

Manfred Juretzko

**Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren
zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen**

München 2005

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren
zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen



Dissertation
zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät für Bauwesen
der Ruhr-Universität Bochum

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Manfred Juretzko

München 2005

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Marstallplatz 8 • D – 80 539 München

Telefon +49 - (0)89 - 23 031 -0 / -1113 • Telefax +49 - (0)89 - 23 031 -1283 / -1100

E-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://dgk.badw.de>

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Scherer

2. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Bertold Witte, Universität Bonn

Einreichung der Dissertation: 12.10.2004

Tag der mündlichen Prüfung: 17.12.2004

© 2005 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

Zusammenfassung

Vermessungsarbeiten an Bauwerken werden aus den verschiedensten Anlässen mit unterschiedlichen Ansprüchen an die Genauigkeit und mit vielfältigen Formen der Ergebnispräsentation durchgeführt. Dafür stehen im wesentlichen vier verschiedene Vermessungsmethoden zur Verfügung: das Handaufmaß, die Tachymetrie, die Photogrammetrie und das Laserscannen. Zwischen den einzelnen Methoden bestehen diverse Verbindungen, wobei die Tachymetrie eine Zentralstellung in diesem Verbindungsgeflecht einnimmt.

Durch den Einbau von Videokameras in ein reflektorlos messendes, motorisiertes Tachymeter wird die Zentralstellung der Tachymetrie gestärkt und insbesondere die Verbindung zwischen Tachymetrie und Photogrammetrie wird wesentlich ausgebaut. Das konzipierte und realisierte Vermessungssystem ist mehrstufig aufgebaut, um den verschiedenen Ansprüchen und Umständen bei der Bauwerksvermessung gerecht zu werden.

Basierend auf dem Einsatz eines reflektorlos messenden, servomotorgesteuerten Tachymeters wird die bidirektionale Verbindung zwischen Tachymeter und Steuerungs-PC genutzt, um Vermessungsabläufe zu automatisieren. Durch den Aufbau der Iterationsschleife „Messen-Berechnen-Positionieren“, die zwingend mit der Möglichkeit der reflektorlosen Entfernungsmessung und der Motorisierung des Tachymeters verbunden ist, können diverse Absteckungsaufgaben sowie die Aufnahme von Profilen automatisch durchgeführt werden.

In seiner endgültigen Ausbaustufe verfügt das System über drei Videokameras mit unterschiedlicher Brennweite: eine Weitwinkelkamera dient der Übersicht, eine Telekamera der Identifizierung von Details und eine Okularkamera der eigentlichen Anzielung. Ein Vorteil dieser Kombination ist die direkte, bildhafte Dokumentation tachymetrisch vermessener Punkte. Durch die Herstellung der Beziehung zwischen den Bildkoordinaten der verschiedenen Kameras und dem Achssystem des Tachymeters kann das Gerät nun per Mausclick über den Bildschirm des Steuerungs-PCs ausgerichtet werden. Des Weiteren stehen auf diese Weise jederzeit orientierte Bilder - aufgenommen mit der aktuellen Fernrohrstellung - zur Verfügung, die photogrammetrisch genutzt werden können. Die Integration tachymetrischer und photogrammetrischer Methoden ermöglicht es, ein Verfahren zu entwickeln, bei dem ein entstehendes 3D-Modell direkt bei der tachymetrischen Aufnahme mit photorealistischer Textur belegt wird, ohne dass eine gesonderte Zuordnung von Bild- und Objektkoordinaten vorgenommen werden muss.

Die Arbeit schließt mit Anwendungsbeispielen zur Verifizierung der Praxistauglichkeit des realisierten Systems und einer Zusammenstellung der durch die Video-Tachymetrie erweiterten Beziehungen zwischen den verschiedenen Vermessungsmethoden.

Abstract

Surveying and mapping of buildings is done for many various occasions with different demands in accuracy and multiple forms of final presentation. For this, there are essentially four different methods of measurement available: Manual measurement, tacheometry, photogrammetry, and laser scanning. There are diverse relations between these methods, tacheometry being in the centre of this relational network.

Installing video cameras in a motorized reflectorless total station strengthens the central position of tacheometry and enhances particularly the connection between tacheometry and photogrammetry. The surveying system designed and put into practice here is configured multi-level, in order to meet different demands and circumstances in the surveying of buildings.

Based on the application of a motorized prismless total station, the bi-directional connection between tacheometer and pc is used to automate. By constructing an iterating loop „surveying - evaluating - positioning“ which is obligatory linked with the possibility of prismless distance measurements and the motorization of the tacheometer, diverse tasks of staking out as well as surveyings of profiles can be conducted automatically.

In the final stage of extension the system disposes of three video cameras with different focal length: a wide angle camera provides an overview, a tele-camera identifies details, and an eyepiece camera serves for the actual sighting. An advantage of this combination is the direct, pictorial documentation of tacheometrically measured points. By creating a connection between the image coordinates of the various cameras and the axial system of the tacheometer, the device can now be adjusted per mouse click via the screen of the controlling pc. Furthermore, thus always oriented images of the current position of the telescope are available, which can be used for photogrammetric purposes. The Integration of tacheometric and photogrammetric methods enabled the development of a procedure for rendering a three-dimensional model with photorealistic texture in realtime during the tacheometric survey. The separate referencing of image and object coordinates is not necessary.

The paper ends with examples of use for the verification of the suitability for use of the system and with a compilation of the relationships between different measurement techniques augmented by video-tacheometry.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	7
1.1	Ansprüche an ein integrales Vermessungssystem	7
1.2	Ziel der Arbeit	8
1.3	Untersuchungsschwerpunkte	8
2	Analyse	8
2.1	Interaktionsanalyse „Bauwerksvermessung“	8
2.1.1	Motivation für eine Vermessung	10
2.1.2	Objekt	10
2.1.3	Ergebnisse	10
2.1.4	Aufnahmemethoden	11
2.1.5	Vergleich der Aufnahmemethoden	13
2.1.6	Beziehungen im Interaktions-Modell	13
2.1.7	Ergebnis der Interaktionsanalyse	14
2.2	Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden	14
2.3	Konzept zum Aufbau eines modularen Vermessungssystems	15
2.4	Zusammenfassung des Kapitels	16
3	„Intelligente“ Tachymetrie	17
3.1	Das Leica TCRM 1102	17
3.1.1	Begriffserläuterung „reflektorlos“	17
3.1.2	Funktionsprinzip der Distanzmessung	17
3.1.3	Untersuchung des Distanzmessers	18
3.1.4	Ergebnisse der Untersuchung des Distanzmessers	22
3.2	Absteckung	22
3.2.1	Begriffserklärungen	23
3.2.2	Übertragung eines 3D-Entwurfs in die Örtlichkeit	24
3.2.3	Übertragung eines 2D-Entwurfs in die Örtlichkeit	29
3.2.4	Tabellarische Darstellung tachymetrischer Absteckungsaufgaben	32
3.3	Scannen	33
3.3.1	Ebenendefinition	34
3.3.2	Linienscan	34
3.3.3	Beispiele für Detaillösungen beim Linienscannen	36
3.3.4	Rasterscan	37
3.3.5	Bewertung des Tachymeter-Scannens	38
3.4	Sonderlösungen zur Koordinatenbestimmung	39
3.4.1	Physisch nicht existenter Punkt als Geradenschnitt	39
3.4.2	Verdeckter Punkt	40
3.4.3	Kanten	42
3.4.4	Mangelnde Reflexionseigenschaften	43
3.5	Zusammenfassung des Kapitels	44
4	Video-Tachymetrie	45

4.1	Stand der Technik.....	45
4.1.1	Serien-Produkte	45
4.1.2	Spezial-Konstruktionen.....	46
4.1.3	Systeme zur Zielpunkterfassung und –verfolgung (ATR-Funktion).....	48
4.1.4	Das Bochumer System.....	48
4.1.5	Tabellarische Zusammenfassung	49
4.2	Interne Kameras	49
4.2.1	Beschreibung der Hardware-Sensor-Techniken	50
4.2.2	Kameramodule.....	51
4.2.3	Kalibrierung und Justierung der Kameras.....	54
4.2.4	Unterschied Bildhauptpunkt / virtuelles Strichkreuz	59
4.2.5	Geometrischer Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten und Theodolit-Richtungen.....	61
4.2.6	Abweichung der Kamerabilder von der Idealgeometrie	68
4.2.7	Zusammenfassende Darstellung der Kalibrierrouinen.....	72
4.3	Integration von Bilddaten.....	73
4.3.1	Ebene Projektivtransformation (Vierpunkt-Entzerrung).....	73
4.3.2	Orthophotos	78
4.3.3	Orientierung externer Bilder zur parametrischen Entzerrung.....	80
4.3.4	Tachymetersteuerung mit Hilfe externer Bilder.....	82
4.3.5	Orientierung der Einbaukameras	84
4.3.6	Belegung eines Objektes mit Bildinformation.....	87
4.3.7	Dreiecksbelegung mit Hilfe der parametrischen Entzerrung	89
4.3.8	Direktmodellierung mit dem Video-Tachymeter.....	91
4.3.9	VRML-Darstellung des Modells.....	92
4.3.10	Zusammenfassende Wertung zur „Integration von Bilddaten“.....	95
4.4	Zusammenfassung des Kapitels	96
5	Verifizierung der Praxistauglichkeit des realisierten Systems	97
5.1	Festpunktnetz	97
5.1.1	Beispielnetz Pantheon.....	97
5.1.2	Punktauswahl.....	98
5.1.3	Vermarkungen	99
5.1.4	Durchführung der Messung	101
5.1.5	Dokumentation der Messwerte und Zielpunkte	102
5.1.6	Auswertung der Messung	102
5.1.7	Bewertung der Methode.....	105
5.2	Anwendungsbeispiel Pantheon.....	105
5.2.1	Aufmaß der Kassetten.....	105
5.2.2	Profile	106
5.2.3	Formbestimmung der Kuppel	106
5.3	Anwendungsbeispiel Fassadenerneuerung.....	109
5.3.1	Vergleich der Vermessungsmethoden für die Fassadenaufnahme.....	109
5.3.2	Tachymetrische Fassadenvermessung	110

5.3.3	Modellierung.....	111
5.3.4	Absteckung	111
5.3.5	Bildüberlagerung	112
5.3.6	Bewertung der Methode.....	113
5.4	Zusammenfassung des Kapitels	113
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	114
6.1	Neue Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden	114
6.2	Das dreistufige modulare Konzept	115
6.3	Ausblick	116
7	Literaturverzeichnis	117

1 Einleitung und Zielsetzung

Ein Bild sagt mehr als tausend Worte. Unser Alltag wird immer mehr von bildlichen Darstellungen dominiert. Insbesondere die steigende Leistungsfähigkeit der PCs und das Internet haben in den letzten Jahren die (digitale) Bilderflut potenziert. Webcams, Photo-Handys und 6-Megapixel-Kameras im Amateur-Bereich markieren den derzeitigen Stand einer sich rasant fortentwickelnden Technik. Doch nicht nur bei der Erfassung, Bearbeitung und Verbreitung der Bilddaten hat sich in den letzten Jahren ein Wandel vollzogen. Immer mehr rückt heutzutage die Visualisierung von Planung und Realität in den Vordergrund.

Wie im Titel bereits hervorgehoben, befasst sich die vorliegende Arbeit auf verschiedene Weise mit der Erweiterung der reflektorlosen Tachymetrie um Bilddaten. Dabei wird zum einen die Erfassung und Nutzung der Bilddaten von Kameras erforscht, die in das Tachymeter eingebaut sind. Zum anderen wird untersucht, wie sich damit die Verbindungen der Tachymetrie zu anderen Vermessungsmethoden, insbesondere der Photogrammetrie, vertiefen lassen, um daraus ein integrales Vermessungssystem zur Bauwerksaufnahme zu entwickeln.

1.1 Ansprüche an ein integrales Vermessungssystem

Die Ansprüche an ein Vermessungssystem zur Bauwerksaufnahme sind vielfältig. Sie hängen in erster Linie davon ab, aus welchem Grund die Vermessung erfolgt. Die Bauwerksaufnahme kann z.B. dazu dienen, ein Gebäude in eine städtische Planung einzubeziehen, sie kann die Grundlage für einen Umbau oder eine Sanierung des Gebäudes sein, sie kann unter denkmalpflegerischen Gesichtspunkten erfolgen oder sie kann dazu dienen, im Rahmen der Bauforschung die Entstehungsgeschichte des Gebäudes zu entschlüsseln. Daraus resultieren verschiedene Anforderungen an die Darstellungsform und die Detailgenauigkeit.

Für die städtische Planung z.B. ist ein stark generalisiertes, auf wenige geometrische Grundformen reduziertes, texturiertes 3D-Modell geeignet. Dabei spielt photorealistisches Rendering eine zunehmende Rolle. Beim Umbau oder bei der Sanierung eines Gebäudes werden in erster Linie Grundrisse und Fassadenpläne im Maßstab 1:100 gefordert. Diese können als solche einzeln aufgenommen, oder alternativ aus einem 3D-Modell abgeleitet werden. Dabei hat das 3D-Modell vor allem den Vorteil der Gesamtdarstellung des Objekts und dessen Planungsalternativen aus beliebig wählbaren Perspektiven. Im Rahmen der Bauforschung werden darüber hinaus Detailaufnahmen in wesentlich größerem Maßstab gefordert, mit denen sich Deformationen beschreiben und Befunde zentimetergenau lokalisieren lassen. Von besonderem Interesse ist auch hierbei die Einbeziehung von Bildern in das geometrische Gesamtsystem des Bauwerks.

Ähnlich vielfältig wie die Gründe für die Bauwerksaufnahme sind die aufzunehmenden Gebäudetypen. Sie reichen z.B. von standardisierten Werkshallen in Modulbauweise über Kirchen, deren ursprünglicher architektonischer Entwurf noch weitgehend vorhanden ist, vielfach umgebauten Stadthäusern bis hin zu den Ruinen antiker Bauwerke.

Den verschiedenen Intentionen zur Aufmessung und den unterschiedlichen Gebäudetypen stehen im wesentlichen vier verschiedene Vermessungsmethoden gegenüber, die zum Teil konkurrierend eingesetzt werden, die sich aber auch miteinander kombinieren lassen:

- Das Handaufmaß, bei dem mit einfachen Gerätschaften wie Messband, Lot, Winkelprisma und Nivellier in der Regel zweidimensionale Pläne entstehen, die ggf. zu CAD-Zeichnungen aufbereitet werden können.
- Die Photogrammetrie, bei der durch Messung in einem oder mehreren Bildern Orthophotos, Fassadenpläne oder komplette, photorealistische Gebäudemodelle abgeleitet werden können.
- Die Tachymetrie, bei der durch die polare Messung von Richtungen und Entfernung die dreidimensionale Lage von Objektpunkten bestimmt und diese dann zu Gitter- bzw. Flächenmodellen zusammengefasst werden können.
- Das Laserscannen, bei dem ähnlich wie bei der Tachymetrie (polar durch Messung von Richtungen und Entfernung) eine sehr hohe Anzahl von Oberflächenpunkten des Objektes erfasst wird. Diese Punktwolke kann zum Beispiel direkt zur Formbeschreibung des Objekts genutzt werden. In der Regel werden daraus aber durch Flächendetektion und –verschneidung Flächenmodelle abgeleitet.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziele der vorliegenden Arbeit sind die Konzeption, die Entwicklung und die Erprobung eines Systems, das die Vorteile der bisher eher einzeln genutzten, bestenfalls nebeneinander eingesetzten verschiedenen Vermessungsmethoden integriert und das somit eine sehr große Bandbreite der Anforderungen seitens der unterschiedlichen Intentionen für eine Vermessung abdeckt, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Genauigkeitsforderungen und Bauwerkstypen.

Zwingende Voraussetzung für die Erforschung des optimalen Zusammenspiels der Systemkomponenten war der begleitende Aufbau des Programmsystems TOTAL (Tachymetrische Objektorientierte Teil-Automatische Laservermessung), welches ein reflektorlos messendes motorisiertes Tachymeter steuert, das mit Videokameras ausgerüstet wurde, und das die erfassten Geometrie- und Bilddaten zu Vermessungsergebnissen unterschiedlichster Art aufbereitet.

1.3 Untersuchungsschwerpunkte

Vor der Konzeption des integralen Vermessungssystems steht die Analyse des Gesamtvorgangs „Bauwerksvermessung“ von der Motivation für eine Vermessung über die Objektbeschaffenheit und die Aufnahmemethoden bis hin zu den angestrebten Ergebnissen. Es ist zu untersuchen, welche Verbindungen zwischen den einzelnen Aufnahmemethoden bestehen, wie diese bislang genutzt werden und welche weiteren Verknüpfungen möglich und sinnvoll sind.

Bei der Konzeption des Systems soll nach Wegen gesucht werden, bestehende und erweiterte Verbindungen in einem einzigen System zu integrieren, das im wesentlichen auf der Tachymetrie basiert. Es soll auch untersucht werden, welche Vermessungsaufgaben vom System (teil-)automatisch durchgeführt werden können und welche häufig auftretenden Schwierigkeiten bei der Bauwerksvermessung durch integrierte Hilfsprogramme einfach gelöst werden können. Mit der Bezeichnung „intelligente“ Tachymetrie soll verdeutlicht werden, dass das Vermessungssystem in der Lage ist, bei bestimmten Vermessungsaufgaben selbständig zu agieren.

Der Schwerpunkt der Forschung liegt jedoch in der Integration interner und externer Kameras in das (im wesentlichen tachymetrische) Vermessungssystem. Damit wird insbesondere die Verbindung Tachymetrie – Photogrammetrie wesentlich vertieft, was im Begriff „Video-Tachymetrie“ im Titel der Arbeit zum Ausdruck kommt.

Anhand verschiedener Projekte wird zum einen die Funktionsfähigkeit des Systems nachgewiesen, zum anderen werden neuartige Vorgehensweisen bei der Anlage von Vermessungsfestpunktnetzen, der Bauwerksaufnahme und der Absteckung an Bauwerken aufgezeigt, die auf der Synthese verschiedener Vermessungsverfahren und der Nutzung der „intelligenten“ Tachymetrie beruhen.

2 Analyse

In diesem Kapitel werden innerhalb einer Interaktionsanalyse die Zusammenhänge der verschiedenen Faktoren bei der Vermessung eines Objektes analysiert. Es folgt eine kurze Zusammenstellung der verschiedenen üblichen Vermessungsmethoden und eine Analyse der Verbindungen zwischen diesen Methoden. Letztendlich wird ein Konzept für die Entwicklung eines Vermessungssystems vorgestellt, das insbesondere die Verbindung zwischen Tachymetrie und Photogrammetrie wesentlich erweitert.

2.1 Interaktionsanalyse „Bauwerksvermessung“

Mit dem Begriff „Bauwerksvermessung“ soll verdeutlicht werden, dass es sich dabei um Vermessungsarbeiten an einem Bauwerk handelt und sich damit von anderen Bereichen wie der Ingenieur- oder der Landesvermessung abgrenzt. Die Interaktionsanalyse „Bauwerksvermessung“ untersucht das Zusammenspiel zwischen der Motivation für eine Vermessung, dem Objekt, das sich in einem bestimmten räumlichen Umfeld befindet, den Vermessungsmethoden und den angestrebten Ergebnissen der Vermessung. Eine grafische Darstellung der Beziehungen zwischen den angesprochenen Punkten liefert Abb. 2-1.

