht erreicht. Vielmehr tritt bei der optischen Abbildung an den unterschiedlichen Komponenten des Aufnahmesystems eine Vielzahl von Einflüssen auf, die sich als Abweichung von der strengen Zentralprojektion im mathematischen Kameramodell modellieren lassen und nachfolgend näher erläutert werden.

2.2.3 Digitale Bildmeßtechnik

Abbildung 5 zeigt die typischen Komponenten eines digitalen Bildverarbeitungssystems zur photogrammetrischen Vermessung. Die Reflexionen eines angestrahlten Objektes (Werkstück bzw. Meßmarke) gelangen durch ein Objektiv auf den optoelektronischen Aufnehmer einer digitalen Kamera, dem bilderzeugenden System. Die Bilddaten werden als Videosignal, in Systemen mit hohen Genauigkeitsanforderungen meist als digitales Signal, zum Auswertesystem übermittelt, das in modernen Anlagen ein mit einem Framgrabber ausgestatteter PC ist. Das Meßergebnis sind zwei- oder dreidimensionale

Objektkoordinaten, die entweder in einem Kamerakoordinatensystem oder in einem übergeordneten Weltkoordinatensystem gegeben sein können.

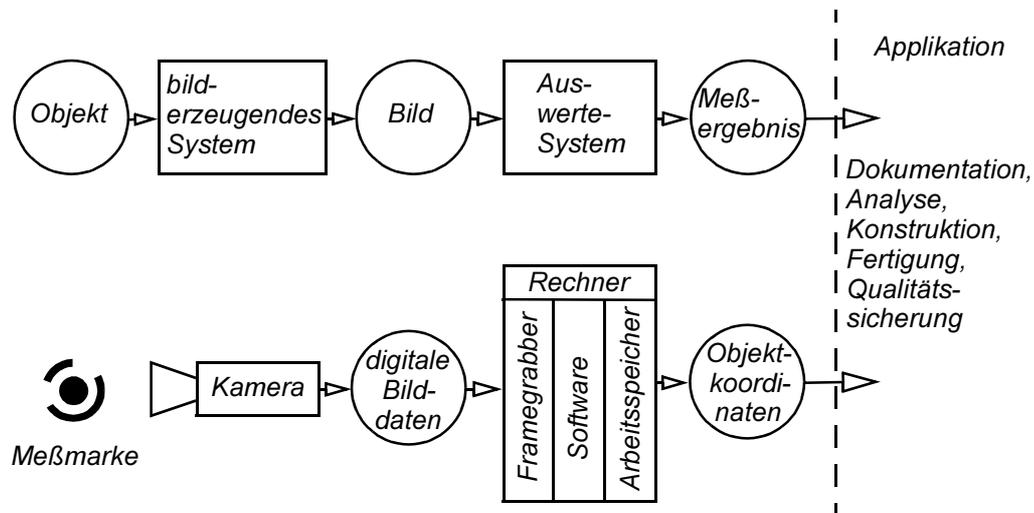


Abbildung 5: photogrammetrischer Meßprozeß

2.2.3.1 Digitale Bildakquisition

Der aktuelle Markt der digitalen Bildakquisitionskomponenten ist durch mit CCD-Sensoren (charge coupled device) ausgestatteten Kameras dominiert.

Die wesentlichen Eigenschaften des CCD-Chips sind der Aufbau aus separaten, lichtempfindlichen Elementen, die ein zweidimensionales, ortsdiskretes Bild liefern, die kleine Baugröße, das geringe Gewicht, die hohe Dynamik, die hohe Linearität, die Unempfindlichkeit gegenüber mechanischen, magnetischen und optischen Störungen sowie die geringen Kosten.

Gelangt Licht durch das Objektiv auf den zweidimensionalen, optoelektronischen Bildaufnehmer, werden die einfallenden Photonen von zeilenförmig zu einem Array angeordneten, voneinander unabhängigen Photodioden aufgefangen. Basierend auf dem photoelektrischen Effekt akkumuliert die Zelle während einer Integrationszeit t_i zur Beleuchtungsintensität proportionale, elektrische Ladungen. Bei gegebener räumlicher Strahlung erhält man ein zweidimensionales, analoges Bild, dessen Grauwerte durch die lokal angesammelten Ladungen repräsentiert sind und das damit eine Information über die Helligkeitsverteilung über der Sensoroberfläche liefert.

Bezüglich der Weiterverarbeitung der Ladung unterscheidet man die derzeit gebräuchlichen CCD-Sensoren von den relativ neuen CMOS-Sensoren. Abbildung 6 stellt den schematischen Aufbau beider Bauformen dar. CCD-Sensoren verwenden das Eimerkettenprinzip, indem die nach einem Steuerimpuls in das analoge Schieberegister übernommenen Ladungen seriell getaktet (ähnlich einer Eimerkette) zum Leseverstärker transportiert werden. Dieser setzt die Ladung jeder einzelnen Zelle proportional in eine

Spannung um, die somit am Ausgang des Leseverstärkers als serielles, analoges Signal der Grauwerte einer Bildzeile vorliegt.

Die Ausgabereinheit der Kamera generiert aus den wiederum seriell ausgelesenen Signalen der Bildzeilen ein analoges, eindimensionales, zeitdiskretes Videosignal, das internationalen Standards (CCIR oder EIA) genügt oder mit Hilfe eines schnellen A/D-Wandlers ein digitales Videosignal (8 Bit, RS-422), das für meßtechnische Anwendungen aufgrund von Einschränkungen, denen der analoge Standard unterliegt, bevorzugt wird.

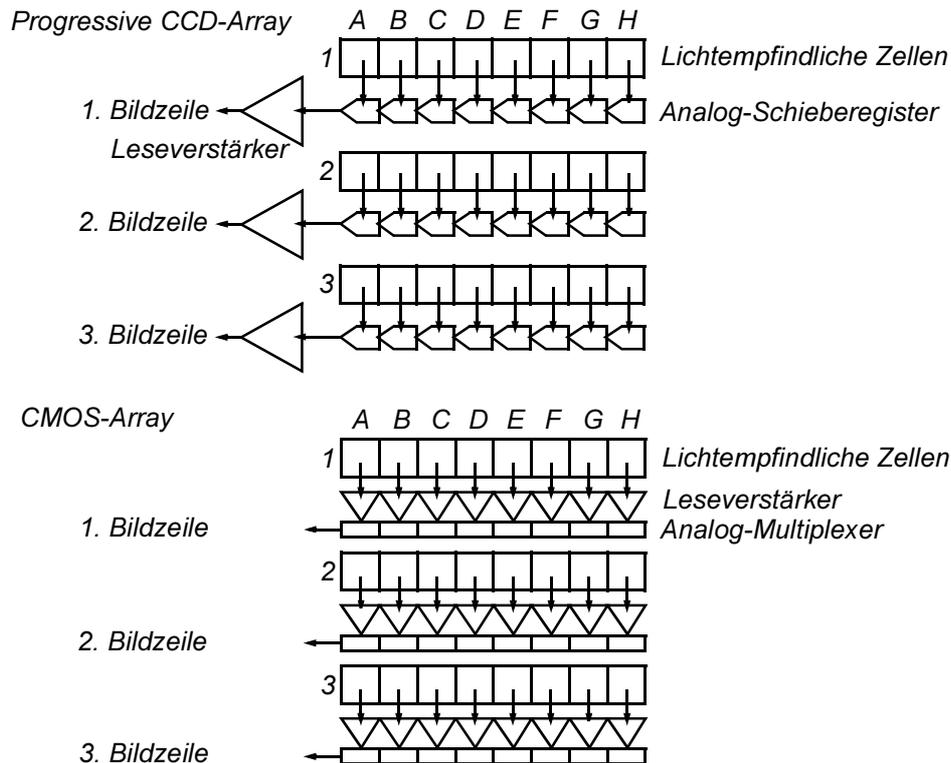


Abbildung 6: Schematischer Aufbau von CCD- und CMOS-Bildaufnehmern

CMOS-Sensoren verfügen anstelle des Schieberegisters über eine adressierbare Speicherstruktur. Der Ladungsinhalt der Photozellen wird durch einen, jeder Zelle zugeordneten Leseverstärker in eine Spannung umgesetzt und in einen adressierbaren Analogmultiplexer geschrieben. Dies ermöglicht das selektive Auslesen der Bildbereiche mit Informationsgehalt sowie eine Steigerung der Signaldynamik durch örtliche Anpassung der Sensorempfindlichkeit.

Ist digitale Übertragung des Videosignals gegeben, sollte eine pixelsynchrone (Pixel = picture elements) Übertragung von der Kamera zum Bildspeicher gewährleistet sein. In dieser Betriebsart wird durch die zusätzliche Übertragung des Pixeltaktes gewährleistet, daß einem Sensorelement exakt ein Bildelement im Bildspeicher entspricht, um Informationsverluste und Verzerrungen zu vermeiden. In Systemen mit pixelsynchroner Übertragung können sehr hohe Genauigkeiten nachgewiesen werden [61].

Die optische Auflösung ist ein grundlegender Parameter des Sensorchips. Sie wird ausgedrückt in der Anzahl effektiver Pixel. Das Array eines typischen CCD-Chips weist 756 Pixel in horizontaler und 581 Pixel in vertikaler Richtung auf. Derzeit findet der Übergang des Standards auf 1300×1030 Pixel statt. Verfügbar sind Sensoren bis zu 4096×4096 Pixel. Die Kantenlänge der lichtempfindlichen Elemente unterscheidet sich für unterschiedliche Sensorbauformen zwischen 6 und $14\mu\text{m}$.

Die Auflösung des Sensors kann auf mathematischem Weg gesteigert werden. Durch Einbeziehen des örtlichen Verlaufs der Beleuchtungsstärke in der Umgebung des Meßpunktes lassen sich mit Hilfe von Interpolations- und Ausgleichsrechnung, der Subpixelarithmetik, Meßgenauigkeiten im Subpixelbereich erreichen.

Ein weiterer, zentraler Parameter ist die Belichtungszeit, gleichbedeutend mit Integrationszeit, die bei Verwendung eines digitalen Signalausgangs zwischen typisch $0,1\text{ms}$ und unendlich frei wählbar ist. Der analoge Signalausgang ist an die Fernsehnorm gebunden und ermöglicht maximale Integrationszeiten von $1/50\text{s}$ für CCIR bzw. $1/60\text{s}$ für EIA. Der Verschuß, der die Belichtungszeit realisiert, kann mechanisch oder elektronisch ausgeführt sein. Für meßtechnische Anwendungen ist der elektronische Shutter zu bevorzugen.

Die Dynamik eines Bildübertragungssystems beschreibt seine Fähigkeit zur Erfassung des Kontrastumfangs der aufgenommenen Szene. Sie wird definiert als Verhältnis aus der durch Sättigung begrenzten, maximal meßbaren Intensität und der minimal auflösbaren Intensität, die durch Störeffekte bestimmt wird. Das Signal-Rauschverhältnis (SNR) liegt für CCD-Meßkameras zwischen 45 und 60dB [63].

2.2.4 Geometrische Kalibrierung und Orientierung

Die Nutzung digitaler Bildaufnahmesysteme zu Meßzwecken erfordert die Möglichkeit, diese Systeme zu kalibrieren bzw. zu überprüfen. Eine solche Kalibrierung und Überprüfung ist insbesondere dann notwendig, wenn:

- eine Aussage über die erreichbare Genauigkeit des Meßsystems und damit auch über die am Objekt erreichbare Meßgenauigkeit getroffen werden soll,
- eine simultane Kalibrierung des Meßsystems während der Messung verfahrensbedingt nicht möglich ist und daher einige oder alle Systemparameter vorab bestimmt werden müssen,
- vollständige Aufnahmesysteme oder Komponenten vom Hersteller im Rahmen der Qualitätskontrolle getestet werden sollen,
- von Einflüssen des Aufnahmesystems bereinigte digitale Bilder als Vorbereitung für weitere Arbeitsschritte (z. B. Entzerrungen) erzeugt werden sollen.

Zudem sind beim Aufbau von Meßsystemen die Positionen der aufnehmenden Kameras oder sonstiger Sensoren bezüglich eines übergeordneten Weltkoordinatensystems zu ermitteln, um eine 3D-Bestimmung von Objekten innerhalb dieser Systeme zu ermöglichen [61].

Kamerakalibrierung

Mit der Kalibrierung wird die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung einzelner Kameras, also der Hauptpunktlage sowie der Verzeichnungskoeffizienten bezeichnet. Bei der Verwendung digitaler Kameras ist es sinnvoll, das vollständige Aufnahmesystem mit Kamera, Übertragungseinheiten und Framegrabber zu betrachten. Die Kalibrierung des Aufnahmesystems ist neben der Kameraorientierung Bedingung, um Messungen zur Bestimmung von Raumkoordinaten des Objektes durchführen zu können.

Kameraorientierung

Die Orientierung von Kameras umfaßt die Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung zur Festlegung der Kameraposition und der Aufnahmerichtung im übergeordneten Weltkoordinatensystem. Hierzu sind für jede Kamera drei Rotations- und drei Translationsparameter zu bestimmen.

2.2.4.1 Einfluß innerer Effekte auf die geometrische Leistungsfähigkeit

Alle Komponenten eines digitalen Bildaufnahmesystems beeinflussen die Abbildung eines Objektes und damit auch die Meßergebnisse, die aus der Weiterverarbeitung dieser Abbildung entstehen.

Optisches System

Fast alle Objektive weisen typische radialsymmetrische Verzeichnungen auf, die sehr unterschiedliche Größenordnungen annehmen können. Besonders Weitwinkelobjektive weisen oftmals Verzeichnungen von mehreren $100\mu\text{m}$ am Bildrand auf, die konstruktionsbedingt sind. Im Gegensatz dazu verursachen die bei der Objektivherstellung entstehenden Linsendezentrierungen Abbildungsfehler, die sich in radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnungsanteilen widerspiegeln [64]. Auch zusätzliche optische Elemente im Strahlengang, z. B. IR-Sperrfilter und das Schutzglas des Sensors, beeinflussen die Abbildung und müssen bei der Kalibrierung eines Systems berücksichtigt werden.

Elemente zur Auflösungserhöhung

Die Steigerung des Formates und der Auflösung digitaler Bildsensoren ist kostenintensiv und physikalisch begrenzt. Aus diesem Grund werden verschiedene Techniken angewendet, um mit handelsüblichen Sensoren durch deren Bewegung parallel zur Bildebene höhere Auflösungen zu realisieren. Im wesentlichen sind zwei Verfahren möglich. Beim Mikrosampling werden durch eine Piezoverstellung die verwendeten Interline-Transfer-CCD-Sensoren um kleine Beträge so verschoben, daß die lichtempfindlichen Sensorelemente in die für diese Sensorbauweise typischen Lücken zwischen diesen Elementen fallen und dort zusätzliche Bildinformation erfassen [65], [66].

Alternativ dazu können beim Makroscanning die Sensoren um ein Vielfaches der Sensorgröße verschoben werden, was zu einer Vergrößerung des Bildformates führt. Die Zuordnung der Einzelbilder zum Gesamtbild erfolgt dann entweder über eine hochgenaue Mechanik [67], [68] oder optisch numerisch durch die Messung eines in der Bildebene auf einer Glasplatte aufgebrauchten Bezugsgitters (Réseauscanning) [69].

Alle Elemente zur Auflösungserhöhung beeinflussen die Gesamtgenauigkeit des Aufnahmesystems. Bei scannenden Systemen wirkt sich bei ausschließlich mechanischer Zuordnung der Einzelbilder die Genauigkeit der Verstellmechanik direkt auf die Geometrie der hochaufgelösten Bilder aus. Beim Réseauscanning ist die Genauigkeit des Réseaus bestimmend für die zu erreichende Bildmeßgenauigkeit [70].

Sensor und Signalübertragung

CCD-Sensoren bieten aufgrund ihres Aufbaus in den meisten Fällen hohe geometrische Genauigkeiten [71]. Zur Beurteilung eines Aufnahmesystems sollte der Sensor in Verbindung mit dem verwendeten Framegrabber betrachtet werden. Insbesondere dann, wenn keine pixelsynchrone Übertragung des Signals von Kamera zu Bildspeicher gewährleistet ist, können bei der A/D-Wandlung des Videosignals je nach Art der Synchronisierung geometrische Fehler unterschiedlicher Größenordnung auftreten [70], [72]. Bei pixelsynchronem Auslesen der Daten hingegen wird durch die zusätzliche Übertragung des Pixeltaktes gewährleistet, daß einem Sensorelement exakt ein Bildelement im Bildspeicher entspricht. Allerdings kann auch bei dieser Übertragungsart nicht davon ausgegangen werden, daß die einzelnen Bildelemente quadratisch sind. Vielmehr ist unabhängig von der Art der Synchronisierung bei den meisten Sensor-Bildspeicherkombinationen ein Affinitätsfaktor zu berücksichtigen, d. h. die Ausdehnung der Pixel in Zeilen- und Spaltenrichtung kann unterschiedlich sein.

2.2.4.2 Einfluß äußerer Effekte auf die geometrische Leistungsfähigkeit

Sind mehrere Kameras im Rahmen eines Online-Meßsystems angeordnet, so können sich nach erfolgter Kalibrierung und Orientierung sowohl die Parameter der inneren Orientierung (z. B. durch Umfokussierung und Temperaturänderungen), als auch die Parameter der äußeren Orientierung (z. B. durch mechanische Einwirkungen oder Temperaturänderungen) verändern. Die daraus resultierenden Einflüsse reichen von Maßstabsfehlern bei der Objektbestimmung bis zu komplexen Modelldeformationen. Aus diesem Grunde muß in solchen Systemen eine Möglichkeit der Überprüfung bzw. der Neubestimmung aller relevanten Parameter vorhanden sein.

2.2.5 Kameramodell

Bei der Nutzung optischer Systeme zu Meßzwecken ist die Modellierung des vollständigen Abbildungsvorganges entscheidend für die zu erreichende Genauigkeit.

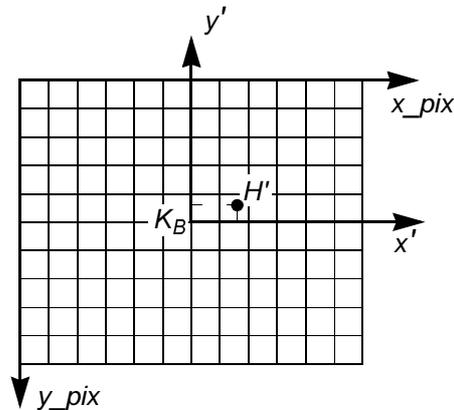


Abbildung 7: Festlegung des Bildkoordinatensystems

Grundlage für die weitere Betrachtung ist die Definition eines Bildkoordinatensystems K_B in der Bildebene der Kamera, die bei elektrooptischen Kameras durch die Sensorebene definiert ist. Der Ursprung des Bildkoordinatensystems liegt im Zentrum der im Bildspeicher befindlichen digitalen Bilder (Abbildung 7). Da der Abstand von Bildelementen in Spaltenrichtung im Bildspeicher gleich dem Abstand der entsprechenden Sensorelemente ist, kann als Maßeinheit im Bildraum die Einheit „Bildelement in Spaltenrichtung“ dienen. Alle Parameter der inneren Orientierung können ohne Umrechnung in metrische Größen sofort in dieser Einheit berechnet werden [73].

2.2.5.1 Kamerakonstante und Hauptpunktlage

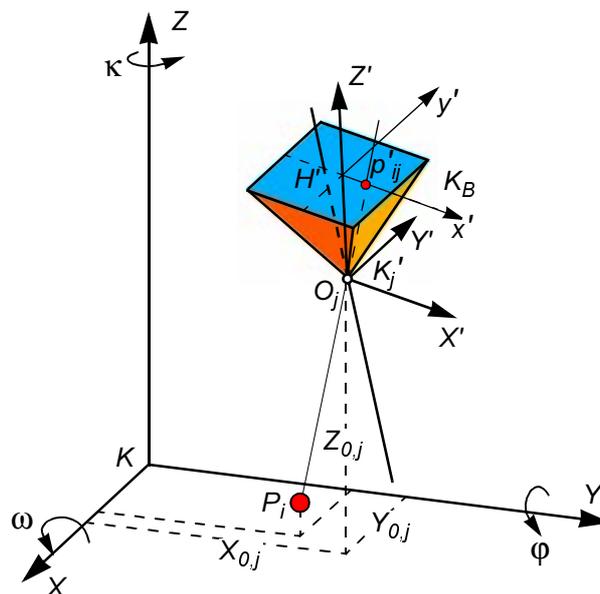


Abbildung 8: Vereinbarung der Koordinatensysteme in der Zentralprojektion

Betrachtet man die Abbildung eines Objektpunktes in die Bildebene unter idealisierten Bedingungen ergibt sich gemäß Abbildung 8 und analog zu Gleichung 6

$$\begin{bmatrix} x'_{ij} \\ y'_{ij} \end{bmatrix} = \frac{-c}{Z'_{ij}} \cdot \begin{bmatrix} X'_{ij} \\ Y'_{ij} \end{bmatrix}. \quad (Gl. 10)$$

Die Bezugsachse zur Kameramodellierung ist jedoch im Realfall nicht die optische Achse im physikalischen Sinne, sondern ein Hauptstrahl, der objektseitig senkrecht auf der Bildebene steht und diese im Bildhauptpunkt $H'(x'_H, y'_H)$ schneidet. Das Projektionszentrum O_j liegt im Abstand c_K senkrecht vor dem Bildhauptpunkt [74].

Damit erweitert sich die Gleichung 10 wie folgt:

$$\begin{bmatrix} x'_{ij} \\ y'_{ij} \end{bmatrix} = \frac{-c_K}{Z'_{ij}} \cdot \begin{bmatrix} X'_{ij} \\ Y'_{ij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x'_H \\ y'_H \end{bmatrix}. \quad (Gl. 11)$$

2.2.5.2 Verzeichnung und Affinität

Für die radialsymmetrische, die radialasymmetrische und tangentiale Verzeichnung sowie die Affinität ergibt sich aus Gleichung 11 mit einem weiteren Korrekturterm:

$$\begin{bmatrix} x'_{ij} \\ y'_{ij} \end{bmatrix} = \frac{-c_K}{Z'_{ij}} \cdot \begin{bmatrix} X'_{ij} \\ Y'_{ij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x'_H \\ y'_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix}. \quad (Gl. 12)$$

Hierbei enthalten dx und dy , in Abhängigkeit von dem verwendeten Kameramodell, Anteile der genannten Verzeichnungen und der Affinität:

$$dx = dx_{sym} + dx_{asy} + dx_{aff} \quad \text{und} \quad dy = dy_{sym} + dy_{asy} + dy_{aff}. \quad (Gl. 13)$$

Radialsymmetrische Verzeichnung

Die für jedes Objektiv charakteristische radialsymmetrische Verzeichnung lässt sich im allgemeinen mit genügender Genauigkeit durch ein Polynom ungerader Potenzen des Bildradius darstellen (im folgenden wird zur Vereinfachung x'_{ij} und y'_{ij} als x und y bezeichnet):

$$dr_{sym} = A_1 \cdot (r^3 - r_0^2 \cdot r) + A_2 \cdot (r^5 - r_0^4 \cdot r) + A_3 \cdot (r^7 - r_0^6 \cdot r) \quad (Gl. 14)$$

mit

dr_{sym} : radialsymmetrische Verzeichnungskorrektur

r : Bildradius aus $r^2 = x^2 + y^2$

A_1, A_2, A_3 : Polynomkoeffizienten

r_0 : zweiter Nulldurchgang der Verzeichnungskurve

wobei

$$dx_{sym} = \frac{dr_{sym}}{r} \cdot x \quad \text{und} \quad dy_{sym} = \frac{dr_{sym}}{r} \cdot y. \quad (Gl. 15)$$

In den meisten Fällen reicht ein Polynom mit zwei Koeffizienten bereits zur Beschreibung der radialsymmetrischen Verzeichnung aus. Durch Erweiterung dieses Verzeichnungsmodells ist es möglich, auch Objektive mit starker Abweichung von der Zentralprojektion hinreichend gut zu beschreiben [75].

Radialasymmetrische und tangentielle Verzeichnung

Zurückgehend auf Conrady [76] lassen sich diese Verzeichnungsanteile wie folgt formulieren [64]:

$$dx_{asy} = B_1 \cdot (r^2 + 2x^2) + 2B_2xy \quad (Gl. 16)$$

$$dy_{asy} = B_2 \cdot (r^2 + 2y^2) + 2B_1xy. \quad (Gl. 17)$$

Affinität und Nichtorthogonalität

Die im allgemeinen durch die Synchronisation hervorgerufenen Unterschiede in Länge und Breite der im Bildspeicher abgelegten Bildelemente lassen sich durch einen Affinitätsfaktor berücksichtigen. Zusätzlich kann auch eine Affinitätsrichtung bestimmt werden, die in erster Linie die Orthogonalität der Achsen des Bildkoordinatensystems K_B beschreibt. Beide Effekte lassen sich wie folgt berücksichtigen:

$$dx_{aff} = C_1x + C_2y \quad (Gl. 18)$$

$$dy_{aff} = 0. \quad (Gl. 19)$$

2.2.5.3 Einsatz der Bündelausgleichung zur Bestimmung von Kameraparametern

Die Bestimmung von Verzeichnungsparametern läßt sich im Labor unter fest definierten Bedingungen nach dem Goniometerverfahren oder dem Kollimatorverfahren durchführen [74].

Gegen den Einsatz dieser Laborverfahren für die Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme spricht, daß

- der apparative Aufwand sehr groß ist,
- die innere Orientierung der verwendeten Kameras im allgemeinen nicht stabil ist, was im Einsatz eine Nachkalibrierung in regelmäßigen Abständen erfordert,
- die innere Orientierung einschließlich Verzeichnung sich bei unterschiedlichen Fokussierungen und Blendeneinstellungen ändert und damit eine Kalibrierung unter Einsatzbedingungen sinnvoller ist.

Die Bestimmung aller zur Kalibrierung und Orientierung notwendigen Parameter unter Einsatzbedingungen kann im Rahmen einer photogrammetrischen Bündelausgleichung erfolgen. Hierbei werden aufbauend auf den Gleichungen 4 und 12 für jeden in einem Bild gemessenen Punkt zwei Beobachtungsgleichungen aufgestellt. Die Gesamtheit aller Gleichungen für die Bildpunkte aller betrachteten Objektpunkte führt zu einem System, das die Bestimmung der unbekannt Parameter ermöglicht [80]. Da es sich um ein nichtlineares Gleichungssystem handelt, muß zunächst linearisiert werden. Die Berechnung wird iterativ nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durchgeführt, wobei die Bestimmung der Unbekannten so erfolgt, daß die Quadrate der Abweichungen

an den beobachteten Bildkoordinaten minimiert werden. Damit erlaubt die Bündelausgleichung eine simultane Bestimmung der unbekanntenen Objektkoordinaten, der äußeren Orientierung sowie der inneren Orientierung mit allen relevanten Systemparametern des Aufnahmesystems. Zusätzlich werden für alle Parameter Standardabweichungen berechnet, wodurch eine Beurteilung der Güte des Aufnahmesystems möglich wird.

Die Kalibrierung und die Orientierung wird an hochgenau vermessenen Paßpunktfeldern durchgeführt, die die Bildpunkte für die Beobachtungsgleichungen liefern. Die Orientierung wird dabei auf das Paßpunktfeld bezogen. Ist dieses ortsfest installiert, so kann das Kamerasystem bezüglich eines festen, übergeordneten Koordinatensystems orientiert werden. Bei der Orientierung mit Hilfe mobiler Paßpunktfelder gilt die Orientierung des Kamerasystems bezüglich des Aufstellungsortes des Paßpunktfeldes.

2.3 Hardwareprofil des verwendeten Photogrammetriesystems

Das verwendete Photogrammetriesystem besteht wie in Abbildung 9 dargestellt aus dem Paßpunktfeld und Meßmarken auf der Objektseite sowie Videokameras mit Beleuchtungseinrichtungen, Multiplexer, Framegrabber und Auswerterechner auf der bildderzeugenden und -verarbeitenden Seite.

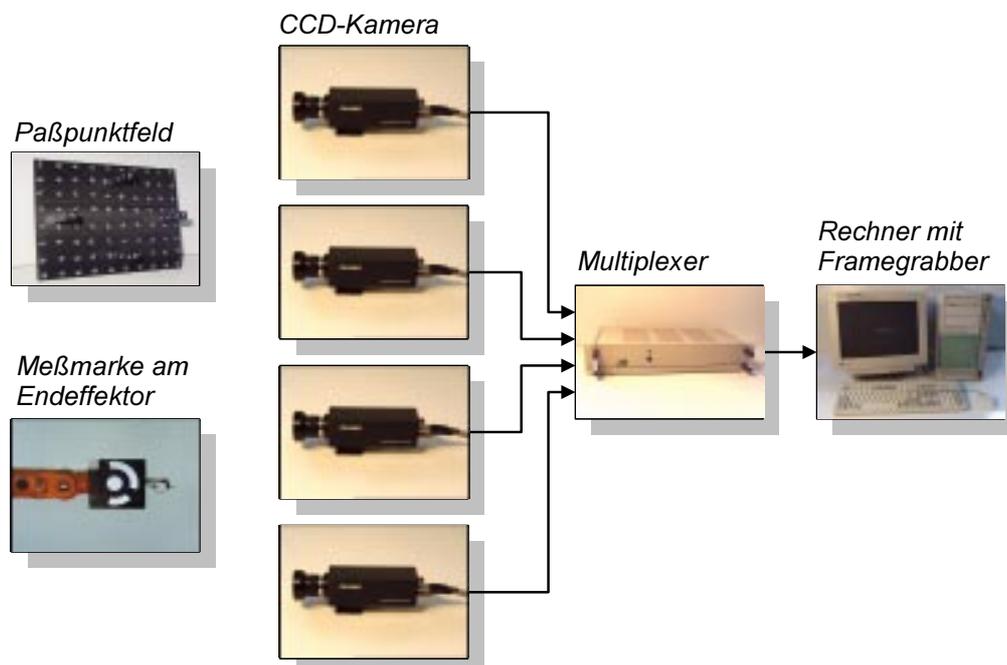


Abbildung 9: Hardware des Photogrammetriesystems

Als Kernstück des Photogrammetriesystems kommen CCD-Kameras vom Typ Pulnix TM-9701 zum Einsatz. In Tabelle 1 sind die wichtigsten technischen Daten zusammengefaßt.

Tabelle 1: technische Daten der Kameras

Sensortyp	S/W, 2/3" Progressive Scan Interline Transfer CCD
Pixelanzahl	768 (h) x 484 (v)
Zellengröße	11,6 μ m x 13.6 μ m
Signal/Rausch-Verhältnis	min. 50dB
Videoausgang	analog, 75 Ohm und digital, 8-bit RS-422
Linsen	C-mount, 2/3"

Die Kameras sind mit 2/3"-C-mount-Objektiven vom Typ Cosmicar $f = 6,5\text{mm}$ mit Festfokus oder vom Typ Cosmicar $f = 8\text{mm}$ mit variablem Fokus ausgestattet. Bis zu vier Kameras können an den Multiplexer vom Typ Mikrotron Inspecta angeschlossen werden. Es wird der digitale Kameraausgang im RS-422-Format genutzt. Der Framegrabber ist eine PCI-Steckkarte vom Typ Mikrotron Inspecta-2. Er ist zur gleichzeitigen Verarbeitung von vier analogen oder vier digitalen Videosignalen mit bis zu 4096 Zeilen geeignet und legt die Bilddaten mit einer maximalen Datenrate von $>100\text{MB/s}$ im Hauptspeicher des Auswerterechners ab. Als Rechner kommt ein PC mit Pentiumprozessor, 300MHz und 64MB RAM zum Einsatz. Die Bildübertragung von den Kameras zum Rechner erfolgt pixelsynchron.

Die Objektseite ist zur Kalibrierung und Orientierung alternativ durch ein kleines, mobiles und ein stationäres Paßpunktfeld gegeben. Das mobile Paßpunktfeld hat die Abmessungen $900 \times 750\text{mm}$ und besteht aus 122 retroreflektierenden Meßmarken mit dem Durchmesser 32mm , die zum Zweck der automatischen Erkennung mittels eines definiert unterbrochenen Coderinges kodiert sind. Sie sind auf eine Kohlefaser-Aluminiumwaben-Sandwichplatte aufgebracht, die über hohe Steifigkeit, geringe Wärmedehnung und damit photogrammetrische Stabilität und ein, die Handhabbarkeit begünstigendes, geringes Gewicht verfügt. Auf das Feld sind vier ebenfalls mit Meßmarken versehene Aluminiumsäulen der Länge 200mm aufgebracht, die das Paßpunktfeld zu einer räumlichen Struktur erweitern.

Das stationäre Paßpunktfeld besteht aus 40 retroreflektierenden Marken mit dem Durchmesser 145mm , die auf die Stützpfiler des in Abschnitt 4 detailliert beschriebenen Großmanipulators die Hallenstruktur und im Objektraum befindliche, stationäre Bauteile aufgebracht sind.

Die Meßmarken am Objekt (Roboter, Endeffektor) sind kodierte, retroreflektierende Marken mit dem Innendurchmesser 70mm .

Als Beleuchtungseinrichtungen werden 150W und 500W Halogenstrahler verwendet.

2.4 Mehrmedien-Photogrammetrie

Durchtritt ein Lichtstrahl auf seinem Weg vom Objekt zum Objektiv der Meßkamera Medien unterschiedlichen optischen Brechungsverhaltens, so spricht man von Mehrmedienphotogrammetrie. Ist nur ein Phasenübergang Gegenstand der Betrachtung, so handelt es sich um einen Zweimedienfall. In vielen Fällen befindet sich jedoch eine Glaseinfassung oder Abdeckung im Strahlengang, und es ist der allgemeinere Mehrmedienansatz zu wählen.

2.4.1 Unterteilung mehrmedienphotogrammetrischer Anordnungen

Die Anwendungen zur Vermessung von Objekten oder Vorgängen unter Wasser lassen sich nach der Anordnungen in drei Gruppen teilen:

- Bei der Verwendung von Unterwasserobjektiven steht die äußere Linse in direktem Kontakt mit dem Wasser. Hier liegt der Einmedien-Fall vor, wobei die speziellen optischen Eigenschaften des Wassers bezüglich der Verzeichnung bzw. der Aberrationen berücksichtigt werden müssen [30], [31].
- Die Kamera befindet sich in Luft, von der das Wasser durch eine Klarsicht-Trennschicht (z. B. Glasscheibe) abgegrenzt ist. Dabei ist die Kamera entweder fest in einer Gehäusekammer montiert, die als Ganzes ins Wasser getaucht wird, oder das Wasser selbst wird durch Fenster begrenzt. Hier liegen die drei Medien Luft-Glas-Wasser vor, im einfachsten Fall mit planparallelen Trennebenen. Beim Einsatz einer Kamera in einer Gehäusekammer wird beides üblicherweise als Gesamtsystem unter Anwendungsbedingungen kalibriert.
Es existieren auch speziell geformte Fenster mit konzentrischen, sphärischen Flächen (Dom oder Kuppel), wobei Brechung und Aberrationen verhindert werden, wenn sich die Eintrittspupille des Objektivs im gemeinsamen Krümmungsmittelpunkt dieser Flächen befindet. So wird erreicht, daß die Abbildungsstrahlen normal zu den Flächen verlaufen. Auch korrigierende Linsenfenster oder Fenstermaterialien mit annähernd gleichem Brechungsindex wie Wasser sind verfügbar [15]. Bei Anwendung solcher Fenster läßt sich die Messung nach dem Einmedienprinzip durchführen. In allen anderen Einsatzfällen muß der Einfluß der Trennflächen entweder streng berücksichtigt werden, oder es können abhängig von der Strahldurchlaufänge durch die einzelnen Medien unter Abschätzung der entstehenden Fehler einfachere Ansätze durch Reduktion auf den Zwei- oder Einmedienfall gefunden werden [25].
- Die Kamera befindet sich ohne weitere Trennmedien außerhalb des Wassers. An Kamera oder Objektiv werden so keine besonderen Anforderungen gestellt, und es können konventionelle Systeme eingesetzt werden. Da nur ein Phasenübergang Gegenstand der Betrachtung ist, handelt es sich um einen reinen Zweimedienfall. Häufig liegt eine ebene, horizontale Phasengrenzfläche vor, deren Position in der Meßanordnung einfach zu bestimmen und zu beschreiben ist [10], [11], [25], [26]. Ist dies nicht gewährleistet und es liegt eine durch Wellen gekrümmte Oberfläche vor, muß die Position und Lage der Grenzfläche im Zeitpunkt der Aufnahme bekannt und möglichst mathematisch beschreibbar sein [39], [40], [52]. Auch hier ist eine Behandlung als Einmedienfall unter bestimmten Gegebenheiten zulässig, etwa bei geringer Wasserüberdeckung und großem Kameraabstand.

Die Zweimedienphotogrammetrie, bei der sich die Objekte unter Wasser und die Kamera im optisch dünneren Medium Luft befinden, bildet den in dieser Arbeit vorliegenden Fall.

2.4.2 Brechungsmodell in der Zweimedien-Photogrammetrie

2.4.2.1 Modellvoraussetzungen

Der Brechungsindex n eines Mediums ergibt sich aus dem Quotienten der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes c_0 im Vakuum zur Ausbreitungsgeschwindigkeit c_M im jeweiligen Medium:

$$n_M = \frac{c_0}{c_M}. \quad (\text{Gl. 20})$$

Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Wellenlänge des Lichtes abhängig ist, wird eine diskrete Wellenlänge, d. h. monochromatisches Licht angenommen. Es wird Homogenität und Isotropie des jeweiligen Mediums vorausgesetzt, so daß der Brechungsindex als konstant angesehen werden kann. Für reine Luft können diese Annahmen gemacht werden, so daß $n_L = 1$ angenommen werden kann (*exakt* $n_L = 1,0003$). Der Brechungsindex n_w von Wasser beträgt etwa 1,33, unterliegt jedoch den in Abschnitt 2.4.3 detailliert beschriebenen Einflüssen, wie Salzgehalt, Temperatur, Wassertiefe und Wellenlänge des Lichtes, die für hohe Genauigkeitsanforderungen berücksichtigt werden müssen.

2.4.2.2 Brechungsmodell für die ebene Phasengrenze

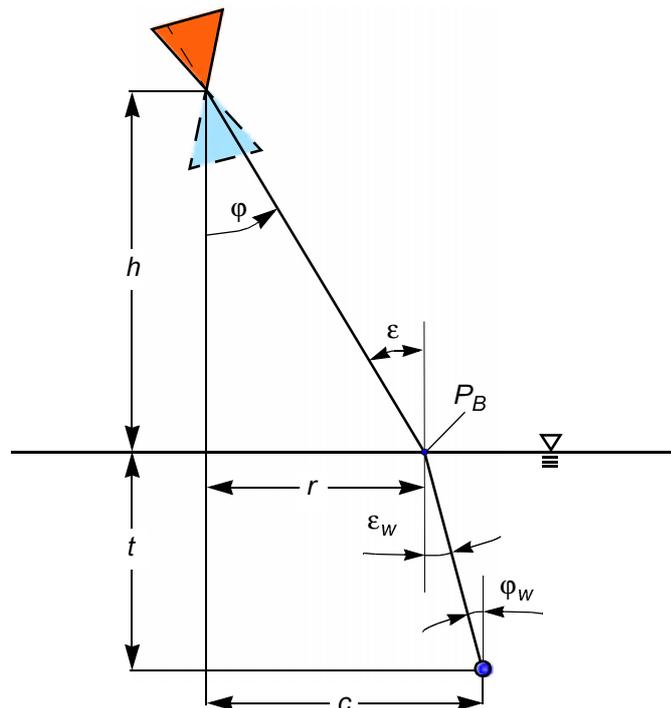


Abbildung 10: Brechung bei ebener Wasseroberfläche

Den Einfluß der Brechung an einer ebenen Wasseroberfläche zeigt Abbildung 10. Das Projektionszentrum der Kamera befindet sich mit dem vertikalen Abstand h über, das betrachtete Objekt mit dem Abstand t unter der Wasseroberfläche. Der horizontale Abstand des Objektes vom Lot durch das Projektionszentrum beträgt c .

Nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz verhält sich der Brechungswinkel ε in Luft zum Brechungswinkel ε_w im Objektmedium Wasser nach:

$$\frac{\sin \varepsilon}{\sin \varepsilon_w} = \frac{n_w}{n_L} \cong n_w \cong 1,33. \quad (\text{Gl. 21})$$

Für den Brechungspunkt P_B auf der Oberfläche mit dem horizontalen Radialabstand r vom Lot durch das Projektionszentrum ergeben sich die Beziehungen:

$$r = h \cdot \tan \varphi = c - t \cdot \tan \varphi_w. \quad (\text{Gl. 22})$$

Dabei gilt für den Fall der ebenen, horizontalen Grenzfläche für den Einfallswinkel zum Lot:

$$\varphi = \varepsilon \text{ und } \varphi_w = \varepsilon_w. \quad (\text{Gl. 23})$$

Da hiermit fünf Gleichungen für ein nichtlineares Gleichungssystem mit fünf Unbekannten (r , φ , φ_w , ε , ε_w) vorliegen und keine analytische Lösung möglich ist, muß ein iteratives Verfahren angewendet werden. So können der Radialabstand r des Brechungspunktes P_B und der Eintrittswinkel φ z. B. mit dem Newtonschen Verfahren zur Lösung von Nullstellenproblemen ermittelt werden (Gleichung 24). Dazu wird der aus dem Gleichungssystem entwickelbare Term in die Form $f(r) = 0$ gebracht (Gleichung 25) und die Ableitung gebildet. Mit einer geeigneten Startnäherung $r^{(0)}$, für die der Durchstoßpunkt des ungebrochenen Strahls durch die Grenzfläche geeignet ist, wird die Iteration nach Gleichung 24 durchgeführt, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist (Mindestgenauigkeit). Für den Einfallswinkel φ ergibt sich die Lösung analog dazu mit Gleichung 26.

$$r^{(k+1)} = r^{(k)} - \frac{f(r^{(k)})}{f'(r^{(k)})} \quad (\text{Gl. 24})$$

$$t \cdot \tan \left(\arcsin \frac{\sin \left(\arctan \frac{r}{h} \right)}{n_w} \right) + r - c = 0 \quad (\text{Gl. 25})$$

$$t \cdot \tan \left(\arcsin \frac{\sin \varphi}{n_w} \right) + h \cdot \tan \varphi - c = 0 \quad (\text{Gl. 26})$$

Die Verlagerung des Brechungspunktradioalabstandes r ist dabei nicht linear von der horizontalen Objektentfernung c abhängig (Abbildung 11), die Linearität nimmt jedoch mit zunehmender Betrachterhöhe h zu. Für $h \rightarrow \infty$ liegt eine Parallelbetrachtung von oben vor, und die Abhängigkeit nimmt den linearen Verlauf $r = c$ an.

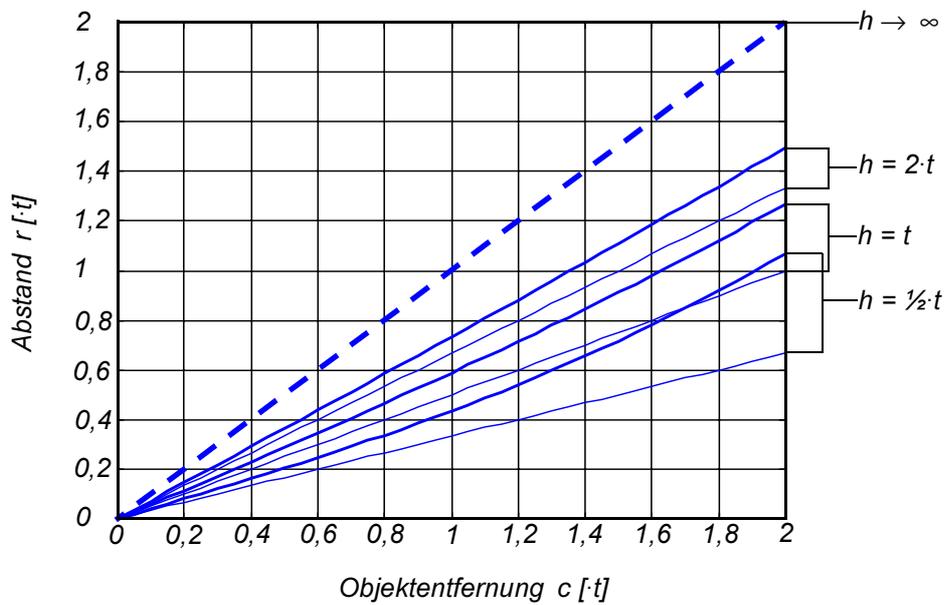


Abbildung 11: Radialabstand des Brechungspunktes r bei Änderung der Objektentfernung c (t als Einheitslänge, dünn: ohne Brechung)

Abbildung 12 zeigt die Abhängigkeit des Einfallswinkels φ von c . Es wird deutlich, daß die durch den Brechungseinfluß hervorgerufene Abweichung vom Einfallswinkel ohne Brechung mit zunehmender Höhe geringer wird, wobei jedoch gleichzeitig der absolute Einfallswinkel abnimmt.

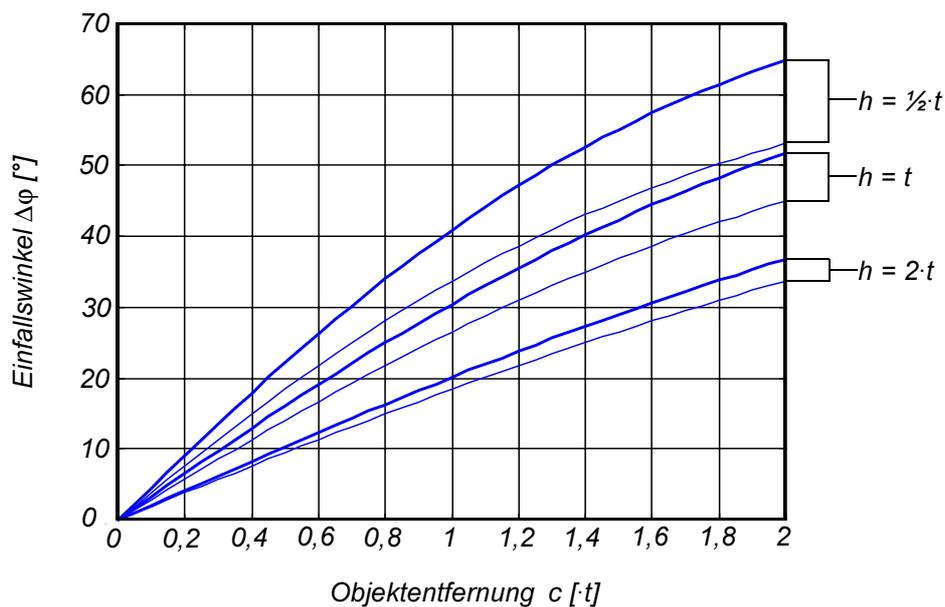


Abbildung 12: Einfallswinkel φ bei Änderung der Objektentfernung c (t als Einheitslänge, dünn: ohne Brechung)

2.4.2.3 Allgemeines Modell für gekrümmte Phasengrenzen

Für den Fall einer nicht ebenen, gekrümmten Phasengrenze (Abbildung 13), die durch eine Funktion $z(r)$ beschrieben wird, sind h und t wie folgt von r abhängig:

$$h(r) = h_0 - z(r) \quad (\text{Gl. 27})$$

$$t(r) = t_0 + z(r). \quad (\text{Gl. 28})$$

Zusätzlich tritt eine ebenfalls von r abhängige Oberflächenneigung auf:

$$\alpha(r) = \arctan \frac{dz(r)}{dr}. \quad (\text{Gl. 29})$$

Aus ihr ergibt sich:

$$\varphi(r) = \varepsilon + \alpha(r) \quad (\text{Gl. 30})$$

$$\varphi_w(r) = \varepsilon_w + \alpha(r). \quad (\text{Gl. 31})$$

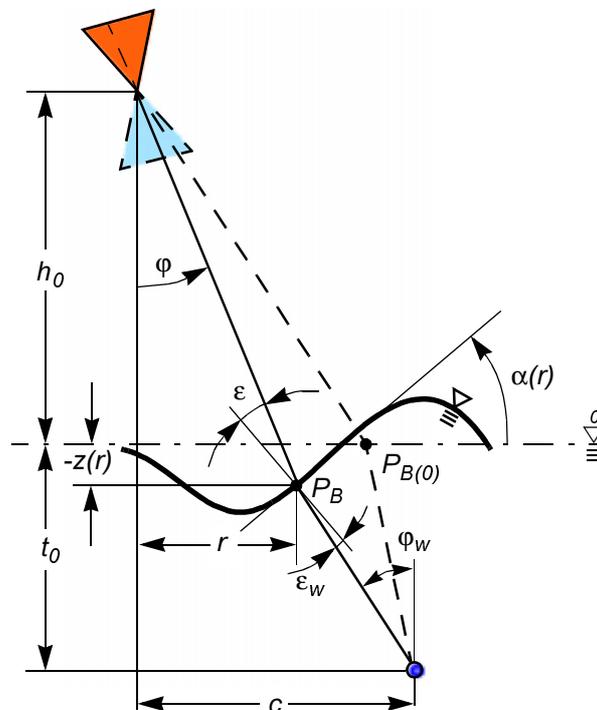


Abbildung 13: Brechung bei gekrümmter Wasseroberfläche
(gestrichelt: Brechung für ebene Grenzfläche mit $\alpha = 0$, $z = 0$)

Für ein Objekt unter der Wasseroberfläche erscheint der Brechungspunkt mit dem Radiabstand r , so daß das Brechungsgesetz (Gleichung 21) und die geometrischen Beziehungen (Gleichungen 22, 30, 31) bei einem Oberflächenverlauf $z(r)$ (Gleichungen 27 bis 29) die Bedingungen für einen Strahlverlauf durch das Projektionszentrum erfüllen.