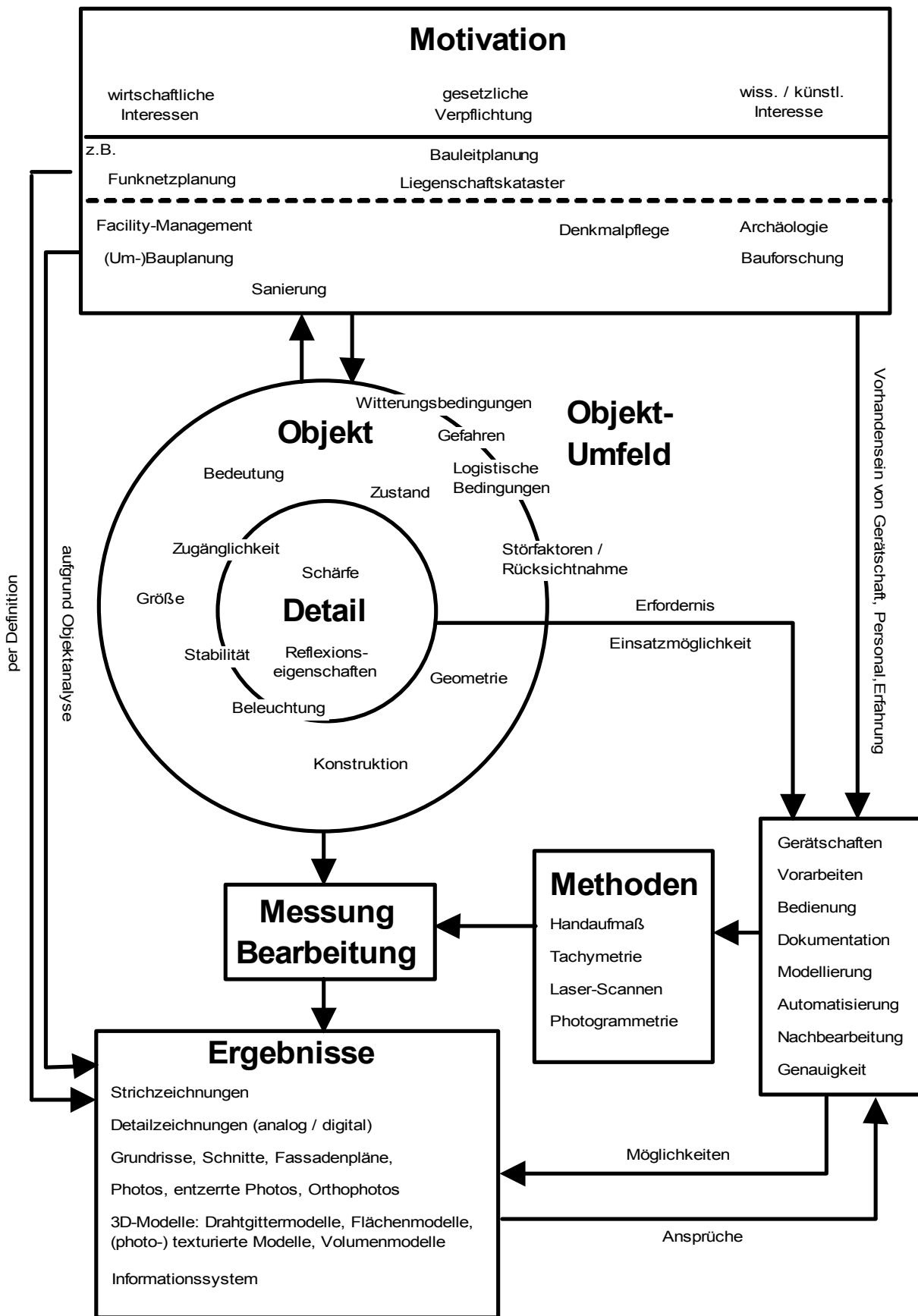


Abb. 2-1: Interaktionsanalyse "Bauwerksvermessung"

2.1.1 Motivation für eine Vermessung

Die Motivation für eine Vermessung kann auf wirtschaftlichen Interessen, gesetzlichen Verpflichtungen oder wissenschaftlich / künstlerischen Interessen beruhen.

Ein direktes wirtschaftliches Interesse liegt dann vor, wenn die Vermessung bestimmte Projekte erst ermöglicht oder sich kostensenkend auswirkt. Als Beispiele seien hier die Gebäudeaufnahmen für die Funknetzplanung, für (Um-)Bauplanungen oder für das Facility-Management aufgeführt.

Gesetzliche Verpflichtungen sind zum Beispiel die Vermessungsarbeiten für die Bauleitplanung und die Ausführungsplanung in Form des Lageplanes zum Baugesuch. Geht man davon aus, dass die gesetzlichen Vorschriften auf der Daseinsvorsorge und dem Schutz vor Fehlplanungen beruhen, sind sie i.d.R. eng mit wirtschaftlichen Interessen verbunden.

Wenn Vermessungsarbeiten aus wissenschaftlich / künstlerischem Interesse erfolgen, sind insbesondere die Archäologie und die Bauforschung zu nennen.

Die verschiedenen Anwendungsbereiche der Vermessung sind i.d.R. mit bestimmten Genauigkeitsanforderungen verbunden, die in [SCHERER, 2001b] tabellarisch aufgeführt werden.

2.1.2 Objekt

Das zu vermessende Objekt besteht aus Details und ist in ein räumliches Umfeld eingebettet. Charakteristika des Objektes selbst sind z.B. seine Größe, Form, Zustand, Konstruktion, Alter, Funktion, Stabilität und Beleuchtung.

Für das Objekt und sein Umfeld gelten bestimmte Witterungsbedingungen, es bestehen bestimmte Gefahren für und durch das Vermessungspersonal, es herrschen bestimmte logistische Bedingungen für den Einsatz von Personal und Gerätschaft, insbesondere bei Objekten mit Publikumsverkehr und Produktionsstätten gibt es Störungen für und durch die Vermessungsarbeiten.

Zum einen lässt sich ein Objekt durch geometrische Elemente beschreiben: Volumina, Flächen, Linien, Punkte. Bei einer Vermessung wird ein Objekt i.d.R. durch Generalisierung (Vereinfachung und Auswahl) in diese Elemente zerlegt und letztendlich durch die Vermessung von Punkten so erfasst, dass die geometrischen Elemente zu einem Modell zusammengesetzt werden können.

Zum anderen besteht ein Objekt aus konstruktiven (z.B. Stahlträger), funktionalen (z.B. Türrahmen) und schmückenden (z.B. Steinrosette) Elementen. Bei einem Großteil der Vermessungsarbeiten kommt es gerade auf die Erfassung dieser Elemente an. Auch hier erfolgt die Generalisierung des Objektes durch Vereinfachung und Auswahl der Elemente so, dass das Objekt als Modell rekonstruiert werden kann. Auch hier werden die Elemente durch bestimmte Punkte repräsentiert.

Mit der Detaillierung eines Objektes einher geht die Erfassung von Attributen der aufgenommenen Elemente. Je nach Intention der Vermessung kann hierin, insbesondere beim Aufbau eines Informationssystems (siehe „Ergebnisse“), der Hauptaufwand der Arbeit liegen.

Die objektrepräsentierenden Punkte selbst haben bestimmte physische Eigenschaften, die einen Einfluss auf die Vermessung haben können. Sie können auf der Oberfläche oder im Inneren eines Bauteils liegen, sie können empfindlich gegenüber Berührungen sein, sie können auf gut oder schlecht reflektierenden Oberflächen liegen, sie können gut oder schlecht erreichbar sein.

2.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse einer Bauwerksvermessung lassen sich als Zeichnungen, Photos und 3D-Modelle darstellen.

Bei den Zeichnungen kann es sich technisch um Unikate auf Karton, um reproduzierbare Strichzeichnungen auf Folie oder um digitale Zeichnungen handeln.

Inhaltlich kann man, insbesondere bei der Gebäudevermessung, zwischen Grundrissen, Schnitten, Fassadenplänen und Detailplänen unterscheiden.

Photographische Ergebnisse sind in erster Linie entzerrte Photos, Orthophotos und daraus zusammengesetzte Photo-pläne, die mit zeichnerischen Elementen versehen sein können.

Bei den 3D-Modellen werden im Weiteren nur die digitalen Modelle beschrieben. Auf physische Modelle aus Holz, Karton oder Kunststoff wird nicht weiter eingegangen. Digitale 3D-Modelle untergliedern sich in Drahtgittermodelle, Flächenmodelle, (photo-) texturierte Modelle und Volumenmodelle.

Zu den Ergebnissen zählen auch die Verknüpfungen zu beschreibenden Dokumenten, insbesondere bei digitalen Zeichnungen und Modellen. Somit können je nach Anspruch unterschiedlich strukturierte und detaillierte Informationssysteme aufgebaut werden wie ein Gebäudeinformationssystem (Gebis) oder ein Denkmal-Information-System (MIS = Monument-Information System). Die höchste anzustrebende Stufe eines Informationssystem bildet ein Monitoring System mit dem Ziel, bei besonders wertvoller Substanz rechtzeitig auch zukünftige Entwicklungen zu erfassen, z.B. zeitliche Veränderungen zu erkennen, um eventuell gegenzusteuern [CCES, 2004].

2.1.4 Aufnahmemethoden

Für die Bauwerksvermessung werden im wesentlichen folgende Methoden angewandt: Das Handaufmaß, die Tachymetrie, die Photogrammetrie sowie in jüngster Zeit auch das Laserscannen.

Bei jeder Vermessungsmethode gibt es bestimmte Gerätschaften, Vorarbeiten und Arbeitsschritte bei der Punkterfassung und Nachbereitung, sowie bestimmte Formen für die Dokumentation der Vermessungsergebnisse. Außerdem stehen verschiedene Möglichkeiten der Modellierung zur Verfügung. Es gibt vereinzelt Möglichkeiten zur Automatisierung der Vermessungsabläufe. Die Vermessungsmethoden führen zu Ergebnissen mit unterschiedlichen Genauigkeiten. Eine ausführlichere Beschreibung der Vermessungsmethoden findet sich z.B. in [WEFERLING, 2002]. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden sind in [SCHERER, 2001b] tabellarisch zusammengestellt.

Handaufmaß

Beim Handaufmaß werden mittels einfacher Messwerkzeuge wie Bandmaß oder elektronischem Distanzmesser, Winkelprisma, Fluchtstab, Schnurlot, Wasserwaage, Hand-Winkelmesser und Winkelprisma charakteristische Bauwerkspunkte durch direkte Messung in eine geometrische Beziehung zueinander gebracht. Die Datenerfassung erfolgt dabei nach den gleichen Regeln, die später bei der zeichnerischen Darstellung des Objektes angewendet werden: Mittels (rechter) Winkel und Streckenmessung wird ein Grundsystem aufgebaut, das nach und nach weiter verdichtet wird.

Je nach Umfang der Vermessung werden die Phasen des Aufbaus eines Grundsystems und der Detailvermessung voneinander getrennt. Die Dokumentation der Messwerte kann hierbei entweder in Form einer unmaßstäblichen Skizze mit Maß- und (Recht-)Winkelangaben oder direkt als maßstäbliche Zeichnung erfolgen. Die direkte maßstäbliche Zeichnung bietet die Möglichkeit der porträtierenden Zeichnung von Details [MADER, 2001]. Bei der Datenerfassung in Form einer unmaßstäblichen Skizze erfolgt die Weiterverarbeitung durch Kartierung auf reproduzierbaren Materialien oder durch Bearbeitung in einem CAD-System.

Werden statt mechanischer Streckenmessgeräte registrierende, elektrooptische Geräte wie z.B. der DISTO der Firma Leica-Geosystems in Verbindung mit einem Notebook eingesetzt, so können direkt vor Ort CAD-Zeichnungen entstehen, die eine Vollständigkeits- und Plausibilitätsprüfung erlauben.

Die absolute geometrische Genauigkeit dieser Methode hängt stark von der Ausdehnung des Objektes ab und liegt im Zentimeter- bis Dezimeterbereich. Die Nachbargenauigkeit einzelner Details kann dabei wesentlich höher sein und hängt in entscheidendem Maße von der Fähigkeit und der Erfahrung des Messenden ab. Der Vorteil liegt neben den geringen Kosten für die Messwerkzeuge im engen Kontakt des Messenden zum Objekt. Dieser ist während der Messung in der Lage, das Objekt mit allen Sinnen zu erfahren und zu „begreifen“. Nachteile liegen in der Automationsunfreundlichkeit, den Lücken in der automatischen Datenverarbeitung und der ungünstigen Fehlerfortpflanzung dieser Methode. Nachteilig ist auch, dass alle Messpunkte zugänglich sein müssen, was oftmals einen aufwändigen Gerüstbau bedingt.

Tachymetrie

Bei der Tachymetrie handelt es sich um ein Vermessungsverfahren, bei dem die Objektpunkte durch polare Richtungs- und Entfernungsmessung mit einem Vermessungsinstrument (Tachymeter) bestimmt werden. Tachymeter bzw. Totalstationen sind Winkelmessinstrumente mit elektronischem Abgriff der Horizontalrichtung und des Vertikalwinkels und der Möglichkeit, Strecken auf elektrooptische Weise zu messen. Durch die drei Bestimmungselemente (zwei Winkel, eine Strecke) können die drei kartesischen Koordinaten des Punktes berechnet werden. Diese Raumkoordinaten beziehen sich primär auf den jeweiligen Standpunkt und die Orientierung des Tachymeters (lokales System). Durch

Messung zu bekannten Anschlusspunkten eines übergeordneten Systems können die lokalen Raumkoordinaten in Koordinaten dieses Systems transformiert werden.

Dieses Vermessungsverfahren beruht auf der langen Tradition der polaren Vermessung mit Theodoliten und optisch / mechanischer Streckenmessung, die sich seit Anfang der siebziger Jahre durch die Integration elektronischer Entfernungsmesser in das Vermessungsinstrument zum Standard-Aufnahmeverfahren im Vermessungswesen entwickelt hat. Benötigten die früheren Tachymeter für die Entfernungsmessung ein Reflektorprisma, das im Zielpunkt aufgehalten wurde, so ist es seit Mitte der neunziger Jahre auch möglich, Strecken bis etwa 200 m ohne Reflektorprisma mit geodätischer Genauigkeit zu messen [ZEISKE, 1999]. Dies erlaubt es, auch unzugängliche Punkte auf einfache Weise zu bestimmen. Da die Messwerte in digitalisierter Form vorliegen, können diese auf einfache Weise abgespeichert und weiterverarbeitet werden. Die Weiterverarbeitung kann entweder im Vermessungsgerät selbst oder in angeschlossenen Geräten erfolgen. Mit Hilfe entsprechender Berechnungs-, Zeichen- und Konstruktionsprogramme können die Messwerte unter Beibehaltung eines geschlossenen Datenflusses in Zeichnungen und Modelle umgesetzt werden.

Die Vorteile der Tachymetrie liegen in der außerordentlichen Flexibilität, der sehr hohen absoluten Genauigkeit auch bei ausgedehnten Objekten und im integrierten Datenfluß bis zum Endprodukt. Die Nachteile liegen in den, verglichen mit dem Handaufmaß, höheren Anschaffungskosten für die technische Ausrüstung.

Laserscannen

Terrestrische Laserscanner, die dem Vermessungsingenieur seit ca. fünf Jahren zur Verfügung stehen, messen ähnlich wie Tachymeter Richtungen und Strecken zu Objektpunkten. Im Unterschied zur Tachymetrie werden allerdings keine ausgesuchten einzelnen Punkte bestimmt, sondern eine (zunächst nicht orientierte) Punktwolke. Die typische Punktwolke eines 360°-Scans beinhaltet bis zu 1 Mio. Punkte und benötigt zur Aufnahme nur wenige Minuten. Ähnlich wie bei der Tachymetrie können auch hier die einzelnen Standpunktsysteme z.B. durch das Scannen bekannter Zielmarken oder Zielkörper miteinander verknüpft werden.

Bei der Weiterverarbeitung der Messwerte werden aus der Punktwolke teilautomatisch entweder (ausgleichende) Regelkörper extrahiert oder es erfolgt eine Oberflächengenerierung durch Dreiecksvermaschung der Messpunkte. Neben den Richtungen und Strecken können auch radiometrische Informationen der gemessenen Punkte registriert werden. Das Funktionsprinzip und die Anwendungsmöglichkeiten des Laserscannens sind ausführlich in [KERN, 2003] beschrieben.

Die Vorteile dieser Methode sind die schnelle Arbeitsweise bei der örtlichen Aufnahme und die ungeheure Anzahl an Informationen, die in kürzester Zeit zu Stande kommt. Durch die große Anzahl der gemessenen Punkte können insbesondere unregelmäßige Formen sehr gut erfasst werden. Die unselektierten Informationen können zu einem späteren Zeitpunkt auch unter anderen Gesichtspunkten ausgewertet werden als ursprünglich angedacht. Der Nachteil ist, neben dem sehr hohen Anschaffungspreis und der Unhandlichkeit der Geräte, die aufwändige Nachbereitung der Daten, um daraus die typischen Vermessungsergebnisse wie Strichzeichnungen oder punkt-, linien-, flächen- und volumenbasierte 3D-Modelle zu generieren.

Photogrammetrie

Bei diesem Verfahren werden Punkte, Linien und Flächen von Objekten durch Messungen in Photos bestimmt. Dabei nutzt man die Regeln der projektiven Geometrie: Sind der Kamerastandpunkt, die Kameraorientierung und das Abbildungsverhalten einer Kamera bekannt, so ist es möglich, ein Objekt durch Messung in zwei Photos, die aus unterschiedlichen Positionen aufgenommen wurden, durch Strahlenschnitte zu rekonstruieren. Unter Verwendung tachymetrisch bestimmter Passpunkte ist es möglich, Teilmodelle des Objektes miteinander zu verbinden und in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu überführen (Mehrbild-Photogrammetrie). Aus dem so entstehenden digitalen Modell lassen sich die verschiedensten Produkte ableiten.

Eine andere Variante stellt die Einbild-Photogrammetrie dar: Nach den Regeln der projektiven Geometrie lassen sich projektiv verzerrte Ebenen mit Hilfe von vier bekannten Punkten entzerren. Auf diese Weise entstehen maßstäbliche Photos von Ebenen des Objektes, die zu maßstäblichen Photoplänen zusammengesetzt werden können. Diese können schon alleine ein Ergebnis der Vermessung darstellen, sie können aber auch die Grundlage für eine zeichnerische Ausarbeitung sein.

Sofern die Geometrie des abgebildeten Objektes sowie die Position und die Aufnahmerichtung der Kamera bekannt sind, kann ein Photo mit Hilfe der differentiellen Entzerrung so umgebildet werden, dass ein maßstäbliches Abbild des Objektes entsteht (Orthophoto).

Die Vorteile der Photogrammetrie liegen in der sehr schnellen Informationsbeschaffung und in der bildlichen Dokumentation des Objektes. Ein weiterer Vorteil ist die Tatsache, dass die Photos ggf. auch unter anderen Gesichtspunkten ausgewertet werden können als ursprünglich angestrebt. Von Nachteil ist die fehlende Möglichkeit von

Plausibilitäts- und Vollständigkeitskontrollen vor Ort und die Forderung nach günstigen Schnitten, also Objektsichtbarkeit von verschiedenen Standpunkten aus.

Eine umfassende Darstellung der Methoden der für die Bauwerksvermessung wichtigen terrestrischen Photogrammetrie liefert [LUHMANN, 2000].

2.1.5 Vergleich der Aufnahmemethoden

Ein Vergleich der Aufnahmemethoden zeigt deutliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede. So benötigen alle Methoden (zumindest bei größeren Objekten) ein übergeordnetes Festpunktfeld, in dem die einzelnen Vermessungsergebnisse zusammengeführt werden. Auch lassen sich (bei entsprechend unterschiedlichem Aufwand) aus allen Methoden Zeichnungen und 3D-Modelle ableiten.

Wesentliche Unterschiede zeigen sich in der technischen Ausrüstung und im Datenfluß. Vor allem aber zeigt sich ein gravierender Unterschied darin, ob die objektbeschreibenden Punkte direkt (Handaufmaß, Tachymetrie) oder zu einem späteren Zeitpunkt (Laserscannen, Photogrammetrie) selektiert werden.

2.1.6 Beziehungen im Interaktions-Modell

Zwischen der Motivation zur Durchführung der Vermessung, dem Objekt, den Aufnahmemethoden und den Ergebnissen bestehen zahlreiche Beziehungen, die insbesondere die Wahl der Methode bestimmen. Im Zentrum der Überlegungen steht das Objekt.

Objekt \leftrightarrow Motivation:

Zwischen der Motivation und dem Objekt besteht eine enge Wechselwirkung. Einerseits kann das Vorhandensein eines bestimmten Objekts von sich aus die Motivation für eine Vermessung sein. Dies gilt insbesondere bei gesetzlichen Verpflichtungen wie der Gebäudeeinmessung nach dem Katastergesetz, kann aber auch aus der überragenden wissenschaftlich / künstlerischen Bedeutung oder der dringenden Sanierungsbedürftigkeit eines Objektes herrühren. Andererseits kann eine übergeordnete Planung das Objekt zum Gegenstand der Untersuchung machen, so z.B. die Funknetzplanung, Bebauungsplanung und (Um-) Bauplanung.

Objekt \rightarrow Methoden:

Die Charakteristika des Objekts, seines Umfeldes und seiner Details machen (jenseits etwaiger wirtschaftlicher Überlegungen) bestimmte Vorgehensweisen erforderlich und können andere ausschließen.