Auch hier wird zur Bestimmung von r bzw. φ das Newton-Verfahren angewendet, um die Lösung des aus sieben Gleichungen bestehenden Gleichungssystems für sieben Unbe-

kannte ($r, \varphi, \varphi_w, \varepsilon, \varepsilon_w, t, h$) zu ermitteln. Für den Abstand r des Brechungspunktes lassen sich folgende Gleichungen herleiten:

$$t(r) \cdot \tan(\alpha(r) + \arcsin \frac{\sin(\varphi - \alpha(r))}{n_w}) + h(r) \cdot \tan \varphi - c = 0. \quad (\text{Gl. 32})$$

Durch Ersetzen von φ :

$$t(r) \cdot \tan(\alpha(r) + \arcsin \frac{\sin(\arctan \frac{r}{h(r)} - \alpha(r))}{n_w}) + r - c = 0. \quad (\text{Gl. 33})$$

Durch Einsetzen von $\alpha(r)$:

$$(t_0 + z(r)) \cdot \tan \left(\arctan \frac{dz(r)}{dr} + \arcsin \frac{\sin \left(\arctan \frac{r}{h_0 - z(r)} - \arctan \frac{dz(r)}{dr} \right)}{n} \right) + r - c = 0. \quad (\text{Gl. 34})$$

Aus der Lösung für r läßt sich nach Gleichung 22 die z -Auslenkung des Brechungspunktes sowie der Einfallswinkel φ bestimmen.

Um den Einfluß einer frei geformten Phasengrenze im Vergleich zu einer ebenen, horizontalen Grenzfläche zu untersuchen, sind die beiden Grenzflächenparameter Auslenkung und Neigung unabhängig voneinander zu betrachten.

Einfluß der Auslenkung

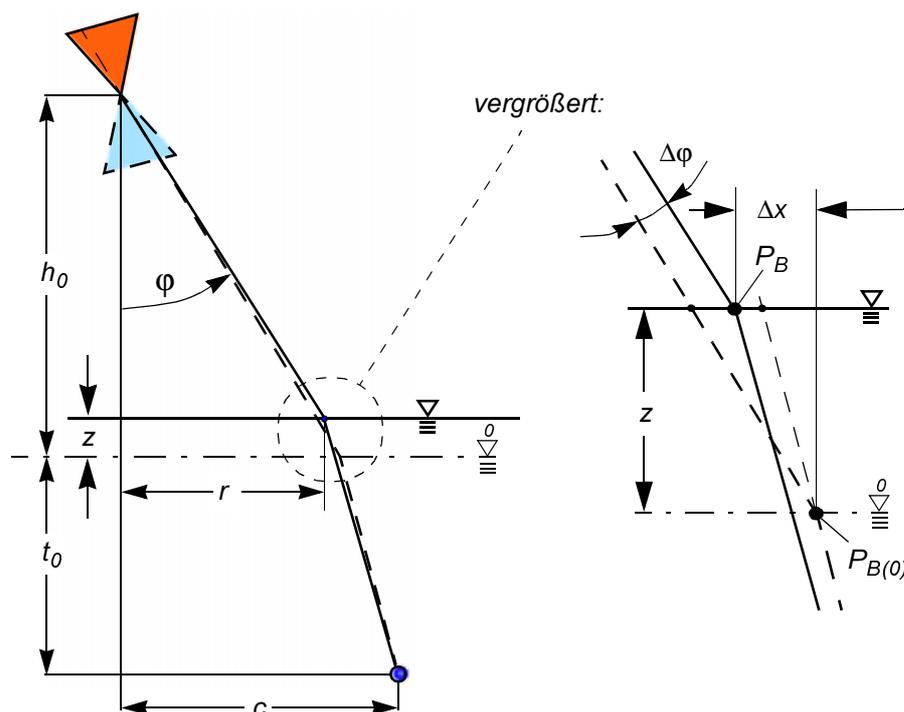


Abbildung 14: Brechung bei höhenveränderter, ebener Wasseroberfläche (gestrichelt: Brechung für $z = 0$)

Zunächst wird die parallele Verlagerung der horizontalen, ebenen Grenzfläche ($\alpha(r) = 0$) von der Ursprungslage (h_0, t_0) betrachtet (Abbildung 14). Der Radialabstand r und der Einfallswinkel φ werden iterativ aus den Gleichungen 27, 28, 32 und 33 ermittelt, wobei $\alpha(r) = 0$ und $z(r) = \text{const.}$ gelten.

Abbildung 14 verdeutlicht, daß bei einer Lageveränderung der Grenzebene um $z = \text{const.}$ der neue Brechungspunkt nur im Bereich zwischen den beiden Schnittpunkten liegen kann, die die an der ursprünglichen Phasengrenze gebrochenen und ggf. verlängerten Strahlabschnitte mit der Linie der verlagerten Phasengrenze bilden. Für Einfallswinkel $\varphi (< 45^\circ)$ ist die Veränderung des Radialabstandes Δx im Verhältnis zu z gering. Daraus resultiert, daß $\tan \Delta\varphi$ und somit für kleine Auslenkungen auch $\Delta\varphi$ selbst annähernd proportional zu z sind.

Die aus der parallelen Lageveränderung einer horizontalen Grenzebene resultierenden Veränderungen des Einfallswinkels φ sind in Abbildung 15 für eine Objektposition mit $c = t$ dargestellt. Es zeigt sich im Bereich kleiner Höhenveränderungen (um $z = \pm 0,1 \cdot t$) ein annähernd linearer Verlauf, wobei die Winkelveränderung $\Delta\varphi$ mit zunehmender Betrachterhöhe abnimmt.

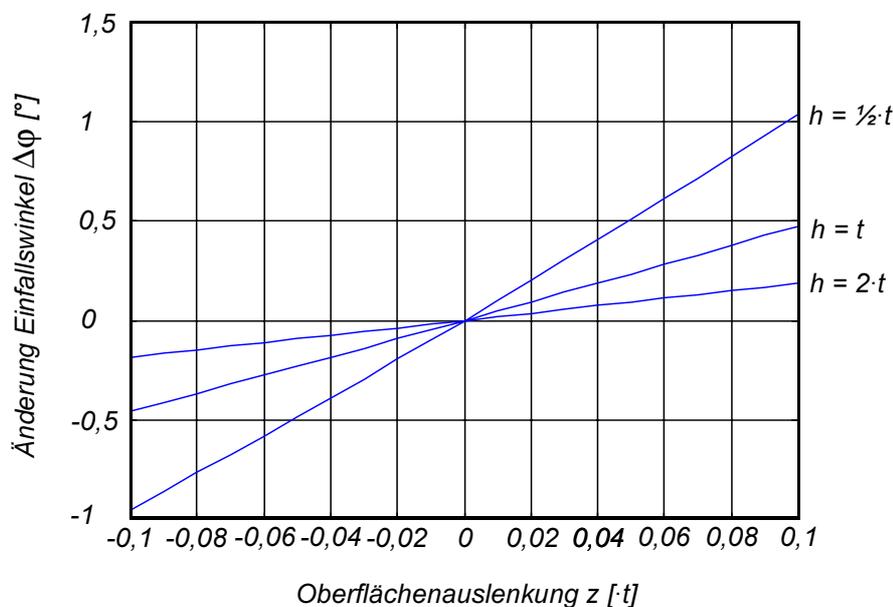


Abbildung 15: Veränderung des Einfallswinkels φ bei Änderung der Auslenkung ($t = c$ als Einheitslänge)

Einfluß der Neigungsänderung

Um den Einfluß der Grenzflächenneigung auf die Brechung zu untersuchen, wird ein Grenzflächenmodell angenommen, bei dem sich die Phasengrenze stets auf der gleichen Höhe befindet ($z(r) = 0$), jedoch in jedem Ort r die gleiche Neigung α bzw. Steigung dz/dr vorliegt (Sägezahnfunktion mit infinitesimal kleinen Abschnitten). Ändert sich diese Neigung, so verändert sich auch der Abstand r des Brechungspunktes. Der neue Brechungspunkt kann auch beschrieben werden als der Punkt, in dem eine um den Win-

Die Änderung des Einfallswinkels φ in die Aufnahmekamera durch eine geneigte Grenz-ebene ist in Abbildung 17 für verschiedene Höhen des Projektionszentrums dargestellt. Im Bereich kleiner Winkel ($\alpha < \pm 10^\circ$) liegt ebenfalls eine annähernd lineare Abhängigkeit vor, wobei die Veränderung mit zunehmender Höhe abnimmt (vgl. Abbildung 15). Die Beträge der Winkelveränderung liegen über den durch Höhenveränderung hervorgerufenen, sind mit diesen aufgrund der unterschiedlichen Einheiten jedoch nur bedingt vergleichbar.

2.4.2.4 Auftreten mehrerer Brechungsbilder

Bei stark gewellten Phasengrenzen bzw. Unstetigkeiten kann es vorkommen, daß die Bedingungen für einen Strahlengang durch das Projektionszentrum für mehrere Punkte auf der Oberfläche erfüllt sind, Gleichung 33 also mehrere Lösungen hat. In diesem Fall liegen mehrere Brechungsbilder desselben Objektes vor (Abbildung 19).

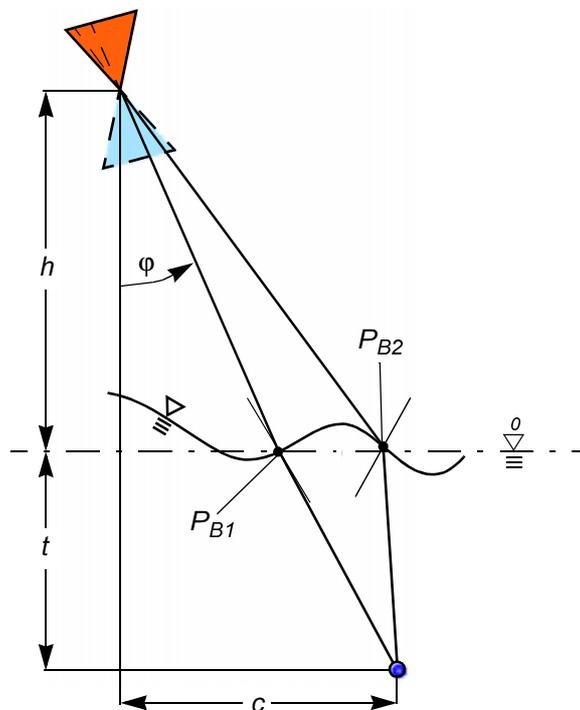


Abbildung 19: mehrere Brechungsbilder bei stark gewellter Wasseroberfläche

2.4.3 Optische Eigenschaften des Wassers

Befinden sich die zu vermessenden Objekte unter Wasser, so müssen die von ihnen ausgehenden Lichtbündel das Wasser auf der Strecke zum abbildenden System durchdringen, welche damit ein optisches Element im Abbildungsvorgang darstellt. Im wesentlichen beeinflusst das Wasser die Anwendung photogrammetrischer Verfahren aufgrund der optischen Eigenschaften bezüglich des Brechungsindex und der Lichtdurchlässigkeit. Da gemäß der Aufgabenstellung in erster Linie Vermessungsaufgaben in industrieller Umgebung mit begrenzter Wassertiefe behandelt werden, so daß die Auswirkungen

der Lichtdurchlässigkeit zurücktreten, beschränkt sich die Betrachtung auf den Brechungsindex.

Der Brechungsindex des Wassers (n_W) wird in komplexer Weise von dessen Zustand beeinflusst. Für von biologischen Einflüssen weitgehend freies Industrierwasser sind die Parameter Wassertemperatur, Wassertiefe und Salzgehalt relevant, wobei die Änderung des Salzgehaltes die größte Auswirkung auf die Änderung des Brechungsindex hat. Der Salzgehalt des Wassers ist vereinbart als die Gesamtmenge der festen Materialien in g pro 1kg Wasser, wenn alle Karbonate in Oxyde umgewandelt, Brom und Jod durch Chlor ersetzt und alle organischen Stoffe vollständig oxydiert sind [82]. So sind im Wasser als Umgebungsmedium von Unterwassererlebe oder -fertigungsprozessen Gradienten des Salzgehaltes in Abhängigkeit von der Entfernung vom Prozeß zu erwarten.

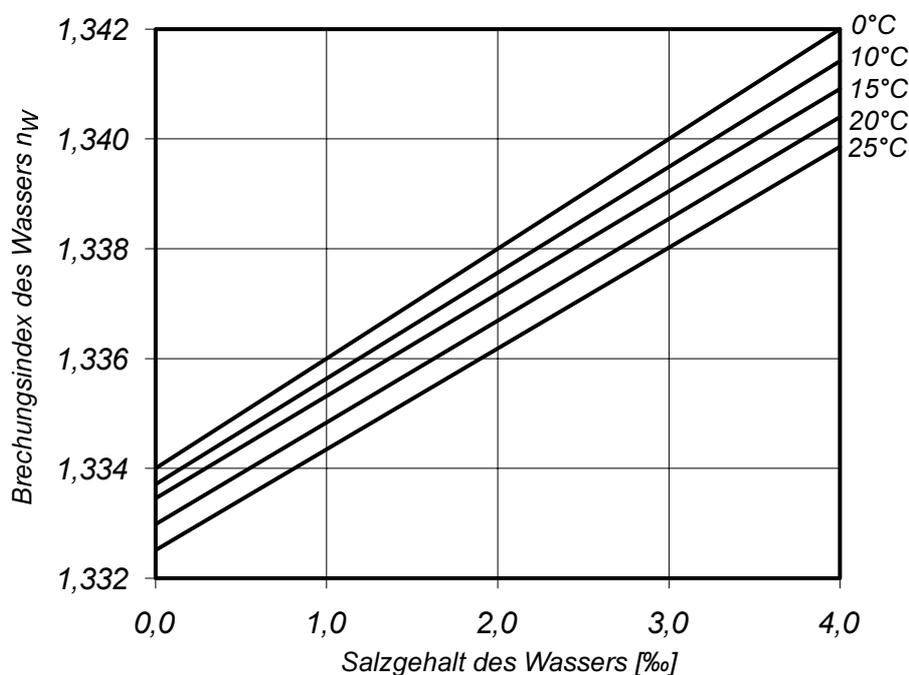


Abbildung 20: Brechungsindex von Wasser in Abhängigkeit vom Salzgehalt ($\lambda = 587,6\text{nm}$) [83]

Der Abbildung 20 ist zu entnehmen, daß zwischen dem Brechungsindex des Wassers und dem Salzgehalt ein streng linearer Zusammenhang, der mit

$$n_W = n_{W_0} + 0,0002 \cdot S \quad (\text{Gl. 35})$$

mit S : Salzgehalt [‰]

beschrieben ist, besteht [83].

Der Einfluß der Wassertiefe ist gemäß Abbildung 21 gering und kann für die meisten Anwendungen vernachlässigt werden. Theoretisch kann diese Abhängigkeit jedoch bei

Vermessungsaufgaben in druckbeaufschlagten Behältern von Bedeutung sein. Dieser Zusammenhang läßt sich mit einer Linearisierung für Wassertiefen von 0 bis 2000m mit

$$n_W = n_{W_0} + 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot t$$

mit t : Wassertiefe [m]

(Gl. 36)

beschreiben [84].

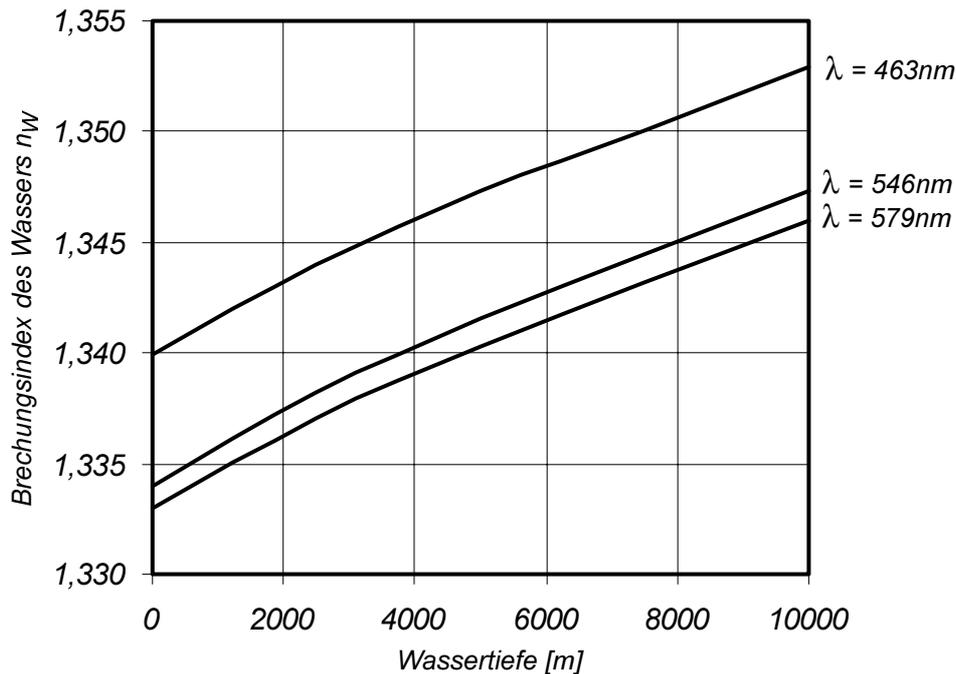


Abbildung 21: Brechungsindex des Wassers in Abhängigkeit von der Wassertiefe (destilliertes Wasser, 25 °C) [84]

Der Einfluß der Wassertemperatur auf den Brechungsindex des Wassers ist um eine Größenordnung größer als der Einfluß der Wassertiefe. Da die Wassertemperatur infolge der Abwärme mechanischer und insbesondere thermischer Fertigungs- und Zerlegeprozesse zumindest in direkter Umgebung des Einsatzortes erhebliche Änderungen erfahren kann, muß die Veränderung des lokalen Brechungsindex des Wassers bei hohen Genauigkeitsanforderungen an die photogrammetrische Messung berücksichtigt werden. Abbildung 22 veranschaulicht die Abhängigkeit des Brechungsindex des Wassers von der Wassertemperatur. Unterstellt man vereinfachend einen linearen Zusammenhang, so läßt sich der Sachverhalt mit:

$$n_W = n_{W_0} + 4 \cdot 10^{-5} \cdot T$$

mit T : Wassertemperatur [°C]

(Gl. 37)

beschreiben [83].

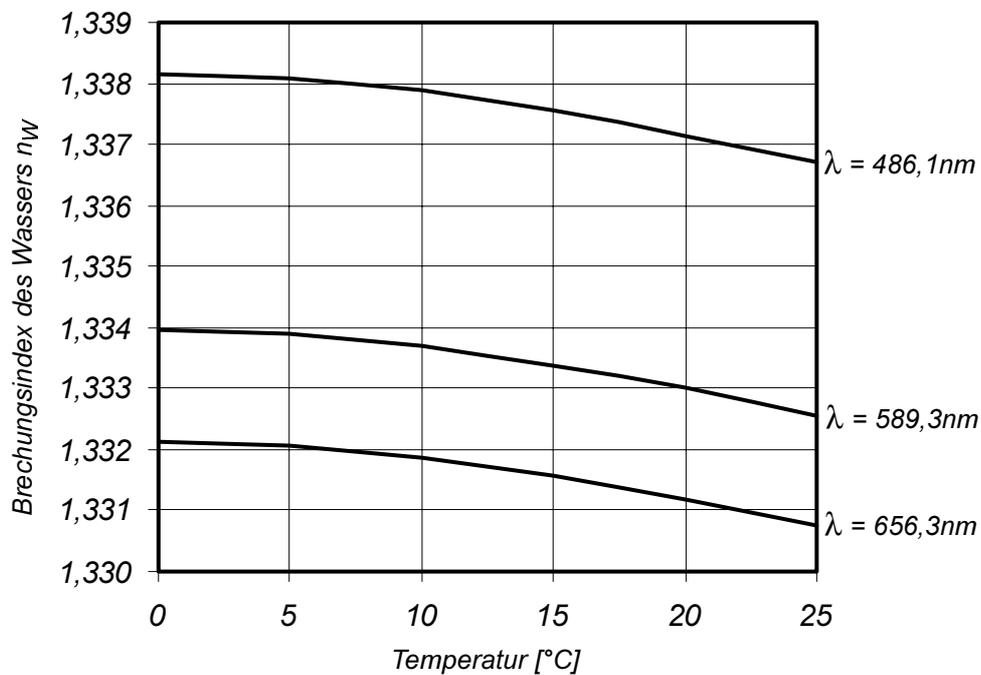


Abbildung 22: Brechungsindex des Wassers in Abhängigkeit von der Wassertemperatur [83]

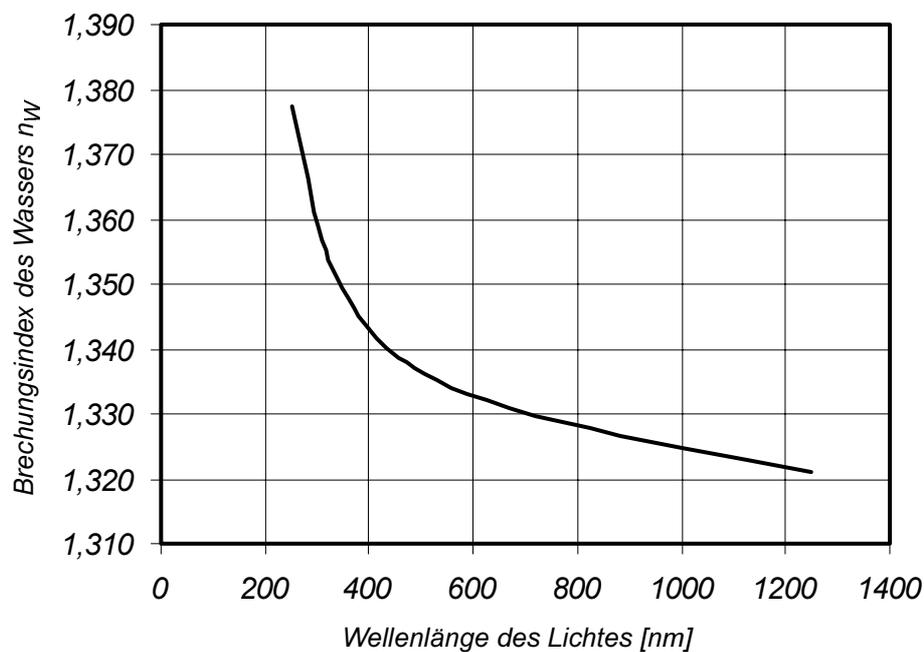


Abbildung 23: Brechungsindex des Wassers in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes [85]

Wie Abbildung 23 zu entnehmen ist, ist die Veränderlichkeit des Brechungsindex mit der Wellenlänge des Lichtes ebenfalls von Bedeutung für die optische Abbildung. Während der Brechungsindex für Luft im sichtbaren Bereich des Lichtes von 380 bis 780nm vernachlässigbar um 0,008% seines mittleren Wertes variiert, beträgt die Abweichung im

Wasser 1,4%. Die Strahlbrechung ist mit einer starken Dispersion verbunden. Im Falle einer optischen Abbildung werden daher an den Bildrändern Farbsäume auftreten. Diese Erscheinung entspricht der chromatischen Aberration und hat ebenso wie diese eine Verringerung des Auflösungsvermögens zur Folge.

Diese Abhängigkeit kann nach [85] im Bereich des sichtbaren Lichtes beschrieben werden als:

$$n_W = n_{W_0} - 4 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda \quad (\text{Gl. 38})$$

für $400\text{nm} \leq \lambda \leq 800\text{nm}$

mit λ : Wellenlänge des Lichtes.

Werden die Terme zur Beschreibung der Einflüsse der Parameter Salzgehalt, Wassertiefe, Wassertemperatur und Wellenlänge zusammengefaßt, so läßt sich in Anlehnung an eine in [86] vorgeschlagene Faustformel angeben:

$$n_W = 1,338 + 4 \cdot ((121 - \lambda) - T + 0,04 \cdot t + 5 \cdot S) \cdot 10^{-5} \quad (\text{Gl. 39})$$

mit

n_W : Brechungsindex des Wassers λ : Wellenlänge des Lichtes [nm]

T : Temperatur des Wassers [°C] t : Wassertiefe [m]

S : Salzgehalt [‰].

3 Verfahrensentwicklung zur Mehrmedienphotogrammetrie bei dynamisch gekrümmter Phasengrenze

Bei der Anwendung des räumlichen Vorwärtsschnitts aus Abschnitt 2.2.2 in der Zwei- oder Mehrmedienphotogrammetrie schneiden sich die für die verschiedenen Kameras rekonstruierten Einfallstrahlen im allgemeinen auch bei exakt bestimmten Bildvektoren nicht, da die Abbildungen des Punktes P in den Bildebenen der Kameras durch an der Wasseroberfläche gebrochene Strahlen erzeugt werden. Während sich die im Objektmedium Wasser verlaufenden Strahlabschnitte schneiden, läßt sich aus den in die Kameras gelangenden Strahlen nur der Richtungsvektor $\vec{x}_{B,i}$ zum jeweils vorliegenden Brechungspunkt $P_{B,i}$ auf der Grenzfläche bestimmen (Abbildungen 4 und 24).

Wie in Abschnitt 2.2.2 basieren auch hier die Überlegungen zunächst auf der Verwendung von zwei Kameras.

Da bei der Brechung die beiden Strahlabschnitte zur Flächennormalen komplanar verlaufen, schneiden sich im Falle einer ebenen Grenzfläche die verlängerten Vektoren \vec{p}_i in einigen Spezialfällen, so z. B. wenn sich der Objektpunkt P in der Ebene befindet, die senkrecht zur Oberfläche durch die beiden Projektionszentren O_i liegt oder in der Symmetrieebene zweier Kameras mit den gleichen vertikalen Höhen h_i . In diesen Fällen kann aus dem Schnittpunkt die exakte, um den Brechungseinfluß korrigierte Objektposition einfach ermittelt werden [10], [11]. Zumeist weist der Schnittpunkt dabei nur eine Höhenabweichung zur exakten Position auf.

Für außerhalb dieser Ebene liegende Objektpunkte P kreuzen sich die Strahlen, d. h. die Ebenen, die vom ungebrochenen Bildvektor \vec{p}_i und vom gebrochenen Vektor $\vec{p}_{B,i}$ aufgespannt werden, schneiden sich in einer Schnittgeraden. Dabei liegt der wirkliche Objektpunkt auf dieser Geraden [10], und die Ermittlung vereinfacht sich ebenfalls (Abschnitt 3.1).

Liegt keine ebene Grenzfläche vor, ist für die Vermessung durch diese hindurch eine aufwendigere Positionsberechnung erforderlich, die jedoch eine Erweiterung des Standes von Wissenschaft und Technik erfordert und daher in dieser Arbeit hergeleitet und entwickelt wird (Abschnitt 3.2).

3.1 Objektpunktbestimmung bei ebener Grenzfläche

Wird ein Objekt durch eine ebene Grenzfläche betrachtet, gibt es zwei Möglichkeiten, die exakte Objektposition photogrammetrisch zu bestimmen. Zum einen können die Strahlverläufe in die einzelnen Kameras mit Hilfe des Brechungsgesetzes und elementarer Methoden der geometrischen Optik rekonstruiert und die Objektposition durch diese Strahlverfolgung bestimmt werden, zum anderen kann der Einfluß der Brechung als radialsymmetrische Verzeichnung interpretiert und in der Kalibrierung des Systems berücksichtigt werden.

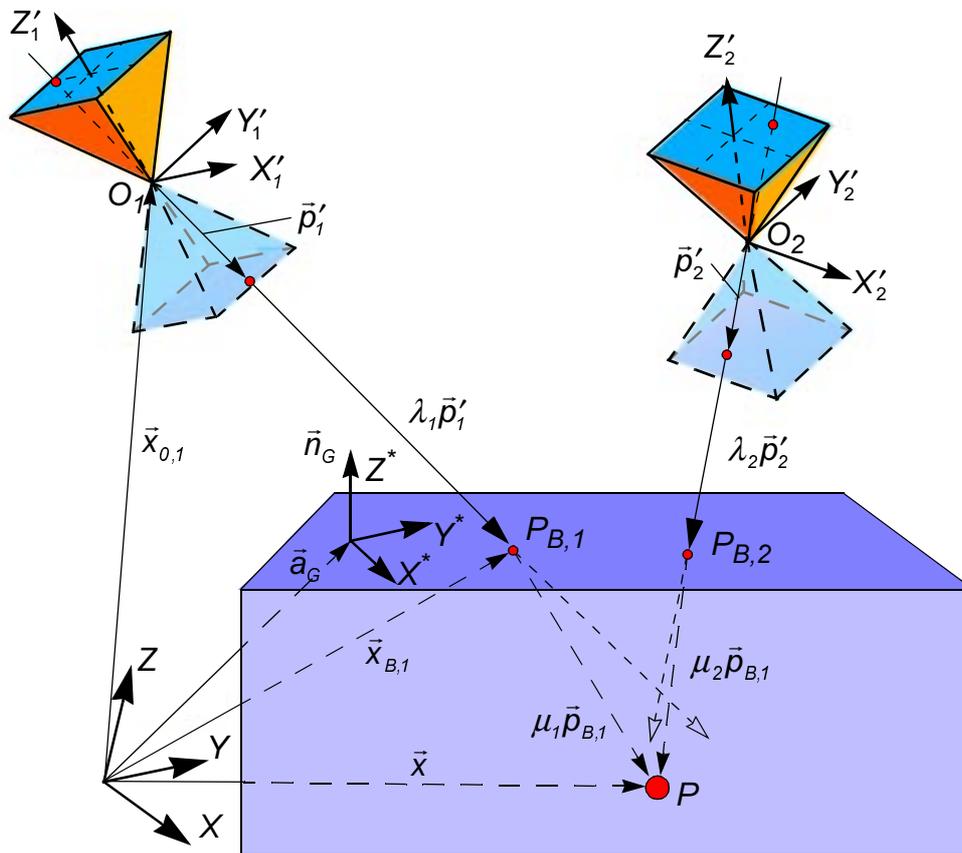


Abbildung 24: Positionsbestimmung bei ebener Grenzfläche

3.1.1 Strahlverfolgung zur Positionsbestimmung (ray-tracing)

Bei der Strahlverfolgung wird der Strahlverlauf vom Bildpunkt durch das Projektionszentrum mit Hilfe der bekannten Position und Orientierung der ebenen Phasengrenze für jede Kamera rekonstruiert. Der Schnittpunkt der im Objektmedium verlaufenden Strahlabschnitte ist die gesuchte Objektposition (Abbildung 24). Dazu wird gedanklich jede Kamera i in den Brechungspunkt $P_{B,i}$ verschoben und in Normalstellung zur Grenzfläche transformiert. Mit Hilfe des Brechungsgesetzes werden neue, gebrochene Bildvektoren $\vec{p}_{B,i}$ aufgestellt, mit denen für die verschobenen Projektionszentren der Vorwärtsschnitt gemäß Abschnitt 2.2.2 durchgeführt wird.

Die Grenzfläche ist durch einen Aufhänge- und einen Normalenvektor gegeben, die etwa durch eine photogrammetrische Vermessung von mindestens drei auf der ebenen Oberfläche schwimmenden Meßmarken mit \vec{x} als Vektor zum Objektpunkt (Marke) ermittelt werden können:

$$\vec{n}_G \cdot (\vec{x} - \vec{a}_G) = 0. \quad (\text{Gl. 40})$$

Es ergeben sich die Koordinaten des Brechungspunktes zu:

$$\vec{x}_{B,i} = \vec{x}_{0,i} + \lambda_i \cdot A_i^T \cdot \vec{p}'_i. \quad (\text{Gl. 41})$$

Dabei gilt:

$$\lambda_i = \frac{\vec{n}_G \cdot \vec{a}_G - \vec{n}_G \cdot \vec{x}_{0,1}}{\vec{n}_G \cdot A_i^T \cdot \vec{p}'_i} \quad (\text{Gl. 42})$$

Zur Ermittlung des Vektors $\vec{p}_{B,i}$ ist der Winkel ε zwischen dem Bildvektor \vec{p}_i und dem Normalenvektor \vec{n}_G der Grenzebene und daraus ε_w nach Gleichung 21 zu bestimmen. Zur Vereinfachung dieses Rechenganges wird zunächst ein weiteres Koordinatensystem K^* mit $X^*-Y^*-Z^*$ eingeführt. Die Bestimmung dieses Grenzflächenkoordinatensystems und der Transformationsmatrix G , die eine Transformation von Welt- in K^* -Koordinaten bewirkt, ist in Abschnitt 3.3.1.1 beschrieben.

Zunächst wird der Bildvektor in K^* -Koordinaten transformiert.

$$\vec{p}_i^* = G \cdot A^T \cdot \vec{p}'_i = \begin{bmatrix} u_i^* \\ v_i^* \\ w_i^* \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 43})$$

Dabei ist A^T die Transformationsmatrix zur Drehtransformation vom Bild- ins Weltkoordinatensystem aus Gleichung 5. Zur Ermittlung des durch Brechung entstehenden Bildvektors $\vec{p}_{B,i}$ wird der Radialabstand r_i^* des Bildpunktes vom Bildhauptpunkt (s. Abschnitt 2.2.1) reduziert. Aus Gleichung 21 ergibt sich:

$$\begin{aligned} n_w \cdot \sin \varepsilon_w &= \sin \varepsilon \\ n_w \cdot \frac{r_{B,i}^*}{\sqrt{w_i^{*2} + r_{B,i}^{*2}}} &= \frac{r_i^*}{\sqrt{w_i^{*2} + r_i^{*2}}} \\ r_{B,i}^* &= \sqrt{\frac{r_i^{*2} \cdot w_i^{*2}}{(w_i^{*2} + r_i^{*2}) \cdot n_w^2 - r_i^{*2}}} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 44})$$

mit

$$r_i^* = \sqrt{u_i^{*2} + v_i^{*2}}.$$

Damit erhält man den gebrochenen Bildvektor in Ebenenkoordinaten

$$\vec{p}_{B,i}^* = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \vec{p}_i^* = \begin{bmatrix} R \cdot u_i^* \\ R \cdot v_i^* \\ w_i^* \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 45})$$

mit der Hilfsgröße

$$R = \frac{|w_i^*|}{\sqrt{(w_i^{*2} + r_i^{*2}) \cdot n_w^2 - r_i^{*2}}}.$$

Im K^* -Koordinatensystem kann $\vec{p}_{B,i}^*$ nun als Bildvektor einer mit Projektionszentrum im Brechungspunkt angeordneten Kamera mit der Kamerakonstanten w_i^* und dem Bildpunkt u_i^*, v_i^* betrachtet werden (Soll die Kamerakonstante weiterhin $w_i^* = c$ betragen, ist Gleichung 43 durch Gleichung 48 zu ersetzen).

Zurücktransformiert in Weltkoordinaten ergibt sich:

$$\vec{p}_{B,i} = G^T \cdot \vec{p}_{B,i}^* \quad (\text{Gl. 46})$$

Nun lässt sich die Objektposition durch Lösen des Gleichungssystems (Gleichung 47) nach μ_j und Einsetzen bestimmen:

$$\vec{x} = \vec{x}_{B,1} + \mu_1 \cdot \vec{p}_{B,1} = \vec{x}_{B,2} + \mu_2 \cdot \vec{p}_{B,2} \quad (\text{Gl. 47})$$

3.1.2 Berücksichtigung der Brechung als radiale Verzeichnung

Die im Abschnitt 3.1.1 durchgeführte Ermittlung des Vektors $\vec{p}_{B,i}$ durch Reduktion des Bildpunktradiabstandes kann auch als Korrektur einer radialsymmetrischen Verzeichnung interpretiert werden. Dabei wird die Kamera gedanklich ebenfalls in den Brechungspunkt P_B verschoben und in Normalstellung zur Grenzebene gebracht. Da dann jedoch für jeden Bildvektor $(\vec{p})_i$ eine spezielle Kamerakonstante vorliegt, müssen die transformierten Bildkoordinaten $(u_j)^*$ und $(v_j)^*$ proportional zur Veränderung der Kamerakonstanten geändert werden, damit die Bildvektoren \vec{p}'_i für die Kamerakonstante c vorliegen:

$$\begin{aligned} (\vec{p})_i^* &= G \cdot A^T \cdot \vec{p}'_i = \begin{bmatrix} (u)_i^* \\ (v)_i^* \\ (w)_i^* \end{bmatrix} \\ \vec{p}'_i &= \frac{c_i}{(w)_i^*} \cdot (\vec{p})_i^* = \begin{bmatrix} (u)_i^* \cdot \frac{c_i}{(w)_i^*} \\ (v)_i^* \cdot \frac{c_i}{(w)_i^*} \\ c_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 48})$$

Aus Gleichung 44 lässt sich für die Verzeichnung ableiten:

$$dr_{B,i}^* = r_i^* - \frac{r_i^*}{n_w \cdot \sqrt{1 + \frac{r_i^{*2}}{c_i^2} \cdot \frac{n_w^2 - 1}{n_w^2}}}$$

mit der Reihenentwicklung (für $|q| < 1$)

$$\frac{1}{\sqrt{1+q}} = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{-\frac{1}{2}}{k} \cdot q^k = 1 - \frac{1}{2} \cdot q + \frac{3}{8} \cdot q^2 - \frac{15}{48} \cdot q^3 + \dots$$

ergibt sich

$$dr_{B,i}^* = \frac{n_w - 1}{n_w} \cdot r_i^* + \frac{M}{2 \cdot n_w} \cdot r_i^{*3} - \frac{3 \cdot M^2}{8 \cdot n_w} \cdot r_i^{*5} + \frac{15 \cdot M^3}{48 \cdot n_w} \cdot r_i^{*7} - \dots \quad (\text{Gl. 49})$$

$$\text{mit } M = \frac{1}{c_i^2} \cdot \frac{n_w^2 - 1}{n_w^2}.$$

Dieser Wert läßt sich wie in Abschnitt 2.2.5.2 als radialsymmetrische Verzeichnung berücksichtigen und entsprechend korrigieren [25].

3.2 Objektpunktbestimmung bei gekrümmter Grenzfläche

Ist die durch die Wasseroberfläche gegebene Grenzfläche durch Wellenbildung frei gekrümmt, muß zur Bestimmung eines Brechungspunktes der Oberflächenverlauf und zur Ermittlung des gebrochenen Bildvektors der Normalenvektor der Tangentialebene im Brechungspunkt bekannt sein (Abbildung 25).

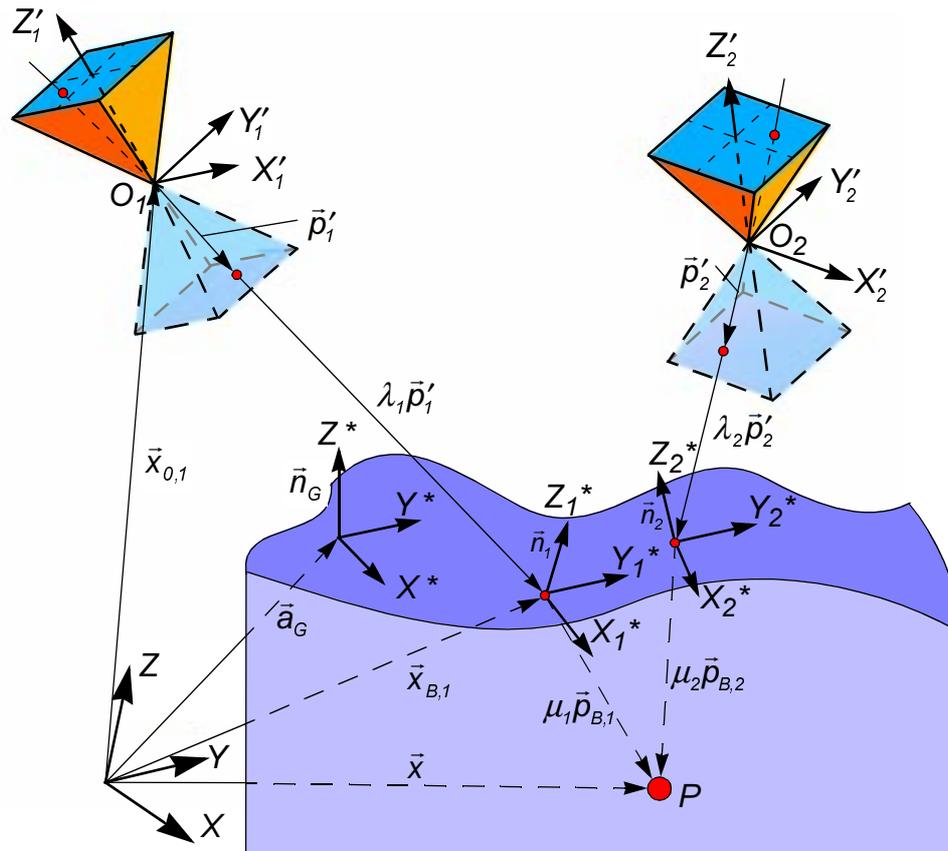


Abbildung 25: Positionsbestimmung bei gekrümmter Grenzfläche

3.2.1 Oberflächenmodellierung

Für die mathematische Modellierung gekrümmter Oberflächen stehen mehrere Varianten zur Verfügung. Da ein Modell gewählt werden soll, aus dem sich die Lichtstrahlbrechung ableiten läßt, die sowohl von der Auslenkung als auch von der Neigung der Oberfläche beeinflusst wird, sollte die Funktion zur Flächenbeschreibung mindestens zweimal stetig differenzierbar und damit glatt sein.

Zur Modellierung von Wasserwellen können unter der Voraussetzung der zweimal stetigen Differenzierbarkeit globale Funktionen, wie z. B.

- Polynomdarstellungen mindestens zweiten Grades bzw. geometrische Formen mindestens zweiter Ordnung,
- explizite Darstellungen als Funktion aus Sinus- bzw. Cosinustermen und
- die wellenbeschreibende, nichtlineare Korteweg-DeVries-Differentialgleichung [94] verwendet werden.

Die stark einschränkende Spezialisierung der durch sie modellierbaren Flächen und die Vernachlässigung nichtlinearer Effekte, wie Oberflächenspannung, Strömung und Wirbel [90], [91], [92], [93] im Falle einer Polynom- oder Sinusdarstellung erfordern starke Vereinfachungen. Da für die Korteweg-DeVries-Differentialgleichung nur spezielle Lösungen existieren [92], [93], ist die analytische Behandlung erschwert und die beschreibbaren Formen bleiben weiterhin beschränkt. Daher führt die Verwendung einer einzigen globalen Funktion für die gesamte Oberfläche nicht zu befriedigenden Ergebnissen.

Bei Verwendung eines regelmäßigen Stützstellennetzes ist die Lage und die Gestalt der Oberfläche durch die Funktionswerte an Gitterknoten gegeben, wobei ein aus Rechtecken aufgebautes Grundgitter Vorteile in der rechnerischen Auswertung bietet. Die Oberfläche setzt sich somit aus den zwischen den Stützstellen liegenden Teilflächen (patches) zusammen.

Die Teilflächen selbst müssen mathematisch durch lokale Funktionen so beschrieben werden, daß sie in der Zusammensetzung eine zweimal stetig differenzierbare Fläche ergeben [88]. So müssen sie stetig in der zweiten Ableitung ineinander übergehen, also längs der gemeinsamen Randkurven gleiche Tangentialebenen haben.

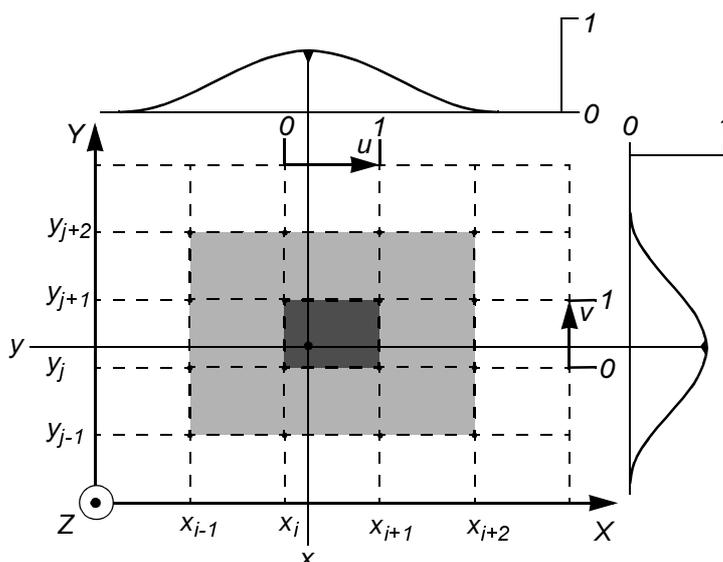


Abbildung 26: Stützstellengewichtung bei kubischen B-Splines
(dunkelgrau: interpolierter patch, hellgrau: gewichtete Stützstellen)

Kubische B-Splines (Grad $m = 3$) erfüllen diese Forderung, da Flächen, die sich aus Splines vom Grad m zusammensetzen, $(m-1)$ -fach stetig differenzierbar sind. Sie ermöglichen zudem eine einfache und zuverlässige Interpolation zwischen den Stützstellen [95], [96]. Für die Stützpunkte, die den zu interpolierenden patch umgeben, werden poly-

nomiale Gewichtsfunktionen, abhängig von den lokalen patch-Koordinaten u und v , aufgestellt. Da Splines vom Grad m nur auf m zusammenhängenden Stützintervallen in jede Gitterrichtung wirken, werden bei kubischen B-Splines somit sechzehn Stützpunkte gewichtet (Abbildung 26), um die Teilfläche zwischen den inneren vier Stützpunkten nach Gleichung 50 zu interpolieren [89], [95], [96].

$$z(u, v) = b(u)^T \cdot Z \cdot b(v) \quad (\text{Gl. 50})$$

mit:

$$u = x - x_i; \quad v = y - y_i$$

$$b(w) = \frac{1}{6} \cdot \begin{bmatrix} (1-w)^3 \\ 3 \cdot w^3 - 6 \cdot w^2 + 4 \\ -3 \cdot w^3 + 3 \cdot w^2 + 3 \cdot w + 1 \\ w^3 \end{bmatrix}; \quad Z = \begin{bmatrix} z_{i-1,j-1} & z_{i-1,j} & z_{i-1,j+1} & z_{i-1,j+2} \\ z_{i,j-1} & z_{i,j} & z_{i,j+1} & z_{i,j+2} \\ z_{i+1,j-1} & z_{i+1,j} & z_{i+1,j+1} & z_{i+1,j+2} \\ z_{i+2,j-1} & z_{i+2,j} & z_{i+2,j+1} & z_{i+2,j+2} \end{bmatrix}$$

Zur Netzbeschreibung können auch andere mathematische Flächenbeschreibungen, etwa aus kubischen Bernsteinpolynomen aufgebaute Bezier-Flächen, Coons-Flächen oder gewöhnliche Polynomdarstellungen verwendet werden, die jedoch zur Beschreibung von gewellten Wasseroberflächen wenig geeignet sind: Während Bezier-Flächen über das gesamte zur Verfügung stehende Stützstellengebiet wirken und somit stets nur eine innerhalb einer konvexen Hülle liegende Fläche erzeugen, benötigen Coons-Flächen ein vorgegebenes Randkurven-Viereck. Eine intervallweise gültige Beschreibung mit gewöhnlichen Polynomen niedrigen Grades hingegen führt zwar auf eine global stetige Funktion, die jedoch im allgemeinen an den Stützstellen nicht stetig differenzierbar ist [89]. Daher wird zur Oberflächenmodellierung in Form eines Stützstellennetzes ein äquidistantes Rechteckgrundgitter mit kubischer B-Spline-Interpolation gewählt.