Motivation \rightarrow Ergebnisse:

Mit der Motivation zur Vermessung eines Objektes ist die Erwartung an bestimmte Ergebnisse verbunden. Diese können weitgehend unabhängig vom Objekt sein, wie z.B. in der Bauleitplanung oder aber sehr stark von diesem abhängen, wie z.B. in der Bauforschung.

Ergebnisse \leftrightarrow Methoden:

Die gewünschten Ergebnisse setzen bestimmte Arbeitsschritte und Gerätschaften voraus. Weil die Methoden aber auch von den Charakteristika des Objektes beeinflusst und einige Arbeitsweisen dadurch ausgeschlossen, andere gefordert werden, haben auch die Methoden einen Einfluss auf die Auswahl möglicher Ergebnisse.

Motivation → Methoden:

Gerade bei Vermessungen, bei denen die Analyse des Objekts einen wesentlich höheren Stellenwert hat als die geometrisch exakte Vermessung, wird die Vermessung oft von denjenigen durchgeführt, die für die Analyse zuständig sind. Die Wahl der Vermessungsmethode richtet sich dann in der Regel nach dem Vorhandensein von Gerätschaft und der Erfahrung, die diese Fachleute auf dem Gebiet der Vermessung haben.

2.1.7 Ergebnis der Interaktionsanalyse

Die Analyse des vorgestellten Systems „Bauwerksvermessung“ zeigt, dass es weder „die“ beste Vermessungsmethode gibt, noch dass bestimmte Motivationen, Objekte oder gewünschte Ergebnisse für sich betrachtet zwingend zu einer bestimmten Vermessungsmethode führen. Es haben sich jedoch gewisse Anwendungsschwerpunkte für die verschiedenen Vermessungsmethoden herausgebildet, die in [SCHERER, 2001b] tabellarisch zusammengefasst werden:

Handaufmaß	Photogrammetrie	Tachymetrie	Scan-Verfahren
Facility Management, Baufaufnahme zur Bau- analyse, Ergänzungs- und Kon- trollmaße	Architektur, Denkmalpflege, Industrie- vermessung, Fassaden- aufnahme, Visualisierung	Architekturerrfassung, Archäologie, Bauforschung, Baudokumentation, Fassadenaufnahme, Facility Management	Visualisierung auch von komplexen Objektstrukturen durch Verknüpfung mit Bildern, z.T. automatisiert

2.2 Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden

Im Folgenden wird untersucht, welche wesentlichen Verbindungen zwischen den einzelnen Vermessungsmethoden bestehen. Die grafische Darstellung der Beziehungen liefert

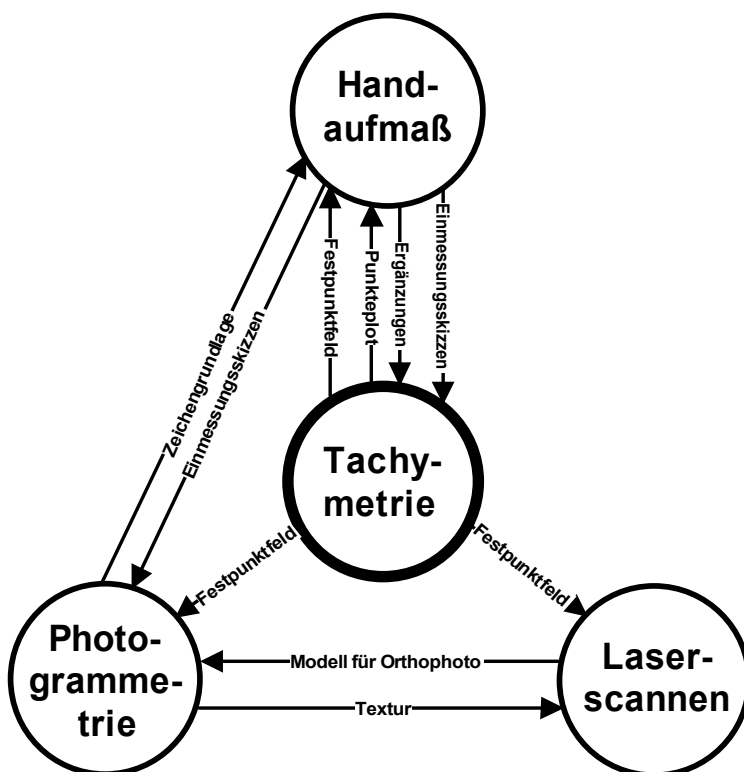


Abb. 2-2: Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden

Zentrale Stellung der Tachymetrie

Mit Ausnahme der Tachymetrie liefern alle anderen Vermessungsmethoden nur lokale Teilergebnisse, die miteinander verknüpft und i.d.R. in ein übergeordnetes Koordinatensystem überführt werden müssen. Dies geschieht im allgemeinen mit Hilfe eines tachymetrisch bestimmten Festpunktfeldes.

Handaufmaß - Tachymetrie

Die tachymetrisch zu vermessenden Punkte müssen vom Standpunkt des Vermessungsinstrumentes aus sichtbar sein. Dies ist aufgrund der geometrischen Gegebenheiten oftmals schwierig bis unmöglich. Hier kann das Handaufmaß (neben anderen, später beschriebenen Techniken, wie der Einsatz eines Extrapolationsstabes) die Tachymetrie ergänzen. Dies kann, unter Verwendung entsprechender Aufnahmesoftware, direkt bei der Aufnahme erfolgen oder bei der Nachbearbeitung im CAD-Programm.

Des Weiteren liefert das Handaufmaß Einmessungsskizzen zum Auffinden und Identifizieren der Netzpunkte.

In anderer Richtung kann die Tachymetrie das Handaufmaß durch einen Punkteplot unterstützen: Hier liefert die tachymetrisch aufgemessene und geplottete, grobe Geometrie eines Objektes die Grundlage zum detaillierten, teils porträtierenden Handaufmaß [MADER, 2001].

Handaufmaß - Photogrammetrie

Ähnlich wie bei der Beziehung zur Tachymetrie kann das Handaufmaß die Skizzen für die photogrammetrischen Passpunkte liefern. Da diese Punkte, wie zuvor beschrieben, i.d.R. durch tachymetrische Vermessungen bestimmt worden sind, haben diese Skizzen eher eine porträtierende als eine „maßgebende“ Bedeutung.

Die Photogrammetrie kann durch entzerrte Photos die Zeichengrundlagen für ein ergänzendes Handaufmaß zur Verfügung stellen.

Photogrammetrie - Laserscanner

Das Verfahren des Laserscannens kann sehr sinnvoll mit der Photogrammetrie verbunden werden [KERN, 2003]. Zum einen stellen die Scandaten ein hervorragendes geometrisches Modell für die Orthophoto-Herstellung dar, zum anderen liefert die Photogrammetrie die entsprechenden Bilddaten für die Einfärbung einer Punktwolke oder die Texturierung eines 3D-Modells.

Erweiterung der Verbindungen

Im Verlauf dieser Arbeit wird gezeigt, wie die Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden, insbesondere zwischen Tachymetrie und Photogrammetrie durch das entwickelte Vermessungssystem ergänzt werden können.

2.3 Konzept zum Aufbau eines modularen Vermessungssystems

Um den verschiedensten Nutzer-Ansprüchen in den unterschiedlichen Einsatzgebieten entgegenzukommen, soll ein neu konzipiertes Vermessungssystem aufgebaut werden, das die Möglichkeiten moderner Tachymeter (reflektorlose Distanzmessung, servomotorgesteuerte Achsen) konsequent nutzt und das die Verbindung zwischen der Tachymetrie und der Photogrammetrie sowohl hardware- als auch softwaremäßig über die bestehenden Ansätze hinaus vertieft. Es werden im wesentlichen drei Ausbaustufen unterschieden:

Tachymeter ohne Steuerrechner (Stufe 1)

Bei dieser Variante soll ausschließlich die Funktionalität des Tachymeters und seiner internen Programme (Speichern der Messwerte, Stationierung, Berechnungen) genutzt werden. Das Haupteinsatzgebiet ist dabei die Erfassung (weniger) Einzelpunkte z.B. bei der Anlage eines Grundlagentetzes. Dazu sind Programmkomponenten zu entwickeln, die den Anwender bei der Aufarbeitung der im Tachymeter gespeicherten Daten zu den diversen Vermessungsergebnissen unterstützen. Ebenso sollen Aufnahmestrategien entwickelt werden, die insbesondere die Möglichkeit der reflektorlosen Distanzmessung zu Effektivitätssteigerungen nutzen.

Tachymeter mit externer Rechnersteuerung ohne Kameras (Stufe 2)

In dieser Ausbaustufe soll die Möglichkeit der bidirektionalen Kommunikation zwischen dem Tachymeter und einem externen Rechner genutzt werden: Das Tachymeter sendet Messwerte und empfängt Positionierungsanweisungen, die es mit Hilfe der Servomotoren umsetzt. Insbesondere soll das Potenzial der Iterationsschleife „Messen-Berechnen-Positionieren“ für eine „intelligente“ Tachymetrie zur Vereinfachung und Automatisierung von Vermessungsabläufen ausgeschöpft werden.

Tachymeter mit externer Rechnersteuerung und Kameras (Stufe 3)

Bei dieser Ausbaustufe soll das Vermessungssystem mit Kameras („interne Kameras“) verschiedener Brennweite versehen werden. Es soll erforscht werden, wie die Bilder zur Steuerung des Tachymeters, zum Aufbau eines Bildarchivs sowie zur Extraktion von photorealistischen Texturen für die Modellierung von Objekten genutzt werden können. Des Weiteren sollen auch die Bilder „externer“ Kameras (frei im Raum positionierte Digitalkameras) in das System einbezogen werden.

2.4 Zusammenfassung des Kapitels

Innerhalb einer Interaktionsanalyse wurden die Zusammenhänge der verschiedenen Faktoren bei der Vermessung eines Objektes analysiert und die Anwendungsschwerpunkte der verschiedenen Vermessungsverfahren tabellarisch zusammengefasst. Die Untersuchung der Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden zeigte deutlich die zentrale Stellung der Tachymetrie. Es wurde ein Konzept entwickelt, die zentrale Stellung der Tachymetrie durch die konsequente Nutzung der reflektorlosen Distanzmessung und der Motorisierung der Geräte auszubauen und die Verbindungen zwischen den Methoden (insbesondere zwischen Tachymetrie und Photogrammetrie) durch die Ausrüstung des Tachymeters mit Videokameras zu erweitern.

Die Realisierung dieses Konzepts wird in den beiden folgenden Kapiteln beschrieben.

3 „Intelligente“ Tachymetrie

Zum Ausbau der zentralen Stellung der Tachymetrie im Zusammenspiel mit den anderen Vermessungsmethoden werden im folgenden Kapitel Lösungen vorgestellt, die den Anwender weit über das bei einer tachymetrischen Aufnahme übliche Maß unterstützten. Zum einen wird untersucht, wie ein reflektorloses, servomotorgesteuertes Tachymeter Vermessungsaufgaben weitgehend selbstständig durchführen kann. Das Instrument wird dabei in eine Iterationsschleife „Messen-Berechnen-Positionieren“ eingebunden. Zum anderen werden Verfahren zur einfachen Lösung häufig vorkommender Aufmaßprobleme aufgezeigt. Auf die bereits ausführlich beschriebene Unterstützung des Anwenders durch zielverfolgende Tachymeter (z.B. [STAIGER, 1998]) wird hier nicht näher eingegangen.

3.1 Das Leica TCRM 1102

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vermessungssystem TOTAL basiert hardwaremäßig auf dem TCRM 1102 der Firma Leica-Geosystems. Diese Tachymeterserie zeichnet sich insbesondere durch einen reflektorlos arbeitenden Distanzmesser (mit sichtbarem Laserstrahl) und motorisierte Achsen aus. Es ist möglich, das Tachymeter über eine serielle Schnittstelle von einem externen PC aus zu steuern.

Während die Funktionsweise und die Genauigkeit des Winkelmesssystem des in dieser Arbeit verwendeten Tachymeters wegen der praktisch vorkommenden geringen Zielweiten von untergeordneter Bedeutung sind, spielt der Distanzmessteil für die später beschriebenen automatisierten Messabläufe eine sehr wichtige Rolle innerhalb der verwendeten Hardware. In diesem Abschnitt (3.1) werden seine Funktionsweise beschrieben und seine Genauigkeit und Zuverlässigkeit betrachtet. Insbesondere wird das Distanzmessverhalten auf unterschiedlichen Materialien, geeigneten Flächen sowie an Ecken und Kanten untersucht.

3.1.1 Begriffserläuterung „reflektorlos“

Der Begriff „reflektorlose Distanzmessung“, der sowohl in Herstellerangaben, der Literatur, als auch in dieser Arbeit verwendet wird, bedarf der näheren Erläuterung. Selbstverständlich basiert auch diese Messtechnologie im Prinzip auf der modifizierten Laufzeitmessung eines Lichtsignals (hier: Phasenmodulation) zu einem reflektierenden Objekt und zurück. „Reflektorlos“ heißt in diesem Zusammenhang, dass bei diesem Messprinzip kein spezieller Retroreflektor in Form eines Prismas, einer Reflexfolie oder eines ähnlichen Mediums im Zielpunkt benötigt wird. Hier wird das von einer natürlichen Oberfläche reflektierte Signal zur Streckenmessung ausgewertet.

3.1.2 Funktionsprinzip der Distanzmessung

Kennzeichnend für die Instrumente der TCR-Reihe der Firma Leica sind zwei integrierte koaxial messende Distanzmesser, die beide nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeiten. Dabei hat der Infrarotlaser für die Distanzmessung auf Prismen und Reflexfolien eine Wellenlänge von 780 nm. Nach Herstellerangaben beträgt seine Reichweite mit einem einzigen Prisma 3000 m bei einer Genauigkeit von 2 mm + 2 ppm. Der sichtbare rote Laser hat eine Wellenlänge von 670 nm und misst in der Standardversion reflektorlos bis zu Distanzen von maximal 80 m, in der X-Range-Version bis ca. 200 m mit einer Genauigkeit von 3 mm + 2 ppm. Das Frequenzmesssystem sorgt für eine Eindeutigkeit der Distanzmessung bis 12 km bei einer „Feinfrequenz“ von 100 MHz. Dies entspricht einem Feinmaßstab von 1,5 m. Zwischen beiden Distanzmessern kann jederzeit mit einem Tastendruck umgeschaltet werden [ZEISKE, 1999].

3.1.3 Untersuchung des Distanzmessers

Die Untersuchung der Leistungsfähigkeit und der Genauigkeit des reflektorlos messenden Distanzmessteils erstreckt sich auf folgende Bereiche:

- Soll-Ist-Vergleich der Streckenmessung (Vergleichsstrecken)
- Größe des Laserflecks in verschiedenen Entfernungen
- Messverhalten bei Kanten
- Verhalten bei Messung auf verschiedene natürliche Materialien unter verschiedenen Einfallswinkeln

3.1.3.1 Vergleichsstrecken

Die Untersuchung des Distanzmessteils fand zum einen auf der Teststrecke der Fachhochschule Bochum, zum anderen auf der Interferometerbahn der Arbeitsgruppe Geodäsie der Ruhr-Universität Bochum statt. Während auf der Teststrecke Distanzen bis zu 80 m überprüft wurden, erstreckten sich die Untersuchungen mit dem Interferometer auf den Nahbereich bis 10 m.

Bei der Untersuchung des Distanzmessteils auf der Interferometerbahn wurde die Verschiebung einer Tischlerplatte als Reflexionsmedium interferometrisch bestimmt. Der Abstand vom Schnittpunkt der Achsen der Totalstation zum Reflexionsmedium zu Beginn der Verschiebung wurde mit Hilfe einer Schieblehre auf ca. 0,5 mm genau bestimmt. Abb. 3-1 zeigt die ermittelten Verbesserungen (Vergleichsstrecke minus Distanzmessung).

Aus der Vergleichsmessung auf der Interferometerbahn ist deutlich ein zyklischer Fehler mit einer Wellenlänge von 1,5 m (entspricht dem Feinmaßstab) mit einer Amplitude von ca. 1 mm zu erkennen. Insgesamt liegen die Verbesserungen innerhalb der Angaben des Herstellers. Es besteht die Möglichkeit, die Korrekturwerte vor der weiteren Verarbeitung der Daten an die Messwerte anzubringen.

Die Vergleichsmessung auf der Teststrecke (Abb. 3-2) zeigt Verbesserungen bis ca. 4 mm. Der überaus größte Teil der in der Bauwerksvermessung üblichen Zielweiten liegt innerhalb des untersuchten Bereiches bis 80 m.

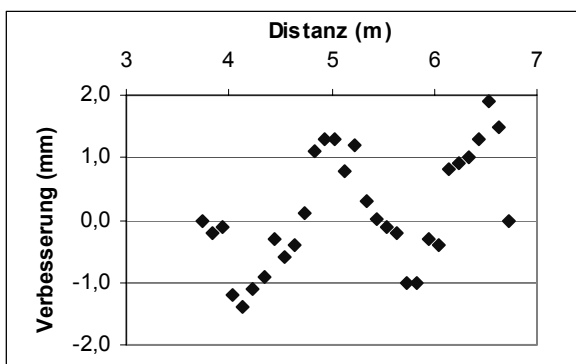


Abb. 3-1: Vergleich Interferometerbahn

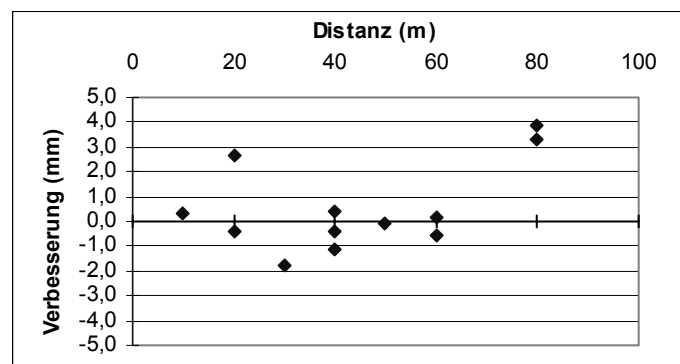


Abb. 3-2: Vergleich Teststrecke

3.1.3.2 Untersuchung der Größe des Laserflecks

Bei der Untersuchung des Laserflecks soll zum einen dessen sichtbare Größe in verschiedenen Entfernungen ermittelt werden. Zum anderen ist zu überprüfen, ob sie identisch ist mit der Größe des Messstrahls, der für die Distanzmessung wirksam ist. Die sichtbare Ausdehnung wird für die verschiedenen Entfernungen durch Anzielung einer Skala und Messung der Größe bzw. fotografische Abbildung der Gestalt bestimmt. Die streckenwirksame Ausdehnung wird durch die kleinschrittige Messung an einer Stufe ermittelt.

Sichtbare Größe

Die folgenden Abbildungen zeigen den Laserfleck in verschiedenen Entfernungen. Ein Teilstrich der Skala entspricht dabei 1 cm. Somit ist der Laserfleck ungefähr in Originalgröße dargestellt. Als Reflexionsmedium diente weißes Papier.

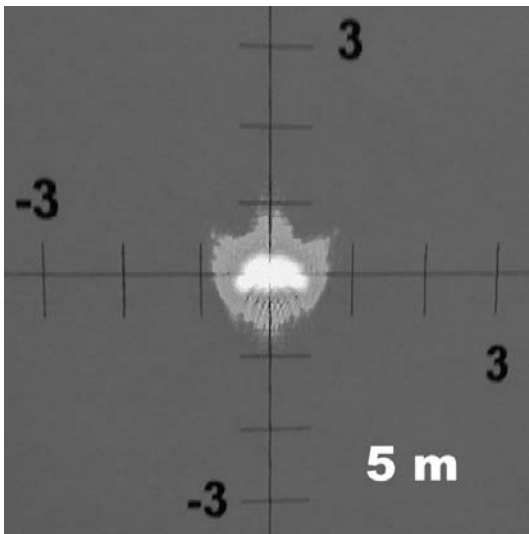


Abb. 3-3: Entfernung 5 m

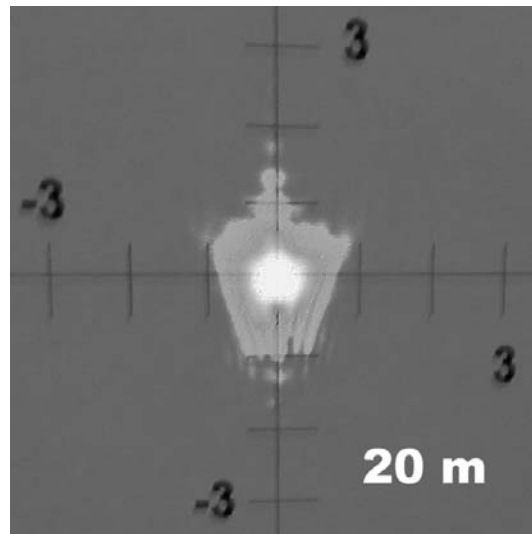


Abb. 3-4: Entfernung 20 m

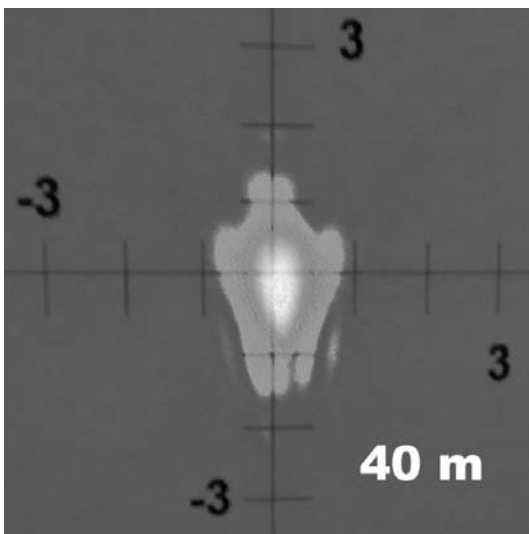


Abb. 3-5: Entfernung 40 m

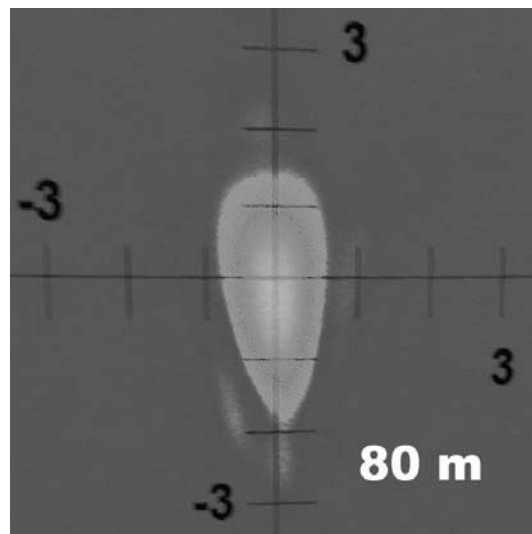


Abb. 3-6: Entfernung 80 m

Deutlich erkennbar sind die abnehmende Schärfe des Laserfleckzentrums sowie eine Formveränderung bei zunehmender Entfernung.

Stufenversuch

Im Folgenden wird das Verhalten des Entfernungsmessers bei einer Distanzmessung auf eine Stufe untersucht [MEIER-HIRMER, 1996], [BUCHMANN, 1996]. Insbesondere soll dabei festgestellt werden, ob der sichtbare Laserfleck in seiner Größe mit dem bei einer Streckenmessung wirksamen Querschnitt übereinstimmt. Des weiteren ist die Homogenität des Laserflecks bezüglich der Streckenmessung zu untersuchen.

Hierzu wird der Laserstrahl in kleinen Schritten über die Kante einer vertikalen Stufe von 10 cm Tiefe geführt und die Streckenmessung ausgelöst. Dabei trifft ein gewisser Anteil des Laserflecks auf den Vorder-, der Rest auf den Hintergrund. Bei dem nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeitenden Entfernungsmesser des untersuchten Tachymeters entsteht dabei ein Mischsignal (optisches Übersprechen).

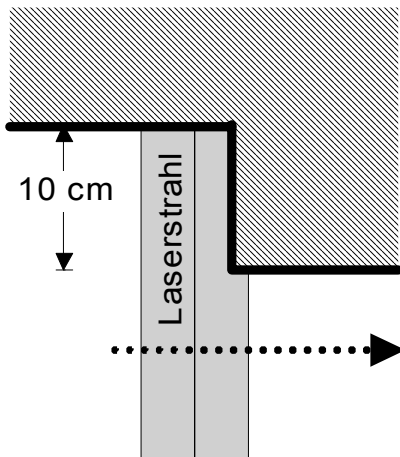


Abb. 3-7: Stufenmessung

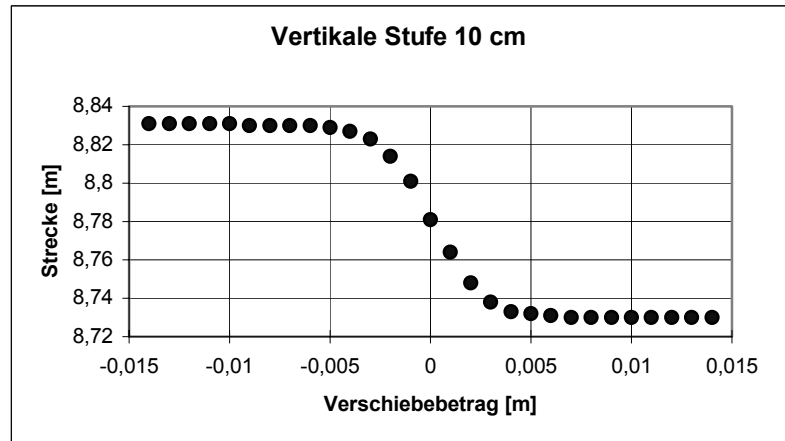


Abb. 3-8: Ergebnis der Stufenmessung

Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen eine annähernd lineare Veränderung der Streckenmessung im Bereich der Stufe. Dies deutet auf eine gleichmäßige Verteilung der Signalintensität innerhalb des Laserflecks hin. Die Größe des für die Streckenmessung wirksamen Laserflecks (ca. 1 cm) stimmt mit der des sichtbaren Laserflecks überein (vgl. Abb. 3-3), was durch Versuche mit größeren Zielweiten (und damit größerem Laserfleck) bestätigt wurde. Ähnliches ergab die alternative Messung auf eine horizontale Stufe.

Messverhalten an Ecken und Kanten

Durch den endlich großen Querschnitt des Laserstrahls wird das Messsignal immer über eine bestimmte Fläche integriert. Dies führt bei der Messung zu Verfälschungen der Streckenmessung [BUCHMANN, 1996]. Diese Verfälschungen können, je nach Objektgeometrie, systematischer oder unsystematischer Natur sein.

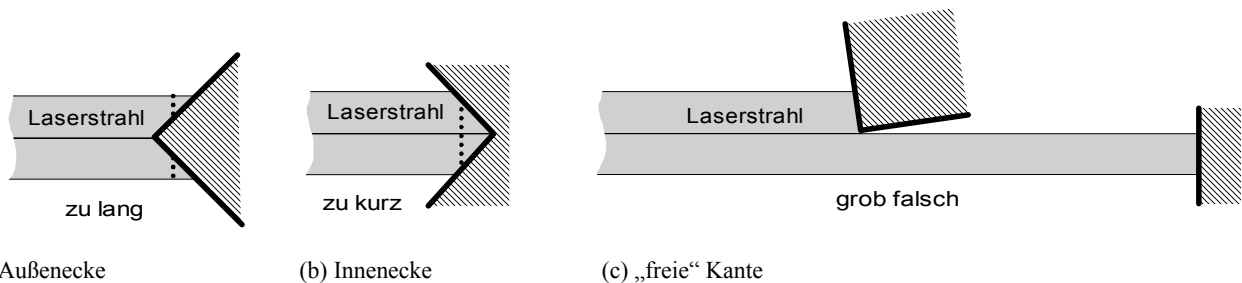


Abb. 3-9: Messverhalten an Ecken und Kanten

Diese Überlegung wurde durch folgenden Versuch untermauert: Ähnlich wie beim Stufenversuch wurde der Laserstrahl in kleinen Schritten über eine Außen- und eine Innenecke bewegt und Streckenmessungen vorgenommen. Zum Vergleich wurde die Entfernung zur Ecke mit Hilfe eines Distanzhalters (Abb. 3-11c) fehlerfrei bestimmt.

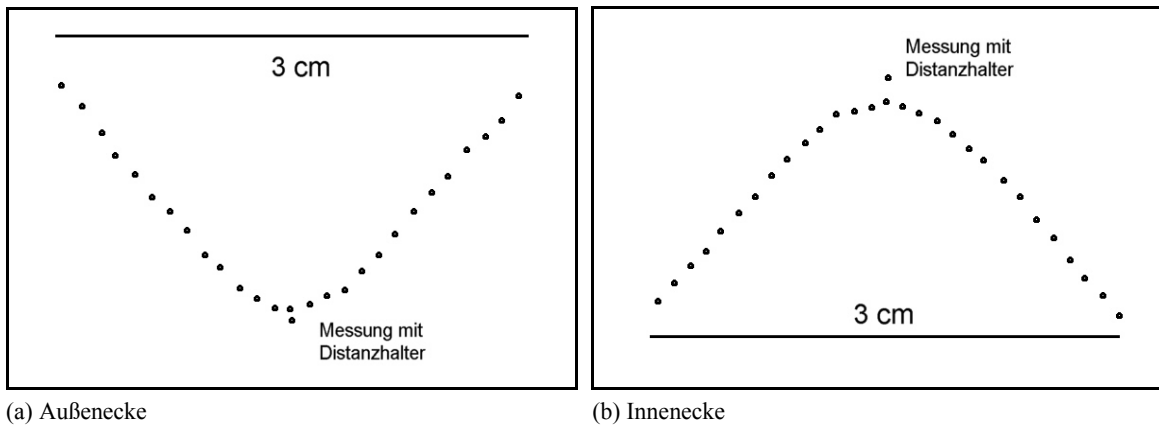


Abb. 3-10: Messverhalten bei Ecken in 8 m Entfernung

Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen deutlich ausgerundete Kanten im Bereich des Strahldurchmessers von ca. 1 cm. Damit wird die Aussage des Stufenversuchs untermauert, dass der für die Streckenmessung wirksame Laserfleck dem sichtbaren Fleck entspricht.

Die Untersuchung des Messverhaltens an „freien Kanten“ war ähnlich angelegt wie beim oben beschriebenen Stufenversuch, jedoch mit einem variablen Abstand von Vordergrund und Hintergrund, der mehrere Meter betragen konnte. Ähnlich wie bei der in [SCHERER, 1996] beschriebenen Untersuchung des Entfernungsmessteils des GEODIMETER 468 DR zeigte sich ein scheinbar groteskes Verhalten, das aus Überlagerung der reflektierten Teilsignale von Vorder- und Hintergrund resultiert. So kam es zu Streckenergebnissen, die kürzer als der Abstand zum Vordergrund oder länger als der Abstand zum Hintergrund waren.

3.1.3.3 Natürliche Oberflächen

Die Messung auf natürliche Oberflächen (im Gegensatz zu wohldefinierten Zielzeichen und Reflektoren) ist dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl mit unterschiedlichen Einfallswinkeln auf verschiedene Materialien und Formen trifft und dabei eine bestimmte Ausdehnung aufweist. Verschiedene Materialien können unterschiedliche Reflexionseigenschaften besitzen, verschiedene Formen (insbesondere Ecken und Kanten) haben Einfluss auf die Verteilung der Messsignale innerhalb des Laserstrahls und damit auf die gemessene Strecke. Im Weiteren werden die Materialeigenschaften und das Auftreffen des Laserstrahls unter verschiedenen Winkeln auf eine Oberfläche näher untersucht.

Hilfsmittel zur „fehlerfreien“ Streckenmessung

Um Aussagen über den Einfluss von verschiedenen Reflexionsmaterialien auf die Streckenmessung machen zu können, ist es notwendig, vorab die „fehlerfreie“ Strecke zu einem klar definierten Punkt der Oberfläche zu ermitteln. Die folgende Abbildung verdeutlicht, dass bei glatten Oberflächen (eine gleichmäßige Signalverteilung innerhalb des Strahlenquerschnitts vorausgesetzt) auch bei einem flachen Auftreffwinkel theoretisch die „fehlerfreie“ Strecke zum Oberflächenpunkt gemessen wird. Bei unregelmäßigen Oberflächen kann es in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel zu Fehlmessungen kommen. Als einfaches mechanisches Hilfsmittel kam bei den Untersuchungen der Materialeigenschaften ein Distanzstück mit glatter Oberfläche und bekannter Länge zum Einsatz (Tischlerplatte mit Nagel, vgl. Abb. 3-11c).

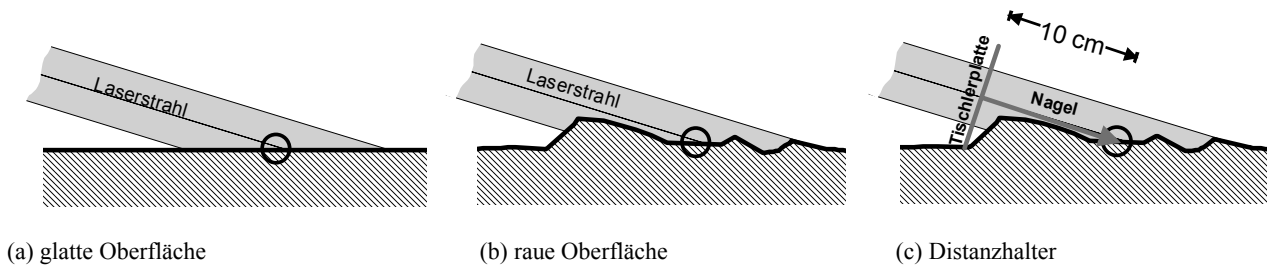


Abb. 3-11: Laserstrahl auf unterschiedlichen Oberflächen

Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchung verschiedenster Materialien bei senkrechtem Auftreffwinkel führte ähnlich wie bei [KERN, 2001] lediglich bei porösen Oberflächen wie Schaumstoff und Styropor zu signifikanten Streckenfehlern. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Laserstrahl in diese Materialien eindringen kann und nicht vollständig an der „tastbaren“ Oberfläche reflektiert wird.

Bei flachem Auftreffwinkel kommt es insbesondere bei rauen Materialien (wie in Abb. 3-11b veranschaulicht) zu signifikanten systematischen Streckenfehlern (Strecken werden immer zu kurz gemessen) bis zu einem Zentimeter.

Auffällig waren insbesondere Streckenfehler bei spiegelnden oder feuchten Materialien unter flachem Einfallswinkel. Es ist zu vermuten, dass ein (geringer) Teil des Signals unkontrolliert auf eine andere Oberfläche reflektiert wird und das „Nebensignal“ das Hauptsignal überlagert.

3.1.4 Ergebnisse der Untersuchung des Distanzmessers

Als wesentliche Aussage der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass die Angaben zum Distanzmessteil im (für die Bauwerksvermessung besonders wichtigen) Nahbereich innerhalb der vom Hersteller angegebenen Spezifikationen liegen. Es konnte gezeigt werden, dass die Größe des sichtbaren Laserflecks identisch ist mit der Größe des für die Streckenmessung wirksamen Flecks. Bei der praktischen Arbeit ist darauf zu achten, dass der Laserfleck vollständig auf der zu vermessenden Oberfläche liegt, da es ansonsten zu Fehlmessungen kommt.

Bei der Messung auf poröse Materialien ist zu berücksichtigen, dass der Laserstrahl in das Material eindringen kann und somit eine längere Distanz gemessen wird als zur „tastbaren“ Oberfläche. Bei rauen Oberflächen kann es insbesondere bei flachem Auftreffwinkel des Strahles zu systematischen Fehlmessungen kommen, die bis zu einem Zentimeter betragen können. Messungen auf feuchte Oberflächen können aufgrund der Spiegelwirkung zu Fehlern führen.

3.2 Absteckung

Im Zusammenspiel der verschiedenen Vermessungsmethoden kommt der Tachymetrie insbesondere durch die Arbeiten zur Realisierung eines Festpunktfeldes eine integrative Bedeutung zu (vgl. 2.2). Neben dem Aufmaß des Festpunktfeldes bietet sie (im Gegensatz zur Photogrammetrie und zum Laserscannen) die Möglichkeit, Einzelpunkte, Achspunkte und Punkte zur Definition einer Ebene in die Örtlichkeit zu übertragen. Damit kann z.B. ein Raster für das Handaufmaß bzw. für die fotografische Aufnahme [KOLLER / THÜR, 2001] mit hoher absoluter Genauigkeit abgesteckt werden. Ein weiterer Anwendungsfall ist das Anzeigen von definierten Schnitten an Bauwerksteilen.

[DIN 18710-3] definiert Absteckung als „Übertragung geometrischer Größen in die Örtlichkeit“. Ziel einer Absteckung ist immer die Festlegung einer (mehr oder minder dauerhaften) Markierung.

In diesem Teil der Arbeit werden die verschiedenen tachymetrischen Absteckungsarbeiten untersucht und systematisiert. Es werden Möglichkeiten der automatisierten Absteckung abgeleitet, bei denen das reflektorlos messende, motorisierte Tachymeter das zentrale Glied der Iterationsschleife „Messen-Berechnen-Positionieren“ bildet. Insbesondere wird gezeigt, dass praktisch alle vorkommenden Absteckungsarbeiten an Objekten mit Hilfe einer iterativen Nachsteuerung des Tachymeters automatisch nach einem einzigen einfachen Grundprinzip durchgeführt werden können. Zahlreiche, derzeit in der Praxis noch umständlich gelöste Aufgaben können damit wesentlich vereinfacht werden.

Nach einigen notwendigen Begriffserklärungen wird die Absteckung von Einzelpunkten, Punkten einer Geraden und Punkten einer Ebene aus 3D-Entwürfen erläutert. Danach wird die Problematik der Übertragung von 2D-Entwürfen in die dreidimensionale Örtlichkeit betrachtet. Auch wenn die Absteckung beliebig orientierter Raumgeraden und –ebenen in der Praxis relativ selten vorkommt, ist es sinnvoll, zuerst diese allgemeinen Fälle zu untersuchen, um daraus Erkenntnisse für die Absteckung besser vertrauter Absteckelemente - insbesondere aus 2D-Entwürfen abgeleiteter Geraden und Ebenen - zu gewinnen. Abschließend werden die Ergebnisse in Tabellenform zusammengefasst.

3.2.1 Begriffserklärungen

Die Darstellung der folgenden Überlegungen zur iterativen Absteckung erfordert (insbesondere in den Abbildungen) knappe, einprägsame Begriffe zur klaren Trennung der verschiedenen Flächen, Linien und Punkte. Diese Begriffe sind in Abb. 3-12 und Abb. 3-13 erläutert.

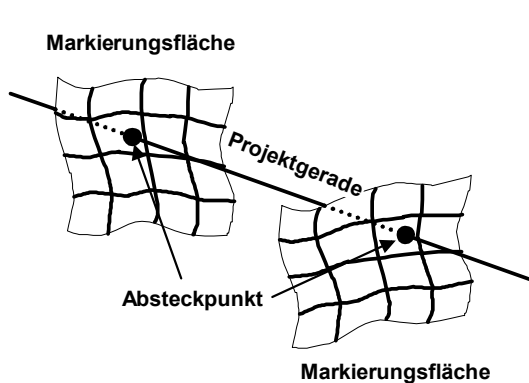


Abb. 3-12: Gerade

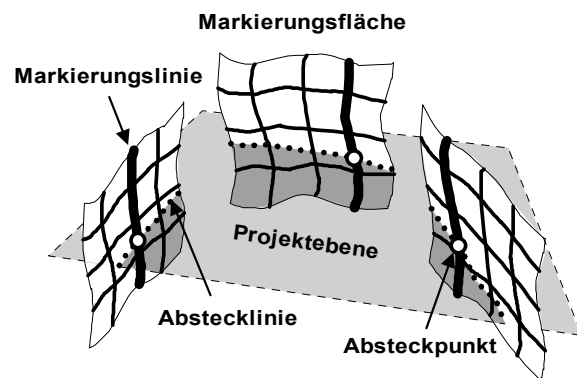


Abb. 3-13: Ebene

Markierungsflächen und –linien:

Das Signalisieren und Markieren von Punkten, Geraden und Ebenen in der Örtlichkeit erfolgt i.d.R. auf einer vorhandenen (i.A. gekrümmten) Oberfläche (Markierungsfläche) oder auf einer (i.A. gekrümmten) Linie (Markierungslinie), auf der ein Zielzeichen oder der Messfleck positioniert und eine physische Markierung angebracht werden kann. Bekannte Beispiele für Markierungsflächen aus dem Vermessungsalltag sind die Erdoberfläche und Wandflächen. Ein Beispiel für den Gebrauch einer Markierungslinie ist die Arbeit mit dem Schnurgerüst (Schnitt einer Vertikalebene mit dem Schnurgerüst).