3.2.2 Berechnung des Brechungspunktes an gekrümmten Oberflächen

Die Ermittlung der Koordinaten der Brechungspunkte erfolgt iterativ (Abbildung 27), da die vorliegenden patch-Funktionen lokal begrenzt sind. Für jeden Bildstrahl werden als Startwerte $(x_{i,0} \ y_{i,0})$ die Koordinaten des Durchstoßpunktes des Bildvektors \vec{p}'_i durch die Nullage der Grenzfläche nach den Gleichungen 41, 42 gewählt. Daraus ergibt sich mit der jeweiligen lokalen Interpolationsfunktion für jeden Strahl ein neuer z_j -Wert. Für eine zur Nullage parallele, durch z_j verlaufende Ebene wird wiederum der Durchstoßpunkt ermittelt. Als Koordinaten für die nächste z_j -Interpolation wird die Mitte zwischen diesem neuen und dem vorherigen Durchstoßpunkt verwendet. Das Verfahren wird fortgeführt, bis die Veränderung der Brechungspunktkoordinaten das Abbruchkriterium unterschreitet, d. h. die gewünschte Genauigkeit erreicht ist.

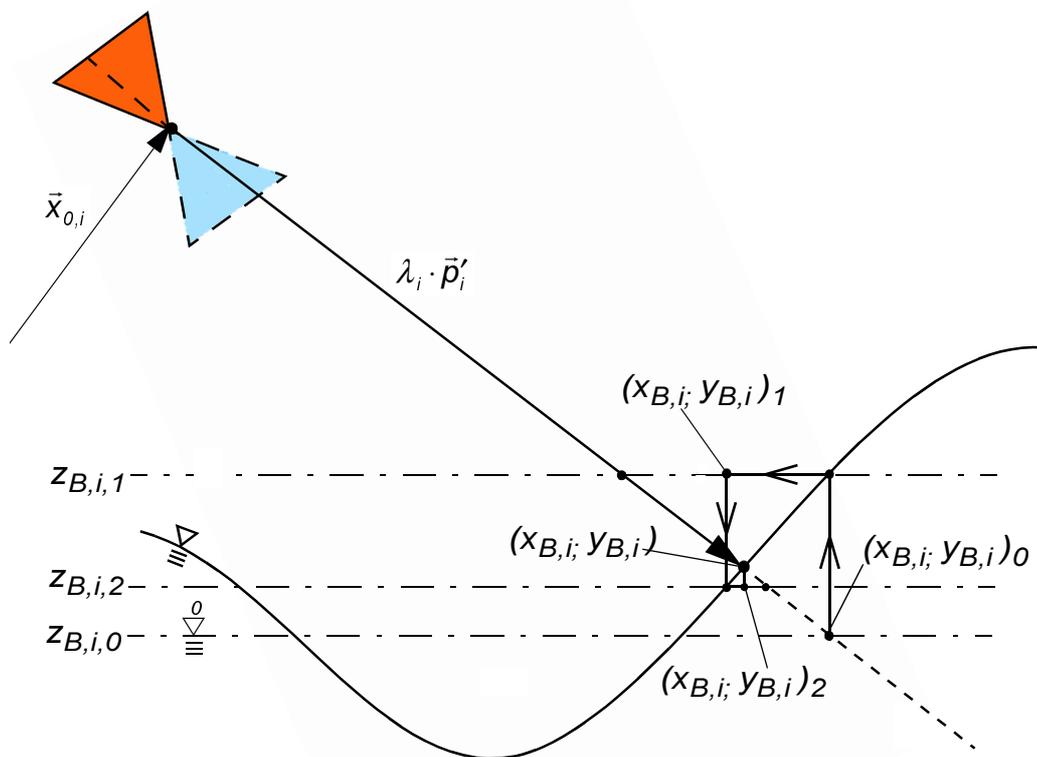


Abbildung 27: Iteration zur Bestimmung des Brechungspunktes

3.2.3 Bestimmung der gebrochenen Bildvektoren

Zur Bestimmung der gebrochenen Bildvektoren $\vec{p}_{B,i}$ bei gegebener Flächenbeschreibung, müssen für alle Kameras im jeweiligen Brechungspunkt $\vec{x}_{B,i}$ die Normalenvektoren \vec{n}_i zur Tangentialebene berechnet werden. Sind die Oberflächenparameter an diskreten Stützstellen in regelmäßiger Netzstruktur gegeben, muß eine geeignete lokale Interpolationsfunktion (B-Spline) für die Fläche, die den gesuchten Punkt umgibt (patch), aufgestellt werden, die dann nach Gleichung 51 partiell abzuleiten ist:

$$\vec{n}_i = \begin{bmatrix} -f_x(x_{B,i}, y_{B,i}) \\ -f_y(x_{B,i}, y_{B,i}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 51})$$

Für jeden Brechungspunkt ist mit dem Normalenvektor jeweils eine Tangentialebenen-Transformationsmatrix G_i aufzustellen. Zur Bestimmung der gebrochenen Bildvektoren ist die bei der ebenen Grenzfläche verwendete, einheitliche Matrix G in den Gleichungen 43 bis 47 für jeden Strahl durch die entsprechende Matrix G_i zu ersetzen. Mit dem Vorgehen zur Strahlverfolgung nach Abschnitt 3.1.1 lassen sich dann die gebrochenen Strahlverläufe und die Objektposition ermitteln.

3.2.4 Verfahren zur Erfassung der Wasseroberfläche

Ein gängiges nicht-optisches Verfahren zur Erfassung von Wasseroberflächen ist das Einbringen von Paaren paralleler Meßdrähte. Durch Beeinflussung des Widerstandes bzw. der Kapazität der Drähte in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe sind Rückschlüsse auf den lokalen Wasserstand und somit auf die Wellenform möglich. Das Verfahren weist jedoch eine geringe Ortsauflösung auf und ist nur für Frequenzen $< 3 \text{ Hz}$ geeignet. Darüber hinaus beeinflussen die Drähte sowohl hydrodynamisch die Wasseroberfläche als auch optisch die Sichtbarkeit von UW-Objekten.

Für Oberflächenmessungen besser geeignet sind optische Verfahren, da sie flächenhaft und berührungslos arbeiten. Zur optischen Erfassung von Oberflächen klarer Flüssigkeiten sind jedoch keine Standardverfahren etabliert.

Grundsätzlich können räumliche Strukturen nur dann aufgelöst werden, wenn

- sich ihre optischen Eigenschaften mit den Raumkoordinaten ändern,
- sich die Beleuchtungsparameter mit den Raumkoordinaten ändern,
- die dreidimensionale Struktur durch beleuchtungstechnische Maßnahmen auf eine zweidimensionale Struktur oder auf ein Ensemble zweidimensionaler Strukturen reduziert wird,
- die Bereiche des Interesses durch charakteristische Marken gekennzeichnet sind.

Erschwert wird die optische Detektion der Räumlichkeit einer Struktur, wenn diese nicht durch scharfe Kanten, sondern, wie beim Anwendungsfall Wasseroberfläche, durch stetige Übergänge gekennzeichnet ist.

Das Standardverfahren zur Detektion räumlicher Strukturen ist die Anwendung strukturierten Lichtes, als dessen Sonderfall das Lichtschnittverfahren betrachtet werden kann. Die Ansätze der Projektion strukturierten Lichtes auf die zu untersuchende Oberfläche setzen diffuse Reflexionseigenschaften des Objektes voraus. Nur aus dem Anteil des aufprojizierten Lichtes, der diffus von der Objektoberfläche reflektiert wird, ergibt sich für eine Kamera ein zusammenhängendes Abbild des Projektionsmusters. Der Anteil der diffusen Reflexion an der Reflexion der sauberen Oberfläche von Leitungswasser beträgt jedoch nur 3%. 97% des aufprojizierten Lichtes werden direkt reflektiert und stehen daher nicht zur Abbildung zur Verfügung. Um das Verfahren der Projektion strukturierten Lichtes dennoch zu verwenden, kann

- der Anteil der diffusen Reflexion der Wasseroberfläche durch gezielte Verunreinigung z. B. mit Stäuben erhöht werden (Opakisierung),
- das Verfahren in Laborräumen ohne Fremdlicht und mit langen Integrationszeiten durchgeführt werden oder
- die Leistung des Projektors soweit gesteigert werden, daß die Intensität der diffusen Reflexion ausreicht, um das Signal trotz Fremdlicht detektieren zu können.

Als alternativer Ansatz zur Visualisierung der Oberfläche kann die Farbanalyse einer Ölschicht auf der Wasseroberfläche dienen. Wird diese mit parallelem, weißem Licht

beleuchtet, so nimmt sie eine vom Betrachtungswinkel abhängige Farbe an. Dies gilt bei festem Beobachterstandort auch für den Neigungswinkel der Wasseroberfläche, so daß für eine gewellte Wasseroberfläche aus dem Farbverlauf auf die Neigung einzelner Oberflächenelemente rückgeschlossen werden kann.

Die gezielte Verschmutzung der Wasseroberfläche kann für viele Anwendungen (Lebensmittelindustrie; chemische, kerntechnische Anlagen) von vornherein ausgeschlossen werden. Das Ausschließen von Fremdlichteinwirkung bzw. die Erhöhung der Projektionsleistung können geeignete Maßnahmen sein, bedeuten jedoch einen erheblichen technischen Mehraufwand.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, von der verzerrten Abbildung eines bekannten UW-Objektes auf die Gestalt der Wasseroberfläche rückzuschließen. So könnten etwa ein strukturierter Hintergrund oder definierte Referenzobjekte eingesetzt werden, deren Abbildungen das Bild des zu vermessenden UW-Objektes umgeben. Da dieses abhängig von seiner Größe und Form die vorliegende Referenzstruktur unterschiedlich stark verdeckt, kann nur die Oberfläche neben der Durchdringungsfläche seines Brechungsbildes bestimmt und aus ihr Rückschlüsse auf den relevanten Bereich gezogen werden. Außerdem sind Anwendungsfälle denkbar, in denen das Einbringen von Referenzobjekten oder -marken in das Wasser technisch, z. B. durch große Wassertiefe oder fehlende Montagevorrichtungen oder aufgrund von damit verbundenen Gefahren (Kontamination, Temperatur, Strömung) nicht möglich ist.

Dringt ein Laserstrahl in ein Wasservolumen ein, so wird der Strahl im Wasser und damit auch der Punkt des Durchtritts durch die Wasseroberfläche aufgrund von Dispersionseffekten sichtbar. Dieser Effekt eignet sich zur photographischen Abbildung. Um einen Bereich der Wasseroberfläche zu beschreiben, muß eine Vielzahl systematisch angeordneter Strahlen betrachtet werden, dazu muß das Laserlicht z. B. in Form eines Punktrasters strukturiert werden, womit eine Schwächung der Intensität einhergeht. Darüber hinaus erfordert die Auswertung der Bilder durch die Verfolgung der Laserstrahlen einen erheblichen Aufwand.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz basiert auf der direkten Reflexion. Im Gegensatz zum Laser stellt sich für eine ungerichtet strahlende Lichtquelle für jeden Ort oberhalb der Wasseroberfläche eine direkte Reflexion der Lichtquelle ein. Bringt man über der Oberfläche strukturiert angeordnete, diffus strahlende Lichtquellen an, so existiert für jede einzelne ein bestimmter, direkt reflektierter Strahlengang zum Beobachtungspunkt. Im Fall einer gewellten Oberfläche werden die Reflexionspunkte abhängig von der Oberflächentopographie verschoben aufgenommen, und es entsteht ein verzerrtes Reflexionsbild der Lichtquellenanordnung, aus dem Rückschlüsse auf die Form der Oberfläche gezogen werden können. Die Visualisierung der Wasseroberfläche mittels der direkten Reflexion eines diffus strahlenden Leuchtenfeldes erscheint hinsichtlich folgender Kriterien günstig:

- Es wird kein zusätzliches Medium in das Wasser eingebracht,
- die Beobachtung der Wasseroberfläche ist in einem engmaschigen Netz in direkter Umgebung des Punktes der Wasseroberfläche möglich, den der das UW-Objekt abbildende Strahl durchtritt (u. U. direkt im Durchtrittspunkt),
- die Intensität der Reflexion läßt die Detektion Fremdlichteinstrahlung zu,
- der Aufbau deckt einen größeren Bereich der Wasseroberfläche ab, als Aufbauten die auf der Projektion strukturierten Lichtes basieren.

3.2.5 Modell zur Oberflächenerfassung mittels direkter Reflexion

Bei dem Modell der Reflexion gilt das Prinzip "Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel".

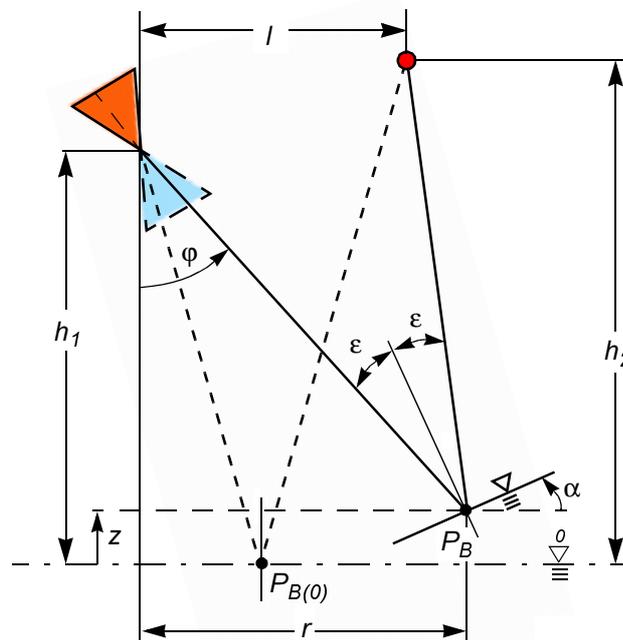


Abbildung 28: Reflexionsmodell
(gestrichelt: $\alpha = 0, z = 0$)

Für das Grundmodell mit ebener Reflexionsfläche gilt

$$\varphi = \arctan\left(\frac{l}{h_1 + h_2}\right). \quad (Gl. 52)$$

Mit den Beziehungen aus Gleichung 27 bis 30 erfolgt die allgemeine Herleitung für φ

$$\frac{h_2(r)}{\tan(\varphi - 2 \cdot \alpha(r))} + \frac{h_1(r)}{\tan \varphi} + l = 0. \quad (Gl. 53)$$

Analog zur Brechung wird der Einfluß einer Auslenkung der ebenen Oberfläche für $\alpha = 0$ und der Einfluß der Oberflächenneigung für $z = 0$ auf den Einfallswinkel φ getrennt untersucht.

Der Einfluß der Oberflächenauslenkung verhält sich qualitativ ähnlich zum Brechungsmodell (Abbildung 15), ist bei der Reflexion für einen vergleichbaren Aufbau jedoch etwa um den Faktor drei bis vier größer (Abbildung 29).

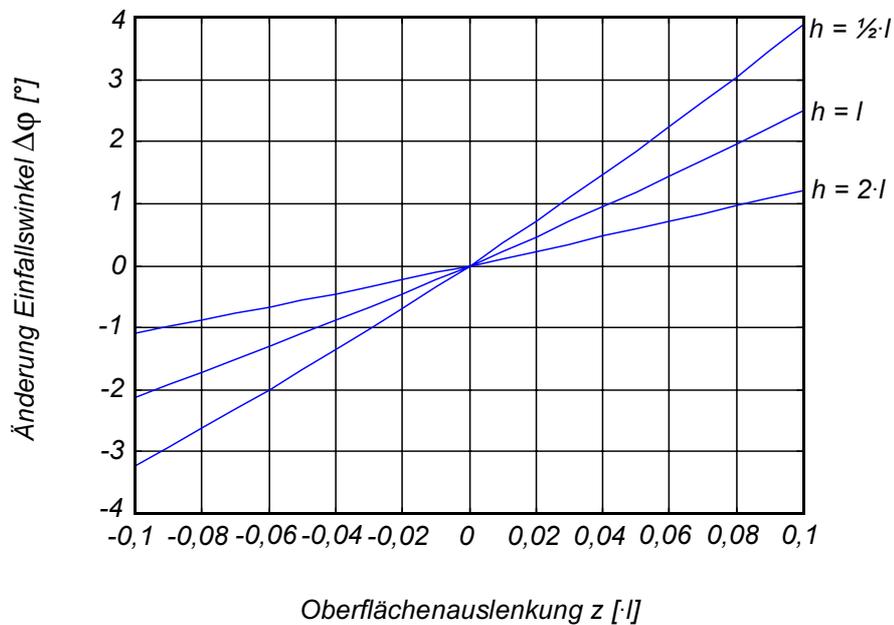


Abbildung 29: Veränderung des Einfallswinkels φ bei Änderung der Auslenkung ($\alpha = 0$, l als Einheitslänge, $h_1 = h_2$)

Die Änderung $\Delta\varphi$ des Einfallswinkels eines reflektierten Strahles durch Veränderung des Neigungswinkels der Oberfläche (Abbildung 30) ist der Änderung eines gebrochenen Strahles entgegengerichtet. Verglichen mit dem Einfluß von Neigung und Auslenkung auf die Brechung ist dieser bei der Reflexion um Faktor ≈ 5 größer. Der Einfluß der Betrachterhöhe ist bei der Reflexion für beide Betrachtungen geringer.

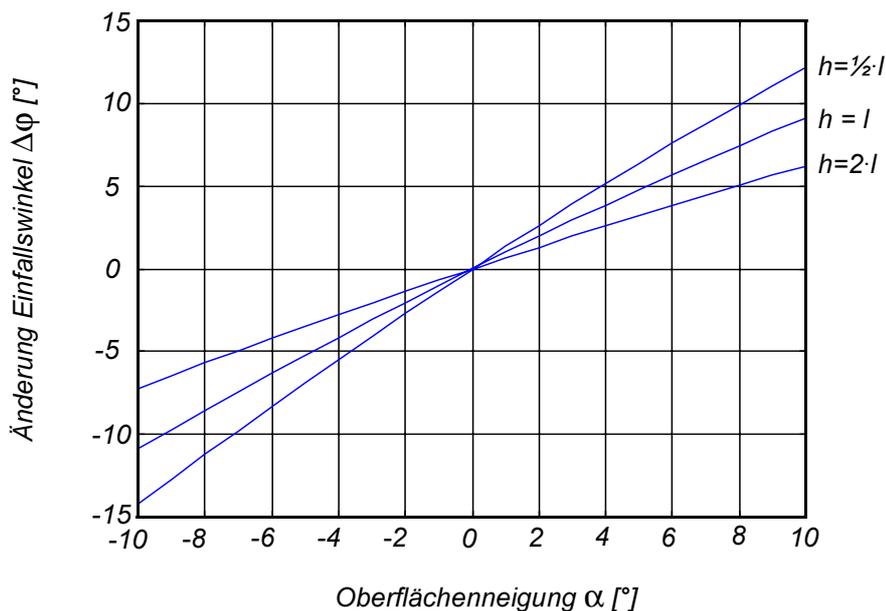


Abbildung 30: Veränderung des Einfallswinkels φ bei Änderung der Neigung ($z = 0$, l als Einheitslänge, $h_1 = h_2$)

Bei der Reflexion liegt ein größeres Verhältnis des Neigungs- zum Auslenkungseinfluß als bei der Brechung vor. Daher läßt sich durch die Wahl der Betrachter- und Objekthöhe

das Verhältnis beeinflussen, so daß bei großen Betrachterhöhen geringe Auslenkungen unter Umständen vernachlässigbar sind.

3.3 Meßaufbau zur Mehrmedienphotogrammetrie

Zur Oberflächenerfassung ist zusätzlich zu den Kameras ein Leuchtenfeld anzubringen. Bei günstiger Anordnung und Bauform des Leuchtenfeldes kommt es zu einer guten Übereinstimmung des Bereiches auf der Wasseroberfläche, in welchem sich die Reflexionen des Leuchtenfeldes abbilden, mit dem Arbeitsraum der vorhandenen Photogrammetriekameras, so daß diese gleichzeitig zur Vermessung der Oberfläche genutzt werden können. Es bietet sich zudem der Vorteil, daß das Grenzflächenkoordinatensystem und die Transformationen für die Oberflächenmodellierung und die photogrammetrische Rekonstruktion des gebrochenen Strahlverlaufes identisch sind. Die Vermessung der Oberfläche und die Vermessung der Lage des UW-Objektes finden am selben Bild statt, so daß bestmögliche zeitliche Korrelation gegeben ist.

Die Abbildung 31 stellt den realisierten Versuchsaufbau bestehend aus vier Photogrammetriekameras vom Typ Pulnix TM 9701 (Objektive $f = 6,5\text{mm}$) und einem Leuchtenfeld, aufgebaut aus 16×16 mit dem Rastermaß 20mm systematisch angeordneten Leuchtdioden (LEDs) $\varnothing 5\text{mm}$ dar.

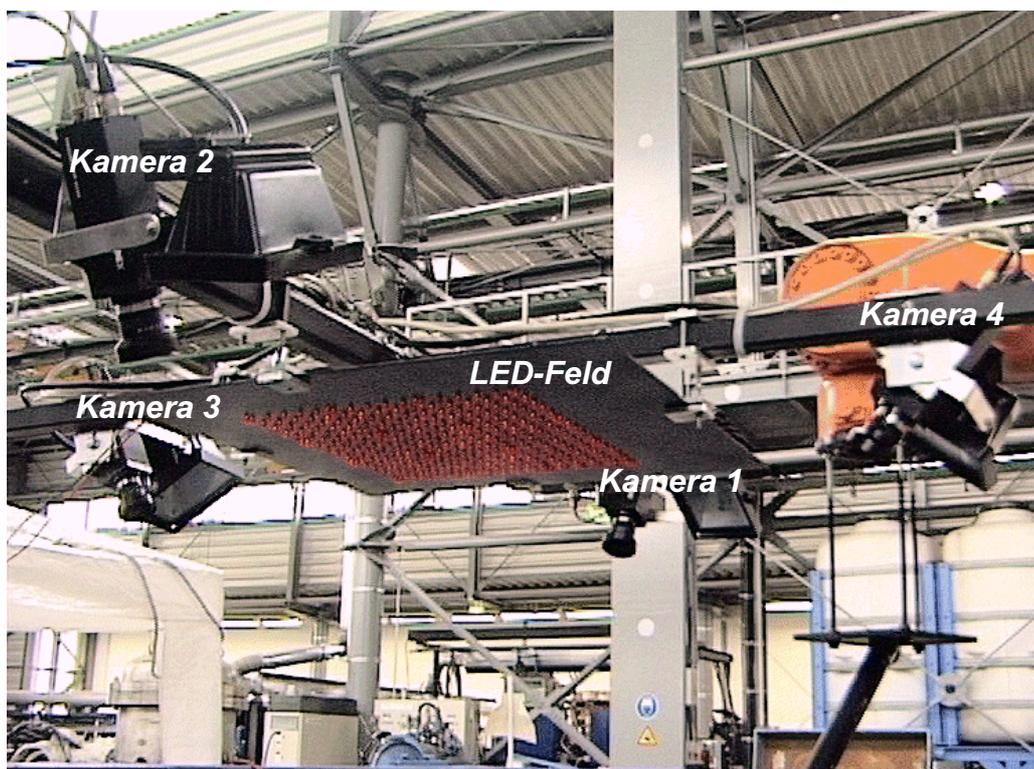


Abbildung 31: Versuchsaufbau zur Mehrmedienphotogrammetrie

3.3.1 Kalibrierung und Orientierung des Meßaufbaus

Die Kameras werden mittels mobilem Paßpunktfeld kalibriert und orientiert. Dies kann entweder im Meßraum, aus dem das Wasser zuvor entfernt wurde, oder, wenn dies nicht möglich ist, oberhalb der Phasengrenze erfolgen. Die Parameter der inneren Orientierung werden zur Verzeichnungskorrektur der Bildkoordinaten verwendet. Die Parameter der äußeren Orientierung werden zur Aufstellung der Koordinatentransformationsmatrizen nach Gleichung 5 und zur Bestimmung der Bildvektoren im Raum bzw. der Reflexionspunkte benötigt.

3.3.1.1 Bestimmung des Grenzflächenkoordinatensystems

Das Grenzflächenkoordinatensystem K^* mit X^* - Y^* - Z^* ist durch die ebene Nulllage der Wasseroberfläche definiert. Sie wird durch die Ermittlung der Koordinaten mehrerer auf dem Wasser schwimmender Meßmarken bestimmt.

Bei drei vermessenen Marken können Aufhänge- und Normalenvektor direkt aufgestellt werden. Um die Genauigkeit zu erhöhen und Meßfehlereinflüsse zu minimieren, müssen die Koordinaten möglichst vieler Oberflächenmarken aufgenommen werden, durch die dann nach der least-square-Methode ein bilineares Polynom als Ausgleichsebene gelegt wird. Es ergibt sich somit ein überbestimmtes Gleichungssystem, dessen optimierte Lösung durch das Minimierungsproblem in Gleichung 54 ermittelt wird.

$$\left[\begin{array}{c} z_1 \\ \vdots \\ z_i \end{array} \right] - \left[\begin{array}{ccc} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & 1 \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} p_1 \\ p_2 \\ p_0 \end{array} \right]^2 = \min! \quad (\text{Gl. 54})$$

Aus den Polynomkoeffizienten lassen sich ein Aufhänge- und der Normalenvektor der Ebene aufstellen:

$$\vec{n}_G = \begin{bmatrix} -p_1 \\ -p_2 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ und z. B. } \vec{a}_G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p_0 \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 55})$$

Der Normalenvektor \vec{n}_G definiert die Z^* -Achse des K^* -Koordinatensystems. Die in der Ebene liegende Koordinatenachse Y^* wird so gewählt, daß ihre Orthogonalprojektion in das Weltkoordinatensystem parallel zu dessen Y -Achse liegt.

Die zur Transformation vom Welt- in das K^* -Koordinatensystem erforderliche Matrix G berechnet sich zu:

$$G = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \cdot \sin \beta & \sin \alpha \cdot \cos \beta \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \cdot \sin \beta & \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 56})$$

Sie bewirkt eine Drehung mit β um die X -Achse und mit α um die Y -Achse. Dabei ergibt sich β als Winkel zwischen der Z -Achse und der Projektion des Normalenvektors \vec{n}_G in

die Y-Z-Ebene und α als Winkel zwischen dem um β in die X-Z-Ebene gedrehten Normalenvektor:

$$\begin{aligned} \beta &= -\arctan(z_y) \\ \alpha &= \arctan(z_x \cdot \cos \beta) \end{aligned} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} z_y &= \frac{dz}{dy} = -\frac{n_y}{n_z} \\ z_x &= \frac{dz}{dx} = -\frac{n_x}{n_z} \end{aligned} \quad \text{und} \quad \vec{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 57})$$

Die Inverse der Drehmatrix G ist zugleich die kanonische Basis des K^* -Koordinatensystems. Es gilt:

$$[\vec{X}^*, \vec{Y}^*, \vec{Z}^*] = G^{-1} \quad (\text{Gl. 58})$$

$$G^{-1} = G^T \quad (\text{wegen Orthogonalität})$$

mit

$\vec{X}^*, \vec{Y}^*, \vec{Z}^*$: Einheitsvektoren der K^* -Koordinatenachsen in Weltkoordinaten.

Die Transformation eines Vektors \vec{v} von Welt- in K^* -Koordinaten bzw. umgekehrt wird in Gleichung 59 beschrieben. Bei der Transformation von Positionskordinaten \vec{x} ist zusätzlich die Verschiebung des Koordinatenursprungs um den Vektor \vec{a}_G zu berücksichtigen:

Welt - in Grenzflächenkoordinaten:

$$\text{Vektor: } \vec{v}^* = G \cdot \vec{v} \quad \text{Koordinate: } \vec{x}^* = G \cdot (\vec{x} - \vec{a}_G)$$

(Gl. 59)

Grenzflächen- in Weltkoordinaten:

$$\text{Vektor: } \vec{v} = G^T \cdot \vec{v}^* \quad \text{Koordinate: } \vec{x} = G^T \cdot \vec{x}^* + \vec{a}_G.$$

3.3.1.2 Bestimmung der Anordnung der Lichtquellen

Zum Erzielen hoher Genauigkeit müssen punktförmige, homogen und diffus strahlende Lichtquellen verwendet werden; somit kommen hier Leuchtdioden zum Einsatz. Die Verwendung einer spezifischen Farbe erleichtert bei Verwendung entsprechender Bildverarbeitungshard- und -software die Selektierbarkeit der Reflexionen. Insbesondere können so auch die Reflexionspunkte detektiert werden, die vom Brechungsbild des Unterwasserobjektes überlagert werden.

Das LED-Feld ist in einem regelmäßigen ebenen Gitter (LED-Feld, Indizierung jk) so angeordnet, daß sich für jede Kamera die Bereiche der LED-Reflexionspunkte und der Brechungsbilder zu vermessender UW-Objekte überdecken. Um eine hohe Genauigkeit der Oberflächenerfassung durch eine hohe Gitterdichte, gleichzeitig jedoch die sichere Selektion einzelner Reflexionen bei stark gewellter Oberflächen zu gewährleisten, wurde mit einem Leuchtenabstand von 20mm ein geeigneter Kompromiß gewählt.

Da sich im realisierten Aufbau das LED-Feld über dem Bildfeld der Kameras befindet, werden die Positionen $(\vec{I})_{jk}$ der virtuellen Bilder der LEDs auf der ebenen Wasseroberfläche durch Vorwärtsschnitt bestimmt und diese scheinbaren Positionen durch

Spiegelung an der Nulllage der Grenzfläche in wirkliche Positionen \vec{l}_{jk} umgerechnet (Abbildung 32).

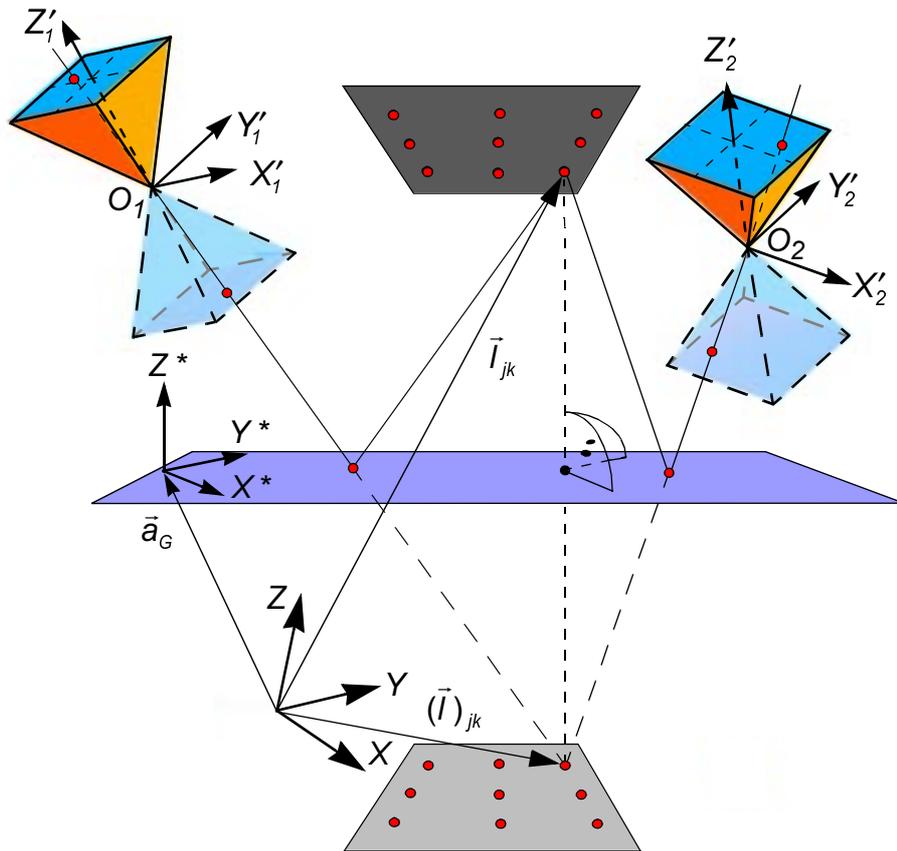


Abbildung 32: Bestimmung der LED-Positionen

Die Umrechnung erfolgt in K^* -Koordinaten durch Vorzeicheninversion der Z^* -Koordinate, so daß die scheinbaren Positionen $(\vec{l})_{jk}$ zuvor in Grenzflächenkoordinaten transformiert werden müssen:

$$\vec{l}_{jk} = G^T \cdot \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot G \cdot ((\vec{l})_{jk} - \vec{a}_G) \right) + \vec{a}_G. \quad (Gl. 60)$$

3.3.2 Ermittlung der Oberflächenparameter

Mit Hilfe des Verfahrens zur Erfassung der Wasseroberfläche durch direkte Reflexion werden die Parameter eines die Wasseroberfläche beschreibenden Stützstellennetzes gewonnen.

Da sich zwar die Bildbereiche der verschiedenen Kameras überschneiden, meist aber nicht die Bereiche der Oberfläche, auf denen für jede Kamera die Reflexionspunkte erscheinen, muß die Oberfläche für jede Kamera einzeln modelliert werden. Falls nötig, lassen sich diese Bereiche bei teilweiser Überdeckung anschließend zusammensetzen.

3.3.2.1 Näherungsweise Ermittlung der Oberflächennormalen

Ist die Oberfläche dynamisch gewellt, wird zunächst angenommen, der Punkt, in dem eine LED jk auf der Oberfläche reflektiert wird, weise keine Auslenkung zur Nulllage auf. So wird die Lage $\vec{x}_{R,jk}$ des Reflexionspunktes P_R mit der Beschreibung der ebenen Grenzfläche aus Gleichung 55 analog zum Brechungspunkt nach den Gleichungen 41, 42 angenähert berechnet. Anschließend lässt sich für jeden Reflexionspunkt der zugehörige Normalenvektor in erster Näherung durch Bestimmung der Winkelhalbierenden zwischen dem Bildvektor \vec{p}_{jk} und dem Differenzvektor $\vec{r}_{jk} = \vec{l}_{jk} - \vec{x}_{R,jk}$, der den Punkt P_R mit der jeweiligen LED verbindet (Abbildung 33), nach Gleichung 61 bestimmen.

$$\vec{n}(\vec{x}_{R,jk}) = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \frac{\vec{r}_{jk}}{|\vec{r}_{jk}|} - \frac{\vec{p}_{jk}}{|\vec{p}_{jk}|} \quad (Gl. 61)$$

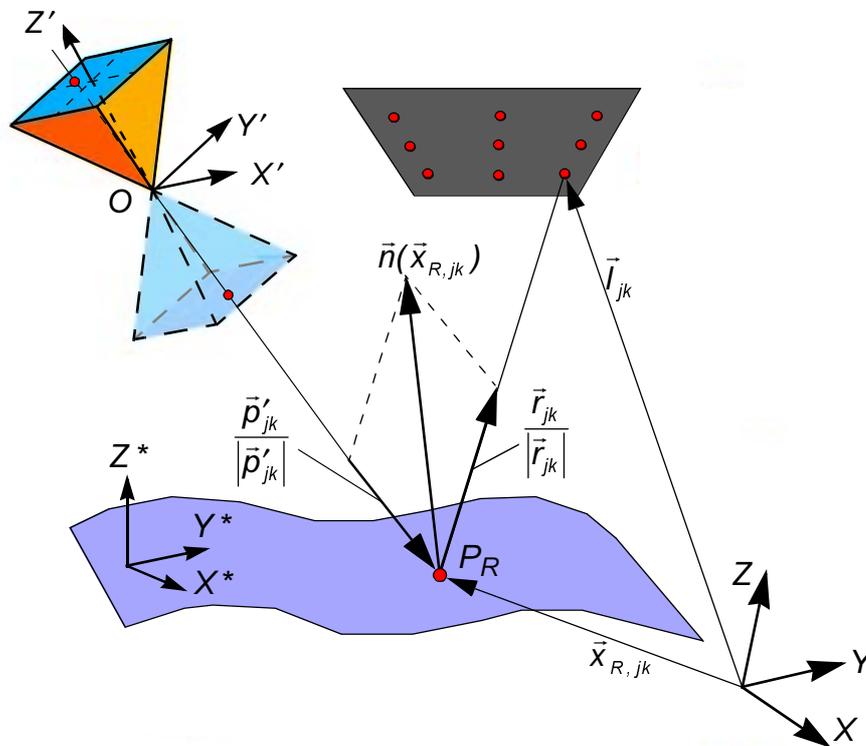


Abbildung 33: Bestimmung des Normalenvektors

Man erhält die Normalenvektoren in den Reflexionspunkten $\vec{x}_{R,jk}$, die im Gegensatz zur Anordnung im LED-Feld aufgrund der welligen Oberfläche unregelmäßig verteilt sind (scattered data). Die Abbildung 34-a zeigt die Aufnahme von Reflexionspunkten auf einer gekrümmten Wasseroberfläche mit zwei beleuchteten UW-Objekten. Die Aufnahme 34-b zeigt die daraus rekonstruierten Normalenvektoren der Oberfläche.

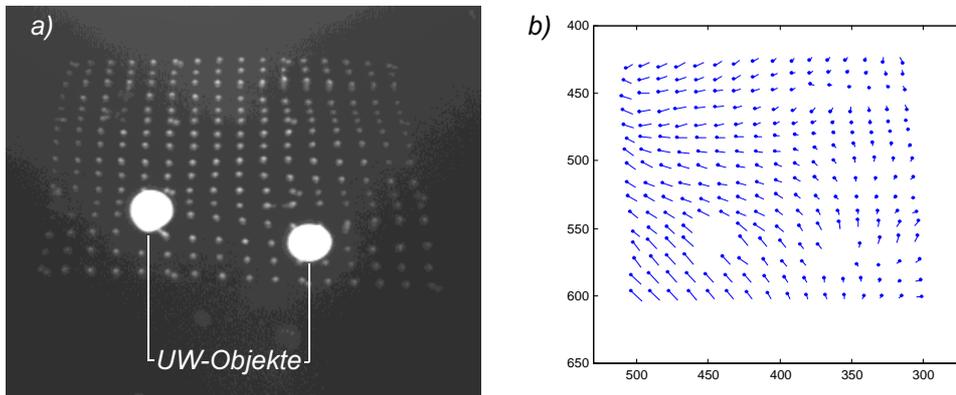


Abbildung 34: a) Aufnahme der Reflexionspunkte und UW-Objekte
b) Normalenvektoren

Daraus berechnen sich die Werte der partiellen Ableitungen $z_x(\vec{x}_R)$ bzw. $z_y(\vec{x}_R)$ der Oberflächenfunktion zu:

$$z_x(\vec{x}_R) = \frac{dz(\vec{x}_R)}{dx} = -\frac{n_x}{n_z} \quad z_y(\vec{x}_R) = \frac{dz(\vec{x}_R)}{dy} = -\frac{n_y}{n_z}. \quad (\text{Gl. 62})$$

3.3.2.2 Ermittlung der Oberflächenauslenkungen

Aus den Normalenvektoren bzw. partiellen Ableitungen $z_x(\vec{x}_{R,jk})$ und $z_y(\vec{x}_{R,jk})$ wird die Auslenkung der Oberfläche in erster Näherung ermittelt. Dazu müssen die vorliegenden Werte durch geeignete Flächen interpoliert oder approximiert werden.

Generieren eines regelmäßigen Stützstellennetzes aus regellos verteilten Meßdaten

Die Modellierung wird wegen der besseren Anschaulichkeit und der vereinfachten Ausrichtung des ermittelten Verlaufes bezogen auf die Nulllage der Grenzfläche in K^* -Koordinaten durchgeführt, so daß die Brechungspunkte und die zugehörigen Normalenvektoren zuvor nach Gleichung 59 zu transformieren sind.

Die Werte der aus den Reflexionspunkten rekonstruierten partiellen Ableitungen $z_x^*(\vec{x}_{R,jk})$ bzw. $z_y^*(\vec{x}_{R,jk})$ liegen prinzipbedingt nicht der systematischen Anordnung der Leuchten entsprechend, sondern aufgrund der Reflexion an der welligen Oberfläche unsystematisch verschoben vor. Zunächst wird aus den unregelmäßig verteilten Werten der partiellen Ableitungen je ein regelmäßiges Netz für die jeweilige Differentiationsrichtungen X^* und Y^* erzeugt, im folgenden X^* - und Y^* -Netz genannt (Abbildung 35). Zur Bestimmung der Funktionswerte $z_{x,lm}^*$ bzw. $z_{y,lm}^*$ an den regelmäßigen Gitterknoten werden aufgrund der hohen Funktionalität und der begrenzten Extrapolationsmöglichkeit globale Scattered-Data-Funktionen eingesetzt (z. B. Green-Funktion, Shepard-Funktion oder Hardysche Multiquadriken [89], [95], [97]). Mit ihnen werden die Werte an den Gitterknoten abhängig vom jeweiligen Abstand d_{jk} zu den X^* - Y^* -Koordinaten sämtlicher Meßwerte bestimmt. Insbesondere eignet sich die Interpolation durch Splineflächen kleinster Krümmung mit der biharmonischen Green-Funktion $C(d) = d^2 \cdot \log(d)$ als Basisfunktion [98]. Mit ihr kann auch über den erfaßten Bereich hinaus extrapoliert werden,

wobei sich die Werte mit zunehmender Entfernung der Nullebene nähern. Probleme treten nur bei einer zu großen Betragsspanne der gemessenen Werte auf. Die Knotenwerte $z^*_{x,lm}$ bzw. $z^*_{y,lm}$ berechnen sich dabei nach folgendem Term:

$$z^*_{x|y}(x^*, y^*) = b_0 + b_1 \cdot x^* + b_2 \cdot y^* + \sum_{jk} a_{jk} \cdot C(d_{jk}). \quad (Gl. 63)$$

Über die o. g. Eigenschaften hinaus bietet sich die Verwendung von biharmonischen Interpolationsfunktionen zur Generierung des X^* - und Y^* -Netzes der jeweiligen partiellen Ableitungen an, da diese in den modernen Mathematiksoftwarepaketen standardmäßig implementiert sind.

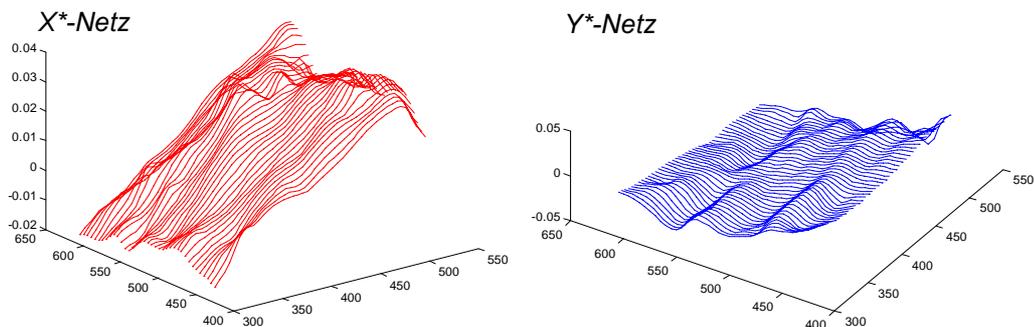


Abbildung 35: biharmonisch interpolierte, regelmäßige X^* - und Y^* -Netze der partiellen Ableitung

Numerische Integration der Stützstellennetze

Um aus den partiellen Ableitungen die Auslenkungen der Oberfläche zu bestimmen, werden die Werte des X^* - bzw. Y^* -Netzes entlang jeder in die jeweilige Richtung verlaufenden Gitterlinie numerisch aufintegriert. Dies erfolgt mit dem Trapez-Verfahren zur Quadratur nach Newton-Cotes. Auf jeder Gitterlinie wird das Integral vom Integrationsstartpunkt, der gleich Null gesetzt wird, bis zu jedem Punkt der Linie explizit gebildet. Bei entsprechend kleiner Gitterkonstante weist das Integral dabei eine ausreichende Genauigkeit auf.

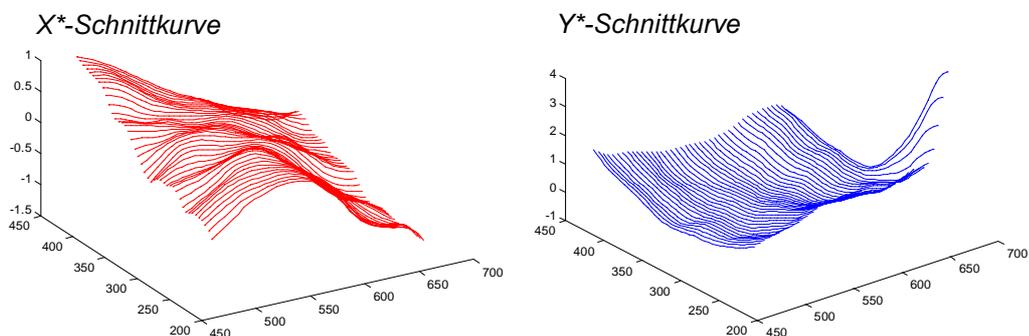


Abbildung 36: X^* - und Y^* -Schnittkurven durch die Oberfläche

Mit diesen Integrationswerten liegen m Schnittkurven in X^* -Richtung bzw. l Kurven in Y^* -Richtung durch die Oberfläche vor (Abbildung 36). Diese Kurven werden in Z^* -Richtung

zueinander ausgerichtet, da bei der Integration nicht bestimmte Konstantanteile entstehen. Die Schnittkurven sind so aneinander anzupassen, daß in jedem Gitterknoten die Differenz der entsprechenden Schnittkurvenwerte minimal ist.

Unter Verwendung der least-square-Methode werden die notwendigen Verschiebungen in Gleichung 64 mit Hilfe der Pseudoinverse [99] minimiert (Abbildung 37-a).

$$\left| z_{lm,X^*}^* + \Delta z_{m,X^*}^* - (z_{lm,Y^*}^* + \Delta z_{l,Y^*}^*) \right|^2 = \min! \quad (\text{Gl. 64})$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \left. \begin{matrix} m_{\max} \\ \vdots \\ l_{\max} \end{matrix} \right\} \begin{bmatrix} \left[\begin{matrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{matrix} \right] & \left[\begin{matrix} -1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right] \\ \vdots \\ \left. \begin{matrix} m_{\max} \\ \vdots \\ l_{\max} \end{matrix} \right\} \begin{bmatrix} \left[\begin{matrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{matrix} \right] & \left[\begin{matrix} 0 & 0 & \dots & -1 \\ 0 & 0 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{matrix} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta z_{1,X^*}^* \\ \vdots \\ \Delta z_{m_{\max},X^*}^* \\ \Delta z_{l,Y^*}^* \\ \vdots \\ \Delta z_{l_{\max},Y^*}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11,Y^*}^* - z_{11,X^*}^* \\ z_{12,Y^*}^* - z_{12,X^*}^* \\ \vdots \\ z_{1m_{\max},Y^*}^* - z_{1m_{\max},X^*}^* \\ z_{21,Y^*}^* - z_{21,X^*}^* \\ \vdots \\ z_{l_{\max}m_{\max},Y^*}^* - z_{l_{\max}m_{\max},X^*}^* \end{bmatrix}$$

Den Schnittkurven in X^* - bzw. Y^* -Richtung werden die jeweiligen Verschiebungsbeträge $\Delta z_{m,X^*}^*$, $\Delta z_{l,Y^*}^*$ zuaddiert. Noch bestehende Differenzen zwischen den Netzen werden durch Mittelwertbildung ausgeglichen.

Die optimierten z_{lm}^* -Werte bilden das Gesamtnetz (Abbildungen 37-b), das jedoch um einen konstanten Anteil in Z^* -Richtung verschoben sein kann. Überdeckt das Netz einen ausreichend großen Oberflächenbereich, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die mittlere Auslenkung des erfaßten Oberflächenbereiches mit der Nulllage der Grenzfläche identisch ist (z. B. durch Erfassung mehrerer Wellenperioden), wird das Netz um den negativen Mittelwert aller gemittelten z_{lm}^* -Werte verschoben.

Wird durch das Netz lediglich eine Lokalstruktur der Oberflächentopographie erfaßt, etwa zur Reduzierung des Rechenaufwandes nur die direkte Umgebung eines betrachteten Brechungspunktes, ist eine solche Ausrichtung nur schwierig möglich. Als Optimierungsansätze können die Netzpunkte, bei denen die größte Neigung auftritt, auf die Nullebene oder, bei Kenntnis der Wellenamplituden, die maximalen bzw. minimalen z_{lm}^* -Werte auf die bekannten Amplitudenwerte verschoben werden.

Abschließend liegen für jeden Gitterpunkt sowohl angenäherte Werte der Normalenvektoren bzw. partiellen Ableitungen als auch der absoluten Oberflächenauslenkung in Grenzflächenkoordinaten vor. Bei der Modellierung lokal begrenzter Oberflächenberei-

che verbleibt im Normalfall aber ein gewisser, für den gesamten Bereich konstanter Fehler durch die unbestimmte Z^* -Verschiebung des gesamten Netzes.