Projektebenen, –geraden und Punkte:

Damit sind diejenigen geometrischen Elemente gemeint, die in einem Entwurf projiziert wurden und in die Örtlichkeit zu übertragen sind. Mit tachymetrischen Methoden kann dies ausschließlich in Form diskreter Einzelpunkte erfolgen.

Absteckpunkte und –linien:

Als Absteckpunkt wird der Durchstoßpunkt einer Projektgeraden durch eine physische Oberfläche (Markierungsfläche) bezeichnet (Abb. 3-12), mit Abstecklinie der Schnitt einer Projektebene mit einer physischen Oberfläche (Markierungsfläche). Bei gekrümmten Markierungsflächen ergeben sich Absteckkurven, bei ebenen Markierungsflächen dagegen Absteckgeraden. Absteckpunkte sind auch die Schnittpunkte einer Markierungslinie mit der Projektebene (Abb. 3-13).

Die „Dimension“ des Entwurfs:

Hierbei kann grundsätzlich zwischen einem 2D- und einem 3D-Entwurf unterschieden werden. Der 3D-Entwurf bezieht sich auf den gesamten Raum, 2D-Entwürfe dagegen auf bestimmte Ebenen. Eine herausragende Rolle spielt dabei seit jeher die Grundrissebene. Vertikalebene sind insbesondere in der Architekturvermessung (Fassadenpläne) von großer Bedeutung. Beliebige im Raum orientierte Entwurfsebenen sind seltener anzutreffen. Ein Beispiel dafür sind Pläne zur Innenverkleidung schräg verlaufender Decken.

3.2.2 Übertragung eines 3D-Entwurfs in die Örtlichkeit

3D-Projektpunkte

Die Absteckung von Punkten eines 3D-Entwurfs mit allen 3 Koordinaten bildet eher die Ausnahme. Eine solche Absteckung setzt voraus, dass der Absteckpunkt in Form einer Zielmarke frei im Raum positioniert werden kann. Beispiele dafür sind Pfähle bei der Wegetrassierung, die sowohl die Lage- als auch die Höhenkoordinate eines geplanten Punktes repräsentieren.

3D-Projektgerade

Eine Gerade im 3D-Entwurf ist durch 2 Punkte bzw. 1 Punkt und die Raumrichtung definiert (Abb. 3-17). Alternativ zur Definition der Geraden durch Punkte und Richtungen ergibt sich eine Gerade als Schnittmenge zweier Ebenen. Die örtliche Absteckung dieser Geraden könnte demnach durch die (i.A. recht umständliche) Absteckung zweier Punkte des 3D-Entwurfs mit allen 3 Koordinaten erfolgen. Wesentlich praxisnäher ist dagegen die Absteckung als Schnitt der Raumgeraden mit 2 Flächen, z.B. Zieltafeln oder Wänden (siehe Abb. 3-12).

Iteration: Absteckung auf den Lotfußpunkt der Geraden

Die Absteckung von Punkten einer Geraden auf eine Oberfläche (Abb. 3-14 bis Abb. 3-16) erfolgt immer nach dem selben Grundprinzip: Nach der Messung zu einem Näherungspunkt auf der Markierungsfläche (der erfahrungsgemäß sehr weit vom Durchstoßpunkt der Gerade durch die Markierungsfläche abweichen darf), wird der Lotfußpunkt des aktuellen Messpunktes auf die Projektgerade berechnet. Dieser berechnete Punkt, der i.d.R. noch nicht auf der Markierungsfläche liegt, dient als nächster Zielpunkt der Iteration. Sobald der Messpunkt mit dem Lotfußpunkt (im Rahmen der angestrebten Genauigkeit) zusammenfällt, ist der Durchstoßpunkt der Geraden durch die Markierungsfläche und somit der Absteckpunkt erreicht. Die iterative Absteckung setzt voraus, dass die Distanzmessung zur Markierungsfläche reflektorlos erfolgen kann und dass die Markierungsfläche in der Nähe des Absteckpunktes keine Diskontinuitäten aufweist.

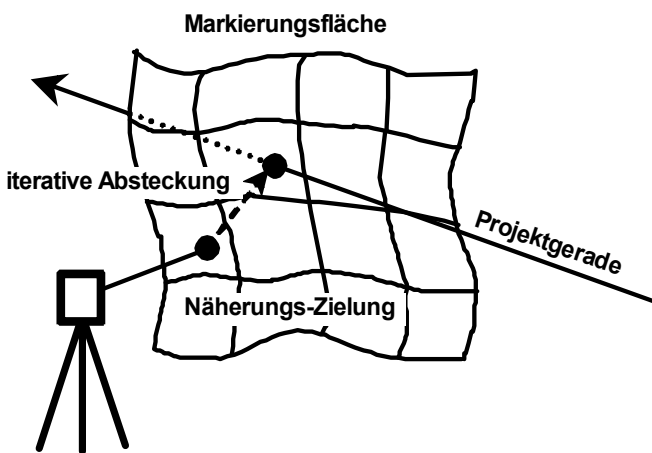


Abb. 3-14: Iterative Absteckung

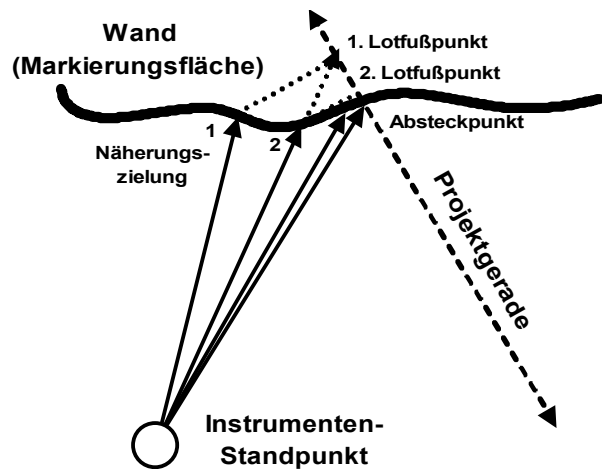


Abb. 3-15: Detail (Grundrissdarstellung)

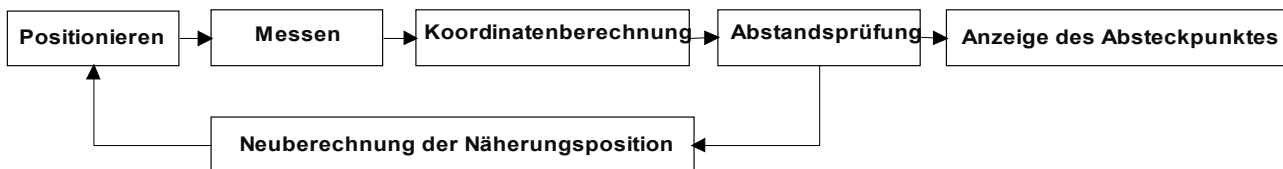


Abb. 3-16: Ablaufschema der iterativen Absteckung

3.2.2.1 Mathematische Grundlagen

Projektion eines Raumpunktes auf eine Gerade

Der Berechnung des Abstandes (d) eines Raumpunktes von einer Raumgeraden sowie der Berechnung des Lotfußpunktes (F) auf der Geraden liegt folgendes mathematisches Modell zu Grunde:

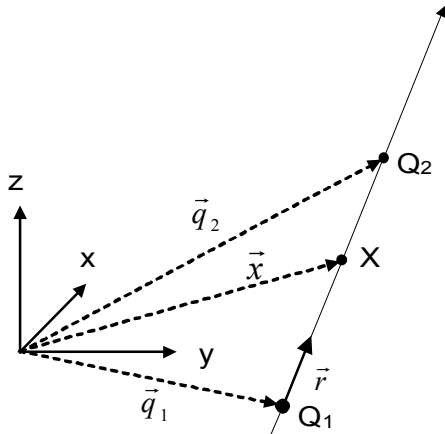


Abb. 3-17: Definition: Gerade im Raum

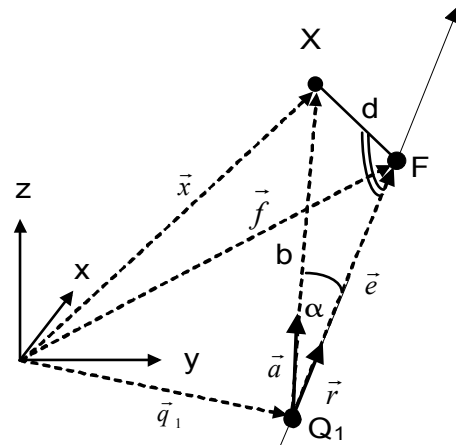


Abb. 3-18: Abstand Punkt-Gerade

Definition der Geraden (Abb. 3-17):

Q_1, Q_2 : Definitionspunkte der Geraden

X : Punkt auf der Geraden

\vec{x} : Ortsvektor zum Punkt X

\vec{q}_1, \vec{q}_2 : Ortsvektoren zu den Geradenpunkten

$$\vec{r} = \frac{\vec{q}_2 - \vec{q}_1}{|\vec{q}_2 - \vec{q}_1|} \quad \text{normierter Richtungsvektor der Geraden} \quad (3-1)$$

$$\vec{x} = \vec{q}_1 + \lambda \cdot \vec{r} \quad \text{Geradengleichung} \quad (3-2)$$

Berechnung des Abstandes eines Punktes von einer Raumgeraden und dessen Lotfußpunkt (Abb. 3-18):

X : Punkt außerhalb der Geraden

\vec{x} : Ortsvektor zum Punkt X

F : Fußpunkt

\vec{f} : Ortsvektor zum Fußpunkt

$$\vec{a} = \frac{\vec{x} - \vec{q}_1}{|\vec{x} - \vec{q}_1|} \quad \text{normierter Vektor von } Q_1 \text{ nach } X \quad (3-3)$$

$$b = |\vec{x} - \vec{q}_1| \quad \text{Entfernung zwischen } Q_1 \text{ und } X \quad (3-4)$$

$$\cos \alpha = \vec{a} \cdot \vec{r} \quad (3-5)$$

$$\vec{e} = \vec{r} \cdot b \cdot \cos \alpha \quad \text{Vektor von } Q_1 \text{ zum Fußpunkt } F \quad (3-6)$$

$$\vec{f} = \vec{q}_1 + \vec{e} \quad \text{Ortsvektor zum Fußpunkt F} \quad (3-7)$$

$$d = b \cdot \sin \alpha \quad \text{Abstand des Punktes X von der Geraden} \quad (3-8)$$

Näherungslösung: Schnitt der Geraden mit einer Ebene

Sofern die Markierungsfläche durch eine Näherungsebene approximiert wird (Messung von 3 Punkten), kann der Absteckpunkt direkt als Schnitt der Geraden mit der Ebene berechnet werden. Diese Lösung liefert meist schon sehr gute Näherungswerte für die zuvor beschriebene iterative Absteckung.

Die direkte Berechnung des Absteckpunktes als Schnitt einer Geraden mit einer Ebene gestaltet sich wie folgt:

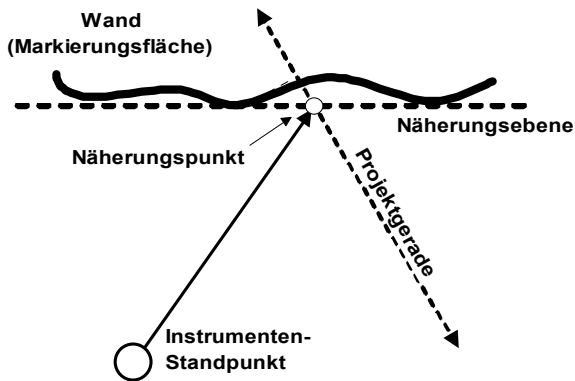


Abb. 3-19: Näherungslösung (Grundrissdarstellung)

Definition der Ebene:

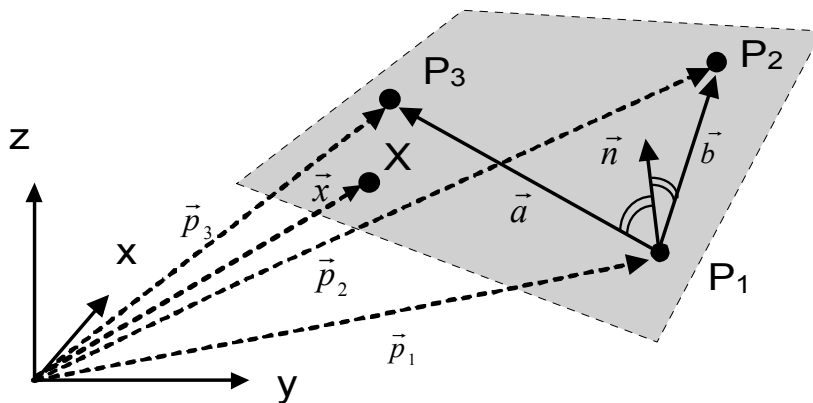


Abb. 3-20: Definition Ebene

P_1, P_2, P_3 : Definitionspunkte der Ebene

$\vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_3$: Ortsvektoren zu den Ebenen-Punkten

X : Punkt der Ebene

\vec{x} : Ortsvektor zum Punkt X

$$\vec{a} = \vec{p}_3 - \vec{p}_1$$

$$\vec{b} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$$

$$\vec{n} = \vec{a} \times \vec{b} \quad \text{Normalenvektor (senkrecht zur Ebene)} \quad (3-9)$$

$$\vec{n}^0 = \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \quad \text{normierter Normalenvektor (Länge = 1)} \quad (3-10)$$

$$\vec{x} = \vec{p}_1 + \lambda \vec{a} + \mu \vec{b} \quad \text{Ebenengleichung} \quad (3-11)$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{x} - \vec{p}_1) = 0 \quad \text{Normalform der Ebene: } \vec{x} - \vec{p}_1 \text{ steht senkrecht auf } \vec{n} \quad (3-12)$$

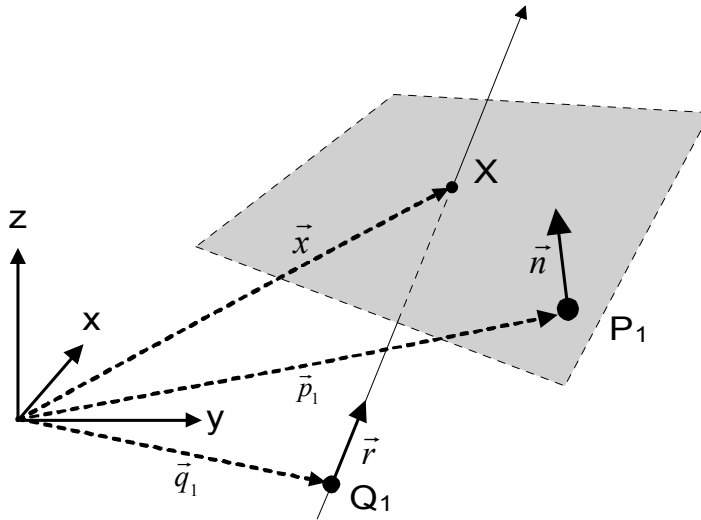


Abb. 3-21: Durchstoßpunkt X einer Geraden durch eine Ebene

Für den Punkt X auf der Geraden (vgl. Definition einer Geraden) gilt:

$$\vec{x} = \vec{q}_1 + \lambda \cdot \vec{r} \quad (3-13)$$

Für den Punkt X auf der Ebene gilt:

$$(\vec{x} - \vec{p}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (3-14)$$

\vec{x} aus Gerade in Ebenengleichung eingesetzt:

$$(\vec{q}_1 + \lambda \cdot \vec{r} - \vec{p}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (3-15)$$

$$(\vec{q}_1 - \vec{p}_1) \cdot \vec{n} + \lambda \cdot \vec{r} \cdot \vec{n} = 0 \quad (3-16)$$

$$\lambda = \frac{(\vec{p}_1 - \vec{q}_1) \cdot \vec{n}}{\vec{r} \cdot \vec{n}} \quad (3-17)$$

λ in Geradengleichung eingesetzt:

$$\vec{x} = \vec{q}_1 + \frac{(\vec{p}_1 - \vec{q}_1) \cdot \vec{n}}{\vec{r} \cdot \vec{n}} \cdot \vec{r} \quad (3-18)$$

3.2.2.2 Anwendungsbeispiel

In [BROCKMANN / WESTERWALBESLOH, 2002] wird die Aufgabe beschrieben, Durchstoßpunkte eines zu montierenden Befestigungsgestänges durch eine existierende gewölbte Stoffwand zu bestimmen. Bei der oben beschriebenen Methode der iterativen Absteckung würde dazu das Befestigungsgestänge als Raumgerade definiert, der Absteckpunkt würde grob auf der Stoffwand angezielt und das System würde nach einigen wenigen Iterationen den Durchstoßpunkt der Raumgeraden durch die Stofffläche anzeigen (vgl. Abb. 3-14).

Sofern es sich bei der Projektgeraden nicht um eine allgemeine Raumgerade sondern um eine Lotgerade oder eine Gerade senkrecht zu einer Vertikalebene handelt, kommt es aufgrund der damit verbundenen Beschränkung der Freiheitsgrade der Projektgerade zu Vereinfachungen im Formelwerk.

3.2.2.3 3D-Projektebene

Die Absteckung einer Ebene erfolgt, ähnlich wie bei der Absteckung einer Geraden beschrieben, durch diskrete Punkte auf Markierungsflächen oder -linien, die von der Ebene geschnitten werden. Zur Absteckung einer beliebig orientierten Ebene werden (mindestens) drei Punkte auf drei verschiedenen Markierungsflächen bzw. -linien benötigt (Abb. 3-13). Bei Vertikalebene reichen zwei Punkte auf zwei Markierungsflächen bzw. -linien, bei Horizontalebene reicht ein einziger Punkt.

Nachdem die Projektebene (z.B. durch 3 Punkte aus dem Entwurf) definiert worden ist, wird ein Punkt in der Nähe des Schnitts der Ebene mit der sie schneidenden Markierungsfläche angemessen. Der Abstand des Messpunktes zur Ebene und dessen Lotfußpunkt auf der Ebene werden berechnet (Abb. 3-22). Zur weiteren Iteration wird der gerechnete Lotfußpunkt automatisch mit dem Tachymeter eingestellt und die Iterationsschleife „Messen-Berechnen-Positionieren“ wird so lange durchlaufen, bis der Abstand zur definierten Ebene eine vorgegebene Grenze unterschreitet.

Ähnlich wie bei der Absteckung von Geraden konvergiert diese Iteration besonders schnell bei relativ glatten Oberflächen und wenn das Tachymeter einen geringen Abstand zur definierten Ebene aufweist.

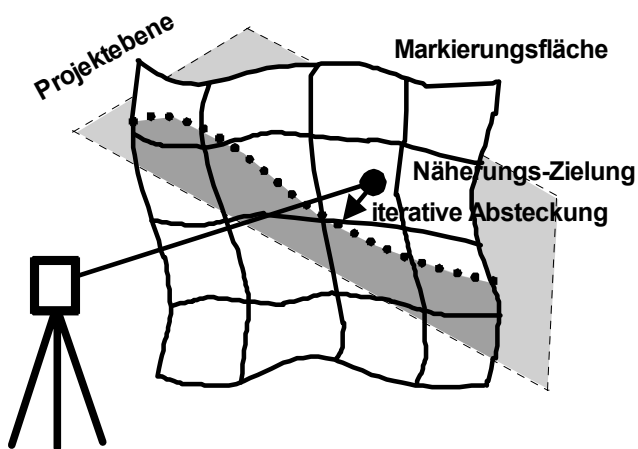


Abb. 3-22: Iterative Absteckung von Punkten einer Ebene

Projektion eines Raumpunktes auf eine Ebene

Der Berechnung des Abstandes (d) eines Raumpunktes von einer Ebene und die Berechnung dessen Lotfußpunktes (F) in der Ebene liegt folgendes mathematische Modell zu Grunde:

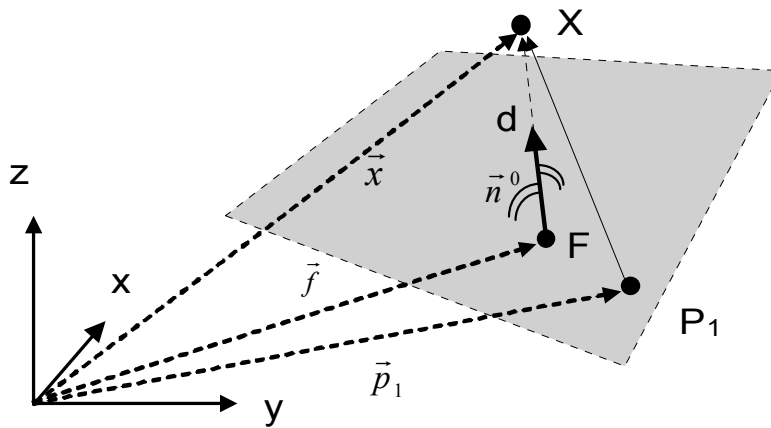


Abb. 3-23: Abstand Punkt - Ebene

X: Punkt außerhalb der Ebene

\vec{x} : Ortsvektor zum Punkt X

F: Lotfußpunkt des Punktes X

\vec{f} : Ortsvektor zum Lotfußpunkt F

$$d = |\vec{n}^0 \cdot (\vec{x} - \vec{p}_1)| \quad \text{Abstand des Punktes von der Ebene} \quad (3-19)$$

$$\vec{f} = \vec{x} - d \cdot \vec{n}^0 \quad (3-20)$$

3.2.2.4 Beispiele für Ebenenabsteckungen

Zwei in der Vermessungspraxis weit verbreitete Anwendungsgebiete der Ebenenabsteckung sind das Antragen einer bestimmten Höhe (Meterriss) und das Übertragen von Baufluchten auf ein Schnurgerüst. Auch wenn sich in diesen Fällen das Formelwerk aufgrund der beschränkten Freiheitsgrade der Projektebene einfacher gestaltet, folgt es dem gleichen Grundprinzip: Nach der ersten Anzielung und Messung eines Punktes in der Nähe der Projektebene wird dessen Fußpunkt auf der Projektebene berechnet und dient als nächster Zielpunkt (siehe Abb. 3-15).

Ein weiteres Beispiel ist in [ECKSTEIN / HOMOLKA 1997] beschrieben. Dort wurde der Vertikalschnitt durch die Mittelachse einer Kirche auf die Gewölbeschale übertragen. Dazu wurden die Endpunkte des Schnitts abgesteckt und der Linienverlauf durch eine Schnur von Außenwand zu Außenwand markiert. Die Linie auf der Gewölbeschale wurde dann von der gespannten Schnur abgelotet und alle 20 cm reflektorlos gemessen.

Diese, in der Bauforschung häufig vorkommende Aufgabenstellung, kann durch die zuvor beschriebene iterative Absteckung in sehr einfacher Weise gelöst werden und wird im Kapitel „Scannen“ dieser Arbeit weiter vertieft.

3.2.3 Übertragung eines 2D-Entwurfs in die Örtlichkeit

Bei der Übertragung von Punkten eines 2D-Entwurfs (Bodenpunkte, Fassadenpunkte) in die Örtlichkeit ist man immer mit der Tatsache konfrontiert, dass die Fläche, auf welcher der Punkt abgesteckt werden soll (Markierungsfläche), in der Regel von der Ebene, in der geplant worden ist (z.B. Horizontalebene, Vertikalebene), abweicht: Bodenpunkte, deren Koordinaten sich auf eine Horizontalebene beziehen, werden mit Hilfe des Lotes durch den Punkt abgesteckt. Den physischen 3D-Absteckpunkt bildet dann der Schnitt der Lotrichtung durch den Punkt mit der physischen Erdoberfläche (Abb. 3-25). Gleiches gilt für Fassadenpunkte: Hier bildet der Schnittpunkt einer zur Entwurfsebene senkrechten Geraden mit der physischen Fassadenoberfläche (Markierungsfläche) den 3D-Absteckpunkt (Abb. 3-26).

3.2.3.1 Begriffserklärungen

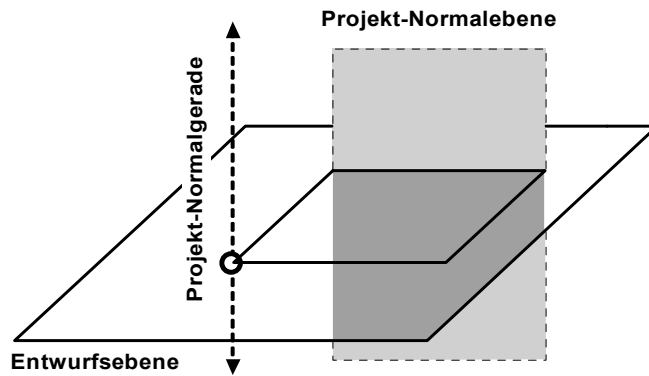


Abb. 3-24: Projekt-Normalebene und Projekt-Normalgerade

Entwurfsebene

Als Entwurfsebene wird die Ebene bezeichnet, in welcher der Entwurf vorgenommen wird, z.B. die Grundrissebene oder die Fassadenebene.

Projekt-Normalgerade und Projekt-Normalebene

Diese Ebenen und Geraden stehen senkrecht auf der Entwurfsebene. Allgemein legt ein Punkt des 2D-Entwurfs in der dreidimensionalen Örtlichkeit eine Gerade fest, die senkrecht zur Entwurfsebene liegt, eine Gerade des 2D-Entwurfs definiert dabei eine Ebene, die senkrecht zur Entwurfsebene liegt.

3.2.3.2 Punkte des 2D-Entwurfs

Die Absteckung von Punkten eines 2D-Entwurfs im Raum kann immer als Schnitt einer Geraden (Projekt-Normalgerade) mit einer Fläche (Markierungsfläche) verstanden werden.

Von besonderer Bedeutung sind dabei folgende Flächen und Geraden:

- Die physische Erdoberfläche in Verbindung mit dem Lot (Tangente an die Lotlinie)
- Wandflächen in Verbindung mit einer Geraden senkrecht zu einer definierten Vertikalebene

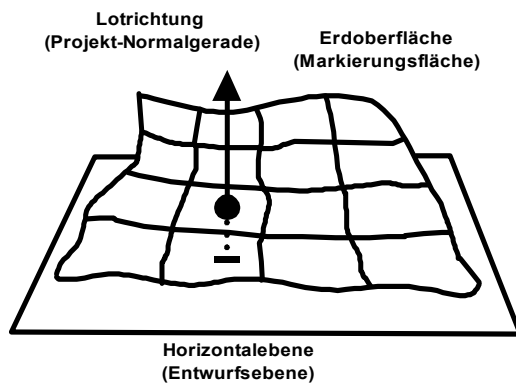


Abb. 3-25: Absteckung orthogonal zur Horizontalebene

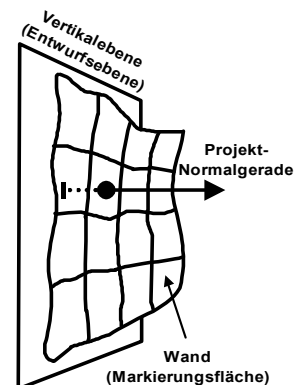


Abb. 3-26: Absteckung orthogonal zur Vertikalebene

Die Absteckung eines Punktes des 2D-Entwurfs mit einem Tachymeter gestaltet sich als iterativer Prozess, der je nach Aufgabenstellung ein hohes Automationspotenzial besitzt:

Dem Vermessungsingenieur am vertrautesten ist der iterative Prozess bei der Absteckung eines 2D-Punktes auf der Erdoberfläche: Nach erfolgter Stationierung / Orientierung des Tachymeters innerhalb eines übergeordneten Festpunktfeldes werden die Soll-Horizontalrichtung sowie die Sollstrecke zum Absteckpunkt berechnet. Bei motorisierten Tachymetern wird das Fernrohr automatisch auf die Sollrichtung eingestellt. Da die reflektorlose Distanzmessung direkt auf die Erdoberfläche i.d.R. nicht sinnvoll ist (Bewuchs, schleifender Schnitt), kommen hier auf Stäbe montierte Reflektoren zum Einsatz. Ein Reflektorträger wird in diese Sollrichtung eingewiesen und die Strecke zum Reflektor gemessen. Daraufhin wiederholt man die Schleife „Messen - Ermittlung der Differenzen zur Sollage - Verschieben des Reflektors“ so lange, bis die Differenzen zur Sollage des Absteckpunktes unterhalb einer zuvor definierten Grenze liegen. Rationalisierungseffekte ergeben sich bei Verwendung automatisch nachführender Tachymeter, die den Bewegungen des Reflektors folgen und die Differenzen zur Sollage des Absteckpunktes per Funkübertragung an den Prismenträger übermitteln. Das eigentliche Positionieren des Reflektors auf dem Absteckpunkt bleibt bei diesem Verfahren aber eine mechanische Tätigkeit, die der Reflektorstab-Träger durchzuführen hat (vgl. [MÖSER et al. 2000]). Die Automation bleibt hier beschränkt auf das Anzeigen der Korrekturdaten.

Eine Vollautomation kann dagegen immer dann erreicht werden, wenn die reflektorlose Distanzmessung zum Einsatz kommen kann:

Bei der Absteckung von Wandpunkten sollen Punkte, die auf einer Geraden (Projekt-Normalgeraden) senkrecht zu einer definierten Ebene (i.d.R. eine Vertikalebene) liegen, auf einer (mehr oder minder ebenen) Wandfläche (Markierungsfläche) abgesteckt werden. Diese Aufgabenstellung ergibt sich vor allem bei der Verkleidung von Fassaden mit vorgefertigten Elementen [REYER et al. 2003]. Im Unterschied zur Absteckung von Punkten auf der Erdoberfläche kann hierbei i.d.R. die reflektorlose Distanzmessung genutzt werden. In Verbindung mit der Motorisierung des Tachymeters eröffnet sich damit die Möglichkeit, den Iterationsprozess bei der Absteckung zu automatisieren. Hierzu wird, genau wie bei der Absteckung einer beliebig orientierten Raumgeraden, nach jeder Messung der gemessene Punkt rechnerisch auf die Projekt-Normalgerade projiziert (Abb. 3-27). Als nächster Absteckpunkt dient dann der Lotfußpunkt auf der Projekt-Normalgeraden. Je glatter die Wandfläche ist und je näher sich das Tachymeter an der Projekt-Normalgeraden befindet, desto schneller nähert sich diese Iteration den Sollwerten an. In der Praxis ist dies meist schon bei der 2. Iteration der Fall.

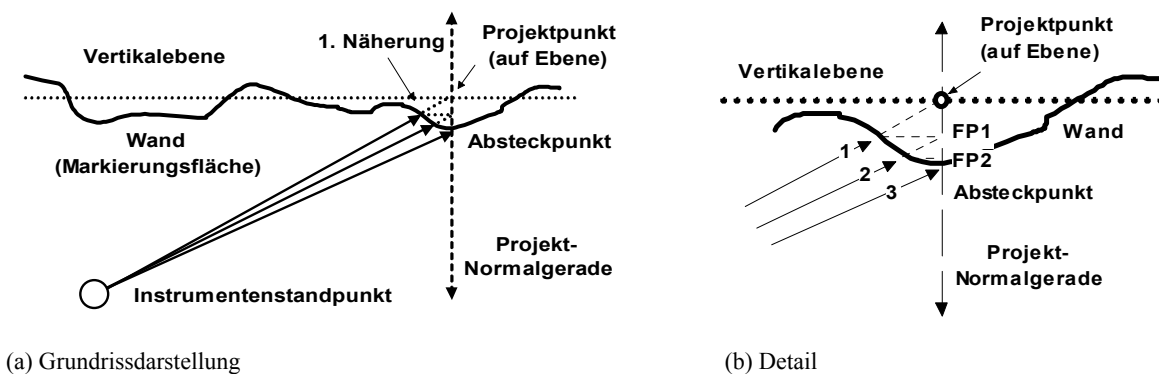


Abb. 3-27: Iterative Absteckung eines Fassadenpunktes

Sofern das Tachymeter über einen sichtbaren Laserstrahl verfügt, kann der projizierte Punkt direkt zum Markieren des Absteckpunktes verwendet werden. Ist dies nicht der Fall, so wird ein Mitarbeiter mit Hilfe des Strichkreuzes im Fernrohr zum Markieren eingewiesen.

3.2.3.3 Geraden des 2D-Entwurfs

Eine Gerade des 2D-Entwurfs definiert bei der örtlichen Absteckung eine Ebene (Abb. 3-24). So stellt sich beispielsweise eine geplante Wand aus dem Grundriss in der Örtlichkeit als Vertikalebene dar, eine horizontale Gerade des Fassadenplans definiert eine Horizontalebene. Die Absteckung kann somit nach demselben Verfahren wie bei dem zuvor beschriebenen Allgemeinfeld der Absteckung einer beliebig orientierten Ebene erfolgen. Die aus einer 2D-Geraden resultierende Ebene (Projekt-Normalebene) wird durch beliebige Punkte zweier Absteckkurven im Raum fixiert (Abb. 3-28). Das typische Anwendungsbeispiel dafür ist die Übertragung von Gebäudeachsen auf ein Schnur-

gerüst. Dabei werden durch die Reduzierung der Markierungsfläche auf eine Markierungslinie (das Brett des Schnurgerüsts) die Schnittkurven zu Schnittpunkten.

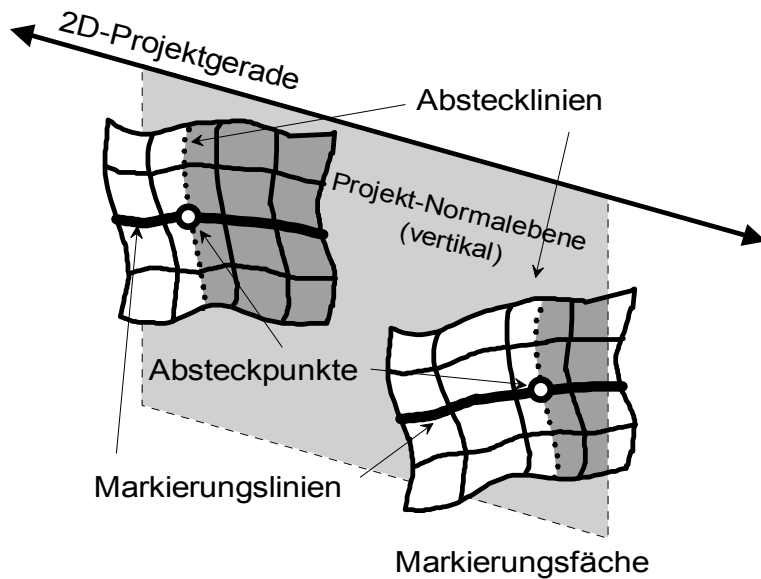


Abb. 3-28: Aus 2D-Gerade resultierende Vertikalebene

3.2.4 Tabellarische Darstellung tachymetrischer Absteckungsaufgaben

In diesem Abschnitt (3.2) wurde verdeutlicht, dass praktisch alle tachymetrischen Absteckungsarbeiten nach dem Grundprinzip der Iteration durchgeführt werden. Insbesondere wurde gezeigt, dass die Absteckung von Punkten (von aufwändigen Spezialfällen abgesehen) i.d.R. als Schnitt einer projizierten Geraden mit einer physischen Fläche betrachtet werden kann. Bei Absteckungsarbeiten an Objekten, bei denen die reflektorlose Distanzmessung eingesetzt werden kann, lässt sich die Iteration mit Hilfe von servomotorgesteuerten Tachymetern automatisieren.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass bei der Übertragung eines 2D-Entwurfs in die Örtlichkeit die gleichen Prinzipien wie bei der Übertragung eines 3D-Entwurfs angewendet werden können, sofern man berücksichtigt, dass Punkte des 2D-Entwurfs in der (dreidimensionalen) Örtlichkeit auf Geraden liegen und Geraden des 2D-Entwurf in der Örtlichkeit auf Ebenen liegen.

Diese Erkenntnisse erlauben es dem Anwender, bei Benutzung eines reflektorlos messenden, motorisierten Tachymeters (mit entsprechender Steuerungs-Software), projizierte Punkte, Geraden und Ebenen weitgehend automatisch, sehr schnell und sicher (weil ein ständiger Vergleich mit den Sollwerten durchgeführt wird) in die Örtlichkeit zu übertragen und zu markieren.

Die folgenden Tabellen fassen, getrennt nach 3D- und 2D-Entwurf die Absteckungsmöglichkeiten von Punkten, Geraden und Ebenen zusammen. Sie zeigen neben verschiedenen Anwendungsbeispielen, wie viele Markierungsflächen /-linien zur Festlegung notwendig sind und welche Art der Iteration durchgeführt wird.

3D-Entwurf

	Markierungsfläche	Iteration	Anwendungsbeispiele
Punkte	Zielzeichen	manuelles Verschieben des Reflektors	Lage- und Höhentrassierung beim Straßenbau
Gerade	2 Flächen	automatisch (Lotfußpunkt auf der Geraden)	Tunnelbau, Leitungsbau (Markierung auf zwei Zieltafeln)
Ebene			
Horizontalebene	1 Linie / Fläche	automatisch (Lotfußpunkt auf der Ebene)	Meterriss (Markierung an einer Wand bzw. einem Pfosten)
Vertikalebene	2 Linien / Flächen	automatisch (Lotfußpunkt auf der Ebene)	Längsschnitt (Markierung auf zwei Wänden)
Beliebig orientierte Ebene	3 Linien / Flächen	automatisch (Lotfußpunkt auf der Ebene)	Beliebig gelagerter Schnitt (Markierung auf 3 Wänden)

2D-Entwurf

Diese Tabelle berücksichtigt insbesondere den Zusammenhang zwischen der Entwurfsebene und der dazu senkrecht stehenden Projekt-Normalgeraden bzw. -ebene. Projektierte Punkte liegen in der dreidimensionalen Örtlichkeit auf dieser Geraden, projizierte Geraden liegen auf dieser Ebene.

	Entwurfsebene	Projekt-Normalgerade / Normalebene	Markierungsfläche / -linie	Iteration	Anwendungsbeispiele
Punkte					
Bodenpunkt	Grundriß	Lotrichtung	Erdoberfläche	Einweisen des Reflektors	Grenzpunkt, Trassierungspunkt
Fassadenpunkt	Ansicht	Gerade senkrecht zur Entwurfsebene	Fassade	automatisch (Lotfußpunkt auf der Projekt-Normalgeraden)	Befestigungspunkt für Fassadenelement
allg. Ebenenpunkt	Raumebene	Gerade senkrecht zur Entwurfsebene	beliebig orientierte (gekrümmte) Fläche	automatisch (Lotfußpunkt auf der Projekt-Normalgeraden)	Innenausbau
Gerade					
Bodenvermarkung mit zwei Punkten	Grundriß	Zwei Lotrichtungen	Erdoberfläche	Einweisen des Reflektors	Bauflucht
Vermarkung auf Schnurgerüst	Grundriß	Vertikalebene	Zwei Bretter des Schnurgerüsts	automatisch (Lotfußpunkt auf der Vertikalebene)	Bauflucht, Vertikalschnitt
Ebene					
Höhe		Horizontalebene	Wand / Pfosten	automatisch (Lotfußpunkt auf der Horizontalebene)	Meterriss

3.3 Scannen

Eng verknüpft mit der iterativen Absteckung sind die im Folgenden vorgestellten Scan-Verfahren. Unter „Scannen“ wird hier die automatisch gesteuerte, massenweise Aufnahme von Einzelpunkten verstanden. Aufgrund der relativ langen Zeitdauer der Entfernungsmessung und der Trägheit des Gerätes bei der servomotorgesteuerten Positionierung kann man diese Art der Messung nicht mit der von echten Laserscannern vergleichen, die einige tausend Punkte pro Sekunde erfassen können. Ein servomotorgesteuertes Tachymeter bietet jedoch die Möglichkeit, bestimmte Bereiche eines Objektes sehr gezielt zu untersuchen, so dass dabei von „intelligentem“ Scannen gesprochen werden kann.

Im folgenden Kapitel werden zwei grundsätzlich verschiedene Arten des Scannens vorgestellt: Das Abtasten einer polygonal begrenzten Ebene mit einer bestimmten Rasterweite (Rasterscan) und das Abtasten eines Profils (Linienscan, vgl. [BUCHMANN, 1996]). Einleitend wird die Bedeutung von definierten Ebenen beim Scannen erläutert. Linien- und Rasterscan werden beschrieben und es werden entsprechende Beispiele aufgeführt.