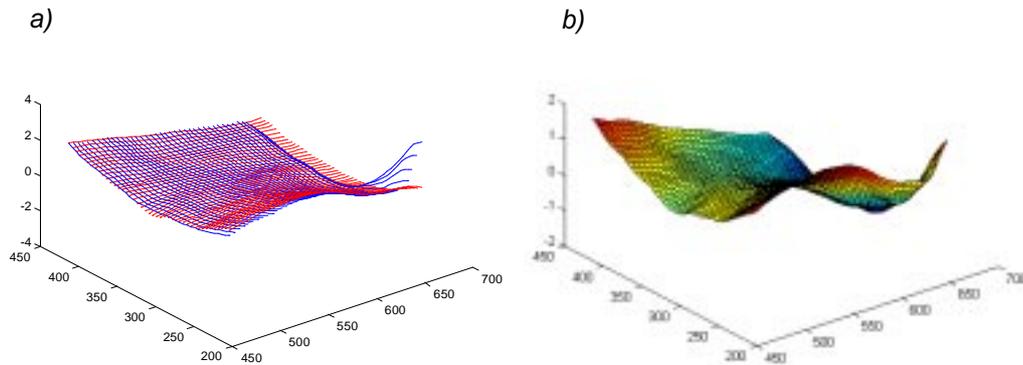


Abbildung 37: a) least-square angepaßte Schnittkurven
b) optimiertes Oberflächennetz

3.3.2.3 Rekursive Parameterverbesserung

Verbesserte Reflexionspunktkoordinaten werden ermittelt, indem die Durchstoßpunkte der Reflexionsbildvektoren durch die vorliegende Modellfläche bestimmt werden. Diese Punktbestimmung erfolgt dabei analog zur Bestimmung des Brechungspunktes. Anschließend werden für die neuen Reflexionspunkte verbesserte Normalenvektoren bzw. partielle Ableitungswerte $z^*_x(\vec{x}_{R,jk})$ bzw. $z^*_y(\vec{x}_{R,jk})$ nach Gleichung 61, 62 aufgestellt, aus denen durch rekursives Vorgehen eine Verbesserung der Werte der Oberflächenauslenkung z^* erreicht wird.

Dieser Ablauf wird wiederholt, bis sich die modellierte Oberfläche bei erneuter Rekursion nur noch unterhalb der erforderlichen Genauigkeit ändert. Die benötigte Rechenzeit hängt hauptsächlich von der Anzahl der gemessenen Reflexionen ($j \times k$) und Gitterknoten ($l \times m$) ab und vervielfacht sich mit jeder rekursiven Wiederholung. So ist für zeitkritische Auswerteaufgaben ein Kompromiß zwischen Genauigkeit und Modellierungszeit zu finden. Minimiert wird die Rechenzeit, wenn nur die Normalenvektoren in den an das Brechungsbild direkt angrenzenden Reflexionspunkten bestimmt werden. Eine weitere Einsparung wird erzielt, indem nicht interpoliert, sondern die Werte einfach gemittelt werden. Unter Umständen reicht es auch aus, nur für einen einzigen, dem Brechungsbild nahegelegenen Reflexionspunkt den Normalenvektor zu bestimmen.

Die Anwendung des Verfahrens mit der Angabe der erreichten Genauigkeiten ist im Abschnitt 5.3 dargestellt.

4 Manipulatorträgersystem (MTS)

Der im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute Großmanipulator basiert auf Komponenten des Manipulatorträgersystems (MTS). Das MTS ist in seinem ursprünglichen Aufbau eine fünfsichtige Portalanlage, die einen sechsachsigen Manipulator führt. Das Gesamtsystem stellte einen elfachsigen Roboter dar, der als Prototyp für Handhabungsaufgaben in verfahrenstechnischen Anlagen für die Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen aufgebaut wurde. Im Jahr 1981 traf die Deutsche Gesellschaft für Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen mbH (DWK) die Entscheidung, in der geplanten Wiederaufbereitungsanlage Wackersdorf (WAW) die Instandhaltung der hoch- und mittelaktiven naß-chemischen Abschnitte des PUREX-Prozesses mit Hilfe der fernhantierungsgerechten Modultechnik (FEMO-Technik) ohne Zutritt von Personen durchzuführen. Die verfahrenstechnischen Apparate wurden in Modulen in Großzellen (FEMO-Zellen) angeordnet, die selbst im Fall etwaig notwendiger Reparaturen nicht betreten werden sollten. Alle zur Inspektion, Wartung und Reparatur erforderlichen Maßnahmen sollten fernbedient durchgeführt werden. Kernstück dieses Instandhaltungskonzeptes war das Manipulatorträgersystem MTS, das zusammen mit dem zugehörigen Manipulator und dem oberhalb operierenden FEMO-Zellenkran alle Instandhaltungsmaßnahmen durchführen sollte. Diese Aufgabenstellung führt zu hohen Anforderungen an die Auslegung des Gerätes:

- Dauerbetrieb bis zu einer Strahlenbelastung von ca. 10^6 Gy [100]. Aufgrund dieser Anforderungen waren sämtliche Halbleiterbauelemente von Meßwertaufnehmern und Antrieben außerhalb der FEMO-Zellen angeordnet. Signale wurden elektrisch oder per Glasfaser übertragen. Die Kabel waren über FEMO-Kupplungen auswechselbar.
- Dauerbetrieb in chemisch aggressiver Umgebung (HNO_3) [100]. Es wurden weitgehend korrosionsbeständige Stähle verwendet.
- Redundante Meßwertaufnahme für Automatikbetrieb und kameraüberwachten Betrieb. Dies wurde durch den Einsatz von Resolvern und die Aufzeichnung der Umdrehungen der Antriebsmotoren (Synchronmaschinen) erzielt.
- Wartung und Reparatur des MTS selbst allein mit Kranhaken und Schlagschrauber eingehängt in die oberhalb operierenden Hilfskräne. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, ist das MTS selbst aus einzelnen FEMO-Baugruppen zusammengesetzt. Es sollte so bei Versagen von beliebigen Bauteilen aus jeder beliebigen Stellung geborgen werden können und jede Baugruppe sollte fernbedient gewartet und ausgewechselt werden können.

Zur Erprobung des FEMO-Konzeptes wurde das Maschinenhaus des stillgelegten Kohlekraftwerks Heyden I in Petershagen-Lahde ausgeräumt und ein in Teilen der projektierten WAW nachgebildeter Teststand installiert, der 1983 in Betrieb genommen wurde (Abbildung 38).



Abbildung 38: MTS mit FEMO-Zellen im Versuchsaufbau in Lahde [100]

4.1 Beschreibung des Manipulatorsystems in seinem Uraufbau

Die von der Fa. Noell realisierte Brücke läuft auf Schienen deren Oberkante sich $14m$ über dem Fundament befindet. Sie verfügt über eine Spannweite von $12m$ und hat innerhalb der FEMO-Zellen einen Fahrweg von $100m$. Die Brücke trägt die Unterkatze mit einem Fahrweg von $4,65m$, auf der der $12m$ lange, um 360° um seine Längsachse drehbare Mast gelagert ist. Am Mast läuft vertikal der Support. Dieser trägt die um 360° schwenkbare Manipulatoraufnahme.

In die schwenkbare Manipulatoraufnahme ist der sechssachsige Manipulator 600 N der Fa. Wälischmiller eingehängt. Es handelt sich um ein Gerät mit zwei translatorischen (1. und 3. Achse) und vier rotatorischen Achsen (Abbildung 39).

Das System war mit einer Steuerung versehen, die Joy-Stick-Betrieb, Master-Slave-Betrieb sowie Automatikbetrieb ermöglichen sollte. Diese war jedoch angesichts des

Aufbaus auf der Basis von SPS-Technik sowie Intel 8086 Prozessoren in der Leistungsfähigkeit begrenzt.

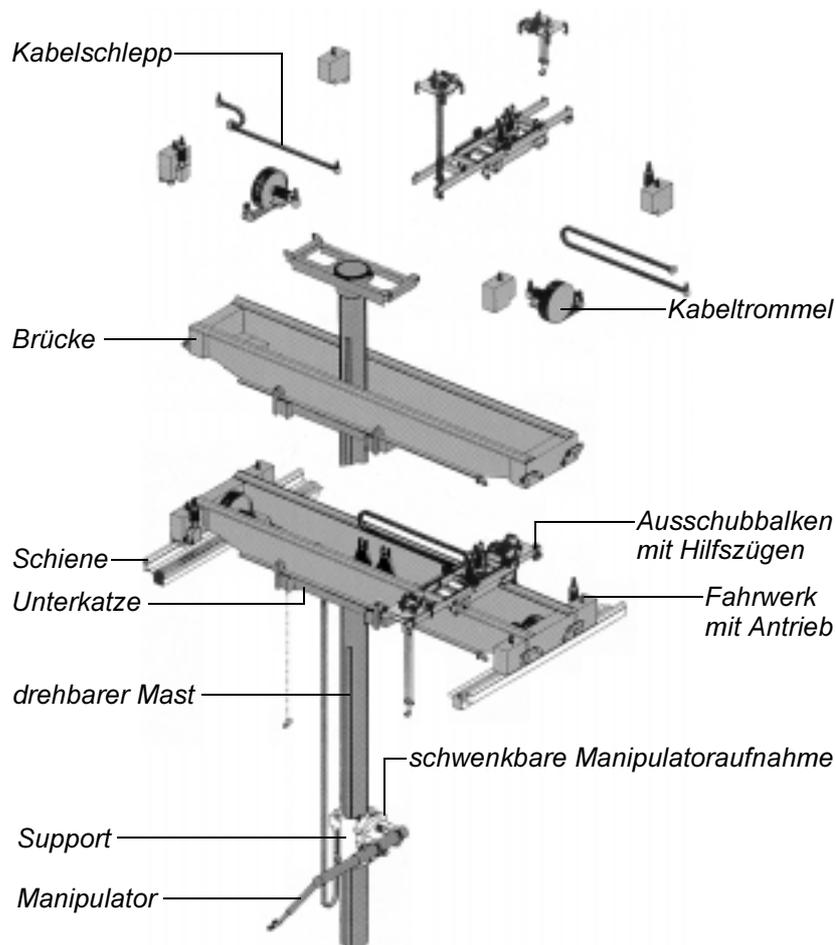


Abbildung 39: Kinematischer Aufbau des MTS

4.2 Beschreibung des Manipulatorsystems in seinem aktuellen Aufbau

Im Mai 1989 gab die DWK den Weiterbau der WAW wegen der infolge des politischen Widerstands wachsenden Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Kosten und der Genehmigungssituation zugunsten der Wiederaufbereitung im Ausland auf [101]. Zeitgleich wurden die Prototypenversuche beendet und das MTS ging als Spende an das Titelinstitut über. Mit dem Bau des Unterwassertechnikums Hannover (UWTH) im Jahr 1997 steht Laborfläche für den Neuaufbau und die Nutzung von Teilen des MTS als universellem Trägersystem in Forschung und Entwicklung zur Verfügung.

Die Komponenten Brücke, Unterkatze, Mast und Support sowie die Fahrwerke der Antriebsblöcke und Teile der Schienenaufgabe wurden für den Neuaufbau verwendet. Die Nutzung der MTS-Komponenten in den Anlagen des UWTH erforderte jedoch eine weitgehende Umkonstruktion der Kinematik. Die Bauform mit starrem Mast konstanter Länge, die auf die Instandhaltung seitlich angeordneter FEMO-Zellen abgestimmt war,

verhindert das in industriellen Anwendungen solcher Portalanlagen verbreitetere Eintauchen in Bauteile sowie das Eintauchen in Wasserbecken.

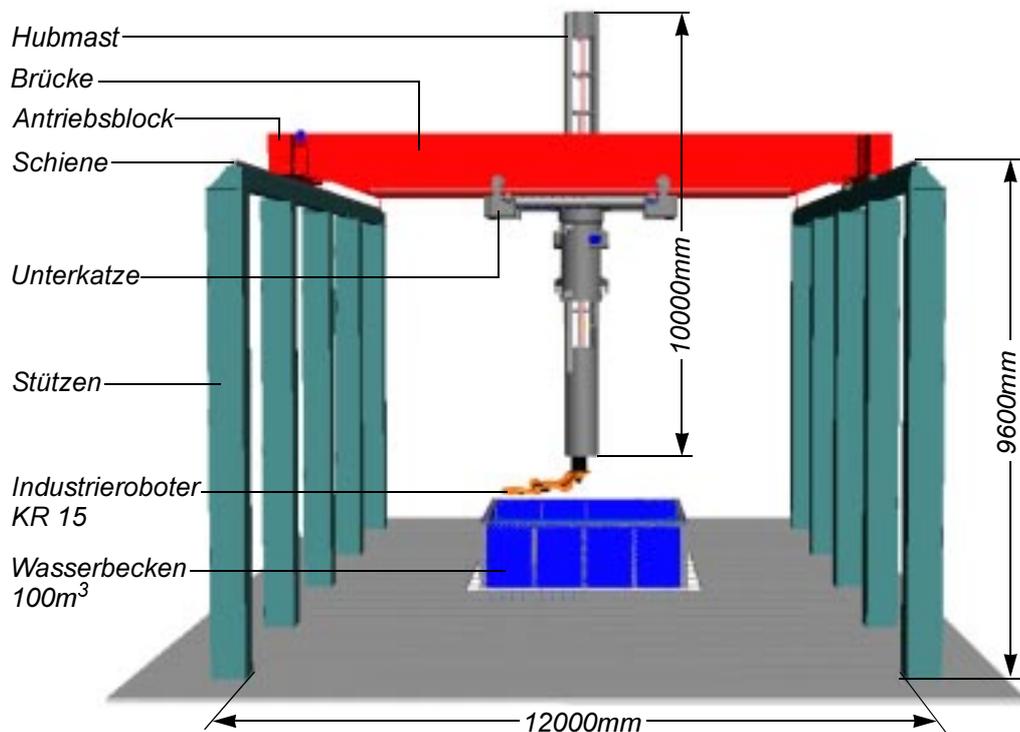


Abbildung 40: Aufbau des MTS im UWTH

Daher fand eine Umkonstruktion dahingehend statt, daß der Mast durch die Unterkatze und die Brücke hindurch angehoben werden kann. Um dies zugunsten der Dynamik zu erleichtern, wurde die Masse des Mastes um 25% vermindert. Die Supporteinrichtung wurde zur Auflager- und Antriebseinheit für die Hubmastachse umgebaut und mit der Unterkatze verschweißt. Es entfällt die Drehung des Mastes um seine Längsachse, die mit der unten beschriebenen Roboterkinematik redundant ist.

Beim MTS handelt es sich nun um eine Portalanlage mit drei senkrecht aufeinander stehenden translatorischen Achsen, an deren Z-Achse, am Mastfuß, mit der ersten Achse koaxial sechsachsige Industrieroboter (IR), je nach Anwendungsfall mit 15 oder 125kg Traglast, in Überkopfposition montiert sind. Das Gesamtsystem, im folgenden als Großmanipulator bezeichnet, ist neunachsig. Roboterkinematisch betrachtet bilden Stützen und Schiene das erste Glied, die Brücke mit dem an ihr entlang laufenden Teil der Unterkatze das zweite Glied und der Hubmast mit Antrieb und Auflagerung in der Unterkatze das dritte Glied. Die Bewegung der Brücke entlang den Schienen stellt die erste Achse, die Unterkatzenfahrt entlang der Brücke die zweite und die Hubbewegung des Mastes durch die Unterkatze die dritte Achse dar. Die drei translatorischen Achsen des Trägersystems übernehmen die Grobpositionierung, mit den sechs Achsen des Industrieroboters ist es möglich jeden Punkt innerhalb des unbedingten Arbeitsraumes des Roboters in jeder Orientierung im Bahn- oder Punkt-zu-Punkt-Betrieb anzufahren.

4.3 Arbeitsraum des Großmanipulators

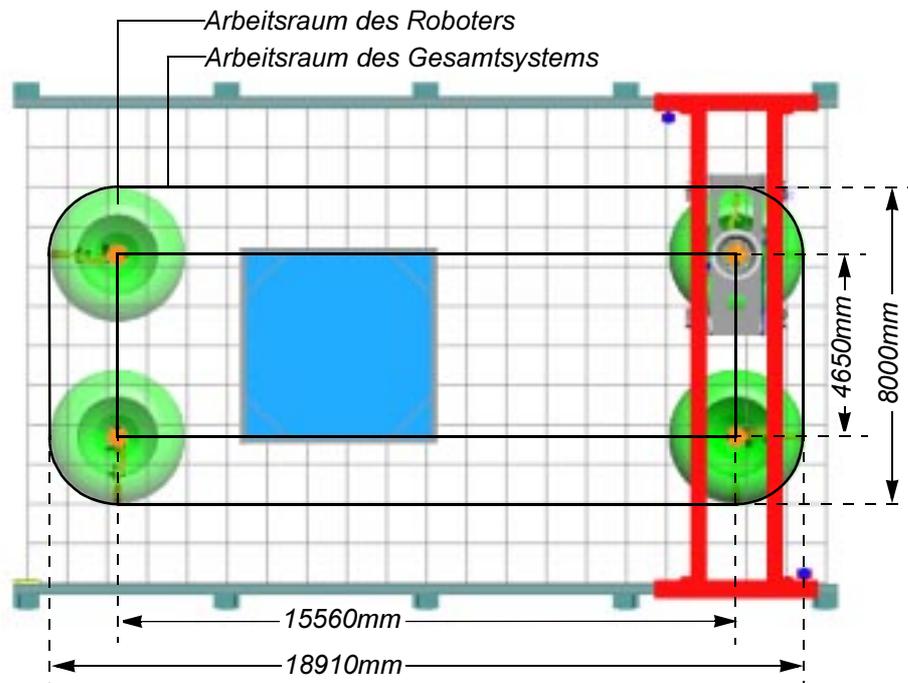


Abbildung 41: Arbeitsraum des Großmanipulators (Draufsicht)

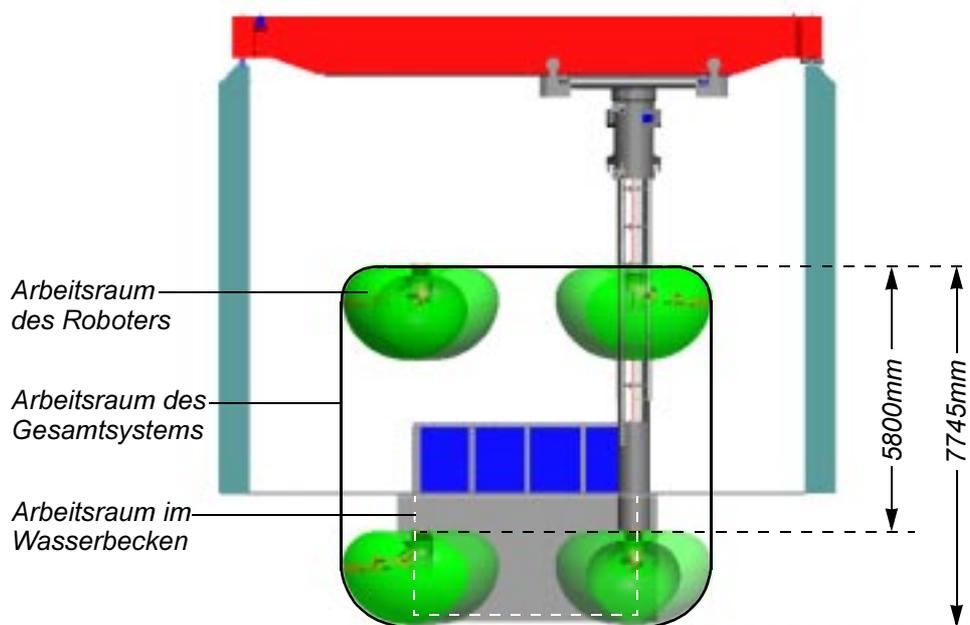


Abbildung 42: Arbeitsraum des Großmanipulators (Seitenansicht)

Der Arbeitsraum des Großmanipulators ergibt sich aus dem Arbeitsraum des applizierten Industrieroboters und den maximalen Verfahrwegen des Trägersystems in den drei translatorischen Achsen, wie in den Abbildungen 41 und 42 dargestellt. Mit dem Industrieroboter KR 15 ergibt sich ein quaderförmiger Arbeitsraum mit den Ausdehnungen $18910 \times 8000 \times 7745\text{mm}$. Durch die gegenüber dem Manipulator 600N wesentlich geringere maximale Auslage des KR 15 (max. Auslage querab: 600N = 4960mm , KR 15 = 1710mm) wird mit dem aktuellen Aufbau, gleiche Schienenlänge vorausgesetzt, ein in der Länge und Breite um 6500mm kleinerer Arbeitsraum erreicht. Bezüglich der Höhe

lassen sich die Arbeitsräume aufgrund der geänderten Länge des Mastes und der umgestalteten Kinematik nicht vergleichen.

Der Arbeitsraum des Großmanipulators im aktuellen Aufbau ist demnach zwar kleiner, als im Uraufbau, die Nutzbarkeit des Arbeitsraumes ist für eine Vielzahl industrieller Automatisierungsaufgaben jedoch wesentlich günstiger. Das Eintauchen und Ausführen von Trenn- und Fügearbeiten in Stahlbaustrukturen, wie z. B. Schiffsgefachen, wird durch die kleine Bauform des Roboters und seine hängende Montage begünstigt. Darüber hinaus ist der nicht nutzbare Raum innerhalb des Arbeitsraumes eines hängend montierten Roboters bei seitlich oder von oben zu führenden Prozessen seltener relevant und kann in der hier realisierten Bauform durch Anheben des Mastes leicht verschoben werden. Gegenüber dem Uraufbau, bei dem sich im Zentrum des Arbeitsraumes stets der Mast befindet, ist im Verhältnis zur Größe des Roboters im aktuellen Aufbau das Abfahren wesentlich längerer, durchgängiger Bahnen möglich.

4.4 Untersuchung der Genauigkeit des Großmanipulators

Ziel der Arbeit ist die Verbesserung der Genauigkeitskennwerte des Großmanipulators. In Anlehnung an die VDI Richtlinie 2861 [102] werden daher im Abschnitt 4.4.1 die relevanten Kenngrößen hergeleitet und definiert. Anhand von Theodolitenmessungen werden die Genauigkeitskennwerte des Großmanipulators in Abschnitt 4.4.2 praktisch bestimmt. Zur Qualifikation der auftretenden Ungenauigkeiten, zur Analyse ihres Ursprunges und zum Ableiten der Verbesserungsmöglichkeiten findet die theoretische Untersuchung des Gerätes statt. Die kinematische Beschreibung des Großmanipulators in Abschnitt 4.4.3 ist Grundlage der Bildung eines mathematischen Modells, mit dessen Hilfe die theoretische Genauigkeit des Systems ermittelt wird und das der Genauigkeitssteigerung des Großmanipulators mit Hilfe der mathematischen Kalibrierung dienen kann. Die Parameter des Modells werden anhand einer FEM-Betrachtung im Abgleich mit den Ergebnissen der Messung der tatsächlichen Genauigkeit des Großmanipulators in Abschnitt 4.4.4 identifiziert.

4.4.1 Definition der Genauigkeitskenngrößen

In der DIN ISO 9283 [103] und der VDI-Richtlinie 2861 werden technische Begriffe und Kenngrößen für IR, Manipulatoren und Handhabungsgeräte definiert. Damit werden Kriterien geschaffen, mit denen die Einsetzbarkeit des Handhabungsgerätes für unterschiedliche Anwendungsfälle sowie die dabei erzielten Genauigkeiten beurteilt werden können.

Charakteristische Kenngrößen der Genauigkeit von Handhabungseinrichtungen sind in Anlehnung an die VDI 2861 die Wiederholgenauigkeit beim Positionieren (Positionsstreuung) und die absolute Positionsgenauigkeit. Bei der Angabe der jeweiligen Genauigkeitskenngröße wird automatischer Betrieb des Gerätes bei Nennlast im betriebswarmen Zustand vorausgesetzt.

Zur Ermittlung der Wiederholgenauigkeit beim Positionieren werden in einem Bezugskordinatensystem nach VDI-Richtlinie 2861 mindestens $k = 30$ Meßorte M_{Oj} ($j = 1 \dots k$) festgelegt.

Jeder Meßort M_{Oj} wird n mal angefahren (laut Empfehlung der VDI-Richtlinie 2861 $n \geq 5$). Es entstehen $n \cdot k$ Meßpunkte MP_{ij} ($i = 1 \dots n$ und $j = 1 \dots k$) also i -ter Meßwert am j -ten Meßort M_{Oj} .

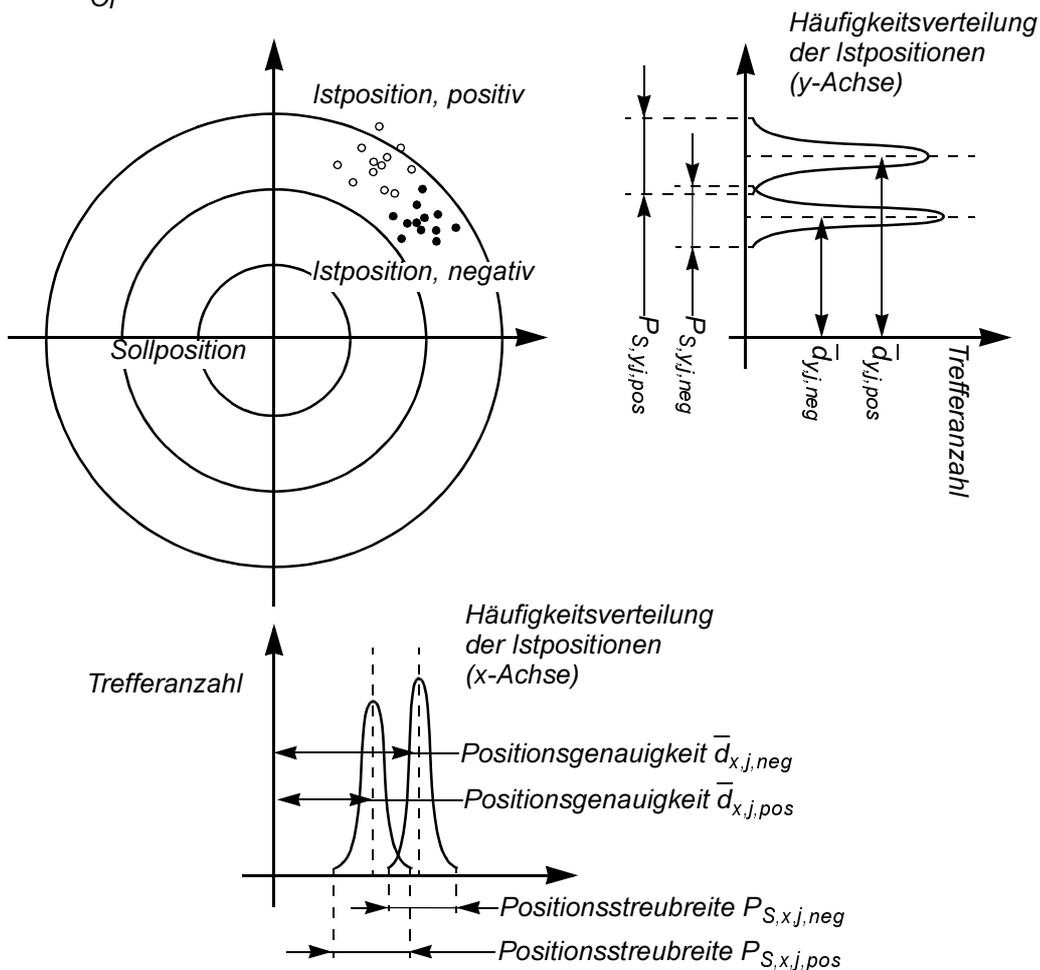


Abbildung 43: zweidimensionale Darstellung statistischer Genauigkeitskenngrößen

Die Abbildung 43 verdeutlicht die Unterscheidung zwischen Positionsgenauigkeit und Positionsstreuung, die mit der Wiederholgenauigkeit gleichbedeutend ist, in zweidimensionaler Darstellung für einen Meßort: Ein Roboter fährt einen Meßort im Raum mit einer Streuung an. Für das Anfahren aus der positiven und der negativen Richtung ergibt sich je ein Punkthaufen, der um einen Mittelwert normalverteilt ist. Der Wert, um den diese Position von der Sollposition abweicht, bezeichnet die Positionsgenauigkeit. Der Bereich, in dem 99,7% aller Meßpositionen liegen, gegeben durch die sechsfache empirische Standardabweichung, bezeichnet die Positionsstreuung, für die jeweilige Koordinate in der jeweiligen Anfahrriichtung.

Die Genauigkeitskennwerte von Manipulatoren und Robotern werden im allgemeinen ohne Spezifikation der Koordinate angegeben. Man berechnet die Abweichungen der Meßpunkte vom Sollwert am Meßort nach

$$d_{ij} = MP_{ij} - M_{Oj} \quad \text{mit} \quad d_{ij} = \sqrt{(x_{soll} - x_{ist})^2 + (y_{soll} - y_{ist})^2 + (z_{soll} - z_{ist})^2}. \quad (\text{Gl. 65})$$

Mit Hilfe dieser Meßwerte lassen sich die in Abbildung 44 verdeutlichten statistischen Werte nach den Tabellen 2 und 3 errechnen.

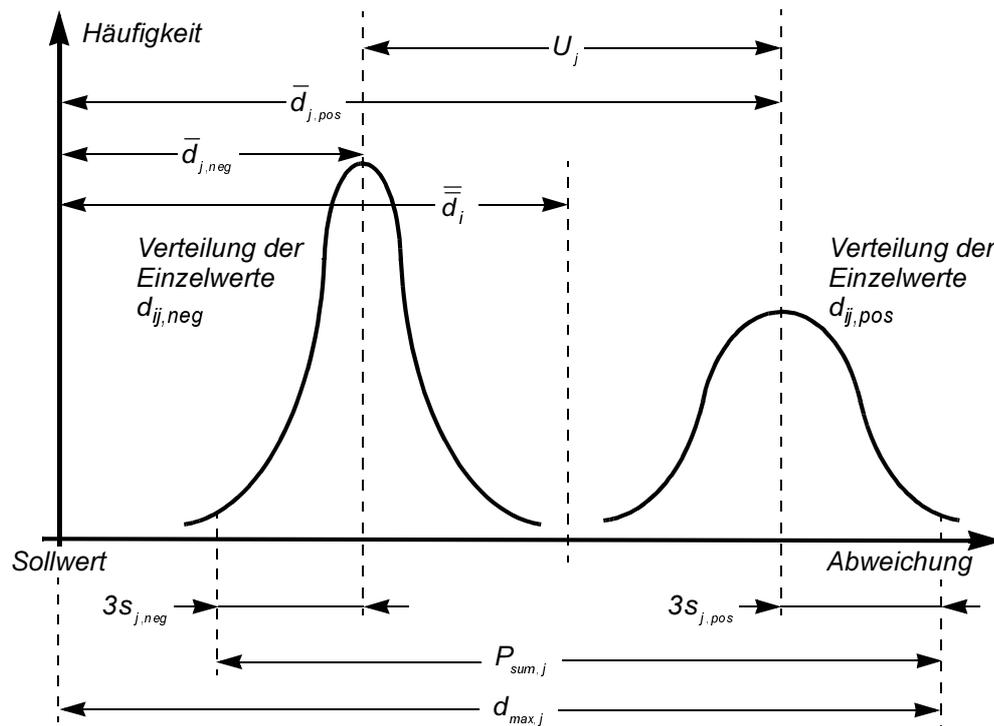


Abbildung 44: typische Häufigkeitsverteilung der Positionsmeßwerte

Im Fall der Positionsstreubreite $P_{S,j}$ widerspricht die Angabe gemäß der VDI-Richtlinie 2861 dem Modell, da sie nur für eine Umkehrspanne $U_{S,j} = 0$ gilt, die jedoch real nicht vorgefunden wird. Die Angabe einer, in der Richtlinie nicht vorgesehenen, auf eine Anfahrrichtung beschränkten Positionsstreubreite kann sinnvoll sein, da der bereits programmierte Roboter eine Position stets aus derselben Richtung anfährt. Die in Tabelle 3 in Erweiterung der Richtlinie angegebene, summierte Positionsstreubreite $P_{sum,j}$ umfaßt hingegen die gefundene Positionsstreubreite bei vorhandenem $U_{S,j}$ und deckt damit auch den Fall ab, daß ein Roboter während einer Teach-in-Programmierung von einer anderen Richtung an die Position herangefahren wird als im späteren Programmablauf. Die Definition der maximalen Positionsabweichung $d_{max,j}$ nach Tabelle 3 geht über die nicht ausreichende Betrachtung der Mittelwerte der Punkthaufen der Meßpositionen \bar{d}_j hinaus. Sie beschreibt den Betrag der maximalen Abweichung einer Meßposition von einer z. B. im offline-System geplanten Sollposition und wird daher als relevante Kenngröße angesehen.

Tabelle 2: Berechnung der statistischen Größen

Größe	Formel
Positionsgenauigkeit: Mittelwert der Einzelmeßwerte am Meßort M_{Oj} in positiver Anfahrriichtung	$\bar{d}_{j,pos} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ij,pos}$
Positionsgenauigkeit: Mittelwert der Einzelmeßwerte am Meßort M_{Oj} in negativer Anfahrriichtung	$\bar{d}_{j,neg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ij,neg}$
Standardabweichung in positiver Anfahrriichtung am Meßort M_{Oj}	$s_{j,pos} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_{ij,pos} - \bar{d}_{j,pos})^2}$
Standardabweichung in negativer Anfahrriichtung am Meßort M_{Oj}	$s_{j,neg} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_{ij,neg} - \bar{d}_{j,neg})^2}$
mittlere Standardabweichung am Meßort M_{Oj}	$\bar{s}_j = \frac{s_{j,pos} + s_{j,neg}}{2}$
Positionsstreubreite am Meßort M_{Oj} (gilt für $U_{S,j} = 0$)	$P_{S,j} = 6\bar{s}_j$
maximale Positionsstreubreite aller Meßorte M_{Oj} ($j=1\dots k$)	$P_{S,max} = \text{Max}(P_{S,j}) \text{ mit } j = 1\dots k$
Umkehrspanne am Meßort M_{Oj}	$U_{S,j} = \bar{d}_{j,pos} - \bar{d}_{j,neg} $
maximale Umkehrspanne aller Meßorte M_{Oj} ($j=1\dots k$)	$U_{S,max} = \text{Max}(U_{S,j}) \text{ mit } j = 1\dots k$
mittlere Abweichung vom Sollwert am Meßort M_{Oj}	$\bar{\bar{d}}_j = \frac{\bar{d}_{j,pos} + \bar{d}_{j,neg}}{2}$
mittlere Positionsstreubreite aller Meßorte	$\bar{P}_S = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k P_{S,j}$
mittlere Umkehrspanne aller Meßorte	$\bar{U}_S = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k U_{S,j}$

In Ergänzung zur VDI-Richtlinie werden als Kennwerte definiert:

Tabelle 3: ergänzende Genauigkeitskenngrößen

Größe	Formel
summierte Positionsstreubreite am Meßort M_{Oj}	$P_{sum,j} = U_{S,j} + 3s_{j,pos} + 3s_{j,neg}$
maximale Positionsabweichung am Meßort M_{Oj}	$d_{max,j} = \text{Max}(\bar{d}_{j,pos} + 3s_{j,pos}, \bar{d}_{j,neg} + 3s_{j,neg})$

Die in der Aufgabenstellung durch die Gewährleistung der Prozeßsicherheit der Verfahren Plasmaschmelzschnitten, autogenes Brennschneiden und MIG/MAG-Schweißen mit $\pm 1mm$ gegebene Genauigkeitsanforderung ist im Sinne der Definition nach den Tabellen 2 und 3 gleichbedeutend mit einer maximalen Positionsabweichung $d_{max} = 1mm$. Abhängig von der erreichten Positionsstreubreite stellt sich die erforderliche Positionsgenauigkeit ein. Für eine angenommene Positionsstreubreite $P_S = 0,2mm$ ergibt sich die erforderliche Positionsgenauigkeit zu $\bar{d} = 0,9mm$.

4.4.2 Bestimmung der Genauigkeitskenngrößen durch Theodolitenmessungen

Als Vermessungswerkzeug zur Bestimmung der Genauigkeitskenngrößen des Trägersystems erscheint angesichts des großen Arbeitsraumes, der Verfügbarkeit und der theoretisch erzielbaren Genauigkeit der Einsatz von Theodoliten zweckmäßig. Es werden zwei Theodoliten vom Typ Wild T3000 und ein PC-basiertes Auswertesystem verwendet.

Zur Bewertung des Theodolitenmeßsystems dienen zwecks Vergleichbarkeit die statistischen Genauigkeitskennwerte zur Beschreibung von Robotern und Manipulatoren nach Tabelle 2 und 3. Innerhalb des Arbeitsraumes des Großmanipulators werden mit dem Meßsystem die in Kalibriermessungen ermittelten Meßgenauigkeiten nach Tabelle 4

Tabelle 4: Genauigkeitskenngrößen des Theodolitenmeßsystems

	Formelzeichen	Zentrum (4 x 4 x 4m)		Randbereich	
Anzahl der Messungen	n	1	3	1	3
Positionsgenauigkeit	\bar{d}_{gem}	0,02mm	0,02mm	0,02mm	0,02mm
Positionsstreubreite	$P_{S,gem}$	0,30mm	0,20mm	0,61mm	0,40mm
maximale Positionsabweichung	$d_{max,gem}$	0,17mm	0,12mm	0,32mm	0,22mm

erreicht. Die mit $d_{max,gem} = 0,32mm$ angegebene Untergrenze der Genauigkeit ist durch ungünstige Winkelverhältnisse der Zielstrahlen der Theodoliten in den Randbereichen des Arbeitsraumes, damit verbundene Berechnungsungenauigkeiten und größere Zielfehler beim Anpeilen der Meßmarken bestimmt. Im Zentrum des Arbeitsraumes sind höhere Genauigkeiten zu erreichen, die sich durch Ausgleichsrechnung mit der Anzahl der Messungen verbessern. Konservativ betrachtet, ist im Zentrum von einer maximalen Positionsabweichung von $d_{max,gem} = 0,12mm$ auszugehen.

Der Literatur [104] ist zu entnehmen, daß für Industrieroboter des verwendeten Typs die Kennwerte nach Tabelle 5 gelten. Diese Annahme zugrundelegend, werden meßtechnisch lediglich die Achsen des Trägersystems betrachtet. In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2861 werden mit jeder Achse des Trägersystems $k = 10$ systematisch im Arbeitsraum verteilte Meßorte $n = 5$ mal aus der positiven und negativen Richtung angefahren und vermessen.

Tabelle 5: Genauigkeitskennwerte des Industrieroboters KR15

Kenngröße	Formelzeichen	Betrag
Positionsgenauigkeit	\bar{d}_{KR15}	0,8mm
Positionsstreubreite	$P_{S,KR15}$	0,2mm

Aus den Meßergebnissen lassen sich die in Tabelle 6 angegebenen Genauigkeitskennwerte des Trägersystems für die Achsen Brücke, Katze und Mast nach den Tabellen 2 und 3 bestimmen. Im Langzeitbetrieb entzieht sich die kraftschlüssig angetriebene Brückenachse der Systematik, da mit dem kumulierten Verfahrweg eine gerichtete Abdrift vom Sollwert mit $w_{Drift} \approx 0,01mm/m$ eintritt, die durch die in die Motoren integrierten Weggeber nicht detektiert wird. Für Verfahrwegen der Brücke $q < 1m$ und geringe Verfahrgeschwindigkeiten tritt dieser Effekt hinter den Genauigkeitskenngrößen zurück, so daß diese identifiziert werden können.

Tabelle 6: gemessene Genauigkeitskenngrößen des Trägersystems bezogen auf das Mastfußpunktkoordinatensystem

über alle M_0 gemittelte Größe	Zeichen	Brücke $q < 1m$	Katze	Mast	Vektor
Positionsgenauigkeit	\bar{d}	6,51mm	11,9mm	0,48mm	13,57mm
Standardabweichung, pos. Richtung	\bar{s}_{pos}	0,05mm	0,10mm	0,03mm	0,12mm
Standardabweichung, neg. Richtung	\bar{s}_{neg}	0,04mm	0,09mm	0,03mm	0,10mm
Standardabweichung	\bar{s}	0,05mm	0,09mm	0,03mm	0,11mm
Positionsstreubreite	\bar{P}_S	0,28mm	0,57mm	0,16mm	0,65mm
maximale Positionsstreubreite	$P_{S,max}$	0,29mm	0,57mm	0,16mm	0,66mm
Umkehrspanne	\bar{U}_S	0,11mm	1,83mm	0,10mm	1,84mm
maximale Umkehrspanne	$U_{S,max}$	0,18mm	2,07mm	0,16mm	2,08mm
summierte Positionsstreubreite	P_{sum}	0,39mm	2,39mm	0,28mm	2,44mm
maximale Positionsabweichung	d_{max}	6,65mm	12,18mm	0,56mm	13,88mm

Die Abbildung 45 stellt exemplarisch die bei der Vermessung einer waagerechten Ebene auftretenden Positionsabweichung des Mastfußpunktes dar. Wie in Abschnitt 4.4.4 gezeigt wird, sind die Positionsabweichungen am Mastfuß in Richtung der Brücken- und Katzenachse wesentlich durch eine Schiefstellung des Mastes verursacht, die sich beim Heben und Senken des Mastes wie in Tabelle 6 angegeben auswirkt. Beim Verfahren des Trägersystems in einer waagerechten Ebene tritt dieser Einfluß nicht auf, so daß die Positionsabweichungen die der Abbildung 45 zu entnehmenden geringeren Werte annehmen. Es sind systematische Einflüsse auf die Positionsabweichungen erkennbar, so daß eine mathematische Kalibrierung unter Berücksichtigung dieser Systematik zur Genauigkeitssteigerung beitragen könnte.

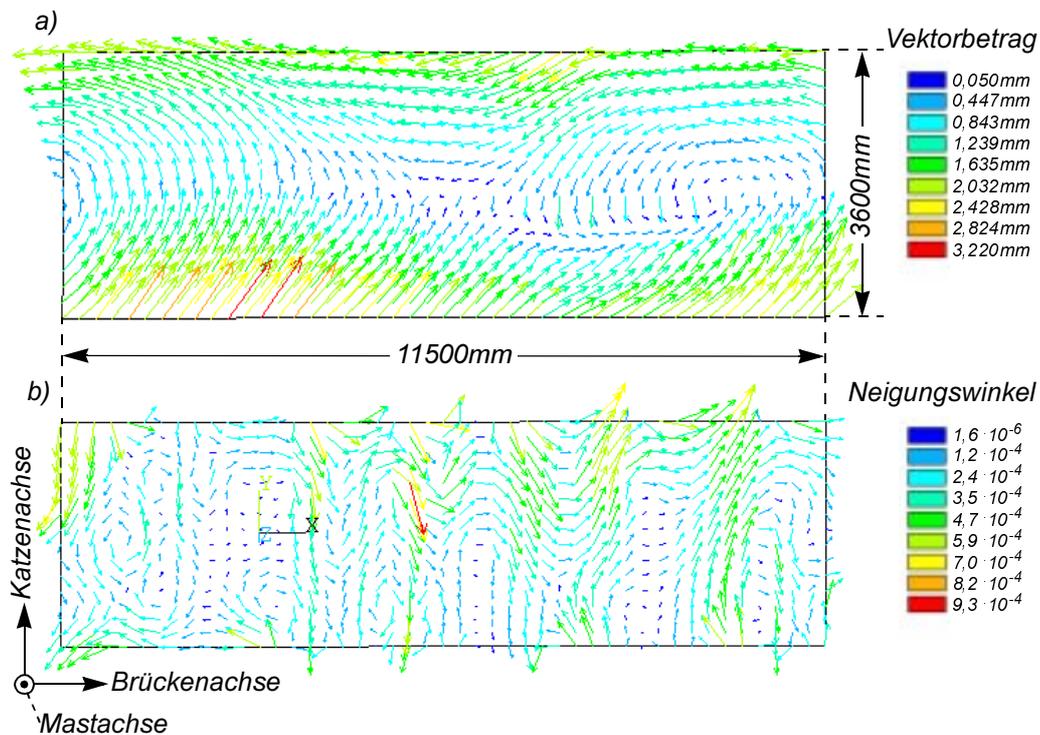


Abbildung 45: a) Positionsabweichungen des Mastfußpunktes in einer Ebene
b) Normalenvektoren der durch Meßpunkte aufgespannten Ebene

In der Positionsabweichung (Abbildung 45-a) zeigen sich die Auswirkungen der Durchsenkung der Brücke für Maststellungen in der Mitte der Brücke sowie der Verdrehung der Brücke auf den Schienen um die Mastlängsachse. Die Darstellung der Normalenvektoren der durch die Meßpunkte aufgespannten Ebene zeigt periodische Neigungsänderungen, die mit dem Abstand der MTS-Stützen korrelieren und auf eine Durchsenkung der Schienen zwischen den Stützen schließen lassen. Die Untersuchung dieser Effekte erfolgt in Abschnitt 4.4.4.

Zur Bestimmung der Genauigkeitskennwerte des Gesamtsystems werden die Größen des Roboters mit denen des Trägersystems addiert:

Tabelle 7: Genauigkeitskennwerte des Großmanipulators
bezogen auf das Mastfußpunktkoordinatensystem

Kenngröße	Formelzeichen	Betrag
Positionsgenauigkeit	\bar{d}_{gem}	14,4mm (+w _{Drift})
Positionsstreubreite	$P_{S,gem}$	0,9mm
maximale Positionsabweichung	$d_{max,gem}$	15mm (+w _{Drift})

Die gefundenen Kenngrößen sind bezüglich der durch die zu führenden Prozesse definierten erforderlichen Genauigkeit unzureichend. Aus der kinematischen Beschreibung und der theoretischen Analyse des Systems in den folgenden Abschnitten werden Möglichkeiten der Genauigkeitssteigerung abgeleitet.

4.4.3 Kinematische Beschreibung des Systems

Unter der kinematischen Beschreibung eines Manipulators versteht man die Transformationsvorschrift, die den Zusammenhang zwischen den Gelenkkoordinaten oder generalisierten Koordinaten q eines Systems und den Umweltkoordinaten des Endeffektors \vec{d} beschreibt. Bei der Modellierung von Robotern und Manipulatoren wird zumeist von einem idealisierten Mehrkörpersystem ausgegangen, das sich aus einzelnen, starren Teilkörpern zusammensetzt,

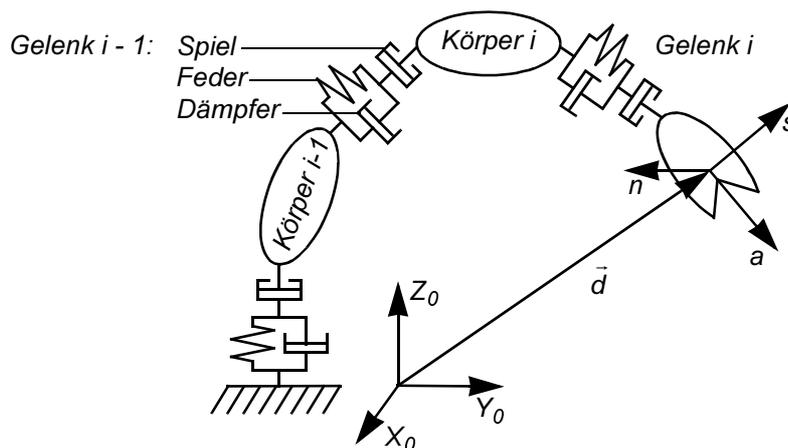


Abbildung 46: Mehrkörpersystem

die über vorerst als ideal, spielfrei und verlustfrei angenommene Gelenke mit einem Bewegungsfreiheitsgrad miteinander verbunden sind.

Zur direkten kinematischen Beschreibung räumlicher Starrkörpersysteme in globalen kartesischen Bezugskordinaten (Weltkoordinaten) als Funktion ihrer Achsparameter $\vec{d} = f(q)$ hat in der Robotertechnik die homogene Matrizendarstellung nach der Denavit-Hartenberg-Notation eine weite Verbreitung gefunden [105], [106]. Zur Beschreibung nach dieser Notation wird systematisch jeder Bewegungsachse des Systems ein rechtsdrehendes kartesisches Koordinatensystem zugewiesen. Diese als körperfest zu betrachtenden Koordinatensysteme sind so zu legen, daß folgende Orientierungsregeln zwischen unmittelbar aufeinanderfolgenden Koordinatensystemen erfüllt sind [107]:

- Der Ursprung des $(i-1)$ -ten Koordinatensystems liegt im Schnittpunkt der gemeinsamen Normalen vom $(i-1)$ -ten und i -ten Gelenk (schneiden sich die Gelenkachsen, so liegt der Koordinatenursprung im Schnittpunkt). Das Basiskoordinatensystem wird als 0 -tes Koordinatensystem definiert und kann beliebig gelegt werden, vorausgesetzt, die z_0 -Achse liegt in Richtung der Bewegungsachse des ersten Gelenks.
- Die z_{i-1} -Achse wird entlang der Bewegungsachse des i -ten Gelenks gelegt.
- Die x_i -Achse steht senkrecht auf der z_{i-1} -Achse und zeigt von dieser weg.
- Die y_i -Achse ergänzt die beiden anderen Koordinatenachsen zu einem beliebigen, rechtshändigen Koordinatensystem.