3.3.1 Ebenendefinition

Sowohl beim Scannen von Oberflächen als auch beim Scannen von Profilen muss zuvor die Ebene definiert werden, in der bzw. auf der die Messungen vorgenommen werden. Als Ebenen können beliebig orientierte Vertikal- und Horizontalebene gewählt werden. Vertikalebene werden mit Hilfe zweier Punkte, Horizontalebene durch die Höhenlage definiert.

Die Praxis hat gezeigt, dass es nicht nur sinnvoll ist, eine Ebene durch zwei Punkte zu definieren, die tatsächlich in der Ebene selbst liegen (Standardfall Abb. 3-29) sondern auch durch Hilfsebenen senkrecht zur Schnittebene (Abb. 3-30) und (bei streng bauwerksbezogenen Koordinatensystemen) durch die Abstände zu den Koordinatenachsen.

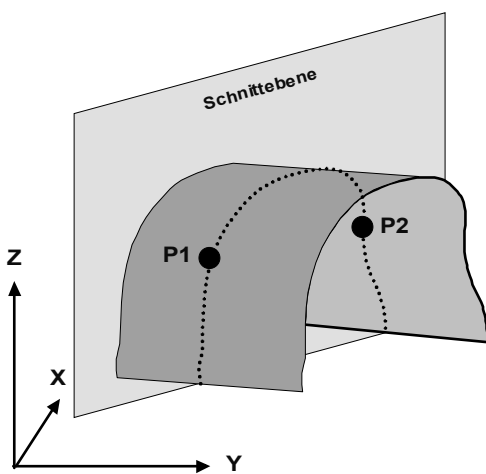


Abb. 3-29: Definition mit zwei Punkten

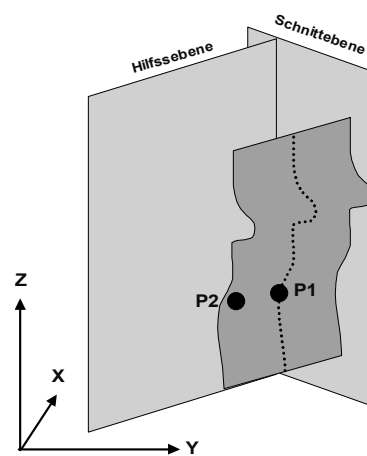


Abb. 3-30: Definition mit Hilfsebene

Die Definition der Schnittebene durch eine senkrecht dazu verlaufende Hilfsebene ist immer dann notwendig, wenn ein annähernd lotrechtes Profil (z.B. Neigung eines Kirchturms) abgetastet werden soll. Die Standard-Definition würde bei zwei annähernd übereinander liegenden Definitionspunkten die dazugehörige Schnittebene nicht hinreichend genau festlegen.

3.3.2 Linienscan

Beim Linienscan soll die Linie ermittelt werden, die sich beim Schnitt einer Form mit einer zuvor definierten Ebene ergibt. Dabei ist es nicht notwendig, das Vermessungsgerät selbst in dieser Ebene zu positionieren. Der nachbarschaftliche Abstand der Punkte innerhalb des Profils ist frei wählbar.

Der Anwender hat vorab den maximalen Abstand zu definieren, bei dem ein angemessener Punkt noch als der Ebene zugehörig angesehen werden kann („Ebenendicke“). Aus praktischen Gründen sollte dieser nicht zu klein sein, um ein allzu langes Nachsteuern des Gerätes zu verhindern.



Abb. 3-31: Linienscan

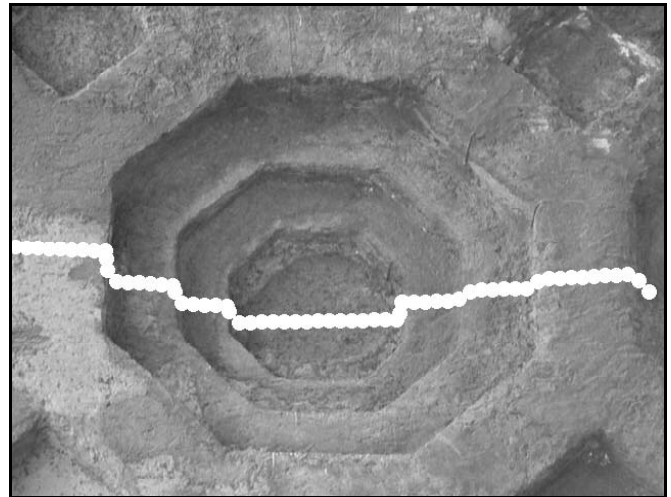


Abb. 3-32: Detail

Dem Linienscan liegt folgender Vermessungsablauf zu Grunde (vgl. 3.2 „Absteckung“):

1. Aus der Position des zuvor definierten Profil-Anfangs- und Endpunktes wird ein Folgepunkt vorausberechnet, der vom Vermessungsinstrument automatisch abgesteckt wird.
2. Es erfolgt eine Messung.
3. Der Abstand des gemessenen Punktes zum Profil wird ermittelt.
4. Ist der Abstand zum Profil größer als eine zuvor definierte „Ebenendicke“, erfolgt eine automatische Nachregelung des Vermessungsinstruments.
5. Diese Nachregelung wird maximal dreimal wiederholt. Befindet sich der Punkt dann immer noch nicht innerhalb der definierten Ebene, wird die Iteration abgebrochen. Es ist dann davon auszugehen, dass die Ebene aufgrund der geometrischen Verhältnisse nicht erreicht werden kann.
6. Aus zwei aufeinander folgenden in der Ebene liegenden Punkten wird jeweils der nächste Punkt vorausberechnet.

Diese Schleife wird solange durchlaufen, bis der Endpunkt des Profils erreicht ist.

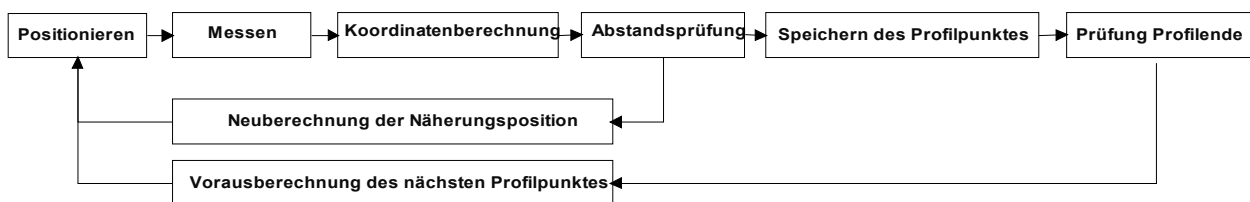


Abb. 3-33: Ablaufschema Profilmessung

Beispiel Maxentius-Basilika

Dieses Anwendungsbeispiel [JURETZKO, 2001] zeigt einen Längsschnitt durch die über 90 m lange und 30 m hohe Maxentius-Basilika auf dem Forum Romanum in Rom. Der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten beträgt 3 cm. Der Schnitt wurde von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen.

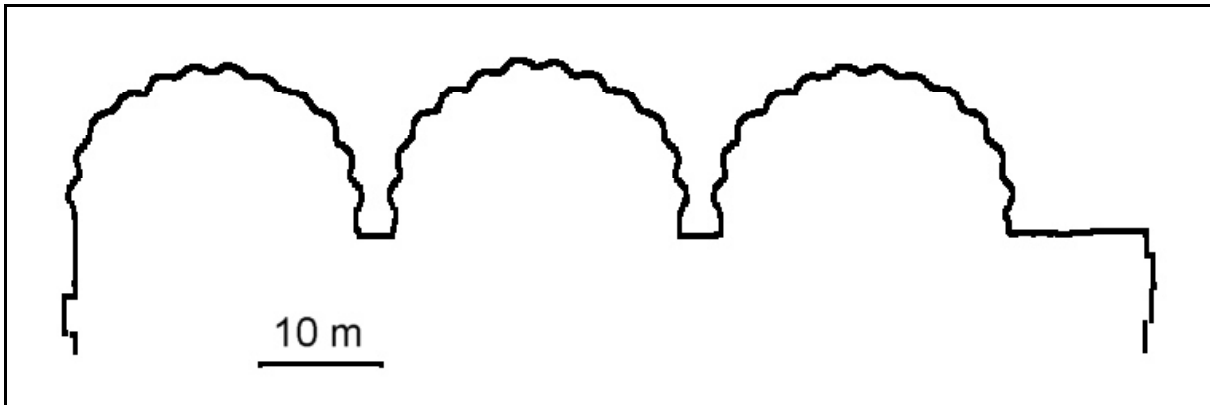


Abb. 3-34: Gesamtansicht: Länge ca. 90 m, ca. 5400 Punkte

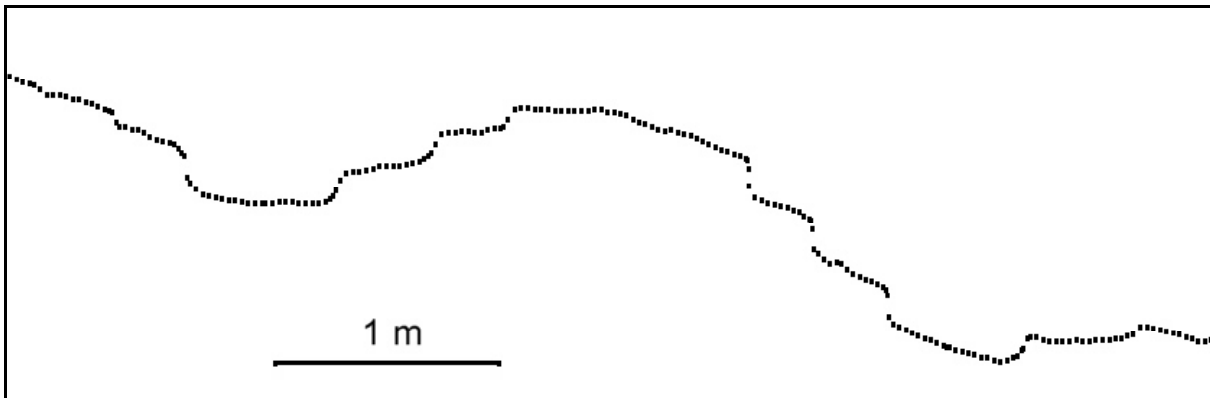


Abb. 3-35: Detailansicht: Länge des Ausschnitts ca. 4 m

3.3.3 Beispiele für Detaillösungen beim Linienscannen

Während des Scannens können vor allem folgende Störungen auftreten:

- Grob fehlerhafte Streckenmessung aufgrund von Strahlunterbrechungen
- Profilabriss
- Unerreichbarkeit der Ebene aufgrund der geometrischen Gegebenheiten
- Keine Streckenmessung möglich aufgrund von Materialeigenschaften (mangelnde Reflexionseigenschaften) oder fehlender Reflexionsfläche

Messfehler

Streckenmessfehler entstehen z.B. dadurch, dass eine Person während der Streckenmessung den Zielstrahl durchquert. Es wird getestet, ob die aktuelle Streckenmessung um einen bestimmten Betrag von der Strecke zum letzten Profilpunkt abweicht. Ist dies der Fall, so wird eine weitere Streckenmessung durchgeführt. Wird die erste Messung durch die zweite bestätigt, so handelt es sich nicht nur um eine kurzfristige Unterbrechung, sondern vermutlich um einen Profil-Abriss.

Profil-Abrisse

Profil-Abrisse ergeben sich aus der Geometrie des Objektes und sind mit einem Schattenwurf zu vergleichen. Kommt es zu einem solchen Abriss, wird der Linienscan mit neuen Startwerten fortgesetzt.

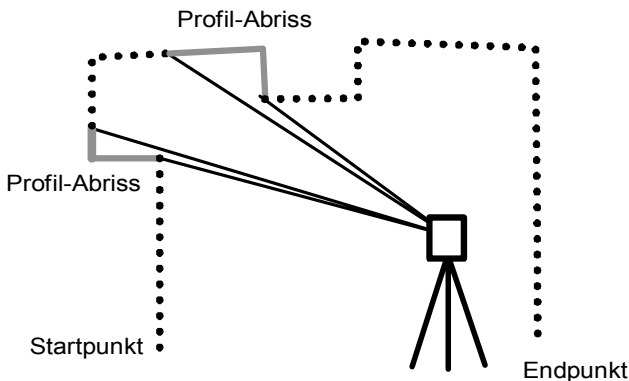


Abb. 3-36: Profilabriss

Unerreichbarkeit von Ebenen

Die Gefahr der Unerreichbarkeit von Ebenen besteht nur dann, wenn das Vermessungsinstrument selbst nicht in der Definitionsebene liegt. Ein typisches Beispiel dafür sind ungünstig gelegene Mauernischen. In einem solchen Fall wird der Abstand zwischen den Punkten automatisch so weit vergrößert, bis die Ebene wieder erreicht wird.

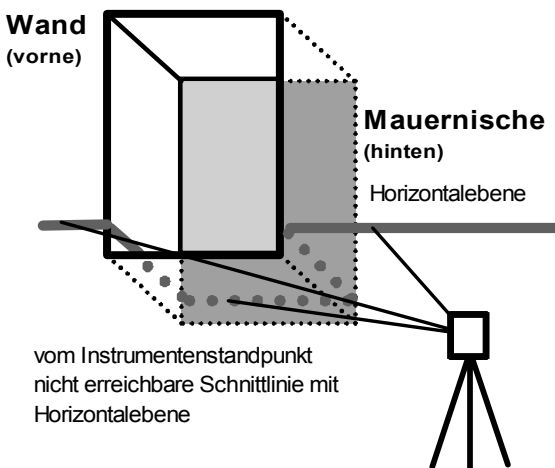


Abb. 3-37: Unerreichbare Horizontalebene

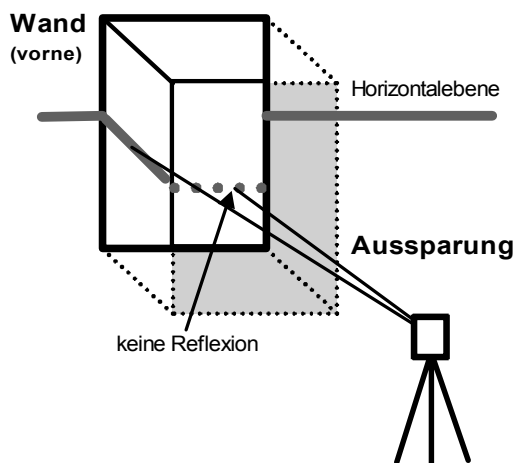


Abb. 3-38: Fehlende Reflexion (Loch)

Fehlende Reflexion

Eine ähnliche Reaktion zeigt sich, wenn aufgrund fehlender Reflexion keine Streckenmessung durchgeführt werden kann. Die fehlende Reflexion kann einerseits auf Materialeigenschaften zurückgeführt werden. Ein anderer Grund ist das vollständige Fehlen einer Reflexionsfläche (z.B. bei Mauerdurchbrüchen). Auch hier wird versucht, durch automatische Vergrößerung des Punktabstandes wieder eine messbare Fläche innerhalb der Definitionsebene zu finden.

3.3.4 Rasterscan

Beim Rasterscan werden innerhalb eines polygonal begrenzten Bereichs (der beliebig viele Aussparungen aufweisen darf) in einer Ebene Punkte vorausberechnet. Die Maschenweite des Punktrasters ist dabei frei wählbar. Die Vorausberechnung der Punkte geschieht nach folgendem Algorithmus:

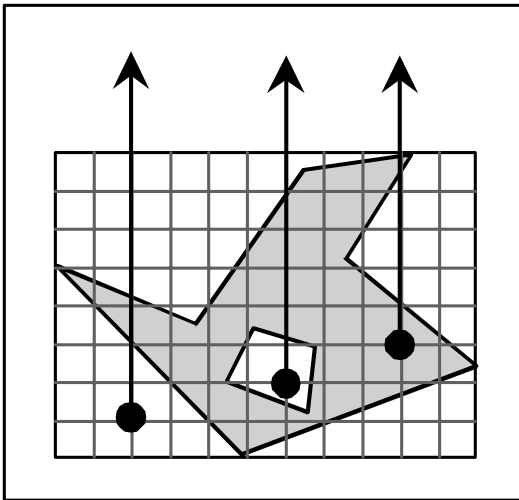


Abb. 3-39: Berechnungsschema

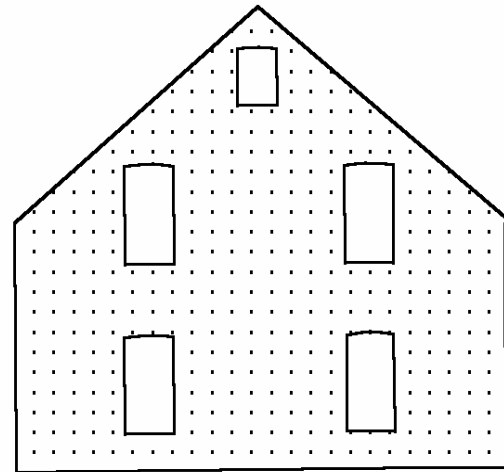


Abb. 3-40: Vorausberechnete Punkte

- Es werden die Koordinaten aller Maschenkreuze innerhalb der Maximaldimensionen des Polygons berechnet.
- Die Prüfung, ob der berechnete Punkt inner- oder außerhalb des Polygon liegt, wird wie folgt durchgeführt: Es wird untersucht, wie häufig ein Punkt „auf dem Weg nach oben“ eine der Polygonseiten schneidet. Bei gerader Anzahl befindet sich der Punkt außerhalb, bei ungerader innerhalb des Polygons.

Beispiel

Als Anwendungsbeispiel für den Raster-Scan ist das Abtasten einer Fassade dargestellt. Aus den Scandaten lassen sich Oberflächenmodelle erstellen, die zur Beurteilung der Unebenheiten der Fassade genutzt werden können (vgl. [SCHERER / JURETZKO, 2000]).

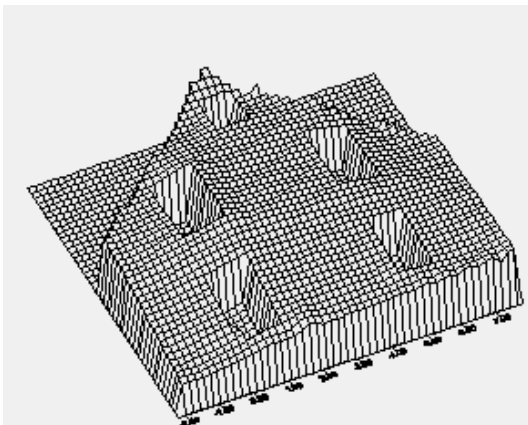


Abb. 3-41: Gitterliniendarstellung

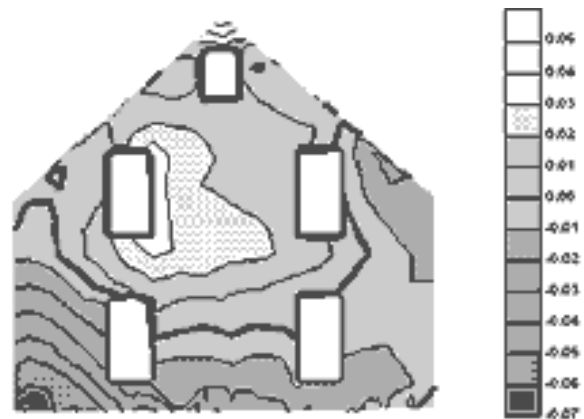


Abb. 3-42: Isoliniendarstellung

Das Beispiel zeigt deutlich eine Wölbung der Fassade im Bereich des linken Fensters im Obergeschoß (heller Bereich in Abb. 3-42) von 5 cm gegenüber der definierten Vertikalebene im Bereich der Erdgeschossfenster.

3.3.5 Bewertung des Tachymeter-Scannens

Wie gezeigt, eignet sich das hier vorgestellte Vermessungssystem auch ohne die enorme Leistungsfähigkeit eines echten Laserscanners sehr gut zur automatischen Erfassung von Oberflächen und Profilen. Dies ist vor allem auf die

Tatsache zurückzuführen, dass das Gerät durch die Steuerungssoftware auf bestimmte Anforderungen reagieren kann, so z.B. das Verbleiben in einem bestimmten Profil und die Reaktion auf unplausible Messwerte.

Insbesondere kann der Anwender die gewünschten Profile im Angesicht des Vermessungsobjektes vor der Messung definieren und von einem anderen Standpunkt aus fortführen. Er ist nicht darauf angewiesen, sie erst im Nachhinein aus einer Punktwolke zu extrahieren.