Für ein System mit n Freiheitsgraden erhält man $n + 1$ Koordinatensysteme. Paul [108] hat gezeigt, daß sich zwei benachbarte Koordinatensysteme durch zwei Elementartranslationen und zwei Elementarrotationen ineinander überführen lassen:

- Rotation um die z_{i-1} -Achse mit dem Winkel θ_i , um die Richtungen der x_i und x_{i-1} -Achse zur Deckung zu bringen,
- Translation in Richtung der z_{i-1} -Achse mit der Länge d_i ,
- Translation in Richtung der x_i -Achse mit der Länge a_i ,
- Rotation um die x_i -Achse mit dem Winkel α_i , um die z_i -Achse und die z_{i-1} -Achse zur Deckung zu bringen.

Die dazugehörigen vier Elementartransformationen liefern gemäß Gleichung 66 eine zusammengesetzte, homogene Transformationsmatrix ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$, die als Denavit-Hartenberg-Transformationsmatrix (DH-Matrix) für zwei benachbarte Koordinatensysteme i und $(i - 1)$ bezeichnet wird:

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \mathbf{T}_{z_{i-1}, \theta_i} \mathbf{T}_{z_{i-1}, d_i} \mathbf{T}_{x_i, a_i} \mathbf{T}_{x_i, \alpha_i} \quad (\text{Gl. 66})$$

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Die relative Lage des i -ten Koordinatensystems zum $(i + 1)$ -ten wird somit durch die vier Denavit-Hartenberg-Parameter θ_i , d_i , a_i und α_i eindeutig bestimmt.

Da es sich bei der betrachteten Anwendung um Achsen mit einem Freiheitsgrad handelt, ist der variable DH-Parameter gleichzeitig die zugehörige verallgemeinerte Koordinate q_i der Achse.

Eine rotatorische Achse ist durch die Achsvariable θ_i beschrieben; d_i , a_i und α_i ergeben sich als feste Größen. Bei einer translatorischen Achse ist d_i die Achsvariable und θ_i , a_i und α_i sind durch die Systemgeometrie fest vorgegebene Achsparameter.

Durch konsequente Anwendung dieser Beschreibung auf die einzelnen Segmente einer offenen kinematischen Kette lassen sich so die Beziehungen zwischen beliebigen Segmenten herleiten. Damit lässt sich die Position und Lage eines Endeffektors bezüglich eines beliebigen Ausgangskordinatensystems darstellen.

Abbildung 47 und Tabelle 8 sind die Achsparameter des MTS bezüglich des Weltkoordinatensystems X_0, Y_0, Z_0 zu entnehmen.

Tabelle 8: Achsparameter des Manipulatorträgersystems (MTS)

Gelenk i	Gelenktyp	$\theta_i [^\circ]$	$d_i [mm]$	$a_i [mm]$	$\alpha_i [^\circ]$	Achsbereich [mm]
1	translatorisch	0	q_1	l_1	-90	2000...17560
2	translatorisch	-90	q_2	0	-90	3500...8150
3	translatorisch	0	q_3	0	0	2000...7800

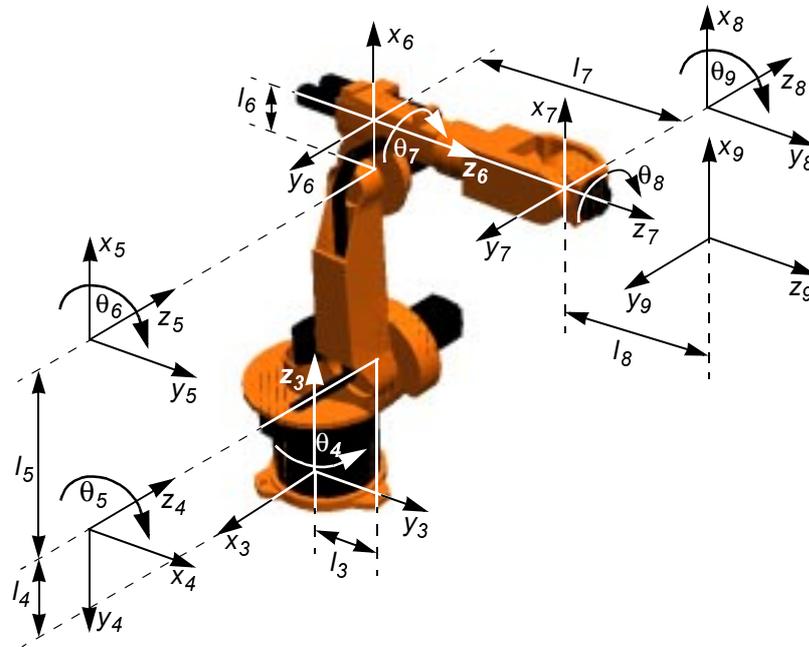


Abbildung 48: Festlegung der Koordinatensysteme für den Industrieroboter KR15

Tabelle 9: Achsparameter des sechssachsigen Industrieroboters KR15

Gelenk i	Gelenktyp	θ [°]	d [mm]	a [mm]	α [°]	Achsbereich [°]
4	rotatorisch	90	l_3	l_4	-90	-185...185
5	rotatorisch	-90	0	l_5	0	-55...115
6	rotatorisch	0	0	l_6	-90	-210...70
7	rotatorisch	0	l_7	0	90	-360...360
8	rotatorisch	0	0	0	-90	-110...110
9	rotatorisch	0	l_8	0	0	-360...360

$$\begin{aligned}
 {}^3\mathbf{A}_4 &= \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & -s\theta_4 & l_4c\theta_4 \\ s\theta_4 & 0 & c\theta_4 & l_4s\theta_4 \\ 0 & -1 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^4\mathbf{A}_5 &= \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 {}^5\mathbf{A}_6 &= \begin{bmatrix} c\theta_6 & 0 & -s\theta_6 & l_6c\theta_6 \\ s\theta_6 & 0 & c\theta_6 & l_6s\theta_6 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^6\mathbf{A}_7 &= \begin{bmatrix} c\theta_7 & 0 & s\theta_7 & 0 \\ s\theta_7 & 0 & -c\theta_7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 {}^7\mathbf{A}_8 &= \begin{bmatrix} c\theta_8 & 0 & -s\theta_8 & 0 \\ s\theta_8 & 0 & c\theta_8 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^8\mathbf{A}_9 &= \begin{bmatrix} c\theta_9 & -s\theta_8 & 0 & 0 \\ s\theta_9 & c\theta_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 69}$$

In diesen Matrizen werden $\sin\theta_i$ und $\cos\theta_i$ mit $s\theta_i$ bzw. $c\theta_i$ abgekürzt.

Die Gesamttransformationsmatrix des Roboters 3T_9 gibt die Position und Ausrichtung des Endeffektors bezüglich des Roboterbasiskoordinatensystems an:

$${}^3T_9 = {}^3A_4 \cdot {}^4A_5 \cdot {}^5A_6 \cdot {}^6A_7 \cdot {}^7A_8 \cdot {}^8A_9 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & d_x \\ n_y & s_y & a_y & d_y \\ n_z & s_z & a_z & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 70})$$

Da diese Transformationsmatrix einen stehenden Roboter beschreibt, muß sie für eine hängende Installation mit einer Koppelmatrix \mathbf{A}^* multipliziert werden, die eine Elementarrotation (siehe Gleichung 66) um die x_3 -Achse mit $\alpha_3 = 180^\circ$ beschreibt:

$${}^3T_{9,\text{hängend}} = \mathbf{A}^* \cdot {}^3A_{9,\text{stehend}}. \quad (\text{Gl. 71})$$

Durch Kombination der DH-Matrizen des MTS und des IR erhält man wiederum eine 4×4 -Transformationsmatrix 0T_9 , welche die Position und Ausrichtung des Roboter-Endeffektors bezüglich des MTS-Basiskoordinatensystems angibt.

Diese wird in der Vorwärtstransformation verwendet, um aus den eingestellten Achsparametern nach $\vec{d} = f(q)$ die Position des Endeffektors in Weltkoordinaten zu ermitteln. Die Rückwärtstransformation (*formal* $q = f^{-1}(\vec{d})$), die zur Berechnung der Bahntrajektorie, der zum Erreichen definierter Raumpositionen einzustellenden Achsparameter, erforderlich ist, läßt sich für allgemeine Strukturen nicht analytisch lösen. Hier kommen numerische Verfahren zum Einsatz.

Die gewonnene mathematische Beschreibung soll in der Vorwärtstransformation als Grundlage zur Abschätzung infolge der Auswirkung definierter Lasten und Modellfehler auftretender Abweichungen der Endeffektorposition von der Sollposition verwendet werden. Das idealisierte Starrkörpermodell sieht entsprechende Fehler nicht vor. Diese werden daher im folgenden klassifiziert und in das mathematische Modell integriert.

4.4.3.1 Klassifizierung der Fehlerursachen

Die für die Abweichung der Lage des Endeffektors im Weltkoordinatensystem ursächlichen Fehler werden, wie in Abbildung 49 dargestellt, in geometrische Fehler und nicht-geometrische Fehler unterteilt [109].

Geometrische Modellfehler umfassen die fehlerbehaftete Lage des Basiskoordinatensystems, die Elastizität der kinematischen Elemente und die Dimensionierungsfehler, welche fertigungsbedingte Toleranzen und montagebedingte Abweichungen der Achsanordnung, wie z. B. nicht exakt parallele oder orthogonale Achsen, beschreiben. Nullagenfehler bilden die Abweichung der mathematischen Nullage von der physikalischen Nullage der Meßgeber ab. Die geometrischen Fehler beeinträchtigen insbesondere die Positionsgenauigkeit von Robotern und Manipulatoren. Sie sind im allgemeinen

identifizierbar, so daß die Möglichkeit besteht, die Auswirkung dieser Fehler durch eine Kalibrierung zu minimieren.

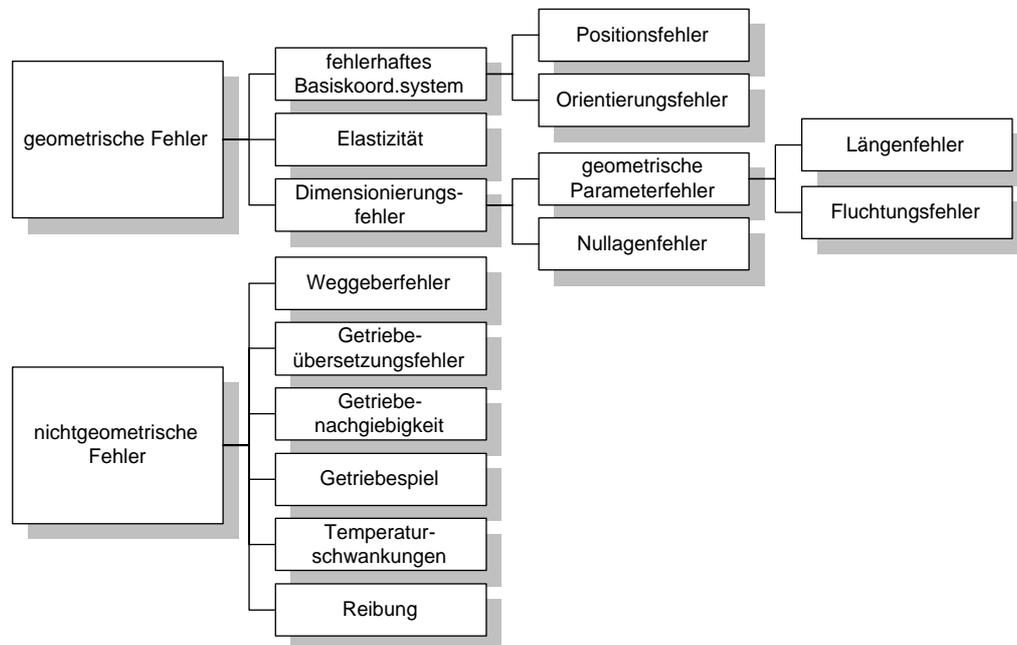


Abbildung 49: Klassifizierung der Fehlerursachen

Die nichtgeometrischen Fehler umfassen einen Großteil der Fehler, die die Wiederholgenauigkeit eines Manipulators einschränken. Während zur Nachgiebigkeit und zum Spiel von Getrieben Untersuchungen vorliegen [110], die eine vereinfachte Modellbildung ermöglichen, sind die nichtgeometrischen Fehler im allgemeinen nicht mit vertretbarem Aufwand deterministisch identifizierbar. Sie entziehen sich somit einer mathematischen Modellierung und Kalibrierung oder sind im Gesamtmodell als additive Abweichungsterme zu behandeln.

Zur Abschätzung des Positionierverhaltens des Großmanipulators und zur Eingrenzung der Fehlerursachen mit der größten Auswirkung auf die Genauigkeitskenngrößen, wird die Matrizendarstellung aus Abschnitt 4.4.3 im folgenden durch die mathematische Formulierung

- der Dimensionierungsfehler,
- der Elastizität,
- der Getriebeachgiebigkeit und
- des Getriebespiels

erweitert.

4.4.3.2 Berücksichtigung der Dimensionierungsfehler

Die Dimensionierungsfehler können unter Beibehaltung des Starrkörpermodells durch die Erweiterung der DH-Matrizen mit Fehlertermen modelliert werden (Gleichung 72). Dabei beschreibt der zusätzliche Parameter Δd_i den durch Fertigungs- oder Montagefehler verursachten Versatz der Gelenkachsen, Δa_i die Längenfehler der Achsen, $\Delta \theta_i$ Null-

lagenfehler und $\Delta\alpha_i$ die Orthogonalitäts- bzw. Parallelitätsfehler zweier aufeinanderfolgender Achsen. Es wird angenommen, daß die Fehler $\Delta\theta_i$, Δd_i , Δa_i und $\Delta\alpha_i$ betragsmäßig klein sind und daß sie nicht von der aktuellen Größe der generalisierten Koordinaten abhängen.

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} c(\theta_i + \Delta\theta_i) & c(\alpha_i + \Delta\alpha_i) \cdot -s(\theta_i + \Delta\theta_i) & s(\alpha_i + \Delta\alpha_i) \cdot s(\alpha_i + \Delta\alpha_i) & (a_i + \Delta a_i) \cdot c(\theta_i + \Delta\theta_i) \\ s(\theta_i + \Delta\theta_i) & c(\alpha_i + \Delta\alpha_i) \cdot c(\theta_i + \Delta\theta_i) & -s(\alpha_i + \Delta\alpha_i) \cdot c(\theta_i + \Delta\theta_i) & (a_i + \Delta a_i) \cdot s(\theta_i + \Delta\theta_i) \\ 0 & s(\alpha_i + \Delta\alpha_i) & c(\alpha_i + \Delta\alpha_i) & d_i + \Delta d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 72})$$

4.4.3.3 Berücksichtigung der Elastizität

Das Vorhandensein von Elastizität in den Robotergliedern widerspricht dem Ansatz des Starrkörpermodells. Kann die Biege- bzw. Torsionssteifigkeit einzelner Glieder nicht länger vernachlässigt werden, verlangt eine vollständige Beschreibung neben den Starrkörperkoordinaten \vec{d}_i die Einführung von örtlichen Auslenkungskoordinaten $\vec{w}_i(\vec{d}_i, t)$ jedes Punktes der Kinematik. Die außerordentlich hohe Systemordnung eines solchen hybriden Systems erschwert die Handhabbarkeit und den Reglerentwurf, verglichen mit dem Starrkörpersystem, erheblich [111], [112]. Wird vereinfachend davon ausgegangen, daß die Elastizitäten näherungsweise auf bestimmte Punkte der Manipulatoremechanik konzentriert sind, so ist eine weniger aufwendige Modellierung möglich, indem die Verlagerung der Achse i am Gelenk i infolge von Biegung und Torsion durch eine Verschiebung Δw und einen Winkelfehler $\Delta\xi$ gegenüber dem Gelenk ($i - 1$) ausgedrückt wird.

Für diese Modellierung werden die kinematischen Glieder als Euler-Bernoulli-Biegebalken angenommen.

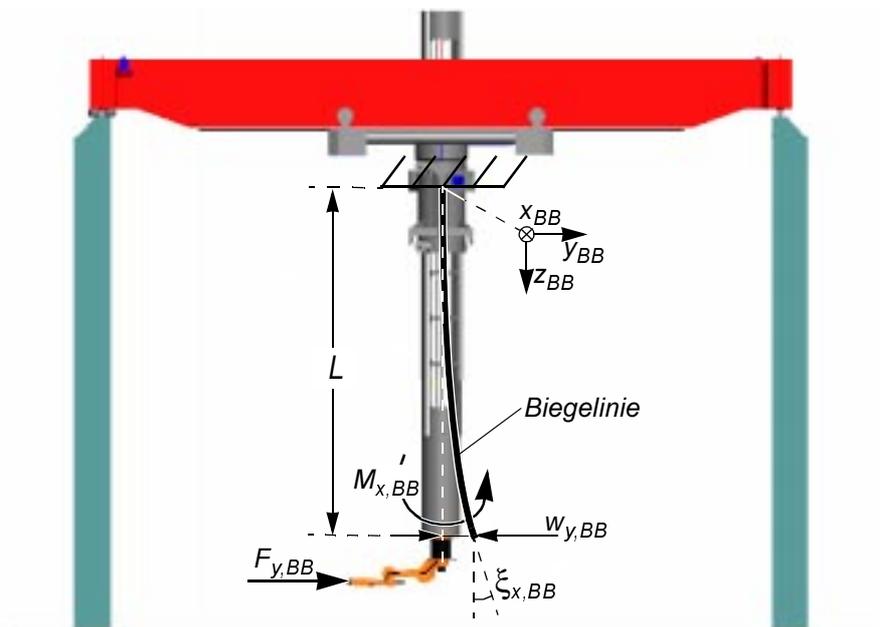


Abbildung 50: Auslenkung und Winkeländerung am Beispiel des Mastes

Es wird ein Biegebalkenkoordinatensystem mit x_{BB} , y_{BB} und z_{BB} eingeführt, dessen Ursprung für ein Glied i zumeist im Gelenk $(i - 1)$ mit der z_{BB} -Achse in Richtung der Biegebalkenlängsachse liegt (Abbildung 50).

Für die Berechnung wird der Balken als an einem Ende fest eingespannt betrachtet. Dabei geht man davon aus, daß Stauchungen und Längungen einen zu vernachlässigenden Beitrag zur Verschiebung des Roboter-Endeffektors liefern.

Die Positions- und Orientierungsabweichung des Endeffektors ergibt sich aus den Kräften und Momenten, die auf die einzelnen Achsen wirken. Sie führen zu einer Verschiebung aller Punkte der Balkenachse, die als Durchbiegung w bezeichnet wird. Unter der Annahme kleiner Durchbiegungen und kleiner Neigungswinkel gegenüber den Längenabmessungen des Balkens ergibt sich die linearisierte Differentialgleichung der Biegelinie:

$$w(L) = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad \text{und} \quad w(L) = \frac{M \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I}. \quad (\text{Gl. 73})$$

Durch Ableitung der Biegelinie erhält man die Neigung der Tangente am Balkenende:

$$\xi(L) = \frac{F \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I} \quad \text{und} \quad \xi(L) = \frac{M \cdot L}{E \cdot I}. \quad (\text{Gl. 74})$$

Um die räumliche Verformung eines Balkens angeben zu können, werden die Biegung in der $x_{BB}z_{BB}$ -Ebene und der $y_{BB}z_{BB}$ -Ebene des Balkenkoordinatensystems berechnet. Die so berechneten Größen gehen als Verformungs- und Neigungsvektor in die Transformationsmatrix in Gleichung 77 ein.

4.4.3.4 Berücksichtigung von Getriebenachgiebigkeit und -spiel

In Handhabungsgeräten kommen vornehmlich unmittelbar am Abtrieb des Antriebselements angeordnete Präzisionsgetriebe zum Einsatz, da sie im Vergleich zu anderen konstruktiven Lösungen, wie Stirn- und Kegelradgetrieben, höchste Steifigkeiten und minimales Getriebeispiel bei hoher Untersetzung und kompakter Bauweise erzielen. Bis auf das Brückenfahrwerk sind alle Achsen des Großmanipulators mit Cyclo- oder Harmonic-Drive-Präzisionsgetrieben ausgestattet.

Ergänzend zu den Präzisionsgetrieben werden im Roboter Zahnriemen eingesetzt. Sie ermöglichen die Verlagerung von Antrieben in untere Achsen des Roboters. Dadurch sinken die vom Handhabungsgerät aufzubringenden Momente. Eine Verringerung der Robotersteifigkeit durch diese zusätzlichen Übertragungselemente wird dabei in Kauf genommen.

Die Nachgiebigkeit von Übertragungs- und Führungselementen kann prinzipiell durch eine Federkennlinie dargestellt werden, die im Bereich des Nulldurchganges durch einen unstetigen Bereich, hervorgerufen durch das Getriebe- und Lagerspiel, erweitert ist. Linearantriebe mittels Zahnstangen werden analog behandelt.

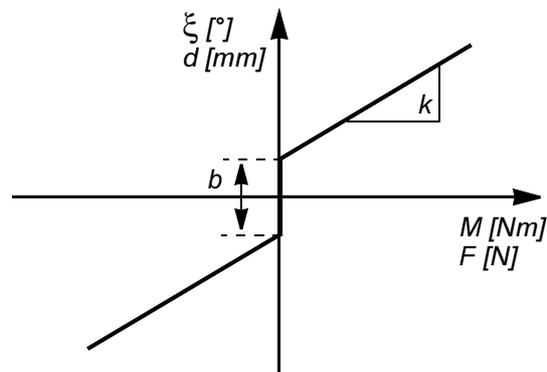


Abbildung 51: Kennlinie der Übertragungs- und Führungselemente

Analog zu einer Federkonstanten kann jedem Antriebsstrang eine Steifigkeit k zugeordnet werden. Das über ein rotatorisches Gelenk $(i - 1)$ auf das Glied i übertragene Moment M bewirkt eine Winkeldifferenz $\Delta\xi$, die über ein lineares Gelenk $(i - 1)$ auf das Glied i übertragene Kraft F bewirkt eine Wegdifferenz Δu im Gelenk $(i - 1)$, so daß sich ergibt:

$$\Delta\xi_i = \frac{M_i}{k_{rot,i-1}} + \text{sgn}(M_i) \cdot b_{rot,i-1} \quad \text{bzw.} \quad \Delta u_i = \frac{F_i}{k_{lin,i-1}} + \text{sgn}(F_i) \cdot b_{lin,i-1}. \quad (\text{Gl. 75})$$

Die Verlagerung des Gelenkes i eines Gliedes i infolge von Nachgiebigkeit und Spiel der Übertragungs- und Führungselemente ergibt sich für kleine Winkel $\Delta\xi_i$ zu:

$$\Delta w_i = \Delta\xi_i \cdot L_i \quad \text{bzw.} \quad \Delta w_i = \Delta u_i. \quad (\text{Gl. 76})$$

4.4.3.5 Ermittlung des resultierenden Fehlers

Die Abweichung des Endeffektors ergibt sich im Modell durch die Summe der Abweichungen infolge von Nachgiebigkeit und Spiel der Übertragungs- und Führungselemente und der Elastizität der kinematischen Glieder. Diese Größen werden in jeweils zwei Vektoren zusammengefaßt, die die Verschiebungen und die Neigungswinkel an den Achsen enthalten. Anschließend werden die Verschiebungen für jede Achse in eine homogenisierte Verformungsmatrix eingebracht. Für diese ergibt sich in Anlehnung an [113] die in Gleichung 77 angegebene Form:

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & -\xi_{z,i} & \xi_{y,i} & w_{x,i} \\ \xi_{z,i} & 1 & -\xi_{x,i} & w_{y,i} \\ -\xi_{y,i} & \xi_{x,i} & 1 & w_{z,i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 77})$$

Dabei sind $\xi_{x,i}$, $\xi_{y,i}$, $\xi_{z,i}$ die Winkel kleiner Drehungen und $w_{x,i}$, $w_{y,i}$, $w_{z,i}$ Verschiebungen entlang der entsprechenden Achsen.

Die allgemeine Bestimmung dieser Matrixelemente wird wie folgt entwickelt:

$$w_{x_{BB},i} = k_{x_{BB},i} \left[\frac{1}{3} F_{x_{BB},i} \cdot L_i^3 + \frac{1}{2} M_{y_{BB},i} \cdot L_i^2 \right] + \frac{\Delta w_{x_{BB},i}}{2} \quad (Gl. 78)$$

$$w_{y_{BB},i} = k_{y_{BB},i} \left[\frac{1}{3} F_{y_{BB},i} \cdot L_i^3 - \frac{1}{2} M_{x_{BB},i} \cdot L_i^2 \right] + \frac{\Delta w_{y_{BB},i}}{2} \quad (Gl. 79)$$

$$w_{z_{BB},i} = \frac{\Delta w_{z_{BB},i}}{2} \quad (Gl. 80)$$

$$\xi_{x_{BB},i} = k_{y_{BB},i} \left[-\frac{1}{2} F_{y_{BB},i} \cdot L_i^2 + \frac{1}{2} M_{x_{BB},i} \cdot L_i \right] + \frac{\Delta \xi_{x_{BB},i}}{2} \quad (Gl. 81)$$

$$\xi_{y_{BB},i} = k_{x_{BB},i} \left[\frac{1}{2} F_{x_{BB},i} \cdot L_i^2 + \frac{1}{2} M_{y_{BB},i} \cdot L_i \right] + \frac{\Delta \xi_{y_{BB},i}}{2} \quad (Gl. 82)$$

$$\xi_{z_{BB},i} = k_{z_{BB},i} \cdot M_{z_{BB},i} \cdot L_i + \frac{\Delta \xi_{z_{BB},i}}{2}. \quad (Gl. 83)$$

F und M bezeichnen Kräfte und Momente am freigeschnittenen Gelenk i eines Gliedes i , so daß diese allgemeine Beschreibung die Behandlung der Lage- und Winkeländerung des Gelenkes aufgrund statischer und dynamischer Belastung erlaubt. Die Matrixelemente sind in der Verformungsmatrix (Gleichung 77) in Gliedkoordinaten anzugeben. Die im Biegebalkenkoordinatensystem angegebenen Verformungsterme w_{BB} und ξ_{BB} müssen daher durch Rotation mit der Orientierung des Gliedkoordinatensystems im Gelenk i zur Deckung gebracht werden und in dieser Orientierung in A_i' eingesetzt werden. A_i' beschreibt dann die Transformation des Koordinatensystems i in ein verformtes Koordinatensystem i' . Die aufgrund der Verformung resultierende, neue Lage des Endeffektors ergibt sich durch die wechselweise Vorwärtstransformation der DH-Matrizen mit den Verformungsmatrizen:

$${}^0T_9 = A_0 \cdot A_1 \cdot A_1' \dots A_9 \cdot A_9'. \quad (Gl. 84)$$

Die Gleichungen 78 bis 83 gelten für einseitig eingespannte Biegebalken und können für die Manipulatorachsen 3 bis 9 (IR-Achsen) verwendet werden. Analog dazu werden die Glieder des Trägersystems behandelt, die durch dieses allgemeine Biegebalkenmodell nicht hinreichend beschrieben sind und deren Matrixelemente daher im Rahmen der Parameteridentifikation mit Hilfe einer FEM-Betrachtung hergeleitet werden.

4.4.4 Identifikation der kinematischen Parameter mittels FEM-Analyse

Die Verwendung der erweiterten DH-Matrix und der homogenen Verformungsmatrix nach Gleichung 72 und 77 erfordert die Identifikation der Korrekturparameter $\Delta\theta_i$, Δd_i , Δa_i und $\Delta\alpha_i$ sowie der Koeffizienten der Matrixelemente k_i , $\Delta\xi_i$ und Δw_i . Abhängig vom Freiheitsgrad der Lagerung und der geometrischen Gestalt des jeweiligen kinematischen Gliedes entfallen einige der Koeffizienten. Irrelevante sowie zu Null identifizierte Koeffizienten sind im folgenden nicht aufgeführt.

Aus den Theodolitenmessungen (Abschnitt 4.4.2) können die Orthogonalitätsfehler der Achsen des Trägersystems, wie in Tabelle 10 angegeben, abgeleitet werden.

Tabelle 10: Korrekturwerte für Orthogonalitätsfehler

Korrekturparameter	$\Delta\alpha_1$ (x_3 - y_3 -Ebene)	$\Delta\alpha_2$ (y_3 - z_3 -Ebene)	$\Delta\alpha_3$ (x_3 - z_3 -Ebene)
Betrag	-0,0019	-0,0029	0,0002

Die Identifikation weiterer Parameter erfolgt mit Hilfe von FEM-Betrachtungen unter Verwendung statischer Lastannahmen, die mit Lasten während der Theodolitenmessung übereinstimmen, so daß die Koeffizienten der im folgenden in Ergänzung zu Abschnitt 4.4.3.3 aufgestellten Matrixelemente der Verformungsmatrix sowie der erweiterten DH-Matrix für jedes Glied des Trägersystems durch den Abgleich von FEM-Simulation und Theodolitenmessungen an mehreren Stellen des Arbeitsraumes bestimmt und optimiert werden können.

4.4.4.1 Stützen und Schienen

Das erste Glied der Kinematik beschreibt die Stützen und Schienen, auf denen die Brücke des Trägersystems läuft (Abbildung 52). Stützen und Schienenträger sind aus Stahlblechen zu Hohlprofilen verschweißt und miteinander biegesteif verbunden. Auf dem Schienenträger befindet sich eine massive Schienenauflage.

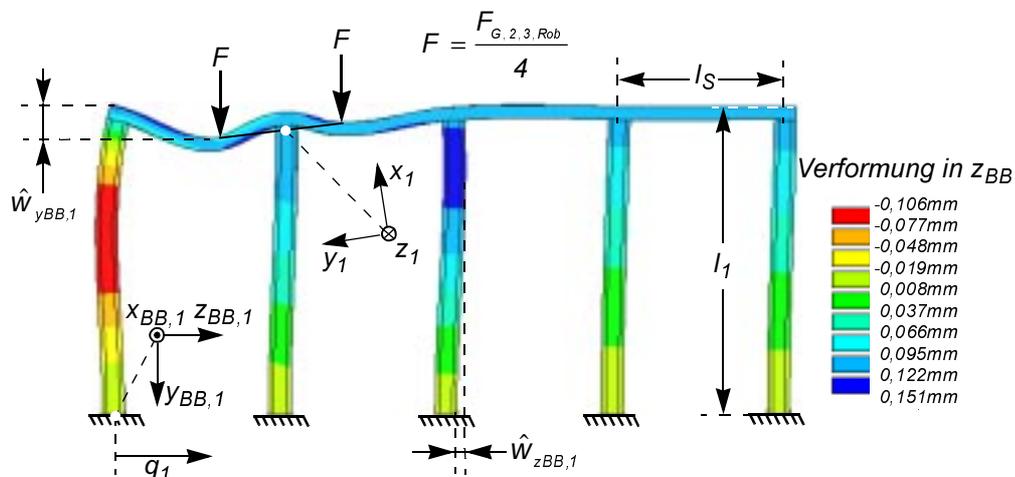


Abbildung 52: FEM-Analyse des Gliedes 1 (Stützen und Schienen)

Die Belastung des ersten Gliedes setzt sich zusammen aus

- der Gewichtskraft der Schienen und Schienenauflage ($F_{G,1} = 12\text{kN}$) und
- der Summe der Gewichtskräfte der Komponenten Brücke ($F_{G,2} = 190\text{kN}$), Unterkatze und Mast ($F_{G,3} = 26\text{kN}$) und Roboter ($F_{G,Rob} = 2\text{kN}$).

Dynamische Lasten aus der Bewegung des Großmanipulators tragen aufgrund der geringen Beschleunigungen der Großkomponenten und der vergleichsweise geringen Masse des Industrieroboters zur Belastung der Schienen und Stützen verglichen mit den Gewichtskräften nur geringfügig bei. Die Lastannahme für die FEM-Betrachtung basiert

daher analog zu den Belastungen während der Theodolitenmessungen ausschließlich auf statischen Größen.

Abbildung 52 zeigt die maximale Verformung des ersten Gliedes in der Simulation mit $\hat{w}_{z_{BB,1}} = 0,15\text{mm}$ und $\hat{w}_{y_{BB,1}} = 0,5\text{mm}$ infolge der über die Räder der Brücke eingeleiteten Kraft F . Es wird resultierend aus einer Belastung in y_{BB} -Richtung sowohl eine Verformung in y_{BB} - als auch in z_{BB} -Richtung gefunden. Die Verformung in z_{BB} -Richtung wird darauf zurückgeführt, daß die Summe der resultierend aus der Verformung des Schienenträgers in die Stützen eingeleiteten Momente in Abhängigkeit vom Parameter q_2 (Brückenstellung) Werte von $M=-4,9\dots 4,9\text{kNm}$ annimmt und so zu einer Verformung der über die Schienen starr gekoppelten Stützen führt. Die Verschiebung der Schienenoberkante nach $z_{BB,1}$ unterliegt einer mit den Parametern q_2 und dem Abstand der Stützen l_s schwelenden Oszillation, deren Amplitude Werte von $-\hat{w}_{z_{BB,1}}$ bis $\hat{w}_{z_{BB,1}}$ annimmt und deren Funktionswert bei symmetrisch über den Stützen angeordneter Brücke 0mm ist. Das Gesamtsystem Stützen und Schienen wird durch die folgenden Matrixelemente beschrieben:

$$w_{x_{BB,1}} = k_{x_{BB},stütz} \cdot (F_{x_{BB,1}} \cdot l_1^3) \tag{Gl. 85}$$

$$w_{y_{BB,1}} = \hat{w}_{y_{BB,1}} \cdot \left(1 + \frac{F_{y_{BB,1}}}{F_{G,2,3,Rob}}\right) \cdot \frac{1}{4} \left[\left(\cos\left(\frac{(q_1 - l_f/2) \cdot 2\pi}{l_s}\right) - 1 \right) + \left(\cos\left(\frac{(q_1 + l_f/2) \cdot 2\pi}{l_s}\right) - 1 \right) \right] \tag{Gl. 86}$$

$$w_{z_{BB,1}} = k_{z_{BB},stütz} (F_{z_{BB,1}} \cdot l_1^3) + \hat{w}_{z_{BB,1}} \cdot \left(1 + \frac{F_{y_{BB,1}}}{F_{G,2,3,Rob}}\right) \cdot \left(1 - \frac{q_2}{2 \cdot l_s}\right) \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot q_2}{l_s}\right) \tag{Gl. 87}$$

$$\xi_{x_{BB,1}} = \frac{w_{y_{BB,1}(q_1-l_f/2)} - w_{y_{BB,1}(q_1+l_f/2)}}{l_f} \tag{Gl. 88}$$

Die Koeffizienten der Matrixelemente sind in Tabelle 11 angegeben. Spielterme entfallen aufgrund der Festlagerung von Glied 1 im Fundament.

Tabelle 11: Koeffizienten der Matrixelemente für Glied 1 (Stützen und Schienen)

Koeffizient	$k_{x_{BB},stütz} [1/Nmm^2]$	$k_{z_{BB},stütz} [1/Nmm^2]$	$\hat{w}_{y_{BB,1}} [mm]$	$\hat{w}_{z_{BB,1}} [mm]$
Betrag	$4,6 \cdot 10^{-17}$	$1,3 \cdot 10^{-16}$	0,5	0,15

4.4.4.2 Brücke

Bei der Brücke handelt es sich um eine Schweißkonstruktion aus Blechen unterschiedlicher Wandstärke, die zwei rechteckige, geschlossene Hohlprofile als Brückenträger bilden. Die Schienen für die Unterkatze sind auf die nach außen kragenden Bleche der Profilunterseite aufgelegt. Die Brückenträger sind stirnseitig durch Kastenprofile abgeschlossen, an die je zwei Fahrwerksblöcke in FEMO-Technik montiert sind (Abbildung 53).

$$\xi_{xBB,2} = \frac{W_{yBB,2(q_2-l_k)} - W_{yBB,2(q_2+l_k)}}{I_{fk}} + \frac{\Delta\xi_{xBB,2}}{2} \quad (\text{Gl. 92})$$

$$\xi_{yBB,2} = \frac{\Delta\xi_{yBB,2}}{2} \quad (\text{Gl. 93})$$

$$\xi_{zBB,2} = k_{yBB,2} \left[\frac{M_{zBB,2}}{I_b^2} \cdot I_2^3 \cdot \frac{q_2}{I_2} \cdot \left(1 - 2 \cdot \left(\frac{q_2}{I_2} \right)^2 + \left(\frac{q_2}{I_2} \right)^3 \right) \right] + \frac{\Delta\xi_{zBB,2}}{2}. \quad (\text{Gl. 94})$$

Tabelle 12: Koeffizienten der Matrixelemente für Glied 2 (Brücke)

Koeffizient	$k_{xBB,2}$ [1/Nmm ²]	$k_{yBB,2}$ [1/Nmm ²]	$\Delta u_{xBB,2}$ [mm]	Δw_{Drift} [mm/m]	$\Delta u_{zBB,2}$ [mm]	$\Delta\xi_{yBB,2}$
Betrag	$5,8 \cdot 10^{-15}$	$1,4 \cdot 10^{-17}$	0,2	0,01	0,1	$1,6 \cdot 10^{-3}$

4.4.4.3 Mast

Der Mast ist mit dem Roboter verschraubt, so daß er als verlängerte Roboterbasis zu betrachten ist. Im Sinne der Transformationsvorschrift wirkt sich die Verformung des Mastes sowie das Spiel in der Hubachse der Unterkatze auf die Verschiebung und Verdrehung des ersten Gelenkes des Roboters (Gelenk 4) aus und ist daher in jener Verformungsmatrix zu berücksichtigen.

Der Mast besteht aus drei miteinander verschraubten Segmenten und ist in der Laufkatze über zwei gegenüber liegende, prismatische Schienen in je vier paarweise angeordneten Rollenlagern gelagert. Der Antrieb der Hubbewegung erfolgt mittels zweier Servomotoren, die über Cyclogetriebe auf geradverzahnte Stirnrad-Zahnstangenpaarungen wirken.

Die Belastung des Mastes setzt sich zusammen aus

- der Gewichtskraft des Mastes ($F_{G,red,3} = 26kN$),
- der Gewichtskraft des Roboters ($F_{G,Rob} = 2kN$),
- etwaigen Zusatzlasten ($F_{xBB,3}, F_{yBB,3}, F_{zBB,3}, M_{xBB,3}, M_{yBB,3}, M_{zBB,3}$),
- der Auftriebskraft des Roboters im UW-Einsatz und
- dynamischen Lasten aus der Bewegung des Roboters.

Als Maximallast wird die resultierende Auftriebskraft der Roboterhülle im UW-Einsatz von $F_A = 2kN$ angenommen (siehe Abschnitt 4.5), die mit einem wirksamen Maximalabstand von der Mastmittelachse $l_A = 700mm$ ein Biegemoment von $M_{xBB,3|yBB,3} = 1400Nm$ in den Mastfuß einleitet.

Die Abbildung 54 stellt den Mast in der FEM-Analyse dar.

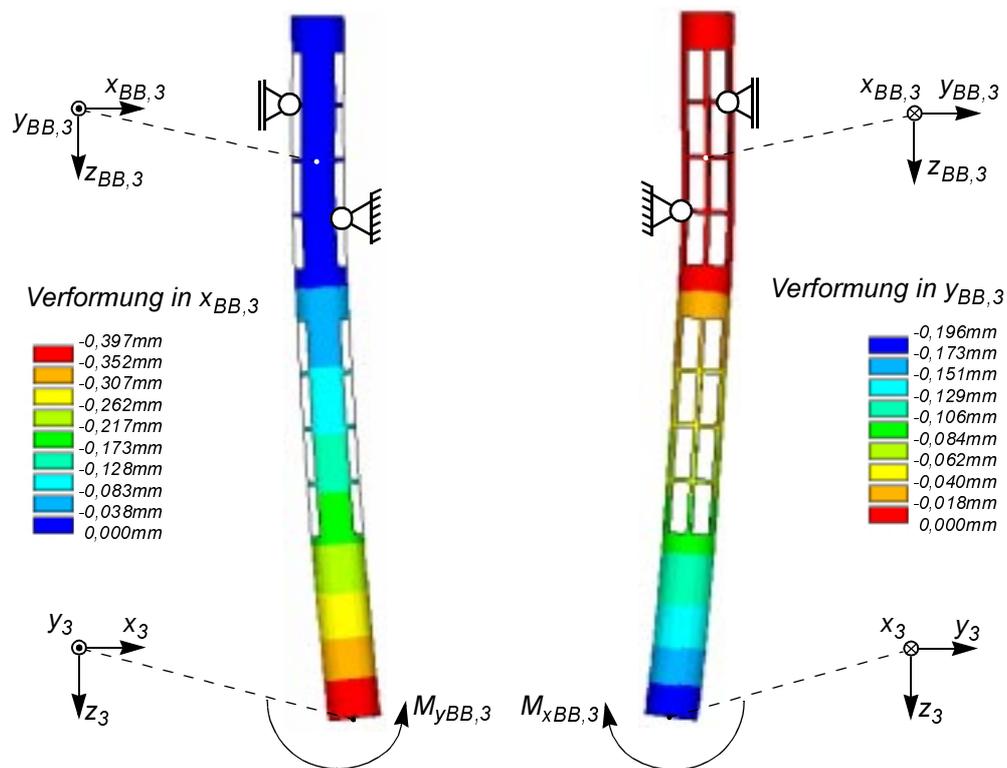


Abbildung 54: FEM-Analyse des Gliedes 3 (Mast und Hubwerk) bei Nennlast

Mit der vereinfachenden Annahme einer festen Einspannung des Mastes im Gelenk 2 lassen sich für den Mast folgende Matrixelemente angeben:

$$w_{x_{BB,3}} = k_{x_{BB,3}} \left[\frac{1}{3} F_{x_{BB,3}} \cdot q_3^3 - \frac{1}{2} M_{y_{BB,3}} \cdot q_3^2 \right] + \frac{\Delta w_{x_{BB,3}}}{2} \quad (\text{Gl. 95})$$

$$\text{mit } \Delta w_{x_{BB,3}} = \Delta u_{x_{BB,3}} + \Delta \xi_{y_{BB,3}} \cdot q_3$$

$$w_{y_{BB,3}} = k_{y_{BB,3}} \left[\frac{1}{3} F_{y_{BB,3}} \cdot q_3^3 + \frac{1}{2} M_{x_{BB,3}} \cdot q_3^2 \right] + \frac{\Delta w_{y_{BB,3}}}{2} \quad (\text{Gl. 96})$$

$$\text{mit } \Delta w_{y_{BB,3}} = \Delta u_{y_{BB,3}} - \Delta \xi_{x_{BB,3}} \cdot q_3$$

$$w_{z_{BB,3}} = \frac{\Delta u_{z_{BB,3}}}{2} \quad (\text{Gl. 97})$$

$$\xi_{x_{BB,3}} = k_{y_{BB,3}} \left[\frac{1}{2} F_{y_{BB,3}} \cdot q_3^2 + M_{x_{BB,3}} \cdot q_3 \right] + \frac{\Delta \xi_{x_{BB,3}}}{2} \quad (\text{Gl. 98})$$

$$\xi_{y_{BB,3}} = k_{x_{BB,3}} \left[-\frac{1}{2} F_{x_{BB,3}} \cdot q_3^2 + M_{y_{BB,3}} \cdot q_3 \right] + \frac{\Delta \xi_{y_{BB,3}}}{2} \quad (\text{Gl. 99})$$

$$\xi_{z_{BB,3}} = k_{z_{BB,3}} \cdot M_{z_{BB,3}} \cdot q_3 + \frac{\Delta \xi_{z_{BB,3}}}{2}. \quad (\text{Gl. 100})$$

Aus Theodolitenmessungen und FEM-Analysen werden die Koeffizienten wie folgt identifiziert:

Tabelle 13: Koeffizienten der Matricelemente für Glied 3

Koeffizient	$k_{xBB,3}$ [1/Nmm ²]	$k_{yBB,3}$ [1/Nmm ²]	$k_{zBB,3}$ [1/Nmm ²]	$\Delta u_{xBB,3}$ [mm]	$\Delta u_{yBB,3}$ [mm]	$\Delta u_{zBB,3}$ [mm]
Betrag	$5,8 \cdot 10^{-15}$	$7,0 \cdot 10^{-15}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	0,1	1,8	0,1

4.4.4.4 Resultierende theoretische Genauigkeit

Die theoretischen Beträge der Genauigkeitskenngößen Positionsgenauigkeit und Positionsstreubreite lassen sich nach der Teilung in geometrische Fehler und nichtgeometrische Fehler (Abbildung 49) aus den Koeffizienten der erweiterten DH-Matrix und der homogenen Verformungsmatrix abschätzen.

Die Positionsgenauigkeit ist vorrangig durch die geometrischen Fehler bestimmt. Die maximalen Beiträge der berücksichtigten geometrischen Fehler addieren sich in Tabelle 14 zu einer Positionsgenauigkeit von $\bar{d}_{theo} = 13,9mm$.

Tabelle 14: Beitrag geometrischer Fehler zur theoretischen Positionsgenauigkeit des Trägersystems bezogen auf das Mastfußpunktkoordinatensystem K_3

Richtung	geometrischer Fehler	Beitrag zu \bar{d}_{theo}
x_3	Orthogonalitätsfehler α_1	$\pm 4,42mm$
	Orthogonalitätsfehler α_3	$\pm 1,83mm$
	Verkipfung der Brücke aus Durchsenkung der Schienen	$\pm 0,46mm$
	Verformung der Stützen	$\pm 0,15mm$
	Verformung des Mastes bei Nennlast	$\pm 0,40mm$
	Summe x_3	$\pm 7,26mm$
y_3	Orthogonalitätsfehler α_2	$\pm 10,15mm$
	Verformung der Brücke	$\pm 1,49mm$
	Verformung des Mastes bei Nennlast	$\pm 0,24mm$
	Summe y_3	$\pm 11,88mm$
z_3	Durchsenkung der Schienen	$0,38mm$
	Durchsenkung der Brücke	$0,17mm$
	Summe z_3	$0,55mm$
	Vektorielle Addition	$13,9mm$

Die Übereinstimmung der Summenterme der theoretischen Positionsgenauigkeit der einzelnen Achsen mit den gemessenen Werten (Tabelle 6) zeigt, daß die vereinfachten

mechanischen und mathematischen Modelle, das reale System mit einer Toleranz von <15% hinreichend abbilden.

Die theoretische summierte Positionsstreuung addiert sich aus den nichtgeometrischen Fehlern ohne Berücksichtigung der Drift der Brückenachse, wie in Tabelle 15 angegeben zu $P_{sum,theo} = 7,9mm$.

Tabelle 15: Beitrag nichtgeometrischer Fehler zur theoretischen summierten Positionsstreuung des Trägersystems bezogen auf das Mastfußpunktkoordinatensystem K_3

Richtung	nichtgeometrischer Fehler	Beitrag zu $P_{sum,theo}$
x_3	Drift der Brücke Δw_{Drift}	0,01mm/m
	Spiel der Übertragungs- und Führungselemente, Brücke	$\pm 0,1mm$
	Verdrehung der Brücke $\Delta \xi_{zBB,2}$	$\pm 3,7mm$
	Spiel der Übertragungs- und Führungselemente, Katze	$\pm 0,05mm$
	Summe x_3	$\pm 3,85mm + 0,01mm/m$
y_3	Spiel der Übertragungs- und Führungselemente, Katze $\Delta w_{yBB,3}$	$\pm 0,9mm$
	Summe y_3	$\pm 0,9mm$
z_3	Spiel der Übertragungs- und Führungselemente, Katze	$\pm 0,05mm$
	Summe z_3	$\pm 0,05mm$
	Vektorielle Addition	7,9mm + 0,01mm/m

Die theoretisch ermittelten Beträge der summierten Positionsstreuung weichen von den gemessenen (Tabelle 6) erheblich ab, was damit zu erklären ist, daß während der zeitlich begrenzten Theodolitenmessung nicht alle nichtgeometrischen Fehler auftreten. Insbesondere der Term $\Delta \xi_{zBB,2}$ (Verdrehung der Brücke) tritt durch Drift oder abrupte Bremsungen (Not Aus) nur bei Langzeitmessungen bzw. in Ausnahmesituationen auf, hat jedoch auf die theoretischen Werte bestimmenden Einfluß.

4.4.4.5 Folgerung

Mit der Anwendung der korrigierten DH-Matrix und der homogenen Verformungsmatrix ließe sich im Rahmen einer mathematischen Kalibrierung die Genauigkeit des Systems durch die Berücksichtigung der deterministisch bestimmbaren Dimensionierungsfehler und Elastizitäten (Verformung der Stützen, Durchsenkung der Schienen und der Brücke, Verformung des Mastes) deutlich steigern. Unterstellt man eine vollständige Korrektur, verbesserte sich die Positionsgenauigkeit des Gesamtsystems um $\Delta d_{max} = 13,9mm$.

Allein die berücksichtigten nicht deterministisch bestimmbaren und damit mathematisch nicht korrigierbaren Fehleranteile in Form des Spiels in den Antriebs- und Übertragungselementen sind jedoch so groß, daß eine für die Anforderungen ausreichende Genauigkeitssteigerung mit Hilfe der mathematischen Kalibrierung nicht erzielt werden kann. Das

Spiel in den Antriebs- und Übertragungselementen der Katze $\Delta w_{yBB,3}$ führt als singulärer Effekt bereits zu Abweichungen, die der zulässigen maximalen Positionsabweichung entsprechen. Der kraftschlüssige Antrieb der Brücke mit in die Motoren integrierten Weggebern und die daraus resultierende Verdrehung $\Delta \xi_{zBB,2}$ und Abdrift Δw_{Drift} der 1. Achse verhindert zudem das Erzielen einer akzeptablen Positionsstreubreite. Mit der Umstellung auf eine formschlüssige Übertragung des Fahrweges auf die Weggeber der Achse 1 könnte durch eine Vermeidung von Drift und Verdrehung eine Verbesserung der Positionsstreubreite auf $P_S = 1,8mm$ erreicht werden.

Da aufgrund einer Vielzahl vereinfachender Annahmen bei der Aufstellung der mechanischen und mathematischen Modelle nicht davon ausgegangen werden kann, daß eine mathematische Kalibrierung des Systems zu einer vollständigen Beseitigung der geometrischen Fehler führt und da die Beseitigung der nichtgeometrischen Fehler mit einem technisch und wirtschaftlich unvermeidbaren Aufwand verbunden wäre, ist es erforderlich, die Genauigkeit des Großmanipulators durch andere Regelungskonzepte, wie der Rückführung von Positionswerten in die Steuerung, die durch ein entkoppeltes räumliches Meßsystem zu ermitteln sind, nachzuregulieren.

4.5 Qualifikation des Großmanipulators für den Unterwassereinsatz

In Reparatur und Rückbau kerntechnischer Anlagen kommen im Unterwasserbereich speziell entwickelte Manipulatoren zum Einsatz, deren Preis aufgrund der aufwendigen Konstruktion und der geringen Stückzahlen den eines bezüglich Arbeitsraum und Traglast vergleichbaren, jedoch nicht unterwassertauglichen Industrieroboters um ein Vielfaches übersteigt. Soll der Einsatz dieser Manipulatoren, wie häufig gefordert, mit Hilfe von Simulationssystemen geplant und offline programmiert werden [114], so muß auch hier auf kostenintensive, möglicherweise unausgereifte und mit ungenügendem Support ausgestattete Kleinserienprodukte zurückgegriffen werden. Gelingt es, für diese Anwendungen einen Standardindustrieroboter in Verbindung mit dem zugehörigen industriellen Simulations- und offline-Programmiersystem zu verwenden, so können erhebliche Kosteneinsparungen bei der Beschaffung und im Betrieb der Anlage erzielt werden, die durch Effekte, wie Verfügbarkeit der Anlage, Verfügbarkeit von Ersatzgeräten oder -teilen, schneller Kundendienst usw. noch unterstützt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit ist daher in Zusammenarbeit mit der Fa. ASP eine Schutzhülle für den am Mastfuß applizierten Industrieroboter KR15 entwickelt und in den Anlagen des UWTH bis zu einer Wassertiefe von 4m erprobt worden.

Die Schutzhülle ist zweigeteilt. Sie besteht aus einer Sockelhülle, die den Mastfuß des MTS und die erste Achse des IR umschließt und der Armhülle, die den Roboter von der ersten Achse bis zum Flansch der sechsten Achse einhüllt. Dieser ist durch eine wasserdichte Drehdurchführung nach außen verlängert. Die Sockelhülle und die Armhülle bil-

den voneinander luftdicht getrennte Volumina, die abhängig von der Eintauchtiefe des jeweils tiefsten Punktes mit Innendruck beaufschlagt werden.

Tabelle 16: maximale Achswinkel des eingehüllten Roboters

Achse	max. Achswinkel, positiv	max. Achswinkel, negativ
4	90°	-90°
5	90°	-20°
6	30°	-120°
7	90°	-90°
8	110°	-110°
9	360°	-360°

Die Schutzhülle ist zweilagig. Die innere Lage besteht aus strapazierfähigem PVC-



Abbildung 55: wasserdicht eingehüllter Roboter

Gewebe mit einer Materialstärke von $0,4\text{mm}$, auf dem die äußere wasserdichte Lage, bestehend aus faserverstärktem PE mit einer Materialstärke von $1,5\text{mm}$, gleitet.

Um das Volumen der Schutzhülle zu begrenzen, das den Roboter unter Wasser infolge Auftriebskraft statisch und infolge Strömungswiderstand dynamisch belastet, ist diese als Maßarbeit ausgehend von der Homeposition des Roboters mit Zugaben für definierte, zulässige Winkel der einzelnen Achsen versehen. Die maximalen Achswinkel sind Tabelle 16 zu entnehmen. Die Abbildung 55 zeigt den eingehüllten Roboter KR 15.

4.6 Steuerungsarchitektur/ Steuerungsentwurf

Moderne Produktionssysteme lassen sich nach ihrer Flexibilität in die Klassen starre, flexible oder programmierbare Automation unterteilen (siehe Abbildung 56). Ein starres Automatisierungskonzept ist geeignet, wenn hohes Produktionsvolumen mit niedriger Teilevielfalt zusammentrifft. Die programmierbare Automation ist sinnvoll, wenn das Produktionsvolumen relativ gering, die Teilevielfalt aber sehr groß ist. Ordnet man die Robotertechnik diesen Automatisierungsklassen zu, so ist sie, charakterisiert durch ihr programmierbares, hochflexibles Bewegungsverhalten eng mit der programmierbaren Automation verbunden.

Typische industrielle Anwendungen für Portalroboteranlagen finden sich im Schwermaschinenbau und im Schiffbau [3], [4]. Hier findet man typischerweise geringe Stückzahlen bei gleichzeitig hoher Varianz vor. Diese Anwendungen lassen sich der programmierbaren Automation zuordnen. Weitere Anwendungen, z. B. Fernhantierungsaufgaben in extremer Umgebung, wie sie sich durch die Handhabung sensibler Stoffe, die Revision, die Reparatur und den Rückbau chemischer oder kerntechnischer Anlagen darstellen [1], [2], definieren mit ihrem teilweise extrem ungünstigen Verhältnis unterschiedlicher Teile zur Losgröße die maximale Anforderung an die Flexibilität des Handhabungssystems.

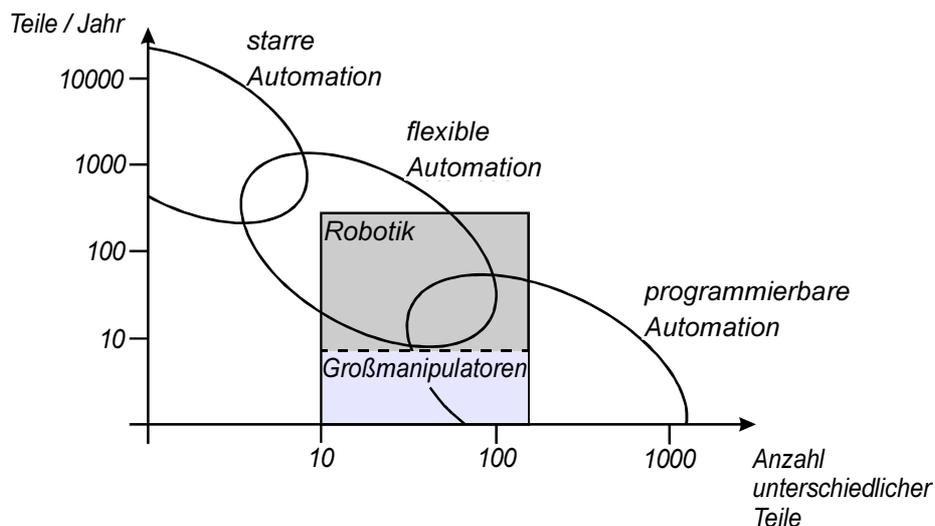


Abbildung 56: Einordnung der Robotik in die Automationsklassen

Mit steigender Flexibilisierung der Automation bzw. der Anwendung steigt der Anspruch an die Steuerung, so daß die Leistungsfähigkeit des Handhabungsgerätes in zunehmendem Maße von der Leistungsfähigkeit der Robotersteuerungen bestimmt wird. Im folgenden Abschnitt 4.6.1 wird auf Entwicklung und den aktuellen Stand der Steuerungstechnik für Industrieroboter eingegangen. Dies bildet die Grundlage für die Auswahl eines Steuerungssystems aus der verfügbaren Steuerungstechnik für Industrieroboter im Abschnitt 4.6.2, in das das Manipulatorträgersystem eingegliedert werden kann und das darüber hinaus über eine offene Architektur die Möglichkeit eröffnet, externe Sensorsysteme

hardware- und softwaremäßig zu implementieren. Die Beschreibung der realisierten MTS-Steuerung erfolgt im Abschnitt 4.6.3.

4.6.1 Steuerungskonzepte für Industrieroboter

Die Entwicklung von Robotersteuerungen ist sehr eng mit der Entwicklung der NC-Technik zur Steuerung von Werkzeugmaschinen und der Entwicklung von Fernhantierungstechniken zur Manipulation schwierig handhabbarer Abfallstoffe verknüpft [115].

Die Fortschritte der Halbleitertechnik führten in den 70er Jahren zur Weiterentwicklung der NC-Technik. Insbesondere die DNC-Technik gab den Anstoß, auch für die Klein- und Mittelserienfertigung mit Rechnerhilfe den Materialfluß zwischen Fertigungseinrichtungen zu steuern, um damit die Prozeßautomatisierung über das Konzept der flexiblen Fertigungszellen voranzutreiben. Die Bewegungsteuerung eines IR war in dieser Phase durch eine zeitgetaktete, originalgetreue Wiederholung einprogrammierter Aktions- und Bewegungsabläufe gekennzeichnet (fest programmierte bzw. verdrahtete Fertigungsabläufe). Die Kommunikation mit der technologischen Umwelt erfolgte in der Regel über binäre Synchronisations-, Melde- und Stellsignale. Als Steuerungen wurden speziell zugeschnittene Hardwarelösungen verwendet. Die Steuerungssoftware wurde in Assembler geschrieben und direkt auf der Hardware implementiert. Jede funktionale Erweiterung oder der Austausch einzelner Hardwarekomponenten war gleichzeitig mit einem kostenintensiven Verdrahtungsaufwand und Programmänderungen verbunden. Diese Dominanz der Hardware und die vornehmlich prozessorgebundene Softwarestruktur verbunden mit wenigen, nicht standardisierten Schnittstellen erschwerte es dem Anwender, spezifische Lösungen zu integrieren.

Der Leitbegriff der 80er und 90er Jahre ist die CIM-Technologie. Von diesem Zeitpunkt an stand nicht mehr der (lokale) Roboter oder die Werkzeugmaschine im Vordergrund (Fertigungsinseln), sondern es wurde die Gesamtlösung für eine produktionstechnische Problemstellung unter Einbeziehung des gesamten Informationsflusses gesucht [105].

Zur Modellierung fertigungstechnischer Systeme haben sich hierarchisch funktional strukturierte Konzepte durchgesetzt, wobei neben funktionalen auch aufgabenorientierte sowie informations-, material- und aktivierungsflußtechnische Modelle zur Beschreibung der relevanten Größen verwendet werden.

Im Bereich der Robotersteuerungen findet sich der hierarchisch funktionale Ansatz im NASREM Standardreferenzmodell für Robotersystemarchitekturen wieder, das als Grundlage für zahlreiche hierarchisch gegliederte Robotersystemstrukturen sowie Robotersteuerungs- und Sensorkonzepte dient [116]. Die Abbildung 57 zeigt exemplarisch ein Referenzmodell, das durch drei Planungs- bzw. Ausführungsebenen unterschiedlichen Abstraktionsniveaus repräsentiert wird, wobei die einzelnen Ebenen nicht notwendigerweise in der eigentlichen Robotersteuerung liegen müssen (Abbildung 57).

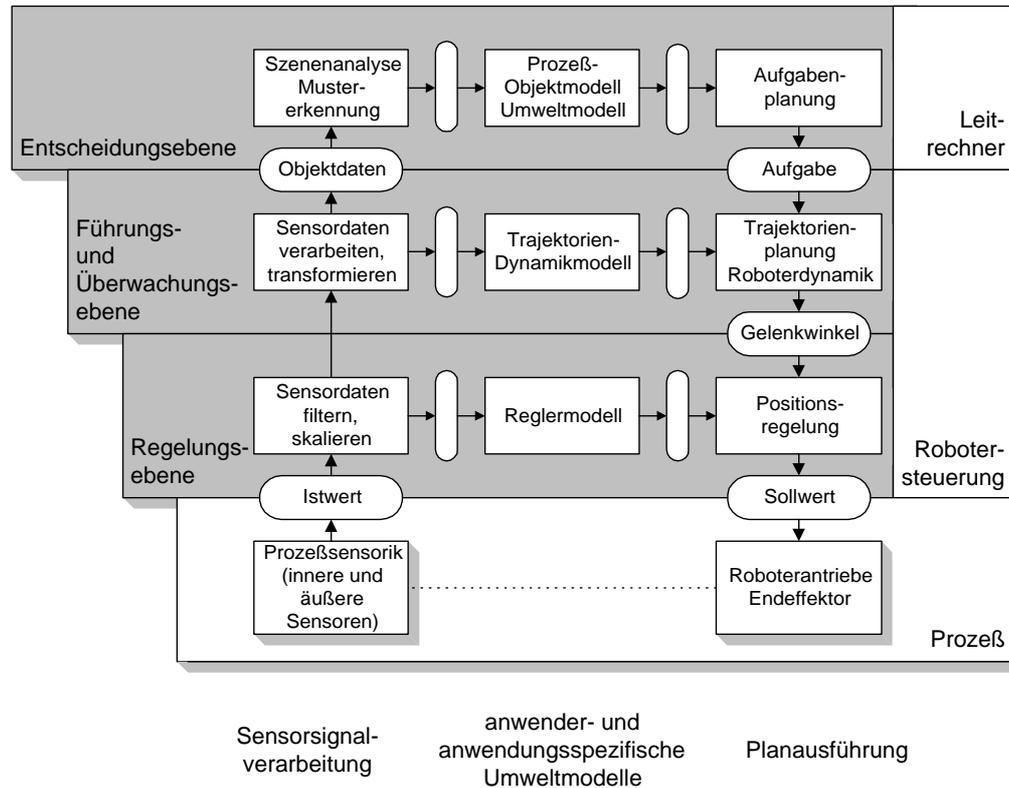


Abbildung 57: Hierarchisches Referenzmodell für eine Robotersteuerung, nach [116]

Industrielle Robotersteuerungen können als die unteren zwei Ebenen aufgefaßt werden. Die Hauptfunktionskomponenten sind im allgemeinen Planausführung, Umweltmodellierung und Sensorsignalverarbeitung.

Die unterste Hierarchieebene, die Regelungsebene, übernimmt die Aufgabe, die Position und Geschwindigkeiten der einzelnen IR-Achsen, die mittels interner Sensoren (z. B. Winkelkodierer, Tachogeneratoren, Resolver) gemessen werden, im Konfigurationsraum zu regeln. Die Auswahl des geeigneten Reglerkonzeptes hängt dabei im starkem Maße

- von der Kinematik, der Dynamik und dem elastischen Verhalten von Struktur- und Antriebskomponenten des verwendeten IR,
- von der verfügbaren Stell-, Sensor- und Rechnerhardware und
- vom Charakter der zu lösenden Handhabungsaufgabe

ab. Die Grundprinzipien der wichtigsten Regelkonzepte werden ausführlich in [117] diskutiert.

Heutige Robotersteuerungen arbeiten auf der Regelungsebene mit einer Interpolations-taktrate von ca. 10ms , um alle Aktionen und Reaktionen unter Echtzeitbedingungen ausführen zu können. Deshalb wird diese Ebene auch als schneller Regelkreis bezeichnet. Die hierzu notwendigen Sollwerte werden für jede Roboterachse als Endwerte bei einfachen, nicht synchronisierten Punkt-zu-Punkt-Bewegungen oder als Zeitfunktion bei synchronisierter Punkt-zu-Punkt-Bewegung oder allgemeiner Bahnsteuerung von der

nächsthöheren, der Führungs- und Überwachungsebene, in Form von Gelenkwinkeln vorgegeben. In dieser Ebene erfolgt die Berechnung der Bahntrajektorie im Umweltraum unter Berücksichtigung externer Sensorinformationen (z. B. optische Sensoren, Kraftmeßdosen, Lichtbogenmessungen) und deren Transformation von kartesischen Koordinaten in Gelenkwinkel.

In der obersten Ebene, der Entscheidungsebene, finden globale Operationen statt. In dieser vollzieht sich die Aufgabenplanung. Auf der Grundlage eines interaktiven Bildschirmdialoges werden unter der Zuhilfenahme von CAD- oder anderen Planungsdaten sowie eines komplexen Prozeß- und Objektmodells Aktionspläne generiert und Arbeitsprogramme erstellt.

Neue Maschinenkonzepte, Entwicklungen im Bereich der Antriebstechnik und Sensorik sowie neue Fertigungsprozesse erfordern ständige Erweiterungen und Anpassungen der Funktionalität der eingesetzten Steuerungssysteme. Gleichzeitig erfordern neue Organisationsformen des gesamten Fertigungsprozesses flexible, nachträglich anpaßbare Steuerungen, die sich einfach in ein Produktionsumfeld integrieren lassen. Dies führte Ende der 80er Jahre seitens der Industrie zur Forderung nach einer modularen, offenen Steuerungsstruktur unter Nutzung von (Quasi-)Standards. „Modular“ bedeutet in diesem Zusammenhang, daß ein System aus Funktionsbaugruppen oder Modulen besteht, die über definierte Systemarchitektur aufeinander abgestimmt sind (klare Strukturierung) und sich entsprechend der Aufgabe parametrisieren und zusammenfügen lassen. Der Begriff „offen“ beschreibt neben dem offenen Zugang zum System selbst über definierte Schnittstellen (offene Kommunikationsstrukturen) auch die Möglichkeit zur Veränderung und Erweiterung bestehender Funktionalitäten in der Steuerung. Eine Voraussetzung für die Konfigurierbarkeit ist die Definition von Schnittstellen in sämtlichen hierarchischen Teilebenen zur informationstechnischen Verknüpfung dieser Baugruppen sowohl in vertikal hierarchischer Richtung als auch innerhalb der jeweiligen Ebene. Diese Forderungen wurden in dem 1992 gestarteten Esprit-Projekt OSACA aufgegriffen [118]. In diesem Projekt wurden erste Grundlagen für herstellerübergreifende, offene Steuerungsarchitekturen und durchgängige Kommunikationskonzepte definiert.

Infolge der Weiterentwicklung der Hardware und durch den wachsenden Massenmarkt im PC-Bereich und dem damit verbundenen Preisverfall wird der Standard im Bereich der Steuerungstechnik derzeit von der PC-Technologie geprägt: von zusätzlichen Bedienstationen für Speziallösungen bis hin zu offenen und konfigurierbaren PC-basierten Systemen mit Standardbetriebssystem (z. B. WINDOWS oder DOS) und Echtzeiterweiterungen z. B. VxWorks [119].

Mit dem Einsatz der PC-Technologie zur Steuerung von Anlagen, Maschinen und IR eröffnen sich für den Anwender die folgenden Vorteile:

- Entkopplung der Steuerungssoftware von der eingesetzten Hardware,
- Netzwerkfähigkeit (z. B. Ethernet, Busanschlüssen) mit vereinfachter Systemintegration durch am Markt verfügbare Einsteckkarten und Treiber,
- Nutzung von Quasistandards in Soft- und Hardware (Betriebssystem, interne Buskommunikation). Daher ist es auch möglich, verfügbare und gebräuchliche Entwicklungswerkzeuge einzusetzen,
- Nutzung der Entwicklung in der PC-Technik: Performancesteigerung durch neue Prozessorgenerationen, interne Bussysteme (z. B. PCI), Einsatz marktgängiger Speichermedien (Festplatte, CD-ROM, Floppy etc.) und Bedienelemente (MF2-Tastatur, Maus etc.), weiterentwickelte Betriebssysteme,
- grafisch orientierte Bedienoberfläche z. B. auf Basis von WINDOWS (95, NT),
- geringere Kosten gegenüber Sonderentwicklungen.

Auf den Grundlagen von OSACA setzen die Aktivitäten des BMBF-Projektes HÜMNOS [118] auf. Ziel ist die Entwicklung einer Strategie für die Umsetzung der Standards und die Demonstration der Funktionsfähigkeit im Produktionsumfeld.

Allgemein zeichnen sich offene Steuerungsstrukturen durch eine Aufteilung in Steuerungsfunktionen und ein Kommunikationssystem aus. Ziele offener Steuerungsstrukturen sind einfache Integration weiterer Funktionalitäten, die Verbindung verschiedener Automationskomponenten und die Wiederverwendbarkeit von Hardware- und Softwarekomponenten [120].

Auf dem Markt befindliche offene Steuerungsstrukturen weisen diese Eigenschaften nur zum Teil auf. Beispielsweise lassen sich Automationskomponenten verschiedener Hersteller nur bedingt, in der Regel jedoch nicht miteinander kombinieren. In vielen Fällen wird durch den Einsatz von PCs als Bedienrechner Offenheit suggeriert. Eine genauere Prüfung zeigt jedoch, daß Steuerungsstrukturen, die Kommunikationsmechanismen und die vorgegebenen Schnittstellen nur unpräzise standardisiert sind. Im folgenden wird vor dem Hintergrund dieser Situation die verfügbare Steuerungstechnik für Industrieroboter betrachtet.

4.6.2 Marktgängige Systemarchitekturen

Die verschiedenen Systemarchitekturen heutiger Steuerungen für Industrieroboter können den folgenden Kategorien zugeordnet werden:

- Herstellerspezifische Hardware und Betriebssystemsoftware,
- PC-Hardware und herstellereigene Betriebssystemsoftware,
- PC-Hardware und Betriebssystem WINDOWS 95 (oder DOS) mit der Echtzeiterweiterung VxWorks als Lösung mit zwei Motherboards,
- PC-Hardware und Betriebssystem WINDOWS 95 mit der Echtzeiterweiterung VxWorks als Einprozessorsystemlösung.

Bei den Steuerungsarchitekturen mit herstellerspezifischer Hardware und Betriebssystemsoftware besteht oftmals die Möglichkeit, einen zusätzlichen PC unter WINDOWS 95 oder NT mit der Robotersteuerung zu verbinden. Auf diesem PC sind grafikunterstützte Anwendungspakete z. B. eine Bedienoberfläche zum Palettieren installiert, da das Programmierhandgerät dieser Robotersteuerungen nicht über die dazu notwendigen Grafikeigenschaften verfügt. Busanschlaltungen oder sonstige Anschaltungen zur Kommunikation mit unter- oder überlagerten Steuerungsinstanzen erfordern spezielle, für die entsprechende Plattform entwickelte Einsteckkarten.

Ähnliches gilt für die Systeme mit PC-Hardware und firmenspezifischer Betriebssystemsoftware. Auch hier ist die Grafikeigenschaft der zugehörigen Programmierhandgeräte durch die diesbezüglich wenig ausgebauten Betriebssysteme häufig stark eingeschränkt. Allerdings läuft hier auf der PC-Hardware noch zusätzlich das Betriebssystem WINDOWS NT. Daher sind die Hardwareanforderungen entsprechend hoch. WINDOWS NT wird weder direkt zur Steuerung noch zur Bedienung genutzt sondern auch hier als Plattform für zusätzliche Softwarebausteine, z. B. eine einfache Simulation, visualisiert über einen zusätzlichen Monitor und zur Integration von Peripherie eingesetzt.

Dem Einsatz von WINDOWS als alleinigem Betriebssystem als Basis für Steuerung und Bedienung steht die Forderung nach Echtzeitfähigkeit und Offenheit entgegen. WINDOWS NT gestattet zwar Echtzeitfähigkeit in gewissen Grenzen, allerdings bestehen hier derzeit noch Defizite bei der Integrationsfähigkeit zusätzlicher Hard- und Softwarebausteine. Diese ist zwar bei WINDOWS 95 gegeben, hier kann dagegen die Echtzeitfähigkeit nicht sichergestellt werden. Dieses Problem wird dadurch gelöst, daß neben WINDOWS echtzeitfähige Betriebssysteme wie etwa VRTX oder VxWorks eingesetzt werden.

Hierzu läuft bei der Systemarchitektur mit PC-Hardware mit zwei Motherboards jedes der beiden Betriebssysteme WINDOWS 95 oder DOS und VxWorks auf einem eigenen Motherboard, die über ISA/PCI miteinander kommunizieren. Dabei wird VxWorks als Basis zur Abwicklung aller echtzeitrelevanten Aufgaben (Bahnplanung etc.) und WINDOWS 95 oder DOS als Basis für die Bedienung eingesetzt [121]. Einziger Vertreter am Markt der Steuerungstechnik für Industrieroboter mit PC-Hardware und Betriebssystem WINDOWS 95 mit der Echtzeiterweiterung VxWorks als Einprozessorklösung ist derzeit die Robotersteuerung KR C1 der KUKA Roboter GmbH.

Die Aussicht darauf, daß sich durch diese Systemarchitektur die Anbindung zusätzlicher Hardware in Form der Zusatzachsen des Trägersystems sowie externer Sensorik über Standard-PC-Schnittstellen realisieren läßt, die Verfügbarkeit eines offline-Simulationssystems mit der Möglichkeit der Modellierung der Zusatzachsen sowie die Möglichkeit der Einbindung des Systems in das bestehende Windows-Netzwerk führten zur Auswahl dieser Robotersteuerung als Basissystem für die Steuerung des MTS.

4.6.3 Beschreibung der MTS-Steuerung

Abbildung 58 zeigt das Systemkonzept der verwendeten Robotersteuerung.

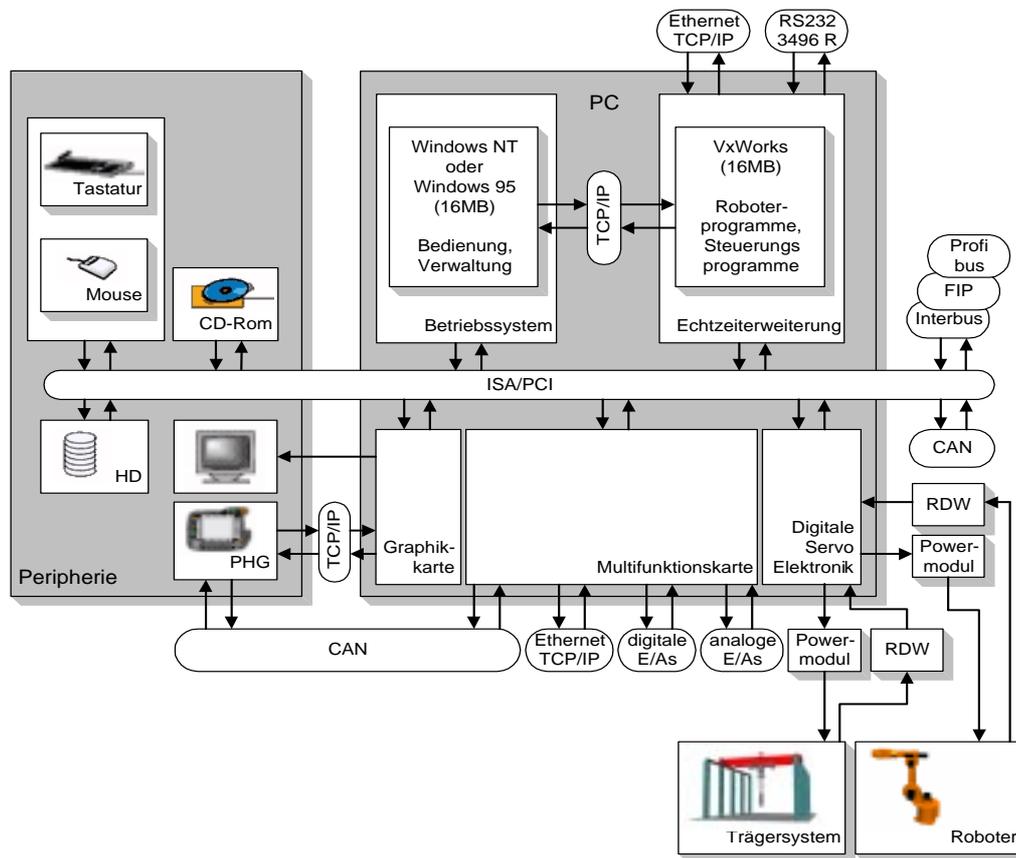


Abbildung 58: Systemkonzept der Manipulatorsteuerung

Hardwarekern der Steuerung ist ein PC-Motherboard mit Pentium Prozessor P166 und 32MB RAM. Auf diesem Prozessor laufen die Betriebssysteme WINDOWS 95 und VxWorks, die sich den Arbeitsspeicher im Shared-Memory-Betrieb teilen.

Bedienung, Anzeige und Datenverwaltung sind unter WINDOWS 95 implementiert, unter VxWorks erfolgen alle echtzeitrelevanten Aufgaben, wie Bahnplanung, Kommandoverarbeitung und Verarbeitung der Informationen peripherer Anschaltungen. Die beiden Systeme kommunizieren zum Austausch von Daten z. B. Variablenwerte, Kommandos, Up/Download von Roboterprogrammen, per TCP/IP-Protokoll miteinander.

Zur Regelung der Antriebe über die Digitale Servo Elektronik (DSE AT) sowie zur Busan- kopplung und der Ankopplung digitaler Ein-/Ausgänge wird auf das PC-Motherboard die Multifunktionskarte (MFC) aufgesteckt. Damit wird aus dem PC eine Maschinensteuerung. Auf dieser MFC befindet sich auch der passive LP-Real Time Accelerator Chip als Logikbaustein. Seine Aufgabe besteht in der Koordination der beiden Betriebssysteme WINDOWS 95 und VxWorks, indem er aus Interrupts des ISA/PCI Busses eine nicht sperrbare Unterbrechung generiert und damit gleichzeitig VxWorks aktiviert. Da WINDOWS 95 diese Art der Unterbrechung nicht sperren kann, ist die Echtzeitfähigkeit auf Basis von VxWorks sowie die höhere Priorität von VxWorks gewährleistet. Damit ist

sichergestellt, daß die eigentlichen Steuerungsaufgaben als Task unter VxWorks stets Vorrang haben und unabhängig von WINDOWS 95 bearbeitet werden. Durch die klare Trennung der Aufgaben der beiden Betriebssysteme ist die Bedienoberfläche eine von der eigentlichen Steuerungssoftware vollständig abgegrenzte Applikation mit Schnittstelle zum Datenaustausch, dem sog. CROSS. Damit ist die Basis für anwender- und anwendungsspezifische Anpassungen gegeben.

Zur Datenhandhabung stehen die aus dem PC-Bereich bekannten Medien wie 3,5" Diskettenlaufwerk, CD-ROM und Festplatte zur Verfügung. Zur Bedienung und Programmierung stehen entweder das Programmierhandgerät mit 8" Farbdisplay, Verfahrstasten, 6D-Maus oder eine PC-typische MF2-Tastatur und Maus in Verbindung mit einem Monitor zur Verfügung. Da die Rückmeldung der Tastenbetätigungen an die Steuerung echtzeitfähig sein muß, um z. B. den Nachlauf des Roboters bei Loslassen der Bedienelemente zum Verfahren zu verhindern, erfolgt sie nicht über ISA/PCI sondern mittels CAN-Bus direkt an die Multifunktionskarte.

Auf der Regelungsebene steuert ein integrierter Achsverstärker (Power Modul) die sechs Achsen des Basisroboters. Der schnelle Regelkreis besteht aus dem Achsverstärker, einem Drehstromservomotor pro Roboterachse und der Rückführung der Achswinkel. Diese werden durch in die Antriebsmotoren integrierte Resolver detektiert, in einer Wandlerschaltung, der RDW-Box, in unmittelbarer Nähe der Antriebsmotoren in digitale Signale umgesetzt und an die Multifunktionskarte zurückgeführt. Für die Integration der drei Zusatzachsen wurden an das MTS entsprechende Drehstromservomotoren mit Resolvern montiert. Die Brückenachse und der Hubmast verfügen über je zwei Antriebsmotoren, die mittels elektronischer Welle gekoppelt sind. Die Unterkatze wird von einem weiteren Motor angetrieben. Zur Ansteuerung erfolgte die Erweiterung der Steuerung durch ein zusätzliches Power Modul sowie eine zusätzliche RDW-Box.

4.6.4 Integration externer Sensorik

In vielen Anwendungen in der Robotik ist es sinnvoll, die Aktionen des Roboters durch Integration externer Sensorik mit dem vom Roboter geführten Prozeß abzugleichen, so daß die ausgeführten Operationen nicht nur durch ein starres Arbeitsprogramm bestimmt sind, sondern durch das Zusammenwirken von Sensorinformation und Roboterprogramm an die Situation im Arbeitsraum angepaßt werden können. Die Komplexität der Sensorinformation sowie die Eingriffstellen in die Robotersteuerung, wie sie in Abbildung 59 dargestellt sind, sind die Parameter, die die erzielbare Geschwindigkeit sowie die möglichen Auswirkungen der Einkopplung bestimmen.

Sensordaten können im einfachsten Fall binär vorliegen und im Sinne einer Ablaufsteuerung über Programmverzweigungen oder Modifikation der Bewegungsparameter direkt in das Arbeitsprogramm eingreifen. Komplexere Sensorsignale werden zunächst vorverarbeitet (Verstärkung, Verschiebung, Linearisierung, Verzögerung, Mittelwertbil-

dung, Fourieranalyse u. a.) und können dann theoretisch auf unterschiedlichen Hierarchiestufen in die Steuerung eingebracht werden.

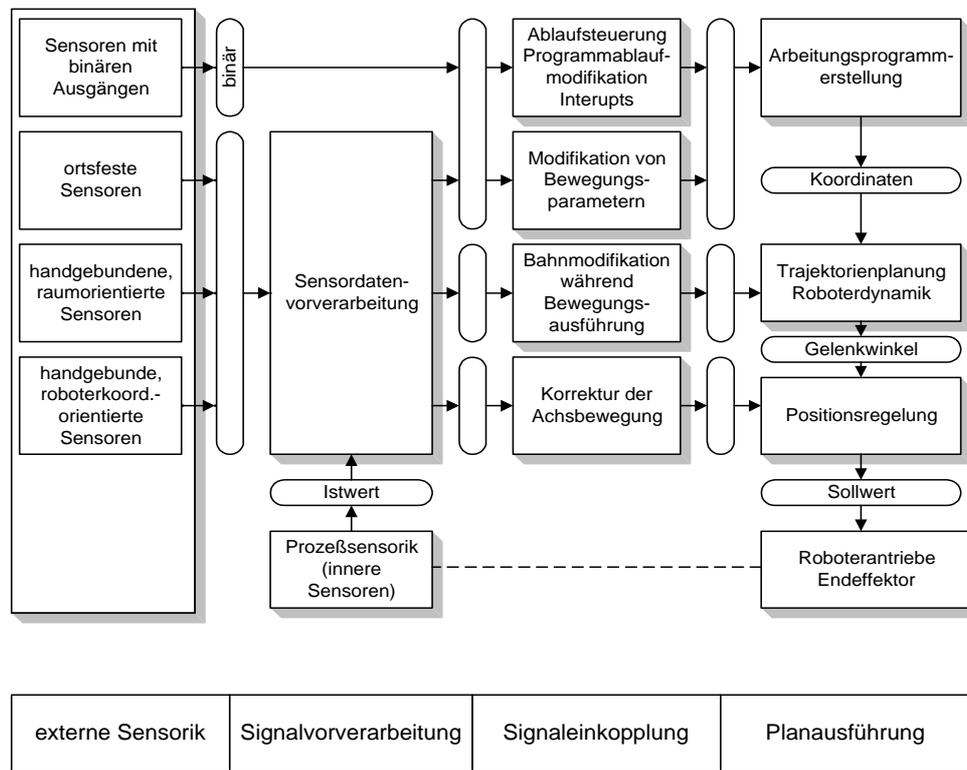


Abbildung 59: Integration externer Sensorik in die Robotersteuerung

Grundsätzlich wird zwischen offline- und online-Sensordatenverarbeitung unterschieden. Offline bezeichnet dabei die Übergabe von Korrekturdaten vor dem Trajektorienplaner. Hierbei werden vor dem Starten der Bewegung programmierte Parameter, z. B. Roboterbasiskoordinaten, Koordinaten des Tool-Center-Points, Endeffektorkoordinaten, Orientierungen oder Geschwindigkeiten durch vom Sensor übergebene Werte ersetzt und dem Trajektorienplaner zur Berechnung der Solltrajektorie zur Verfügung gestellt. Die Zeitanforderung für die Auffrischung der Bahnvorgaben ist durch die Unabhängigkeit zwischen der Datenaufnahme und der Bewegungsausführung unkritisch [121].

Die online-Sensordatenverarbeitung dient der dynamischen Beeinflussung der Bewegungsbahn. Die Prozeßzustände werden während der Bewegung erfaßt. Diese Informationen müssen verzögerungsfrei auf den Prozeß zurückgeführt werden. Die meist in kartesischen Koordinaten oder in Tool-Center-Point-Koordinaten vorliegenden Daten werden unmittelbar hinter der Trajektorienplanung direkt vor der Transformation von Weltkoordinaten in Achskoordinaten als Korrekturwerte zur Positionierungsregelung aufgeschaltet. Bei der Verarbeitung der online-Sensordaten sind bestimmte Zeitbedingungen einzuhalten. Im Interpolationstakt werden der Positionierungsregelung die gültigen Achswerte der nächsten Stützpunkte zur Verfügung gestellt. Für die Berechnung von Korrekturwerten ist deshalb sicherzustellen, dass die gesamte Korrekturwertberechnung weniger als $10ms$ (entsprechend dem derzeitigen Interpolationstakt) dauert, um die korrigierten

Achswerte für den folgenden Interpolationstakt rechtzeitig abzulegen. Die Abfrage der Korrekturwerte muß also in einem festen Zeittakt erfolgen.

4.6.4.1 Hardwarezugang zur MTS-Steuerung

Die Möglichkeiten des Hardwarezugangs sind der Abbildung 58 zu entnehmen.

Auf der Multifunktionskarte ist zur Kommunikation mit der Peripherie standardmäßig ein CAN-Bus Modul integriert, das das Protokoll DeviceNet unterstützt. Die Ankopplung von weiteren Bussystemen (Interbus-S, Profibus Master oder Slave, FIP etc.) erfolgt über zusätzliche Einsteckkarten. Damit wird der Anforderung Rechnung getragen, die unterschiedlichen, am Markt verfügbaren Bussysteme zu unterstützen [122]. Durch den internen ISA/PCI Bus können alle auf diesem Standard basierenden Einsteckkarten integriert werden.

Zur Kommunikation über Ethernet (Protokoll TCP/IP) bestehen die Anschlußmöglichkeiten an der Multifunktionskarte mit direktem Zugang zum Echtzeitbetriebssystem VxWorks und am Motherboard mit Zugang zum Datenaustausch zwischen WINDOWS 95 und VxWorks.

Ebenfalls unterstützt wird die PC-typische serielle RS 232 Schnittstelle, die allerdings aufgrund der geforderten Echtzeit unter einem speziellen Protokoll (3964 R) betrieben wird.

Zur direkten Ansteuerung von Peripheriebaugruppen steht eine E/A-Baugruppe mit 16 binären Eingängen, 20 binären Ausgängen mit 24V Pegel sowie 4 analogen Eingängen zur Verfügung.

4.6.4.2 Softwarezugang

Die Steuerung KR C1 stellt, angepaßt an das spezielle Layout des Programmierhandgerätes, Basisfunktionalitäten in Form von Programmmodulen zur Verfügung, die unter Verwendung der im PC-Bereich gängigen Entwicklungswerkzeuge Visual Basic und C++ zu Anpassungen und Erweiterungen eingesetzt werden können.

Veränderungen an der eigentlichen Steuerungssoftware zur Bahnplanung auf Basis von mathematischen Modellen sind dem Anwender nicht offengelegt, da dazu roboterspezifische Kenntnisse notwendig sind sowie sicherheitstechnische Abfragen und interne Kontrollalgorithmen mitberücksichtigt werden müssen. Zudem würde der Roboterhersteller seine Kernkompetenz offenlegen. Daher ist der eigentliche Steuerungskern bis auf einen definierten Zugang über das sog. OCX verschlossen. Zur Integration von Sensorinformationen wurde in Form eines nachladbaren Tasks (C-Programm unter Nutzung vorhandener Bibliotheksroutinen) eine Möglichkeit geschaffen, Roboterbewegungen und Robotersystemparameter veränderten Umgebungsbedingungen im Interpolationstakt anzupassen. Über diesen Zugang zum Steuerungskern soll die Möglichkeit bestehen, alternative Bewegungsführungen und dynamische Lageregleroptimierungen durchzuführen. Auf das OCX kann man hardwaremäßig über das Ethernet oder die serielle Schnitt-

stelle zugreifen. Das OCX wäre der optimale Zugang zur online-Integration externer Sensorinformationen in den Trajektorienplaner. Leider ist eine lauffähige Version seitens des Herstellers lediglich in Aussicht gestellt aber nicht verfügbar.

Zur offline-Integration externer Sensordaten vor dem Trajektorienplaner können aus der Anwenderoberfläche mittels Befehlen im Ablaufprogramm die oben genannten Schnittstellen RS 232, CAN-Bus und die digitale und analoge E/A-Baugruppe angesteuert werden.

4.6.5 Ausblick auf Nutzung der Photogrammetriedaten zur Lageregelung des MTS

Ziel der Sensoreinkopplung ist die Verbesserung der Genauigkeitskenngrößen des Großmanipulators auf der Basis photogrammetrisch ermittelter Positionsdaten. Diese Daten stehen auf dem Auswerterechner (PC) des Photogrammetriesystems zur Verfügung. Da das Tool zur online-Einkopplung derzeit noch nicht verfügbar ist, wird eine offline-Einkopplung vorgenommen, die darauf basiert, den Großmanipulator in räumlicher Nähe des Werkstückes und an etwaigen Haltepunkten während des Prozesses durch die Rückführung photogrammetrisch ermittelter Positionsdaten zu kalibrieren. Somit ist die dynamische Konturregelung nicht möglich, die aufgrund der Genauigkeit des Industrieroboters für kurze Wege, definierte Startpositionen vorausgesetzt, verzichtbar erscheint, womit aber die Anforderung an die Sensoreinkopplung hinsichtlich der Geschwindigkeit der Datenakquisition und der Datenübertragung wesentlich vermindert wird.

Da der Steuerungsrechner ebenfalls ein PC ist und die Anforderungen an die Übertragungsrate gering sind, liegt es nahe, die Kommunikation beider Rechner über die PC-typische RS 232 Schnittstelle abzuwickeln.

Die realisierte Implementation ist Abschnitt 6.1 zu entnehmen.

5 Anwendung des digitalen Photogrammetriesystems

5.1 Genauigkeitskenngrößen des Photogrammetriesystems

Zur Bewertung der Meßgenauigkeit des Photogrammetriesystems werden Genauigkeitskenngrößen eingeführt, die zwecks Vergleichbarkeit analog zu den Genauigkeitskenngrößen für Roboter und Manipulatoren aus dem Abschnitt 4.4.1 definiert werden.

Es wird zwischen der Positionsgenauigkeit \bar{d}_{Phot} und der Positionsstreuung $P_{S,phot}$ unterschieden. Zur Ermittlung der Kenngrößen werden im Bezugskoordinatensystem Meßorte M_{Oj} ($j = 1 \dots k$) festgelegt. Jeder Meßort M_{Oj} wird n mal mit $n \geq 5$ gemessen. Es entstehen $n \cdot k$ Meßpunkte MP_{ij} ($i = 1 \dots n$ und $j = 1 \dots k$) also i -ter Meßwert am j -ten Meßort M_{Oj} . Der Tabelle 17 sind die Definitionen der Genauigkeitskenngrößen zu entnehmen.

Tabelle 17: Vereinbarung der Genauigkeitskenngrößen der Photogrammetrie

Größe	Formel
Positionsgenauigkeit: Abweichung des Mittelwertes der Einzelmeßwerte am Meßort M_{Oj}	$\bar{d}_{Phot,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{Phot,ij}$
Standardabweichung am Meßort M_{Oj}	$s_{Phot,j} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_{Phot,ij} - \bar{d}_{Phot,j})^2}$
Positionsstreuung am Meßort M_{Oj}	$P_{S,Phot,j} = 6s_j$
maximale Positionsabweichung am Meßort M_{Oj}	$d_{max,Phot,j} = \bar{d}_{Phot,j} + 3s_{Phot,j}$

Das übergeordnete Bezugskoordinatensystem ist durch Vergleichsmessung mit Theodoliten gegeben, die selbst fehlerbehaftet sind. Das Theodolitensystem läßt durch die Ausgabe von Zielfehlern bei der Kollimation und bei der Messung jedoch eine Abschätzung der Meßfehler zu, die in vergleichbaren Aufbauten stets eine Größenordnung geringer sind, als die mit der Photogrammetrie erreichten, so daß das übergeordnete Bezugskoordinatensystem als hinreichend genau betrachtet werden kann (vgl. Abschnitt 4.4.2).

5.2 Anwendung des Photogrammetriesystems an Atmosphäre

5.2.1 Mobiler Nahbereichsmeßaufbau

Zur Erprobung der Eignung des Photogrammetriesystems zur Verbesserung der Genauigkeitskenngrößen des MTS kommt ein mobiler Meßaufbau bestehend aus Videokameras und Leuchten auf Stativen und dem mobilen Paßpunktfeld zum Einsatz.

5.2.1.1 Beschreibung des mobilen Nahbereichsmeßaufbaus

Die Konfiguration des mobilen Photogrammetriesystems besteht aus zwei Kameras Pulnix TM-9701, die mit Objektiven der Brennweite $f = 6,5\text{mm}$ ausgestattet sind. Aus der Brennweite des Objektivs und den Abmaßen des Sensors ergibt sich der horizontale Bildwinkel nach

$$\theta = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{B_{\max}}{f} \right)$$

mit

θ = Bildwinkel

B_{\max} = horizontale, vertikale oder diagonale Sensorabmessung

f = Brennweite

(Gl. 101)

zu $\theta_{\text{hor}} = 107^\circ$, der vertikale Bildwinkel beträgt $\theta_{\text{ver}} = 91^\circ$. Das System wird gemäß Abbildung 60 mobil auf Stativen aufgebaut. Die Ermittlung der inneren und äußeren Orientierungen der Kameras, die gemäß Abschnitt 2.2.4 Voraussetzung für den räumlichen Vorwärtsschnitt ist, wird aus Beobachtungen des mobilen Paßpunktfeldes im Rückwärtsschnitt durchgeführt.

Die Abbildung 60 zeigt den mobilen Meßaufbau mit dem mobilen Paßpunktfeld im Hintergrund. Im Anschluß an die Kalibrierung kann das Paßpunktfeld entfernt werden.



Abbildung 60: mobiler Meßaufbau

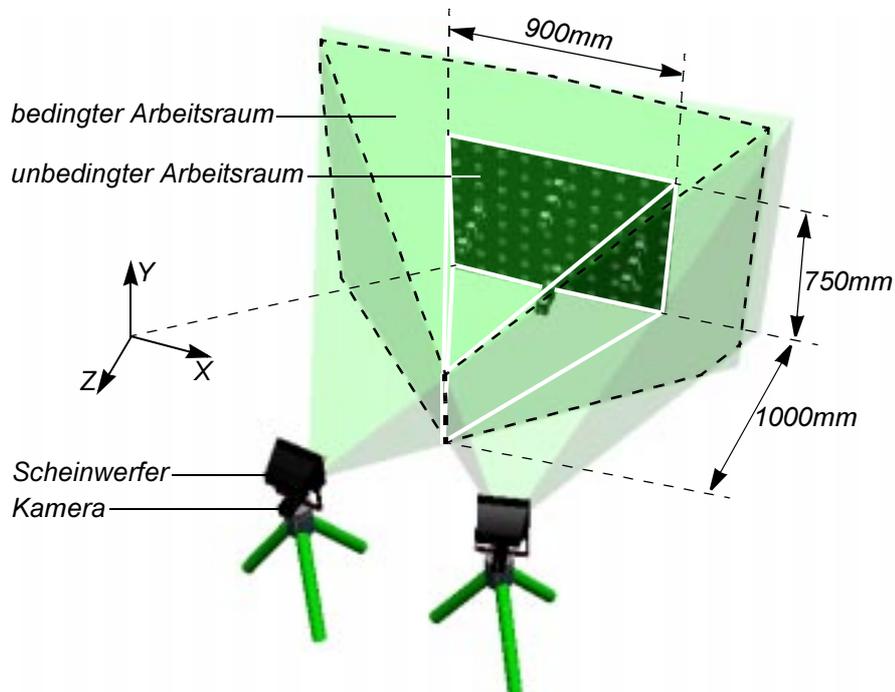


Abbildung 61: Arbeitsraum der Photogrammetrie im mobilen Meßaufbau

Gestalt und Größe des durch dieses System abgedeckten Arbeitsraumes sind in Abbildung 61 dargestellt. Es empfiehlt sich bei hohen Genauigkeitsanforderungen, das zu vermessende Objekt in dem Raum zu positionieren, der durch den Überdeckungsbe- reich der pyramidenförmigen Gegenstandsräume gekennzeichnet ist, die durch die Objektive einerseits und durch die Ecken des Paßpunktfeldes andererseits bestimmt sind, da die Verzeichnungsparameter der Kameras außerhalb dieses Bereiches nur durch Extrapolation ermittelt werden.

5.2.1.2 Bestimmung der erzielbaren Genauigkeit im mobilen Aufbau

Für ein über der Zeit stabiles Meßverhalten des Systems ist eine stationäre Temperatur der Kameras und der Optiken erforderlich. Die Temperatur der Kamera wird durch mehrere Parameter beeinflusst:

- Verlustleistung der Kameraelektronik,
- Temperatur des Umgebungsmediums,
- thermische Einflüsse der Beleuchtungseinrichtungen durch Konvektion und/oder Wärmestrahlung und
- thermische Einflüsse des zu vermessenden Objektes oder Prozesses durch Konvek- tion und/oder Wärmestrahlung.

Die in diesem Versuchsaufbau relevanten Einflußgrößen sind unter der Annahme gleich- bleibender Temperatur des Umgebungsmediums Luft die Verlustleistung der Kamera- elektronik und die thermischen Einflüsse der Beleuchtung.

Die Abbildung 62 stellt den Aufwärmvorgang des Meßsystems infolge der zu Versuchs- beginn eingeschalteten Beleuchtung (zwei Halogenstrahler à 150W, deren Ausrichtung

aufgrund der Verwendung von retroreflektierenden Meßmarken möglichst gut mit der optischen Achse der Kameras übereinstimmen soll und die somit nah an diese herangebracht werden müssen) dar:

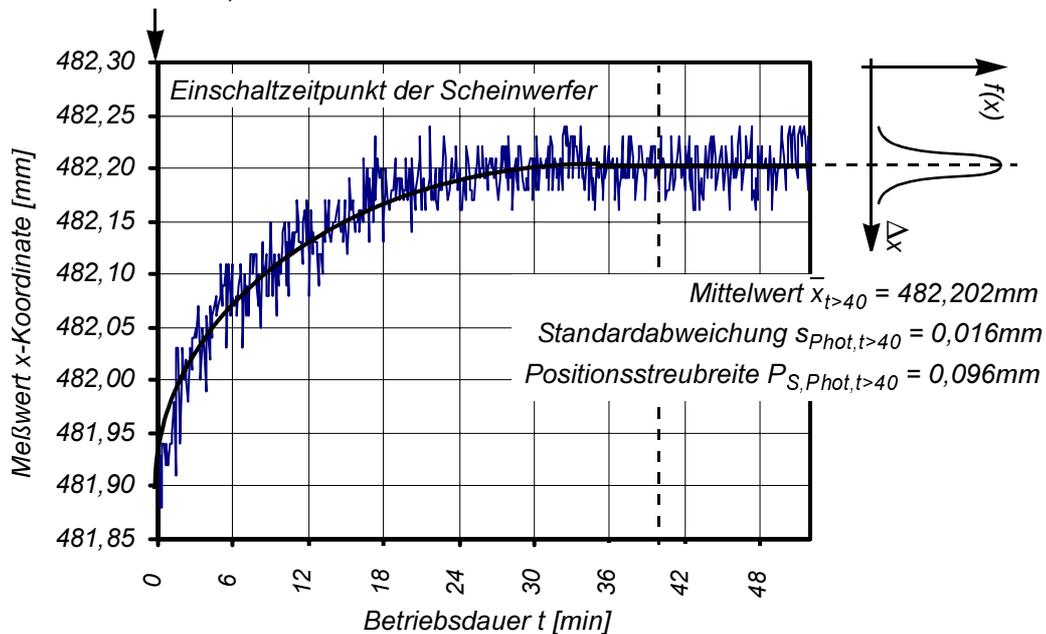


Abbildung 62: Messung eines ortsfesten Punktes während des Aufwärmvorganges

Es ist der Verlauf der gemessenen x-Koordinate eines während der Messung ortsfesten Punktes über der Einschaltdauer aufgetragen. Gegenüber der Kalibrierung zum Zeitpunkt $t = 0$ ergibt sich infolge der Aufwärmung der Optik und der damit einhergehenden Verformung des Objektivs, des Gehäuses und des Sensors eine Abweichung von $\approx 0,3\text{mm}$. Für diesen Aufbau stellt sich nach einer Aufwärmdauer von $t = 40\text{min}$ ein Beharrungszustand ein, in dem stabil gemessen werden kann. Im Anschluß an die Aufwärmphase muß das System kalibriert werden.

Die Genauigkeit des Systems im betriebswarmen und kalibrierten Zustand innerhalb des Arbeitsraumes wird mit Hilfe des Paßpunktfeldes bestimmt. Durch das Paßpunktfeld mit einer Genauigkeit von besser als $0,01\text{mm}$ gegebene Strecken zwischen Meßmarken werden mit gemessenen Werten verglichen. Zu diesem Zweck wird das Paßpunktfeld zusätzlich zur Kalibrierposition im 50mm Abstand in fünf Positionen in Richtung der positiven Z-Achse und in fünf Positionen in Richtung der negativen Z-Achse aufgestellt und vermessen. Beispielhaft für fünf Stellungen und fünf Strecken stellt Abbildung 63 den Vorgang dar. Grundlage der Auswertung sind die Abweichungen des Mittelwertes aus $n = 20$ Messungen des Abstandes einer Meßmarke j gegenüber der unteren, linken Marke und dem Istabstand der Meßmarken auf dem Paßpunktfeld. Es werden die in der jeweiligen Aufstellung für beide Kameras sichtbaren Marken in ihrer Lage und je 39 Abstände zwischen Marken vermessen. Um die Messungen der Abstände zur Auswertung der Positionsgenauigkeit zu verwenden, wird das Paßpunktfeld für jede Messung als übergeordnetes Koordinatensystem betrachtet, indem der Ursprung in die Marke an der unteren, linken Ecke des Paßpunktfeldes gelegt wird. Die Messungen in den unter-

schiedlichen Stellungen des Paßpunktfeldes lassen sich auf diese Weise bedingt miteinander verknüpfen. Aus den Messungen der Lage ergeben sich nach Tabelle 17 die in Tabelle 18 angegebenen Genauigkeitskennwerte

Tabelle 18: Genauigkeitskennwerte des mobilen Nahbereichsaufbaus

Kennwert	Formelzeichen	Betrag
Anzahl der Meßorte	k	390
Anzahl der Wiederholmessungen pro Meßort	n	20
Positionsgenauigkeit	\bar{d}	< 0,1mm
mittlere Positionsstreuung	$\bar{P}_{S,Phot}$	0,12mm
maximale Positionsabweichung	$d_{max,Phot}$	0,16mm

Die Meßgenauigkeit dieses Systems muß für Positionieraufgaben in der Robotik, die nach der Aufgabenstellung maximale Positionsabweichungen $d_{max} = 1mm$ und Positionsstreuungen $\bar{P}_S = 2mm$ zulassen, als ausreichend bewertet werden.

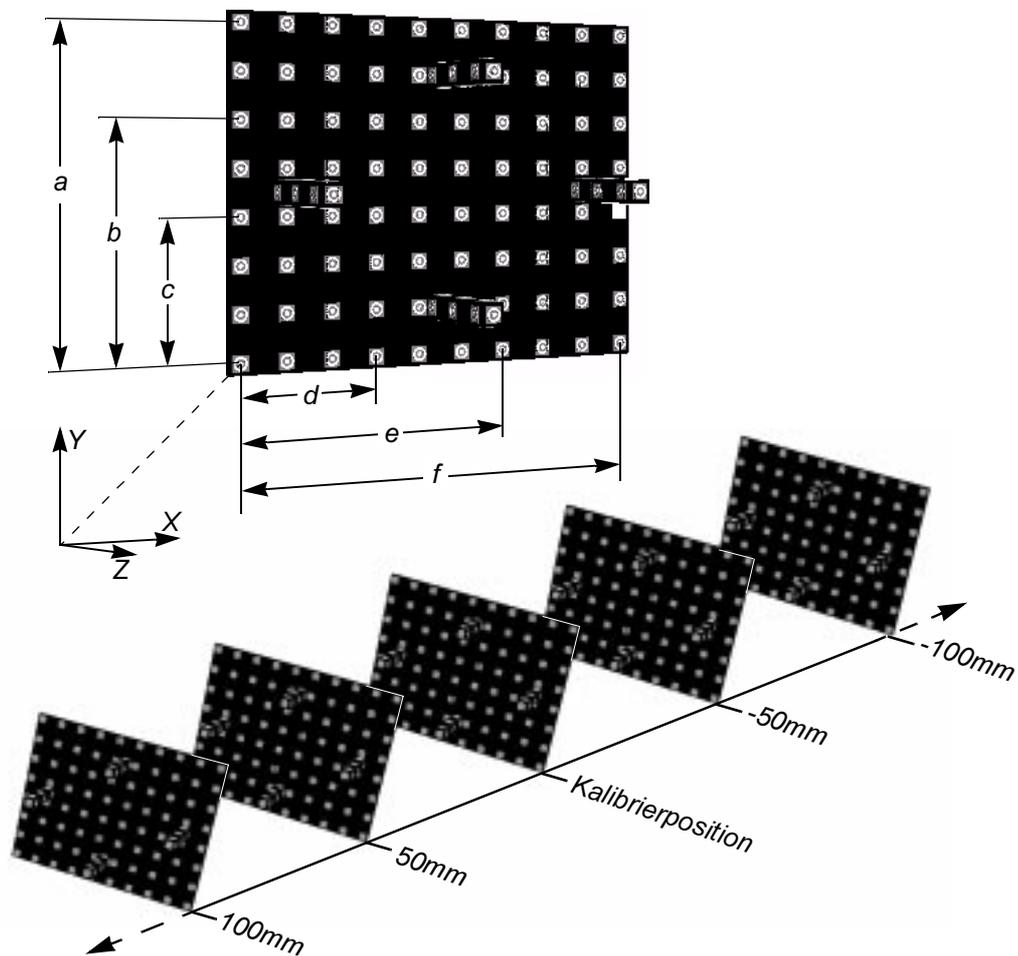


Abbildung 63: Anordnung des Paßpunktfeldes zur Bestimmung der Genauigkeit

5.2.2 Meßaufbau für erweiterten Arbeitsraum

Es soll die Verbesserung der Genauigkeitskenngrößen des Großmanipulators betrachtet werden. Daher muß die Betrachtung auf Meßvolumina erweitert werden, die der Größenordnung des Arbeitsraumes des MTS entsprechen. Es wird ein Meßvolumen der Größe $4000 \times 4000 \times 4000\text{mm}$ angestrebt. Anhand dieses Meßvolumens soll die Eignung des Verfahrens zum Einsatz an großtechnischen Anlagen erprobt werden. Für die digitale 3-D-Photogrammetrie mit Echtzeitauswertung sind der Literatur keine Abhandlungen zu Anwendungen dieser Größenordnung zu entnehmen.

Eine weitere Vergrößerung des Meßvolumens ist entweder durch Anreihen weiterer Meßzellen oder durch die Verwendung höher auflösender Kameras möglich.

5.2.2.1 Beschreibung des Meßaufbaus für erweiterten Arbeitsraum

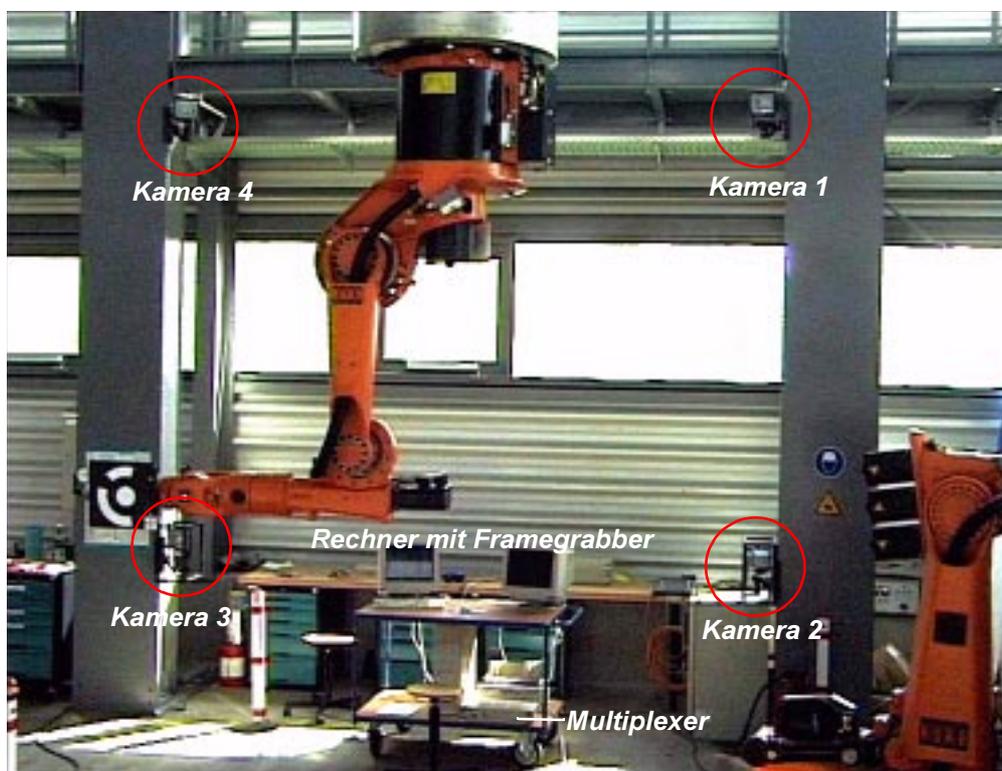


Abbildung 64: Kameramontage für den erweiterten Arbeitsraum

In diesem Meßaufbau kommt eine Konfiguration des Photogrammetriesystems bestehend aus vier Kameras Pulnix TM-9701 ausgestattet mit Objektiven der Brennweite $f = 8\text{mm}$ zum Einsatz. Der Arbeitsraum der Photogrammetrie wird als Würfel mit einer Kantenlänge von 4000mm angenommen. Aus der Brennweite des Objektivs und den Abmaßen des Sensors ergibt sich der horizontale Bildwinkel nach Gleichung 101 zu $\theta_{hor} = 95^\circ$, der vertikale Bildwinkel beträgt $\theta_{ver} = 79^\circ$. Der Arbeitsraum ergibt sich aus dem Schnittvolumen der pyramidenförmigen Volumina, die den Sichtbereich der einzelnen Kameras beschreiben.

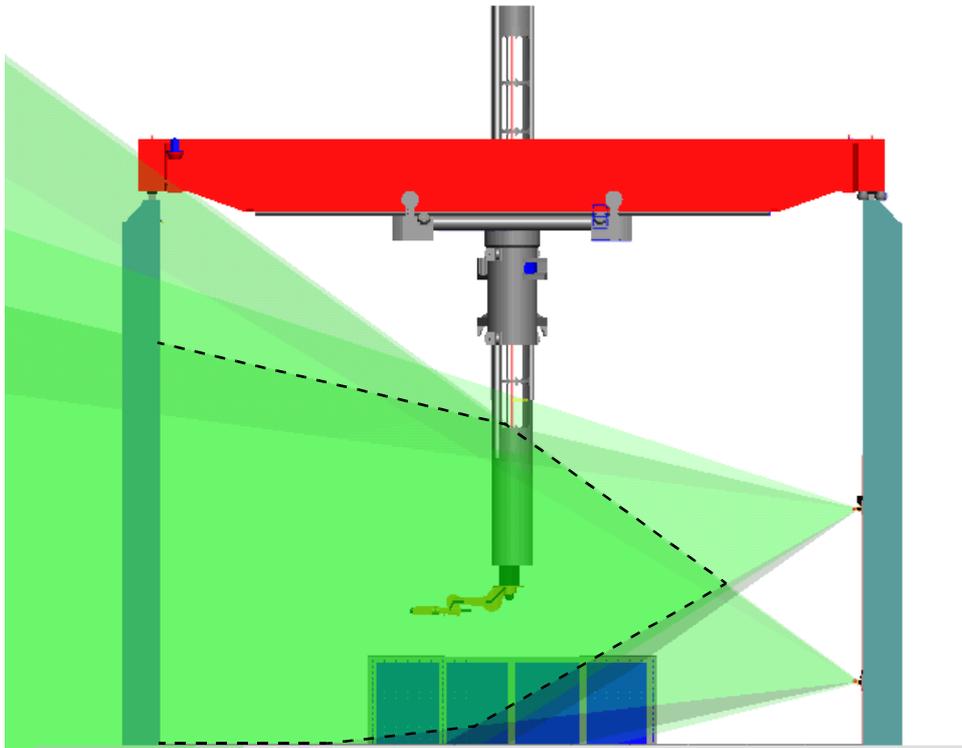


Abbildung 65: Arbeitsraum der Photogrammetrie (Seitenansicht)

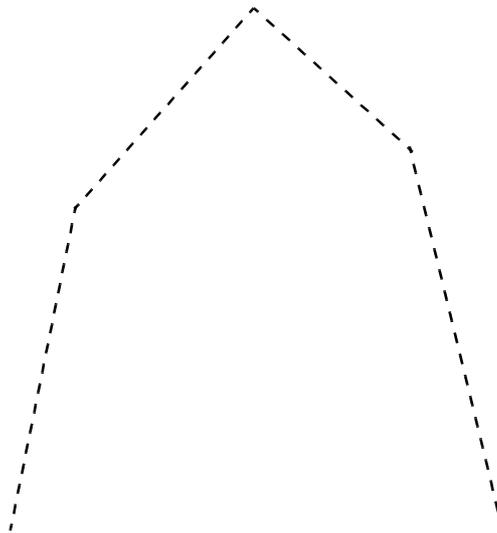


Abbildung 66: Arbeitsraum der Photogrammetrie (Draufsicht)

Bei einer Montage der Kameras an den Stützen der MTS-Schienen ergibt sich als potentieller Arbeitsraum die Lage des Schnittvolumens der Sichtbereiche der Kameras gemäß den Abbildungen 65 und 66.

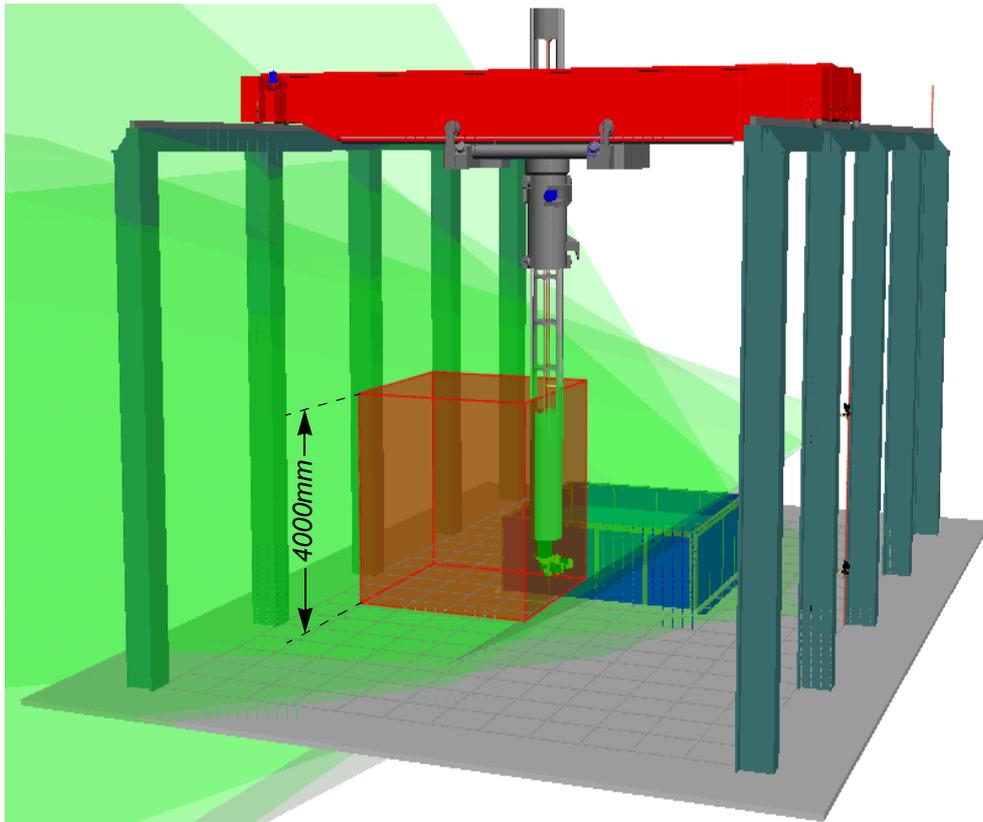


Abbildung 67: Vereinbarung des MTS-Arbeitsraumes mit dem Meßvolumen

Wird die Nutzung der durch starke Verzeichnung gekennzeichneten Randbereiche des Sichtfeldes vermieden, so ergibt sich die Einpassung des $4000 \times 4000 \times 4000\text{mm}$ Arbeitsraumes gemäß Abbildung 67.



Abbildung 68: Videobilder der Meßkamera vom Arbeitsraum

Die Ermittlung der inneren und äußeren Orientierungen der Kameras wird aus Beobachtungen des stationären Paßpunktfeldes an den Stützen der MTS-Schienen mit hochgenau vermessenen Meßmarken im Rückwärtsschnitt bestimmt. Die Abbildung 68 zeigt die Bilder der vier Videokameras.

Im Zentrum der Bilder ist der Mastfuß des Trägersystems mit dem in Überkopffosition montierten Industrieroboter KR15 zu sehen. Charakteristische Punkte des Großmanipulators sind durch kodierte Meßmarken gekennzeichnet.

5.2.2.2 Bestimmung der erzielbaren Genauigkeit

Die mit der Photogrammetrie in dieser Konfiguration erzielbare Genauigkeit wird anhand zweier Größen quantifiziert:

- Messung relativer Längen an verschiedenen Orten des Arbeitsraumes anhand von Längennormalen,
- Messung absoluter Raumkoordinaten im Abgleich mit Theodolitenmessungen.

Messungen des Längennormals

Die Abbildung 69 zeigt das Längennormal, bestehend aus einem Glasfaserprofil mit zwei kodierten Meßmarken.



Abbildung 69: Längennormal mit kodierten Meßmarken

Dieses Längennormal wird ohne Bewegung des Großmanipulators an systematisch angeordnete Koordinaten innerhalb des Photogrammetriearbeitsraumes gebracht und in mehreren Orientierungen vermessen. Die größten räumlichen Abweichungen der Längemessungen gegenüber dem Sollwert sind in Abbildung 70 als Ungenauigkeitskugel über dem Meßort aufgetragen.

Diese Messungen geben unmittelbar die erreichbare Genauigkeit in diesem Versuchsaufbau vorgenommener Längenmessungen an. Darüber hinaus lassen sie die Äquidistanz eines räumlichen Koordinatengitters im Arbeitsraum beurteilen, die im günstigsten Fall den Abbildung 70 zu entnehmenden Größen entspricht. Diese Konsistenz des räumlichen Koordinatensystems ist maßgeblich für die Nutzbarkeit des Meßverfahrens bzw. des Meßaufbaus zur Messung von Weltkoordinaten, bestimmt also die Positionsgenauigkeit.

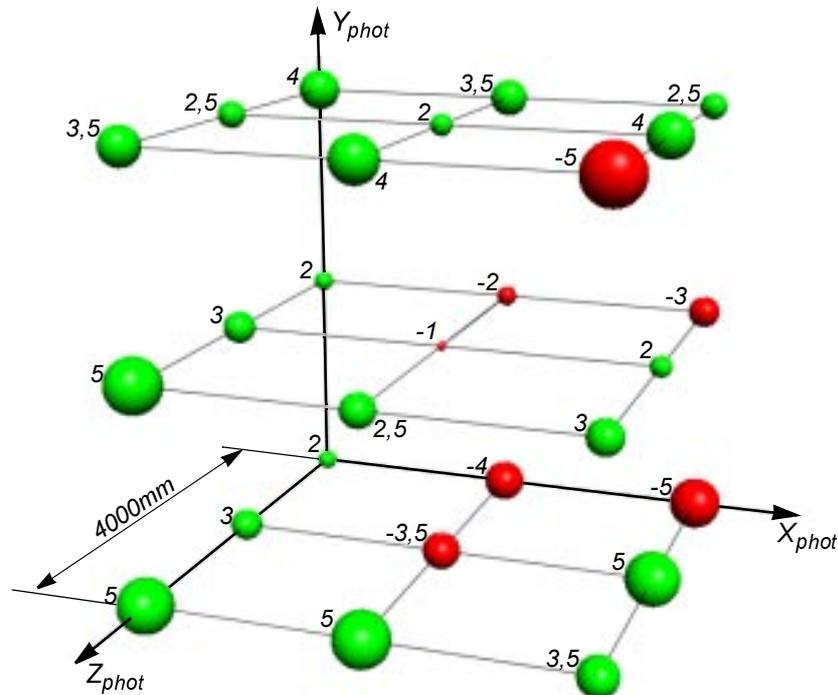


Abbildung 70: Abweichung der Längenmessung vom Sollwert in Abhängigkeit vom Meßort, ruhendes MTS, Angaben in 1/10mm

Meßergebnisse aus Vergleich mit Theodolitenwerten

Geprüft wird die Konsistenz des photogrammetrischen Weltkoordinatensystems mit Hilfe des Vergleiches von Theodolitenmessungen und photogrammetrischen Messungen. An 27 in Abbildung 70 eingenommenen Positionen werden die absoluten Positionsmeßwerte aus Photogrammetrie- und Theodolitenmessung miteinander verglichen.

Tabelle 19: Genauigkeitskennwerte für den erweiterten Arbeitsraum (ruhendes MTS)

Kennwert	Formelzeichen	Betrag
Anzahl der Meßorte	k	27
Anzahl der Wiederholmessungen pro Meßort	n	5
mittlere Positionsgenauigkeit	\bar{d}	<1,2mm
mittlere Positionsstreuung	$\bar{P}_{S,Phot}$	0,56mm
maximale Positionsabweichung	$d_{max,Phot}$	1,48mm

Gemessen an den durch die Theodolitenmessung definierten Referenzwerten errechnen sich die Genauigkeitskenngrößen dieses photogrammetrischen Aufbaus bei ruhendem Trägersystem zu den in Tabelle 19 angegebenen Werten.

Bei bewegtem Großmanipulator sind die in diesem Aufbau mit der Photogrammetrie erreichten Meßgenauigkeiten geringer. Es muß demnach eine Rückwirkung der Bewegung des MTS auf die MTS-Stützen, an denen die Kameras montiert sind, unterstellt werden. Die Abbildung 71 stellt die Abweichungen photogrammetrischer Meßwerte von

Theodolitenmeßwerten anhand der mittleren von drei ausgewerteten, waagerechten Ebenen durch den Photogrammetriearbeitsraum dar. Dabei wird jede Ebene aus 256 Meßorten gebildet, die mit dem Großmanipulator angefahren und mit Photogrammetrie und Theodoliten vermessen werden. Die Theodolitenmeßwerte als Referenz nutzend, sind die Abweichungen der Photogrammetriemeßwerte im Koordinatensystem der Photogrammetrie aufgetragen. Aus der Auswertung von drei Ebenen ergeben sich die in Tabelle 20 zusammengestellten Genauigkeitskennwerte der Photogrammetrie.

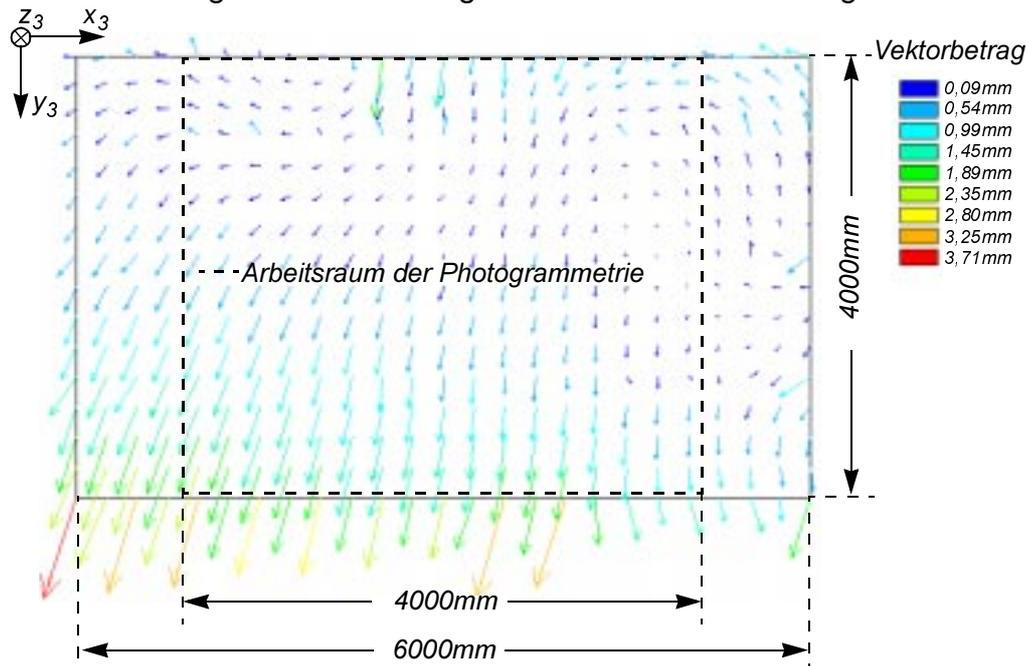


Abbildung 71: Abweichung photogrammetrisch bestimmter Raumkoordinaten mit Theodolitenmeßwerten, bewegtes MTS

Tabelle 20: Genauigkeitskennwerte für den erweiterten Arbeitsraum (bewegtes MTS)

Kennwert	Formelzeichen	Betrag
Anzahl der relevanten Meßorte	k	256
Anzahl der Wiederholmessungen pro Meßort	n	5
mittlere Positionsgenauigkeit	\bar{d}	<1,2mm
mittlere Positionsstreuung	$\bar{P}_{S,Phot}$	1,45mm
maximale Positionsabweichung	$d_{max,Phot}$	1,92mm

Um die Abhängigkeit der Meßgenauigkeit der Photogrammetrie von der Bewegung des Großmanipulators zu belegen, werden bei bewegtem Trägersystem ortsfeste Marken vermessen. Abbildung 72 zeigt einen Ensemblezusammenhang in der photogrammetrischen Bestimmung der Koordinaten ortsfester Meßmarken bei bewegtem MTS auf. Aufgetragen sind die vektoriell addierten Abweichungen derselben ortsfesten Meßmarke von ihrem Mittelwert über der Anzahl der Messungen. Nach jeweils zwanzig Messungen erfolgte eine Bewegung des Trägersystems. Die aus diesen Messungen errechneten

Genauigkeitskennwerte zeigen gute Übereinstimmung mit dem Abgleich mit den Theodolitenmeßwerten (Tabelle 20).

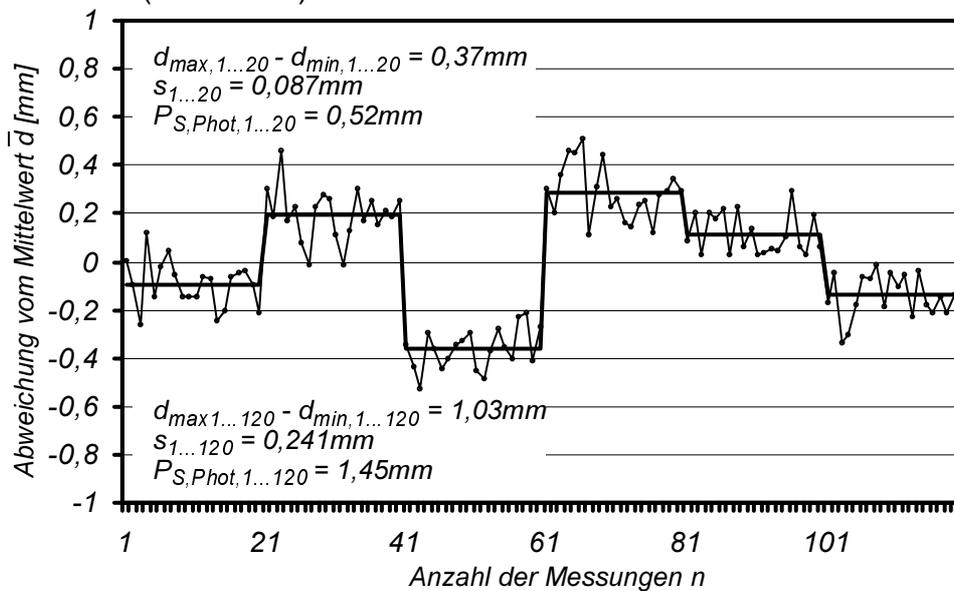


Abbildung 72: Ensemblezusammenhang der Meßabweichung ortsfester Punkte, bewegtes MTS

Die ungünstige Beeinflussung der Genauigkeitskennwerte wird auf die Verformung der Stützen des Trägersystems zurückgeführt, die eine Änderung der Orientierung der an ihnen montierten Kameras bedingt, so daß dieser Aufbau für hohe Genauigkeitsanforderungen als ungeeignet angesehen werden muß.

Die für das System in diesem Aufbau und in dieser Konfiguration gefundenen Fehler lassen sich in die im folgenden dargestellten Fehlerklassen teilen:

- Veränderliche Meßergebnisse für ortsfeste Meßmarken nach Neukalibrierung des Systems trotz unveränderter äußerer Orientierung der Kameras (ruhendes MTS). Dies läßt sich auf mathematische Iterationsvorgänge zurückführen, die der Orientierung und Kalibrierung des Systems dienen. Gemäß Abschnitt 2.2.4 werden aus optischen Beobachtungen des Paßpunktfeldes Beobachtungsgleichungen zur Errechnung sechs unbekannter Parameter der äußeren und zehn unbekannter Parameter der inneren Orientierung bestimmt. Abhängig von den Startwerten, vom Aufbau des Paßpunktfeldes und von der Qualität der Beobachtungen des Paßpunktfeldes, kann diese Iteration zu abweichenden Ergebnissen führen. Die Instabilität der Iteration wird vermindert durch die Bestimmung und Festlegung der Parameter der inneren Orientierung jeder einzelnen Kamera im Labor, so daß im Versuchsaufbau durch Iteration nur noch die Parameter der äußeren Orientierung bestimmt werden müssen. Die Qualität der Beobachtungen des Paßpunktfeldes läßt sich durch den Einsatz leistungsstärkerer Beleuchtungseinrichtungen mit größeren Öffnungswinkeln und damit vollständiger räumlicher Ausleuchtung verbessern.
- Inkonsistenz der Raumkoordinaten beschrieben durch Abweichung photogrammetrisch gemessener Raumkoordinaten von Theodoliten-Raumkoordinaten und Abweichung photogrammetrisch gemessener Normlängen innerhalb des Arbeitsraumes (Abbildung 70 und 71). Dies ist zurückzuführen auf die geringe Ausdehnung des Paßpunktfeldes in der Tiefenachse. Zusätzliche Paßpunkte, die als Hochpunkte aus dem nahezu zweidimensionalen Paßpunktfeld herausragen, können die Kalibrierung

stabilisieren. Darüber hinaus ist den Abbildungen 65 und 66 zu entnehmen, daß große Teile der Kamerasichtbereiche nicht mit Paßpunkten versehen werden können, so daß für diese Bereiche die Verzeichnungsparameter nur extrapoliert und damit nicht exakt bestimmt werden können. Dies setzt die erreichbare Meßgenauigkeit in diesen Bereichen herab und führt zu der Abbildung 70 deutlich zu entnehmenden Verminderung der Genauigkeit im vorderen, unteren Bereich des Arbeitsraumes.

- Instabile Meßergebnisse zwischen Wiederholmessungen desselben Meßortes bei bewegtem MTS (Ensemblezusammenhang, Abbildung 72).

Diese Meßfehler werden auf äußere Einflüsse zurückgeführt, die zur Veränderung der Parameter der äußeren und inneren Orientierung der Kameras führen. Dies kann beispielsweise durch Temperaturveränderungen hervorgerufen werden. Eine stärkere Auswirkung ist jedoch der Veränderung der Kameraorientierungen infolge der Bewegung der MTS-Stützen, an denen die Kameras montiert sind, beim Fahren des MTS oder des auf derselben Schiene fahrenden Hallenkrans zuzuschreiben. Dies macht das mechanische Entkoppeln der Kameras von den MTS-Stützen erforderlich.

Diese Erkenntnisse führen zu einem weiterentwickelten Meßaufbau für den erweiterten Arbeitsraum.

5.2.3 Weiterentwickelter Meßaufbau für erweiterten Arbeitsraum



Abbildung 73: Meßaufbau mit entkoppeltem mobilem Kamerarahmen

Der weiterentwickelte Meßaufbau basiert auf einem von den MTS Stützen und der Hallenstruktur entkoppelten Kamerarahmen, der zwecks Schwingungsdämpfung aus sand-

befüllten Stahlrohren aufgebaut ist (Abbildung 73), so daß erwartet werden kann, daß die Bewegung des MTS keinen meßbaren Einfluß auf die Meßgenauigkeit hat.

Die Kalibrierung des Systems erfolgt entweder anhand des mobilen Paßpunktfeldes, das zu diesem Zweck vor die Kameras gebracht werden muß und so die Kalibrierung des gesamten Sichtbereiches der Kameras ermöglicht, oder im Labor. Die Ungenauigkeiten im vorderen, unteren Bereich des Arbeitsraumes, die als Folge der unzureichenden Ausdehnung und Dichte des stationären Paßpunktfeldes nur eine extrapolierende Verzeichnungskorrektur für diese Bereiche ermöglichte, werden vermieden. Die Orientierung des Systems, für die bezüglich Dichte und Ausdehnung des Paßpunktfeldes wesentlich geringere Anforderungen gelten, kann anhand des stationären Feldes vorgenommen werden.

Die Meßgenauigkeit des Photogrammetriesystems im entkoppelten Aufbau wird analog zu Abschnitt 5.2.2 mit Hilfe des Vergleiches von Theodolitenmessungen und Photogrammetriemessungen bei bewegtem MTS geprüft. Es ergeben sich bei einer Meßkampagne an 27 Stützstellen mit jeweils 5 Wiederholmessungen die in Tabelle zusammengestellten Genauigkeitskennwerte.

Tabelle 21: Genauigkeitskennwerte für den entkoppelten Aufbau (bewegtes MTS)

Kennwert	Formelzeichen	Betrag
Anzahl der Meßorte	k	27
Anzahl der Wiederholmessungen pro Meßort	n	5
Positionsgenauigkeit	d	<0,7mm
mittlere Positionsstreuung	$\bar{P}_{S,Phot}$	0,4mm
maximale Positionsabweichung	$d_{max,Phot}$	0,9mm

Die in diesem Aufbau und mit Hilfe der o. g. Kalibriermaßnahmen erreichte Genauigkeit ist im Sinne der geforderten Genauigkeit ausreichend, so daß diese Konfiguration für die Rückführung von Positionsdaten im Abschnitt 6 verwendet wird.

5.3 Anwendung des photogrammetrischen Mehrmedienverfahrens

Die Genauigkeit des in Abschnitt 3.2.5 entwickelten Verfahrens zur Wasseroberflächenerfassung und Korrektur des Brechungseinflusses in der Zweimedienphotogrammetrie wird im Versuchsstand erprobt, um die Eignung des Verfahrens zum Nachführen von Manipulatoren im Mehrmedieneinsatz zu bewerten.

5.3.1 Beschreibung des Mehrmedienmeßaufbaus

Über ein Versuchsbecken, in dem der Wasserstand frei regulierbar ist, werden entsprechend Abbildung 31 vier CCD-Kameras an einem mechanisch vom Becken entkoppelten Träger montiert. Zwischen den Kameras befindet sich das Leuchtenfeld, das aus

16 x 16, in einem rechteckigen Gitterraster mit 20mm Abstand angeordneten, 5mm-LEDs aufgebaut ist.

Als zu vermessende UW-Objekte werden mattweiße, von innen beleuchtete, Hohlkugeln ($\varnothing 37,5\text{mm}$) verwendet. Sie werden an den Manipulator angebracht und dienen als Meßmarke des Endeffektors für den Unterwassereinsatz (Abbildung 74).

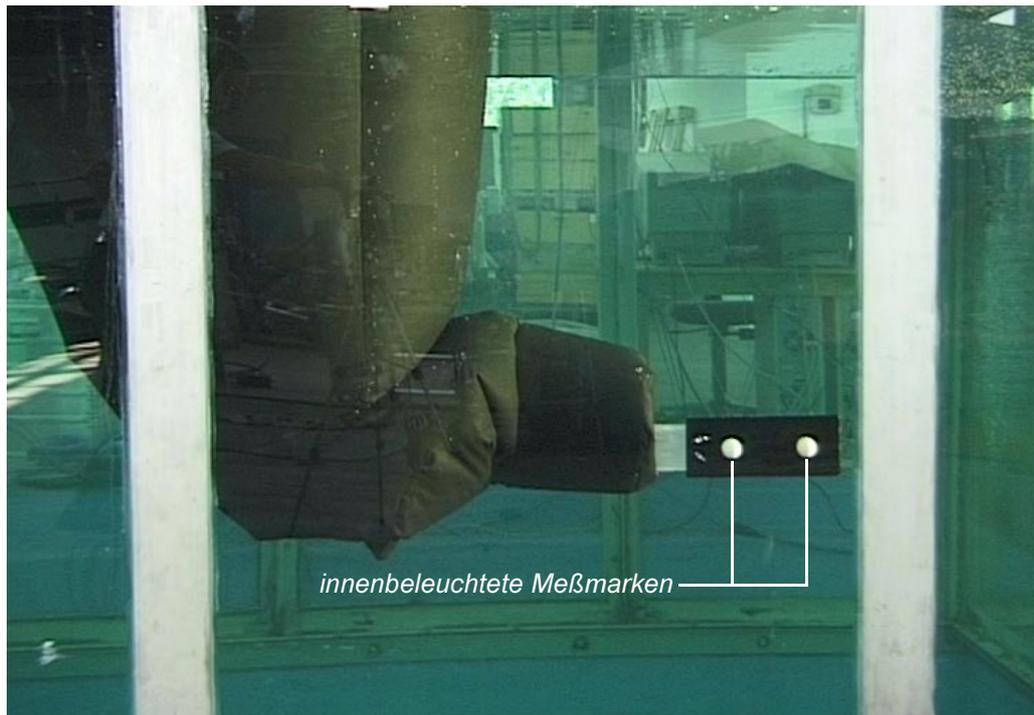


Abbildung 74: UW-Meßmarken am Großmanipulator im UW-Test

5.3.2 Bestimmung der erzielbaren Genauigkeit

Um die Genauigkeit der im Mehrmedienverfahren ermittelten Meßwerte zu bewerten, werden zwei UW-Meßmarken ohne Wasserüberdeckung, also als gewöhnlicher Einmedienfall in Luft, vermessen.

Anschließend wird das Becken auf einen Wasserstand von $\approx 420\text{mm}$ über den UW-Objekten befüllt und die Messung bei ebener Oberfläche ohne Berücksichtigung der Brechung wiederholt. Mit der Beschreibung der ebenen Oberfläche (Nullage) als Grenzfläche, wird die Brechung nach Abschnitt 3.1 korrigiert, um einen Vergleichswert zu den Messungen mit gewellter Oberfläche zu erhalten.

Tabelle 22: mittlere Positionsgenauigkeit bei ebener Wasseroberfläche, ohne und mit Korrektur

Korrektur	$\Delta\bar{x}$ [mm]	$\Delta\bar{y}$ [mm]	$\Delta\bar{z}$ [mm]	$\Delta\bar{r}$ [mm]	\bar{d} [mm]
Zweimedienmessung, Brechung vernachlässigt	5,085	5,78	128,375	7,69	128,6
Zweimedienmessung, Korrektur als Ebene	0,275	0,33	0,4	0,43	0,59

Es ergeben sich die in Tabelle 22 angegebenen mittleren kartesischen Abweichungen und Radialabweichungen $\Delta \bar{r}$ (xy -Ebene) zur exakten Position sowie mittlere Positionsgenauigkeiten \bar{d} . Für diesen Aufbau ist der Meßfehler durch die Abweichung in der z -Koordinate dominiert.

An durch Wellen gekrümmten Oberflächen werden mit den in 3.3.2 erstellten Oberflächenmodellen, bei deren Erfassung mittels direkter Reflexion zeitgleich die Bildkoordinaten der Unterwasserobjekte bestimmt werden, Brechungskorrekturen durchgeführt. Dabei werden die Oberflächenmodelle

- ebene Oberfläche,
- Normalenvektornetz unter Vernachlässigung der Auslenkung (Abschnitt 3.3.2.1),
- im ersten Modellierungsschritt erzeugtes Oberflächennetz (Abschnitt 3.3.2.2),
- einfach rekursiv verbessertes Oberflächennetz (Abschnitt 3.3.2.3) und
- vierfach rekursiv verbessertes Oberflächennetz

eingesetzt und die Abweichungen gegenüber der im Einmedienfall bestimmten Position ermittelt.

Tabelle 23: Meßfehler bei gewellter Oberfläche nach Korrektur mit steigender Modellkomplexität

Oberflächenmodell	$\Delta \bar{x}$ [mm]	$\Delta \bar{y}$ [mm]	$\Delta \bar{z}$ [mm]	$\Delta \bar{r}$ [mm]	\bar{d} [mm]
vereinfacht als ebene Oberfläche	1,255	1,535	2,290	1,98	3,03
Normalenvektornetz, Vernachlässigung der Auslenkung	0,23	0,55	1,425	0,59	1,544
Oberflächennetz im ersten Modellierungsschritt	0,525	0,495	1,31	0,721	1,495
Oberflächennetz, einfach rekursiv verbessert	0,46	0,385	0,105	0,60	0,60
Oberflächennetz, vierfach rekursiv verbessert	0,44	0,39	0,095	0,59	0,60

Bei Annahme einer ebenen Oberfläche tritt erwartungsgemäß der größte Fehler auf, der wiederum hauptsächlich aus einer Abweichung in z -Richtung resultiert.

Verwendet man das Modell der Normalenvektoren unter Vernachlässigung der Oberflächenauslenkung, verbessern sich die Werte deutlich, und zwar sowohl die Höhenabweichung $\Delta \bar{z}$ als auch die Radialabweichung $\Delta \bar{r}$. Der Betrag der mittleren Positionsgenauigkeit \bar{d} reduziert sich auf etwa die Hälfte, so daß mit diesem sehr vereinfachten Modell bereits eine stark verbessernde Wirkung erzielt wird.

Wird das vollparametrisierte Modell, also sowohl die Normalenvektoren als auch die Auslenkung, zur Korrektur nach Abschnitt 3.3.2.2 eingesetzt, ist bei Verwendung des ersten erstellten Oberflächennetzes keine Verbesserung festzustellen. Wird dieses Oberflächenmodell jedoch durch mindestens eine rekursive Wiederholung erzeugt, stellt

sich eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit ein. Dabei treten Positionsgenauigkeiten auf, die mit den Werten der Vermessung durch die ebene Wasseroberfläche vergleichbar sind. Weitere Rekursionen verbessern das Ergebnis nicht.

Gegenüber der nichtkorrigierten Messung läßt sich durch das entwickelte Verfahren eine Steigerung der Positionsgenauigkeit um mindestens drei Größenordnungen erzielen. Aus Einmedien-Messungen ist bekannt, daß die Positionsabweichung der photogrammetrischen Vermessung von Objekten an Luft in einem vergleichbaren Aufbau $\bar{d} < 0,1mm$ beträgt. Im Vergleich weisen die Werte, die mit Hilfe des Mehrmedienverfahrens im Zweimedienfall an ebenen und gewellten Grenzflächen gemacht werden, Positionsgenauigkeiten von $\bar{d} \approx 0,6mm$ auf. Diese Fehler resultieren sowohl aus dem nicht exakt bekannten und mit $n_W = 1,33$ angenäherten Brechungsindex, als auch aus Ungenauigkeiten, die bei der Bestimmung der ebenen Oberfläche auftreten. Weiterhin wird die Messung durch lokale Unebenheiten der Oberfläche (Blasen, Staub) beeinflusst.

6 Inbetriebnahme des Gesamtsystems

6.1 Implementation des Photogrammetriesystems in die Robotersteuerung

Aus den Abschnitten 4.4.2 und 5.2.3 werden die Genauigkeitskennwerte des Großmanipulators und seiner Teilsysteme bezüglich des Endeffektors und des Photogrammetriesystems in den Tabellen 24 und 25 zusammengestellt.

Tabelle 24: Genauigkeitskennwerte des Großmanipulators

Teilsystem	Positionsgenauigkeit	Positionsstreubreite	maximale Positionsabweichung
Roboter KR 15	$\bar{d} = 0,8mm$	$P_S = 0,2mm$	$d_{max} = 0,9mm$
Trägersystem	$\bar{d} = 13,9mm$	$P_S = 7,9mm$	$d_{max} = 17,9mm$
Gesamtsystem	$\bar{d} = 14,7mm$	$P_S = 8,1mm$	$d_{max} = 18,8mm$

Tabelle 25: Genauigkeitskennwerte des Photogrammetriesystems

Teilsystem	Positionsgenauigkeit	Positionsstreubreite	maximale Positionsabweichung
Photogrammetrie	$\bar{d} = 0,7mm$	$P_S = 0,4mm$	$d_{max} = 0,9mm$

Sowohl die Positionsgenauigkeit als auch die Positionsstreubreite des Großmanipulators ließe sich demnach durch die Rückführung photogrammetrisch ermittelter Weltkoordinaten der Manipulatorkinematik in die Steuerung deutlich verbessern. Beide Größen haben Anteil an der maximalen Positionsabweichung. Die Zielgröße für die maximale Positionsabweichung ist mit $d_{max} \leq 1,0mm$ definiert.

Die Abbildung 75 stellt die realisierte Implementation des Photogrammetriesystems in die Manipulatorsteuerung dar. Die Meßdatenrückkopplung ist zwecks der Funktionstrennung aus dem Steuerungsrechner, einem Terminalrechner und dem Photogrammetrierechner aufgebaut. Wie in Abschnitt 4.6.4 erläutert, erfolgt die Kommunikation mit dem Steuerungsrechner über die serielle RS 232 Schnittstelle. Die Befehle zum Datenaustausch über diese Schnittstelle werden auf der Anwenderebene im Arbeitsprogramm des Roboters programmiert. Die Kommunikation zwischen Terminalrechner und Meßrechner ist ebenfalls über die serielle RS 232 Schnittstelle realisiert.

Der Steuerungsrechner übermittelt dem Terminalrechner die aktuelle Sollposition x_R , y_R und z_R sowie gegebenenfalls eine Identifikation n . Die photogrammetrisch gewonnene Istposition läuft in Photogrammetriekoordinaten x_P , y_P und z_P ebenfalls im Terminalrechner auf und wird in das Manipulatorkoordinatensystem transformiert. Nach einem Soll/Ist-Vergleich übermittelt der Terminalrechner die Korrekturparameter Δx_R , Δy_R und Δz_R an den Steuerungsrechner.

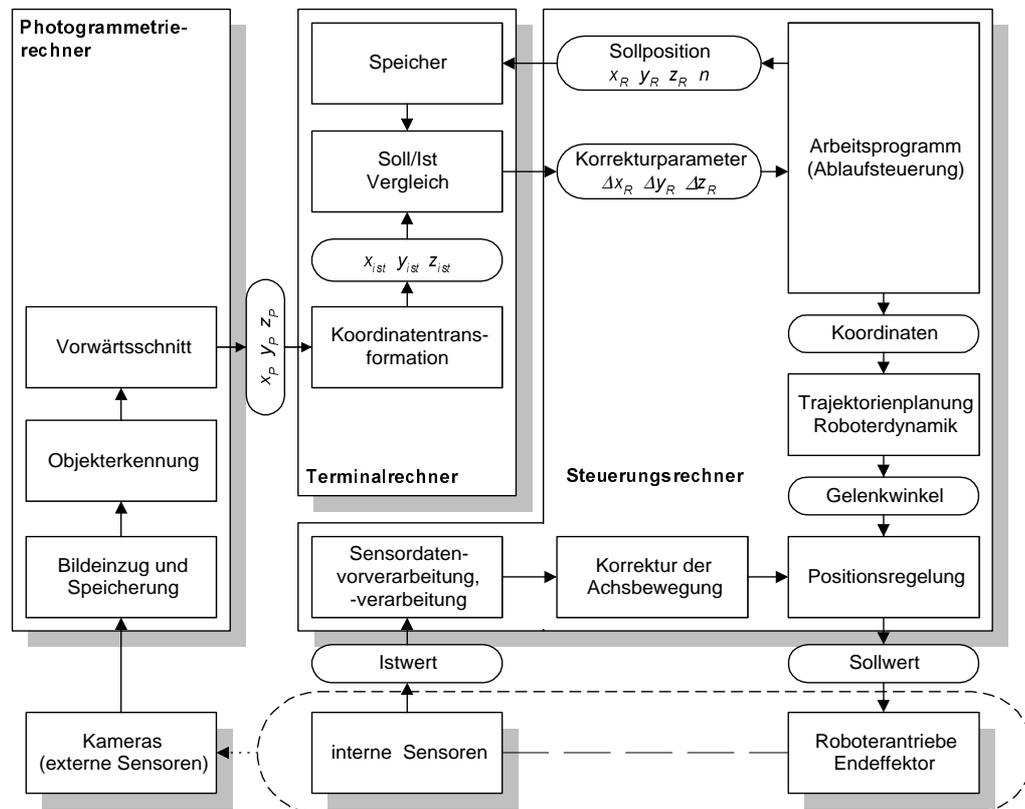


Abbildung 75: Implementation des Photogrammetriesystems in die Manipulatorsteuerung

Dieser Aufbau ermöglicht die Betriebsarten

- Rückführung von Weltkoordinaten und
 - Rückführung von Relativkoordinaten,
- die in den folgenden Abschnitten dargestellt sind.

6.1.1 Verbesserung der Positionsgenauigkeit auf der Basis rückgeführter Weltkoordinaten

Der Ansatz geht von einem Handhabungsvorgang aus, der es erlaubt, im Arbeitsprogramm Stützpunkte in räumlicher Nähe des Werkstückes einzurichten, die zur Kalibrierung des Manipulators genutzt werden können.

Der Manipulator fährt diese Kalibrierposition an (siehe Abbildung 76), im Ablaufprogramm des Steuerungsrechners folgen die Anweisungen, die photogrammetrische Messung auszulösen und die derzeitigen Sollkoordinaten x_R , y_R , z_R auszugeben. Diese werden im Terminalrechner zwischengespeichert, während das Auslösesignal an den Photogrammetriechner weitergeleitet wird. Alle verfügbaren Kameras werden zeitgleich veranlaßt Aufnahmen zu machen, die Bilder werden eingezogen und auf kodierte Meßmarken analysiert. Sofern Marken auf mehr als einem Bild detektiert werden können, werden für diese Marken die Koordinaten im Koordinatensystem der Photogrammetrie (Weltkoordinatensystem) mit Hilfe des räumlichen Vorwärtsschnitts ermittelt. Aus

dem Datensatz der Photogrammetriekoordinaten aller gefundenen Marken werden die Koordinaten der Endeffektormarke x_P, y_P, z_P entnommen, in das Roboterkoordinatensystem transformiert und mit den zwischengespeicherten Sollkoordinaten x_R, y_R, z_R zu den Korrekturwerten $\Delta x_R, \Delta y_R, \Delta z_R$ verrechnet. Diese werden in die Steuerung zurückgegeben und dort den folgenden Positionsbefehlen zuaddiert.

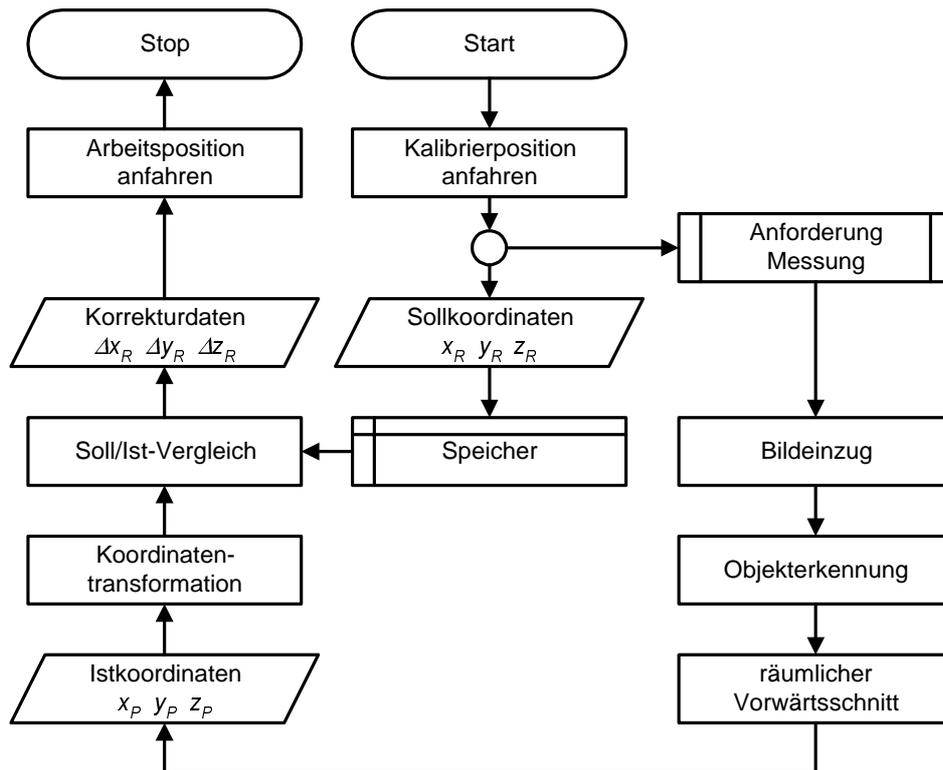


Abbildung 76: Flußdiagramm für Weltkoordinatenrückführung

Werden die Fahrwege zwischen der Kalibrierposition und der Arbeitsposition kurz gehalten, wirkt sich auf diese Wege nahezu nur noch die Positionstreibereite des Roboters genauigkeitsmindernd aus. Die theoretische maximale Positionsabweichung des nachgeregelten Großmanipulators setzt sich aus der Positionstreibereite des Roboters und der Positionsgenauigkeit des Photogrammetriesystems sowie deren Streubreite, wie in Tabelle 26 angegeben, zusammen.

Die in diesem Betriebsmodus erreichte Positionsgenauigkeit erfüllt die in der Aufgabenstellung durch die zu führenden Prozesse definierten Anforderungen. Aufgrund der geringen dynamischen Beanspruchung und der kurzen Wege zwischen der Kalibrierposition und der Arbeitsposition ist die tatsächliche Positionstreibereite des Roboters häufig besser als die theoretische, so daß praktisch geringere Positionsabweichungen des Gesamtsystems erreicht werden als in Tabelle 26 angegeben. Dies wird für die einzelnen Koordinatenachsen durch das Anfahren von Arbeitspositionen mit Meßuhren bestätigt.

Tabelle 26: theoretische Positionsgenauigkeit des Großmanipulators bei rückgeführten Weltkoordinaten

Teilsystem	relevante Genauigkeitskenngröße	Beitrag zur theoretischen maximalen Positionsabweichung
Roboter KR 15	Positionsgenauigkeit	kein Beitrag
	Positionsstreubreite	$P_S / 2 = 0,1mm$
Photogrammetriesystem	Positionsgenauigkeit	$\bar{d} = 0,7mm$
	Positionsstreubreite	$P_S / 2 = 0,2mm$
Summe		$d_{max} = 1,0mm$

Falls die Montage einer Meßmarke am Endeffektor, beispielsweise aufgrund unerwünschter Wechselwirkungen mit dem robotergeführten Prozeß, nicht möglich ist oder die Meßmarke durch andere Strukturen verdeckt wird, können andere Achsen des Roboters mit Meßmarken versehen werden. Dies erfordert jedoch eine Vorwärtstransformation über die Gelenkwinkel bis zu der jeweiligen Achse, um die Sollkoordinaten für diesen Punkt zu ermitteln. Diese Transformation entfällt, wenn die Meßmarke am Mastfuß des Trägersystems, also am Robotersockel befestigt wird, da für diesen Punkt Roboterkoordinaten im Ablaufprogramm zur Verfügung stehen. Da in dieser Anwendung nur die Position des Trägersystems nachgeregelt wird, ist für die maximale Positionsabweichung des Großmanipulators beim Anfahren der Arbeitsposition die Positionsgenauigkeit des Roboters zuzüglich ihrer Streuung relevant (Tabelle 27).

Tabelle 27: theoretische Positionsgenauigkeit des Großmanipulators bei rückgeführten Weltkoordinaten des Mastfußes (Robotersockel)

Teilsystem	relevante Genauigkeitskenngröße	Beitrag zur theoretischen maximalen Positionsabweichung
Roboter KR 15	Positionsgenauigkeit	$\bar{d} = 0,8mm$
	Positionsstreubreite	$P_S / 2 = 0,1mm$
Photogrammetriesystem	Positionsgenauigkeit	$\bar{d} = 0,7mm$
	Positionsstreubreite	$P_S / 2 = 0,2mm$
Summe		$d_{max} = 1,8mm$

Für viele Anwendungen, die von Großmanipulatoren ausgeführt werden, erscheint auch die in diesem Betriebsmodus erreichte maximale Positionsabweichung ausreichend, die ebenfalls den ungünstigsten Fall angibt und in der praktischen Anwendung zumeist übertroffen wird.

6.1.2 Erhöhung der Positionsgenauigkeit auf der Basis rückgeführter Relativkoordinaten

Ist über die in Tabelle 26 angegebenen Werte hinaus höhere Genauigkeit gefordert, so kann dies über einen weiteren am MTS realisierten Ansatz erreicht werden.

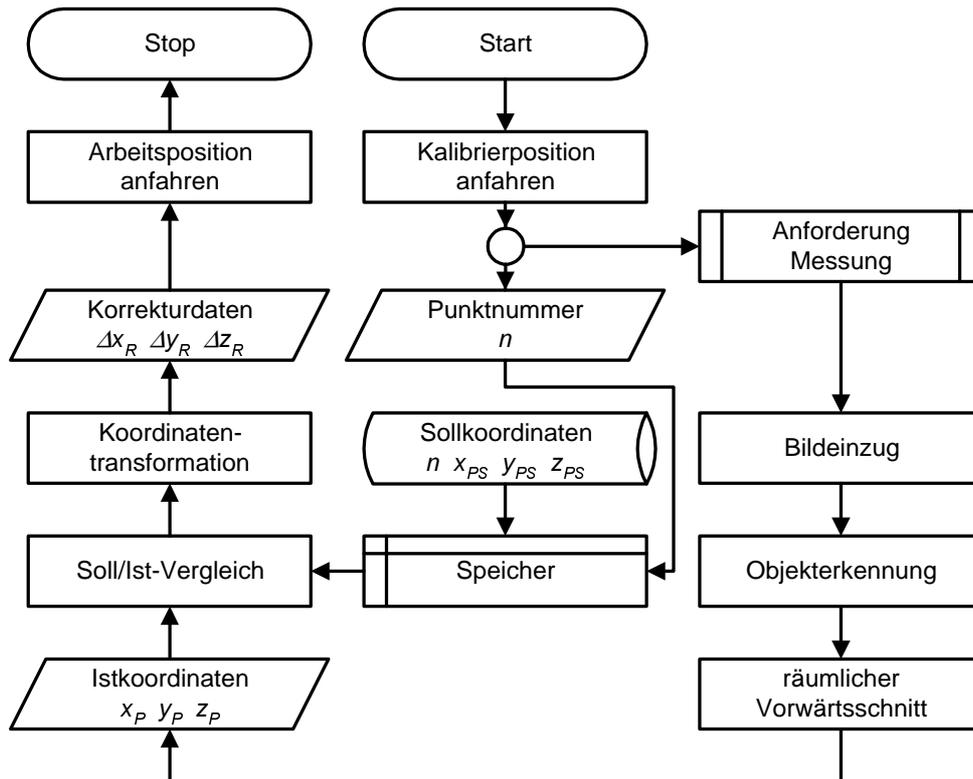


Abbildung 77: Flußdiagramm für Korrektur mit geteachten Photogrammetriekoordinaten

Dieser Ansatz basiert darauf, daß die Endeffektorpositionen photogrammetrieseitig geteacht werden. Zu diesem Zweck wird auf dem Terminalrechner eine Datei angelegt, in der die Photogrammetriekoordinaten angefahrener Positionen als Sollkoordinaten mit einer Identifikationsnummer n , die der Punktnummer im Arbeitsprogramm entspricht, abgelegt werden.

Beim Abfahren des Arbeitsprogrammes nimmt der Roboter eine Kalibrierposition in räumlicher Nähe der Arbeitsposition ein. Analog zum Abschnitt 6.1.1 folgt im Ablaufprogramm die Anweisung, die photogrammetrische Messung auszulösen. Zusätzlich wird die aktuelle Punktnummer n an den Terminalrechner übermittelt. Aus der Datenbasis werden die zugehörigen Photogrammetriesollkoordinaten x_{PS} , y_{PS} , z_{PS} entnommen und mit den aktuell vom Photogrammetriesystem ermittelten Photogrammetriestkoordinaten x_P , y_P , z_P der Endeffektormarke (oder nötigenfalls einer anderen Meßmarke) abgeglichen. Die Differenzen werden nach einer Transformation ins Roboterkoordinatensystem als Korrekturkoordinaten Δx_R , Δy_R , Δz_R an den Steuerungsrechner übermittelt.

Auf diese Weise kann sich der in Abschnitt 5.2.2.2 beschriebene Fehler der Inkonsistenz der photogrammetrischen Weltkoordinaten, d. h. die Positionsabweichung der Photogrammetrie nicht auf die Messung auswirken. Es bleibt die durch die Positionsstreuung der Photogrammetrie beschriebene Meßunsicherheit. Werden die Verfahrenswege zwischen der Kalibrierposition und der Arbeitsposition kurz gehalten, wirkt sich auf diese Wege, wie in Tabelle 28 angegeben, nahezu nur noch die Positionsstreuung des Roboters genauigkeitsmindernd aus.

Tabelle 28: theoretische Positionsgenauigkeit des Großmanipulators bei rückgeführten Relativkoordinaten

Teilsystem	relevante Genauigkeitskenngröße	Beitrag zur theoretischen maximalen Positionsabweichung
Roboter KR 15	Positionsgenauigkeit	kein Beitrag
	Positionsstreuung	$P_S / 2 = 0,1\text{mm}$
Photogrammetriesystem	Positionsgenauigkeit	kein Beitrag
	Positionsstreuung	$P_S / 2 = 0,2\text{mm}$
Summe		$d_{max} = 0,3\text{mm}$

Es wird auf diese Weise eine gegenüber der gemessenen maximalen Positionsabweichung des Großmanipulators (Tabelle 24) um zwei Größenordnungen verbesserte theoretische Positionsabweichung erreicht, die durch Messungen angefahrterer Arbeitspositionen mit Meßuhren bestätigt wird.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Effizienz von Fertigungsprozessen hängt eng mit dem Grad ihrer Automatisierung zusammen. Die Automatisierung der Herstellung von Großkomponenten im Stahlbau, Schwermaschinenbau, Schiffbau und zukünftig in der Bauindustrie scheitert unter anderem an der Verfügbarkeit kostengünstiger Roboter mit ausreichenden Arbeitsräumen bei gleichzeitig hoher, durch den Fertigungsprozeß definierter Genauigkeit.

Vergleichbare Problemstellungen ergeben sich bei Fernhantierungsprozessen an großtechnischen Anlagen in extremer Umgebung. Hier wird erheblicher Aufwand getrieben, um die notwendigen Fernhantierungsgeräte mit der geforderten Genauigkeit auszustatten.

Ziel dieser Arbeit war es, die Genauigkeitskenngrößen von Großmanipulatoren durch den Einsatz eines Regelungskonzeptes auf der Basis eines entkoppelten, räumlichen Meßsystems zu verbessern und so einen Beitrag zu leisten, die Effizienz der Automatisierung der Großkomponentenfertigung herzustellen sowie die Kosten bei Fernhantierungsprozessen in extremer Umgebung über die Verminderung der Anforderung an die Genauigkeit bei Fertigung und Montage von Großmanipulatoren zu senken.

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit erfolgten Aufbau eines Großmanipulators aus Komponenten des aus dem Vorversuchsstadium der Wiederaufbereitungsanlage Wackersdorf stammenden, prototypischen Manipulatorträgersystems (MTS), erweitert durch einen Industrieroboter (IR), steht dem Titelinstitut eine universelle neunachsige Führungsmaschine mit der Funktionalität moderner Industrieroboter zur Verfügung. Die Umkonstruktion der Kinematik des Trägersystems in Anpassung an die veränderten Gegebenheiten ging mit einer mechanischen Modellbildung und kinematischen Analyse des Systems einher, die, in Form einer erweiterten Denavit-Hartenberg-Notation und aus einem allgemeingültigen Ansatz hergeleiteter homogener Verformungsmatrizen, in offene Robotersteuerungen eingebunden und so zu einer deutlichen Genauigkeitssteigerung führen können. Die Notwendigkeit des Einsatzes einer zeitgemäßen Steuerung sowie die Ergänzung des Systems durch einen modernen Industrieroboter führten über die Betrachtung verfügbarer Steuerungsarchitekturen zur Auswahl eines IR-Systems und der Implementation des MTS in die Robotersteuerung.

Die Genauigkeitskennwerte des Trägersystems unterscheiden sich erheblich von den mit Industrierobotern erreichbaren Werten. In umfangreichen Meßkampagnen wurde dies verifiziert, quantifiziert und mit den Werten des theoretischen Modells abgeglichen. Die gefundenen Kennwerte sind für die Anwendung von Großmanipulatoren für Füge- und Trennverfahren sowie für Handhabungsaufgaben zu Montage- oder Demontagezwecken im Maschinen- und Anlagenbau häufig nicht ausreichend. Der fertigungstechnische Aufwand, die Genauigkeit dieser Geräte zu erhöhen, ist unverhältnismäßig. Mathematische Kalibrieransätze sind aufgrund der Vielzahl schwieriger zu erfassender oder nichtdeterministischer Modellparameter sehr komplex bzw. zur vollständigen Kor-

rektur prinzipbedingt ungeeignet, so daß die regelnde Rückführung von gemessenen Positionisistdaten, gewonnen durch ein entkoppeltes, hochpräzises, räumlich messendes Sensorsystem, für Großmanipulatoren die größte Effizienz erzielt. Die digitale Photogrammetrie verfügt durch das schnelle, berührungslose und räumliche Messen von Koordinaten aus der Distanz über die erforderlichen Charakteristika. In Vorversuchen erwies sich das Meßverfahren als zur Verbesserung der Genauigkeitskenngrößen von Manipulatoren geeignet. Die Größe des Arbeitsraumes sowie die erschwerten Bedingungen der Kalibrierung und der meßtechnischen Stabilität im fertigungstechnischen Umfeld stellen jedoch deutlich über den Stand von Wissenschaft und Technik hinausgehende Randbedingungen dar. Durch die Fortentwicklung der Auswertesoftware sowie des Meßaufbaus wurde das Verfahren für diesen großtechnischen Einsatz qualifiziert und in die Steuerung des Großmanipulators implementiert. Die Anbindung des Vermessungssystems an die Robotersteuerung ist aufgrund der Verwendung von Standardschnittstellen unspezifisch und daher auf andere Anlagen oder Prozesse übertragbar.

In mehreren realisierten Ansätzen wurde das durch Meßdatenrückkopplung verbesserte Positionierverhalten des Großmanipulators erprobt und innerhalb einer großräumigen Arbeitszelle eine Verbesserung der Genauigkeitskenngrößen um bis zu zwei Größenordnungen erreicht, die nunmehr zum Ausführen von Füge-, Trenn- und Montageanwendungen ausreichend sind. Dieses aus Großmanipulator und Meßeinrichtung aufgebaute Gesamtsystem bildet somit ein Referenzmodell, um die Effizienz großtechnischer Fertigungsprozesse zu steigern bzw. die Kosten präziser Fernhantierungsanwendungen zu senken.

Die Erweiterung des Arbeitsraumes durch das Anreihen weiterer Meßzellen, die weitere Verminderung der Meßfehler durch den Einsatz höher auflösender Kameras sowie die Stabilisierung der Meßergebnisse durch verbesserte, räumliche Kalibrierhilfen empfehlen sich als Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Mit der Qualifikation des Großmanipulators zum Unterwassereinsatz durch die Entwicklung einer wasserdichten Schutzhülle für den Industrieroboter wurde durch die Erweiterung der Einsatzfähigkeit von Standardsystemen und die Verminderung der erforderlichen Komplexität ein Beitrag zur Kostensenkung bei manipulatorgestützten Handhabungsaufgaben im Unterwasserbereich geleistet. Die Beschaffung von Spezialmanipulatoren kann zugunsten von Standardindustrierobotern und den damit einhergehenden Vorteilen bezüglich Verfügbarkeit, Bedienbarkeit etc. entfallen, etablierte industrielle Simulations- und offline-Programmiersysteme können genutzt werden.

Der Unterwassereinsatz des Großmanipulators bedingt die Entwicklung des photogrammetrischen Vermessungswerkzeugs für den Mehrmedieneinsatz, bei dem die Meßkameras an Atmosphäre verbleiben, während sich das zu vermessende Objekt unter Flüssigkeitsabdeckung befindet. Eine Vielzahl von Untersuchungen sind mit dieser grundlegenden Problemstellung befaßt, innerhalb einer Flüssigkeit befindliche Objekte von außerhalb der Flüssigkeit zu vermessen. Bekannte Verfahren sind jedoch auf den

Einsatz an definierten und ruhenden Phasengrenzen beschränkt. Da dieser statische Zustand in der Realität nicht immer gewährleistet werden kann, wurde ein neuartiger Ansatz zur photogrammetrischen Vermessung durch eine durch Wellen beschriebene, dynamisch bewegte Phasengrenze verfolgt. Es wurde so ein Verfahren von interdisziplinärem Interesse geschaffen, daß es erstmals ermöglicht, sowohl Objekte und Prozesse unter Abdeckung einer freien Flüssigkeitsoberfläche unter Berücksichtigung der zeitlich und räumlich veränderlichen Brechungseigenschaften nach Lage und Orientierung, als auch die topographische Gestalt der Flüssigkeitsoberfläche selbst zu bestimmen, ohne Kameras und Kalibrierhilfen in die Flüssigkeit einzubringen, so daß eine gegenseitige Beeinflussung und Kontamination ausgeschlossen ist. Die Anwendung des Verfahrens ermöglicht eine, im Vergleich zu nicht korrigierten Messungen um zwei Größenordnungen verbesserte Positionsbestimmung von Objekten unter Flüssigkeitsabdeckung durch die freie Flüssigkeitsoberfläche hindurch. Mit der Entwicklung dieses Verfahrens ist die Voraussetzung für künftige Untersuchungen geschaffen, die die Automatisierung des Verfahrens sowie die Beeinflussung durch Prozeßnebenprodukte, wie Gasblasen oder Hydrossole, betrachten sollten.

Abschließend bleibt festzuhalten, daß es am Beispiel des im Rahmen der Arbeit aufgebauten und weiterentwickelten, neunachsigen Großmanipulators mit der Bereitstellung eines mathematischen Werkzeugs zur kinematischen Kalibrierung, der deutlichen Verbesserung der Genauigkeitskenngrößen des Manipulatorsystems durch den Einsatz der für großvolumige Arbeitsräume in fertigungstechnischer Umgebung fortentwickelten digitalen Photogrammetrie, der Implementation des Photogrammetriesystems in die Manipulatorsteuerung, der Qualifikation des Manipulators für den Unterwassereinsatz sowie der Entwicklung eines Verfahrens zur Photogrammetrie durch die freie Flüssigkeitsoberfläche hindurch gelungen ist, ein modulares Gesamtsystem zu erstellen, daß es ermöglicht, Handhabungs- und Fertigungsprozesse an Großbauteilen mit hohen Präzisionsanforderungen sowohl an Atmosphäre als auch unter Wasserabdeckung durchzuführen, wobei jedes der Einzelmodule unabhängig vom Gesamtsystem zur Lösung spezifischer Aufgabenstellungen eingesetzt werden kann.

8 Literatur

Verwendete Abkürzungen:

- DGK: Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
- PE&RS: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing
- IAoP&RS: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing
- VBAW: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

- [1] Bach, Fr.-W. et al.: *Handbook on decommissioning of nuclear installations*. Luxemburg, Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaft, 1995
- [2] Haferkamp, H., Fr.-W. Bach und M. Bachmann: *Handling devices for the dismantling of Nuclear Installations - Cooperation of University and Operator*. Proceedings of the workshop „Decommissioning experience in Europe“, Luxemburg, Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaft, 1996
- [3] N. N.: *3D CAM - from the screen to the shop floor for small batch production*. Welding Review International, 11/1995, S. 144-146
- [4] Six, W. et al.: *Entwicklung eines Systems zur iterativen rechnergestützten Generierung von Bahnführungsdaten für Schweißrobotersysteme im Schiffbau*. Forschungszentrum des deutschen Schiffbaus, Bericht Nr. 243, Hamburg, 1992
- [5] Bach, Fr.-W., H. Haferkamp, M. Niemeyer und M. Reinhold: *Prozeßintegrierte Qualitätsprüfung beim Plasmaschmelzschnneiden*. Internationale Schneidtechnische Tagung, Hannover, 5./6.3.1997
- [6] Meydenbauer, A.: *Ein deutsches Denkmäler Archiv*. Deutsche Bauzeitung, Heft 629, 1984
- [7] Finsterwalder, S.: *Eine Grundaufgabe der Photogrammetrie und ihre Anwendung auf Ballonaufnahmen*. Königlich Bayerische Akademie der Wissenschaften, Bd. 22, München, 1903
- [8] Hallert, B.: *Photogrammetry, Basic Principles and general Survey*. McGraw Hill Book Co, Nr. 59-11932, New York, 1960
- [9] Schmid, H.: *An analytic Treatment of the Orientation of a photogrammetric camera*. Ballistic Research Laboratory Report No. 880, Aberdeen, USA, 1953

- [10] Zaar, K.: *Zweimedienphotogrammetrie*. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, Sonderheft 4, Wien, 1948
- [11] Rinner, K.: *Abbildungsgesetz und Orientierungsaufgaben in der Zweimedienphotogrammetrie*. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 5, Wien, 1948
- [12] Lacmann, O.: *Die Photogrammetrie in ihrer Anwendung auf nicht-topographischen Gebieten*. Verlag S. Hirzel, Leipzig, 1950
- [13] Tewinkel, G.: *Water depths from aerial photographs*. PE&RS, Heft 29, 1963, S. 1037-1042
- [14] Meijer, W.: *Formula for conversion of stereoscopically observed apparent depth of water to true depth, numerical examples and discussion*. PE&RS, Heft 30, 1964, S. 1037-1045
- [15] Ivanoff, A.: *On underwater photogrammetry*. Journal of the Optical Society of America, Heft 41, 1951, S. 645ff
- [16] Ball, G.: *A deep-sea camera system*. PE&RS, Heft 33, 1967, S. 913-920
- [17] Hopkins, R.: *Optical design and underwater photography*. PE&RS, Heft 33, 1967, S. 892-896
- [18] Seifert, V.: *Underwater cameras, lenses and housing*. PE&RS, Heft 37, 1971, S. 975-978
- [19] Welsh, J.: *Bibliography on UW-Photography*. PE&RS, Heft 37, 1971, S. 985
- [20] Litthales, B.: *Color in underwater photography*. PE&RS, Heft 33, 1967, S. 905
- [21] Phillips, S.: *Films for underwater photos*. PE&RS, Heft 37, 1971, S. 987-988
- [22] Kreiling, W.: *Einfache Auswertung von Zweimedien-Bildpaaren in Doppelprojektoren*. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 38(6), 1970
- [23] Jerie, H.G.: *Eine Methode für die Höhenblockausgleichung von Aerotriangulationen unter Einbeziehung von Hilfsdaten*. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 9, 1967
- [24] Masry, S. und G. Konecny: *New Programs for Analytical Plotter AP-2C*. PE&RS, Heft 36, 1970, S. 1269-1276
- [25] Höhle, J.: *Zur Theorie und Praxis der Unterwasser-Photogrammetrie*. Dissertationsschrift, VBAW, Reihe C, Heft 163, München, 1971
- [26] Rinner, K.: *Zweimedienphotogrammetrie*. Handbuch der Vermessungskunde, Metlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1972, S. 1527-1549

- [27] Girndt, U.: *Analytische Behandlung von einigen Grundaufgaben der Zweimedien-Photogrammetrie*. Schriften der Deutschen Geodätischen Kommission, Reihe C, Heft 196, 1973
- [28] Okamoto, A. und J. Höhle: *Allgemeines analytisches Orientierungsverfahren in der Zwei- und Mehrmedienphotogrammetrie und seine Erprobung*. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 40, 1972, S. 103-106
- [29] Baldwin, R.: *A proposed system for underwater photogrammetry from a manned submersible camera platform*. IAOP&RS, Heft 25, 1984, S. 49-58
- [30] Fryer, J.: *Underwater 35mm photogrammetric applications in Australia*. IAOP&RS, Heft 24, 1982, S. 167-174
- [31] Elfick, M. und J. Fryer: *Mapping in shallow water*. IAOP&RS, Heft 25, 1984, S. 240-247
- [32] Adams, L.: *Underwater Analytical Photogrammetry using non-metric Cameras*. IAOP&RS, Heft 26, 1982, S. 12-22
- [33] Fraser, C. und J. Fryer: *On the calibration of underwater cameras*. Photogrammetric Record, Heft 12, 1986, S. 73-75
- [34] Welham, L.: *The development of an underwater measuring capability using photogrammetric techniques*. IAOP&RS, Heft 25, 1984, S. 925-936
- [35] Newton, I.: *The current status of underwater photogrammetry*. IAOP&RS, Heft 25, 1984, S. 580-589
- [36] Masry, S. und S. Ritchie: *Different considerations in coastal mapping*. PE&RS, Heft 36, 1980, S. 521-528
- [37] Fryer, J. und H. Kniest: *Errors in depth determination caused by waves in throughwater photogrammetry*. Photogrammetric Record, Heft 11, 1986, S. 745-753
- [38] Linke, K.: *Untersuchungen zur Anwendungen der Zweimedien-Photogrammetrie für die Bestimmung von Wassertiefen in Flachwassergebieten*. Vermessungstechnik, Heft 33, 1985, S. 973-974
- [39] Okamoto, A.: *Wave influence in two-media photogrammetry*. PE&RS, Heft 37, 1982, S. 955-968
- [40] Okamoto, A.: *Orientation problems of two-media photographs with curved boundary surface*. PE&RS, Heft 50, 1984, S. 303-316
- [41] Beyer, R., R. Hössler und W. Wester-Ebbinghaus: *Numerische Photogrammetrie am Traggerüst der Wuppertaler Schwebebahn*. IAOP&RS, 25, Rio de Janeiro, 1984, S. 73-83

- [42] Blaustein, M.: *Controle photogrammetrique des appareils chaudronnes*. Bull. Soc. Franc. et. Teledect., Paris, 1984, S. 33-46
- [43] Borutta, H. und J. Peipe: *Photogrammetrische Erfassung von Deformationen im Automobilbau*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Karlsruhe, 1987, S. 326-338
- [44] Bozolato, G.: *Photogrammetrische Maßkontrolle an Großobjekten im Schiffbau*. Jenaer Rundschau, 36, Berlin, 1986, S. 181-183, 203
- [45] Szczechowski, B.: *The photogrammetric measurement of ship deformations*. IAOP&RS, Bd. 5, Hamburg, 1980, S. 714-723
- [46] Szczechowski, B.: *Photogrammetrische Messungen beim Stapellauf eines Schiffes*. Jenaer Rundschau, 29, Berlin, 1984, S. 52-53
- [47] Vogl, W.: *Fotogrammetrisch-dynamische Messungen an Schaufelradbaggern im Tagebau*. Neue Bergbautechnik, Leipzig, 1986, S. 373-376
- [48] Bullock, F. W.: *The photogrammetry of bubble chamber tracks*. Photogrammetric Records, Heft 7, 1971, S. 119-134
- [49] Phillips, J.: *Ein photogrammetrisches Aufnahmesystem zur Untersuchung dynamischer Vorgänge im Nahbereich*. Geodätisches Institut der Rheinisch Westfälischen technischen Hochschule Aachen, Heft 30, 1985
- [50] Maas, H.-G.: *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmeßtechnik*. Dissertationsschrift, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidg. Technischen Hochschule Zürich, Bd. 50, Zürich, 1992
- [51] Kamsties, K.-D.: *DV-Einsatz in Kraftwerksbau und -Betrieb, Genau im Bild*. Siemens Power Journal, Heft 2/98, 1998, S. 18-21
- [52] Meid, A. und H.-J. Przybilla: *Mehrmedien-Photogrammetrie im industriellen Einsatz. Beispiele und Lösungsstrategien*. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 57, 1989, S. 82-91
- [53] Przybilla, H.-J., R. Kotowsky, W. Meid und B. Weber: *Geometrical Quality Control in Nuclear Power Stations: A Procedure for High Precision Underwater Photogrammetry*. Firmenschrift der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerk AG, Essen, 1990
- [54] Buchtela, A. und G. Hell: *Photogrammetrische Bestimmung der Schiffsabdrift durch Querströmungen*. Vermessungswesen und Raumordnung, Bonn, 43, 1989, S. 358-365
- [55] Jakobi, O.: *Photogrammetric tracking of moving particle in running water*. IAOP&RS, Heft 23, 1980, S. 368-374

- [56] Moctezuma de la Barrera, J. L.: *Ein durchgängiges System zur computer- und roboterunterstützten Chirurgie*. Dissertationsschrift, Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der technischen Universität München, Bd. 99, Springer-Verlag, 1995
- [57] N. N.: *Ein patentiertes Meßrobotersystem macht die Qualitätskontrolle von Karosserien effizienter*. Roboter news, Firmenschrift der Kuka Roboter GmbH, Heft 4, Augsburg, 1999
- [58] N. N.: *Werft 2000. An der Quelle der Genaufertigung*. Firmenschrift der HDW-Kiel, 05.1996
- [59] Konecny, G. und G. Lehmann: *Photogrammetrie*. Walter de Gruyter-Verlag, Berlin, New York, 1984
- [60] Kraus, K.: *Photogrammetrie Bd. 1*. Inst. für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien, Ferd. Dümmler-Verlag, Bonn, 1996
- [61] Godding, R.: *Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme*. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 2, 1996, S. 82-90
- [62] N. N.: *Digitale Bildverarbeitung*. Firmenschrift der DBS GmbH, Bremen, 1999
- [63] Boecker, R.: *Problematik glänzender Oberflächen bei der 3-D-Topometrie*. ABW-Workshop 5a, Technische Akademie Esslingen, 1998
- [64] Brown, D.: *Decentering and distortion of lenses*, PE&RS, 1996, Seite 444-462
- [65] Lenz, R. und U. Lenz: *Calibration of a color CCD camera with 3000*2300 picture elements*. ISPRS Symposium Com. V. Close Range Photogrammetry meets Maschine Vision, Proc. SPIE 1395, Zürich, 1990, S. 104-111
- [66] Richter, U.: *Hardwarekomponenten für die Bildaufnahme mit höchster örtlicher Auflösung*. Tagungsband zur DGPF-Jahrestagung 1992 in Jena, DGPF, Berlin, 1993
- [67] Poitz, H.: *Die UMK SCAN von Carl Zeiss Jena, ein neues System für die digitale Industrie-Photogrammetrie*. Tagungsband zur DGPF-Jahrestagung 1992 in Jena, DGPF, Berlin, 1993
- [68] Holdorf, M.: *Höchstaflösende digitale Aufnahmesysteme mit Réseau Scanning und Line Scan Kameras*. Symposium Bildverarbeitung, Technische Akademie Esslingen, 1993, S. 45-51
- [69] Riechmann, W.: *Hochgenaue photogrammetrische on-line Objekterfassung*. Dissertationsschrift, Braunschweig, 1993

- [70] Bösemann, W., R. Godding und W. Riechmann: *Photogrammetric Investigation of CCD Cameras*. ISPRS Symposium Com. V Close Range Photogrammetry meets Maschine Vision, Proc. SPIE 1395, Zürich, 1990, S. 119-126
- [71] Lenz, R.: *Zur Genauigkeit der Videometrie mit CCD-Sensoren*. Informatik Fachbericht 180, 10. DAGM-Symposium, Zürich, 1988, S. 179-189
- [72] Beyer, H.: *Advances in Characterisation and Calibration of Digital Imaging Systems*. IAOP&RS, ISPRS Kongreß Washington, 1992, S. 545-555
- [73] Godding, R.: *Geometrische Kalibrierung und Orientierung digitaler Bildaufnahmesysteme*. Institut für Photogrammetrie und Bildverarbeitung, TU Braunschweig, 1997
- [74] Rüger, Pietschner und Regensburger: *Photogrammetrie - Verfahren und Geräte*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1978
- [75] Wester-Ebbinghaus, W.: *Photographisch-numerische Bestimmung der geometrischen Abbildungseigenschaften eines optischen Systems*. Optik Heft 3, 1980, S. 253-259
- [76] Conrady, A.: *Decentering Lens Systems*. Royal Astronomical Society, Monthly Notices, Vol. 79, 1919, S. 384-390
- [77] Fryer, J.: *Camera Calibration in Non Topographic Photogrammetry*. Handbook of Non Topographic Photogrammetry, 2. Auflage, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1989, S. 51-69
- [78] Fraser, C. und M. Shortis: *Variation of Distortion within the Photographic Field*. PE&RS, Vol. 58, Heft 6, 1992, S. 851-855
- [79] Gerdes, R., R. Otterbach und R. Kammermüller: *Kalibrierung eines digitalen Bildverarbeitungssystems mit CDD-Kameras*. Technisches Messen 60, Heft 6, 1993, S. 256-261
- [80] Bösemann, W.: *Ein photogrammetrisches Verfahren zur modellgestützten Objektrekonstruktion*. Dissertationsschrift, VBAW, Reihe C, Heft 442, München, 1984
- [81] Born, M. und E. Wolf: *Principles of Optics*. Pergamon Press, Oxford, 1964
- [82] Hering, E., R. Martin und M. Stohrer: *Physik für Ingenieure*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
- [83] Tilton, L. W. und J. K. Tayler: *Refractive index and dispersion of distilled water for visible radiation, at temperatures from 0° to 60°*. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Bd. 20, 1938
- [84] Rosen, J.: *The refractive indices of alcohol, water and their mixtures at high pressures*. Journal of the Optical Society of America, Bd. 37, 1947

- [85] Jerlov, N. G.: *Optical oceanography*. Elsevier oceanography series, 5, Amsterdam, 1968
- [86] McNeil, G.T.: *Optical fundamentals of underwater-photography*. Photogrammetrie, Rockville, Maryland, 1968
- [87] Meid, A.: *Wissensgestützte digitale Bildkoordinatenmessung in aberrationsbehafteten Meßbildern*. Dissertationsschrift, DGK, München, 1991
- [88] Schwenkel, D.: *Mathematisch-numerische Methoden zur Approximation und Abbildung der Systemgeometrie weitgespannter Flächen-Tragwerke*. Dissertationsschrift, DGK, München, 1978
- [89] Grosche, G.: *Teubner-Taschenbuch der Mathematik Teil 2*. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995
- [90] Wehausen, J.: *Vorlesung über ausgewählte Kapitel aus der Theorie der Wasserwellen*. Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Bericht Nr. 76, Hamburg, 1961
- [91] Lighthill, J.: *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, London, New York, Melbourne, 1978
- [92] Nettel, S.: *Wave Physics. Oscillations - Solitons - Chaos*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1994
- [93] Sorensen, R.-M.: *Basic Coastal Engineering*. International Thompson Publishing, New York, 1997
- [94] Niehl, E.: *Zur numerischen und analytischen Behandlung der Korteweg-deVries Gleichung*. Dissertationsschrift, Mathematische Fakultät der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1991
- [95] Watson, E. D.: *Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data*. Pergamon Press, Tarrytown, New York, 1992.
- [96] Späth, H.: *Spline-Algorithmen zur Konstruktion glatter Kurven und Flächen*. R. Oldenbourg Verlag, München/ Wien, 1973
- [97] Hardy, R.L.: *Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces*. Geophysical Research Letters, 8, S. 1905-1915, 1971
- [98] Sandwell, D. T.: *Biharmonic Spline Interpolation of GEOS-3 and SEASAT Altimeter Data*. Geophysical Research Letters, 2, S. 139-142, 1987
- [99] Grosche, G.: *Teubner-Taschenbuch der Mathematik Teil 1*. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1996
- [100] N. N.: *Manipulator-Trägersystem (MTS)*. Firmenschrift NOEL GmbH, Dept. V 29, Würzburg, 06/1987

- [101] Michaels, H. und C. Salander: *Handbuch Kernenergie - Kompendium der Energiewirtschaft und Energiepolitik*. VWEW-Verlag, Frankfurt am Main, 1995
- [102] N. N.: *VDI-Richtlinie 2861, Blatt 1-3: Kenngrößen für Industrieroboter*. Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Verlag, Düsseldorf, 05/1988
- [103] N. N.: *ISO 9283: Manipulating Industrial Robots – Performance Criteria and Related Test Methods*. International Organisation for Standardization, 1990
- [104] Denavit, J. und R. S. Hartenberg: *A Kinematic Notation For Lower Pair Mechanism Based on Matrices*. Applied Mechanics, Nr. 22, 1955, S. 215- 221
- [105] Rembold, U., B. O. Nnaji und A. Storr: *CIM: Computeranwendung in der Produktion*. Addison-Wesley Publishing Company, Bonn, Paris, 1994
- [106] Schwinn, W.: *Grundlagen der Roboterkinematik*. Verlag Liborius Schwinn, Schwalbach, 1994
- [107] Heinemann, B., W. Gerth und K. Popp: *Mechatronik: Komponenten - Methoden - Beispiele*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 1998
- [108] Paul, R. P.: *Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control*. MIT-Press, 1981
- [109] Kim, Mun-Sang: *Entwicklung eines Parameteridentifikationsverfahrens zur Erhöhung der absoluten Positioniergenauigkeit von Industrierobotern*. Carl Hanser Verlag, München, 1987
- [110] Gerstmann, U.: *Robotergerauigkeit. Der Getriebeeinfluß auf die Arbeits- und Positionsgenauigkeit*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
- [111] Gebler, B.: *Feed-forward control strategy for an industrial robot with elastic links and joints*. Lehrstuhl für Mechanik, TU München, CH2413-3/87 IEEE, 1987
- [112] Kuntze, H.-B.: *Regelungsalgorithmen für rechnergesteuerte Industrieroboter*. Regelungstechnik rt, Karlsruhe, Heft 7, 1994, S. 215-226
- [113] Pritschow, G., G. Spur und M. Weck: *Vorschubantriebe in der Fertigungstechnik*. Carl Hanser Verlag, München, 1989
- [114] Tönshoff, H. K. und K. Brillowski: *Rückbau kerntechnischer Anlagen - Anforderungen an Handhabungssysteme*. atomwirtschaft-atomtechnik (atw) Bd. XL, 1995, Nr. 10, S. 612-615
- [115] Dillmann, R. und M. Huck: *Informationsverarbeitung in der Robotik*. Springer-Verlag, Berlin 1991
- [116] Albus, J. S., H. G. McCain und R. Lumia: *NASA/NBS standard reference model for telerobot control system architecture (NASREM)*. US GPO, NBS Technical Note 1235, Washington DC, 1987

- [117] Kuntze, H.-B.: *Regelungsalgorithmen für rechnergesteuerte Industrieroboter*. Regelungstechnik rt, Karlsruhe, 1984, Heft 7, S. 215-226
- [118] Schäfer, W.: *OSACA und HÜMNOS - der Weg zu herstellerübergreifenden offenen Systemen*. VDW-Forschungsberichte: Trendwende in der Steuerungstechnik – Herstellerübergreifende offene Systeme, 1998, S. 7-18
- [119] Bartenschlager, J., H. Hebel und G. Schmidt: *Handhabungstechnik mit Robotertechnik*. Fried. Vieweg&Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden, 1998
- [120] Happacher, M.: *Der steinige Weg zur Offenen Steuerung*. Elektronik 24/1997, S. 68-74
- [121] Ahrens, A., G. Drunk und A. Langen: *Sensorschnittstellen für Robotersteuerungen*. Robotersysteme, Springer-Verlag, 1996, S. 37-45
- [122] Kreis W., G. Eckerth, T. Bönker und S. Albers: *Trends bei Industrierobotern und Handhabungstechnik*. VDI-Z Integrierte Produktion 139/1997, Nr. 9, S. 82-85