Ein Hauptvorteil gegenüber einem echten Laserscanner, der ein reines Erfassungsgerät ist, liegt darin, dass einzelne Profilpunkte in der Örtlichkeit angezeigt werden können, so z.B. der Schnittpunkt eines Horizontalprofils mit einem Vertikalprofil.

3.4 Sonderlösungen zur Koordinatenbestimmung

Bei der reflektorlosen tachymetrischen Aufnahme eines Objektes kann es trotz überlegter Standortwahl zu der Situation kommen, dass einige objektbeschreibende Punkte nicht direkt messbar sind. Diese problematischen Punkte kann man in vier Kategorien unterteilen:

- Die Punkte sind physisch nicht vorhanden, da es sich um idealisierte Punkte handelt, wie den Schnittpunkt zweier vertikaler Wände.
- Die Punkte sind durch andere Bauteile verdeckt, wie z.B. Punkte in Mauernischen.
- Die Punkte können aufgrund des endlichen Querschnitts des Messstrahles nicht eindeutig bestimmt werden.
- Die Punkte können aufgrund ihrer Reflexionseigenschaften nicht reflektorlos angemessen werden. Typisch sind hier spiegelnde und sehr dunkle, feuchte Oberflächen.

Bei der klassischen tachymetrischen Aufnahme ist es üblich, diese problematischen Punkte mit Hilfe des Handaufmaßes zu ergänzen: Dazu werden tachymetrische Hilfspunkte bestimmt, von denen aus Längenmessungen mit Hilfe von Zollstöcken, Messbändern oder elektrooptischen Distanzmessgeräten (z.B. Leica DISTO) zu den Objektpunkten vorgenommen werden. Es werden dabei rechte Winkel gemessen oder vorausgesetzt. Die Situation wird im Feldbuch skizziert. Die Berechnung der verdeckten Objektpunkte erfolgt i.d.R. erst bei der häuslichen Aufbereitung der Aufnahme. Sofern die Vermessung mit Hilfe eines angeschlossenen Notebooks online ausgewertet wird, können die verdeckten Punkte sofort konstruiert werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte integrale Vermessungssystem stellt dem Benutzer verschiedene Werkzeuge zur Verfügung, problematische Punkte zu erfassen, ohne dass Hilfspunkte abgespeichert und nachträgliche Berechnungen notwendig werden. Die oben aufgeführten vier Fälle werden im Folgenden behandelt.

3.4.1 Physisch nicht existenter Punkt als Geradenschnitt

Ein häufig benötigter, aber oftmals problematischer Punkt ist der Schnittpunkt zweier Wände. Oft liegt dieser Punkt an einer beschädigten oder ausgerundeten Kante. Setzt man voraus, dass die Wände hinlänglich eben sind, so lässt sich dieser Punkt durch den Schnitt zweier 2D-Geraden berechnen. Die 4 notwendigen Wandpunkte können dazu in messtechnisch unproblematischen Wandbereichen bestimmt werden. Dem berechneten Punkt wird dabei die Höhenkoordinate des am nächsten gelegenen Hilfspunktes zugeordnet.

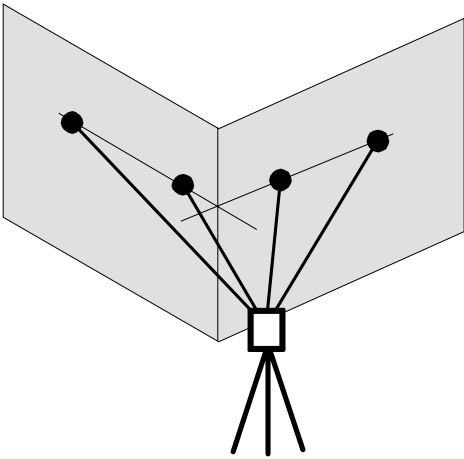


Abb. 3-43: Geradenschnitt

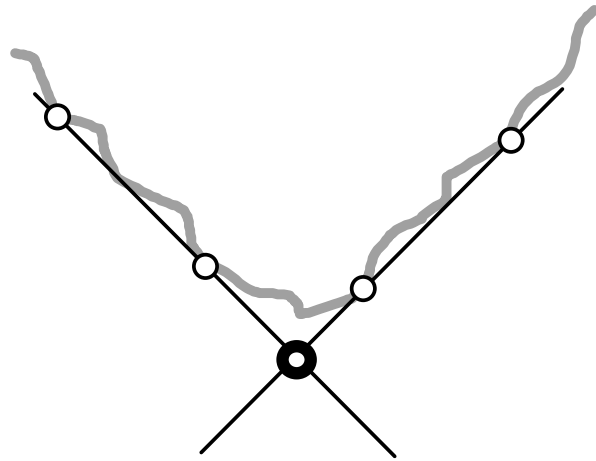


Abb. 3-44: Detail im Grundriss

3.4.2 Verdeckter Punkt

Orthogonalprojektion

Bei hinlänglich rechtwinkliger Geometrie können verdeckte Punkte, wie sie z.B. bei Mauernischen auftreten, durch Orthogonalprojektion bestimmt werden.

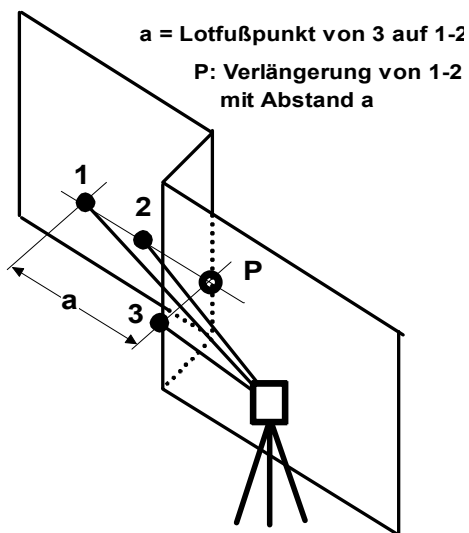


Abb. 3-45: Orthogonalprojektion, Variante 1

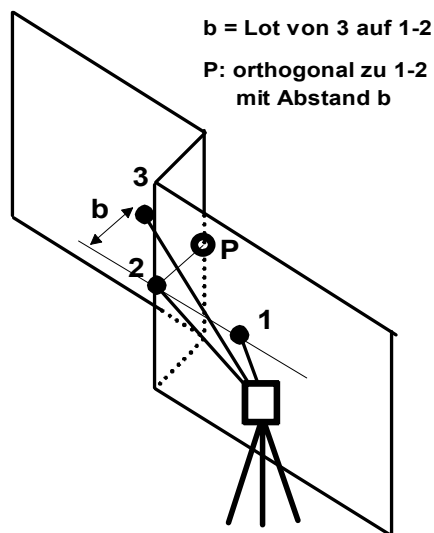


Abb. 3-46: Orthogonalprojektion, Variante 2

Bei der ersten Variante wird die Position des zurückliegenden Punktes P dadurch ermittelt, dass der Punkt 3 auf die Linie 1-2 projiziert wird. Bei der zweiten Variante wird die Position des zurückliegenden Punktes P dadurch ermittelt, dass das Lotmaß „b“ von Punkt 3 auf die Linie 1-2 berechnet und mit diesem Maß in Punkt 2 ein zur Linie rechtwinkliger Punkt berechnet wird. Bei beiden Varianten wird dem berechneten Punkt die Höhenkoordinate des Punktes 2 zugewiesen.

Diese Vorgehensweise hat im Vergleich mit der sonst üblichen Vorgehensweise des ergänzenden Handaufmaßes und nachträglicher Konstruktion den Vorteil, dass alle notwendigen Maße mit dem Tachymeter bestimmt werden können.

Extrapolationsstab

Eine weitere Möglichkeit, verdeckte Punkte zu bestimmen ist der Einsatz eines Extrapolationsstabes (Abb. 3-47). Hierbei werden zwei Punkte eines Stabes bekannter Länge angemessen und die Position der Stabspitze berechnet. Der Stab darf zwischen den Messungen nicht in seiner Lage verändert werden.

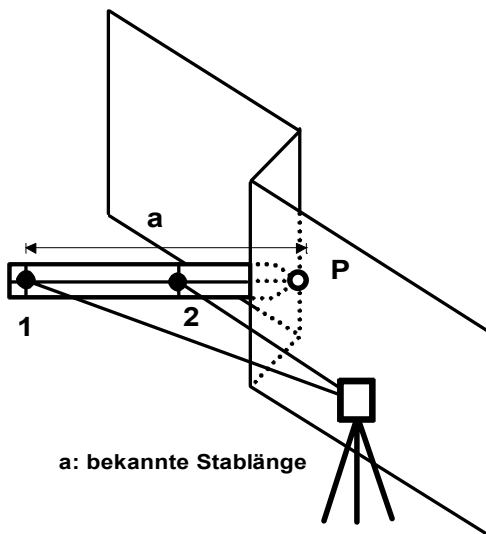


Abb. 3-47: Extrapolationsstab

Alternativ zu den bekannten Kanalmessstäben mit zwei oder mehreren Prismen an bestimmten Positionen [ECKSTEIN / HOMOLKA, 1997] wurde ein Extrapolationsstab mit codierten Zielmarken entwickelt und patentiert [SCHERER et al., 2003], der die Vorteile der reflektorlosen Entfernungsmessung bei diesem Messprinzip ausnutzt (Abb. 3-48). Er ist durch ein Stecksystem in seiner Länge variabel. Zudem wurden die Zielmarken mit Leuchtdioden versehen, was gerade bei den oft mangelhaften Beleuchtungsverhältnissen in Innenräumen die Anzielung erleichtert.

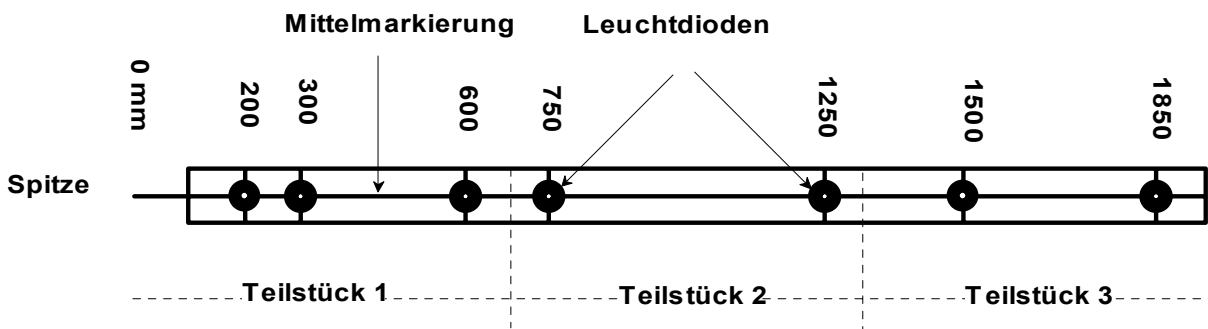


Abb. 3-48: Codierter Extrapolationsstab

Die Verwendung des Extrapolationsstabes kann in zwei verschiedenen Aufmessungsvarianten erfolgen.

Bei der ersten Variante wird in der ersten Messung eine bekannte Zielmarke angemessen und der Abstand der Zielmarke von der Stabspitze wird dem Vermessungssystem per Tastatureingabe mitgeteilt. Die zweite Zielung erfolgt auf einen beliebigen Punkt auf der Mittelmarkierung (der Abstand zwischen den beiden Zielungen kann aus den Raumkoordinaten berechnet werden). Dadurch wird es möglich, den Abstand zwischen den beiden Messpunkten den tatsächlichen Sichtverhältnissen anzupassen und ihn möglichst groß zu wählen.

Bei der zweiten Variante werden zwei beliebige bekannte Zielmarken angemessen. Diese sind in ihrem Abstand zueinander so codiert, dass das Programm aufgrund des Abstandes automatisch erkennt, welche der Marken angezielt worden sind. Auch diese Variante erlaubt dem Anwender eine bessere Anpassung der Messung an die tatsächlichen Sichtverhältnisse als bei Verwendung von Extrapolationsstäben mit nur zwei Prismen.

Verlängerung

Ein der Messung mit dem Extrapolationsstab ähnliches Prinzip wird bei dem Verfahren des Verlängerns eingesetzt. Ein typisches Beispiel dafür stellen die unteren Fensterpunkte hoch gelegener Fenster dar (Abb. 3-50). Diese Punkte sind in der Regel durch Fensterbänke verdeckt und können somit nicht direkt angezielt werden.

Bei Fassadenvermessungen ist es oft möglich, den Abstand (a) vom oberen zum unteren Fensterpunkt von Hand vorab zu messen. So reicht es beim Tachymeteraufmaß, den oberen Punkt (1) anzumessen und irgendeinen weiteren Punkt (2) entlang der Fensterkante in der Nähe des unteren Punktes.



Abb. 3-49: Nicht anzielbare Fensterunterkante

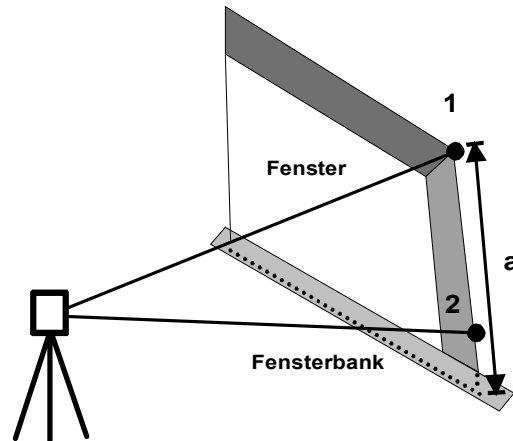


Abb. 3-50: Verlängerung

3.4.3 Kanten

Wie in 3.1.3 beschrieben, wird aufgrund des endlich großen Querschnitts des Laserstrahls das Messsignal immer über eine bestimmte Fläche integriert.

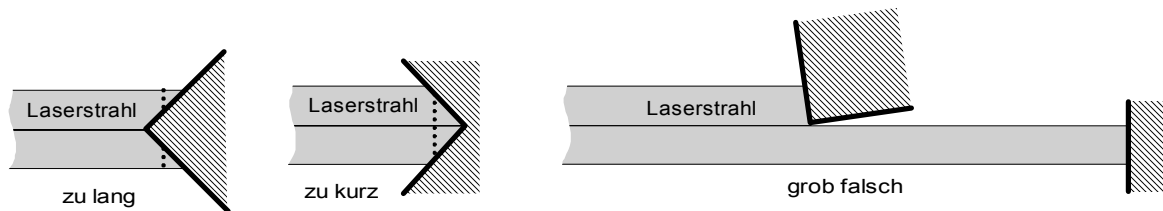


Abb. 3-51: Messverhalten an Ecken und Kanten

Bei der Messung zu Außenecken wird die Entfernung systematisch zu lang, bei der Messung zu Innenecken systematisch zu kurz ermittelt. Weil der Laserstrahl der benutzten Totalstation im Nahbereich einen Querschnitt kleiner 1,5 cm hat, ist diese Verfälschung in der Praxis kaum relevant, da sie meist von der Oberflächenrauigkeit des Materials überlagert wird. Wesentlich gefährlicher ist die unsystematische Streckenverfälschung bei Messungen auf „freie“ Kanten, die vom Messstrahl gestreift werden: Durch das Mischsignal aus Messungen zum angezielten Vordergrund und dem zufälligen Hintergrund kommt es zu grob falschen Ergebnissen.

Herkömmliche praktische Lösungen

Dieses Problem wurde in der Praxis bislang durch zwei verschiedene Vorgehensweisen gelöst:

Eine Möglichkeit ist die Trennung von Richtungs- und Entfernungsmessung (Abb. 3-52). Zuerst wird die Entfernungsmessung in einem unkritischen Oberflächenbereich in der Nachbarschaft des Punktes ausgeführt. Danach erfolgt die Richtungsmessung zu dem kritischen Punkt. Bei der Registrierung der Messwerte wird die Entfernungsmessung den Richtungsmessungen zugeordnet. Dies setzt voraus, dass die benutzten Vermessungsinstrumente dieses Vorgehen erlauben. Hierbei kommt es jedoch immer zu systematischen Verfälschungen, da die Strecke in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel des Messstrahles immer zu kurz gemessen wird.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, durch die Messung von drei Punkten in der unkritischen Umgebung des Punktes eine Ebene aufzuspannen und den kritischen Punkt durch einen Schnitt des Richtungsvektors vom Vermessungsinstrument zum Punkt mit der Ebene zu bestimmen (Abb. 3-53). Grundvoraussetzung hierfür ist, dass sich alle vier Punkte in einer Ebene befinden. Dieses Verfahren ist gut dafür geeignet, eine ganze Reihe von Punkten ohne direkte Entfernungsmessung zu bestimmen. Zur Ermittlung eines einzigen kritischen Punktes ist es jedoch sehr aufwändig und fehleranfällig.

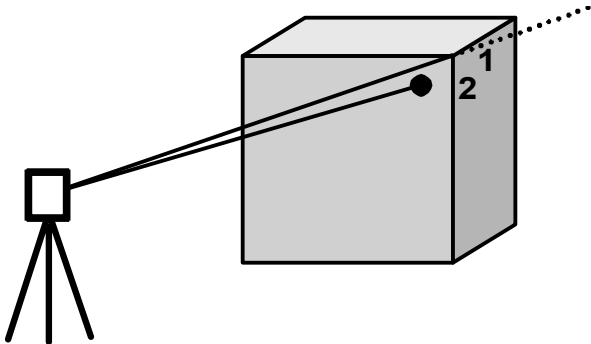


Abb. 3-52: Trennung von Richtung und Entfernung

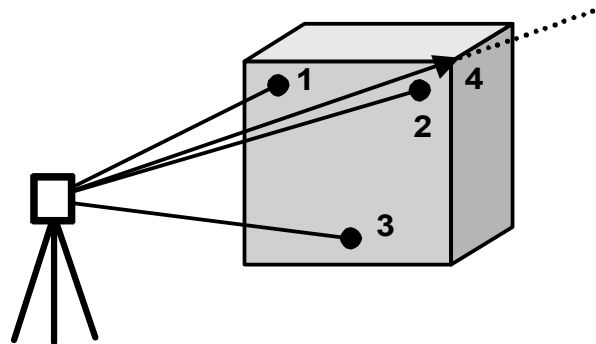


Abb. 3-53: Schnitt Richtung / Ebene

Automatisches Auslenken des Laserstrahls

Als Alternative zu dieser Vorgehensweise wurde das Verfahren des „automatischen Auslenkens“ entwickelt (Abb. 3-54). Dabei wird der kritische Punkt 1 angezielt. Am Datenerfassungsgerät kann nun die Richtung der unkritischen, ebenen Umgebung des Punktes gewählt werden. Ausgehend von der Richtung zum Punkt 1 wird der Messstrahl zweimal um bestimmte (kleine) Richtungsbeträge in ein- und derselben Ebene versetzt und es werden automatisch die Messungen zu Punkt 2 und 3 durchgeführt. Aus diesen beiden Streckenmessungen wird die Strecke zum Punkt 1 extrapoliert. Mit dieser Strecke und den Richtungen zum Punkt 1 wird dieser dann berechnet.

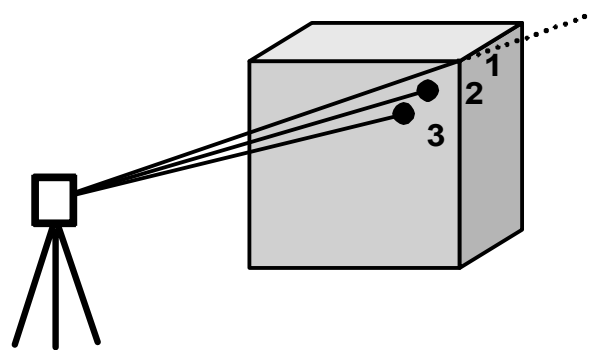


Abb. 3-54: Automatisches Auslenken

3.4.4 Mangelnde Reflexionseigenschaften

Bei Punkten, die aufgrund mangelnder Reflexionseigenschaften (spiegelnd, feucht, sehr dunkel) nicht reflektorlos aufgemessen werden können, muss der Beobachter eingreifen, indem er eine künstliche Reflexionsfläche schafft. Im einfachsten Fall kann er, nachdem die Richtung zum Aufnahmepunkt eingestellt ist, ein Blatt Papier auf den Punkt halten lassen.

3.5 Zusammenfassung des Kapitels

Im vorangegangenen Kapitel ist gezeigt worden, wie sehr der Anwender durch die Möglichkeiten moderner Tachymeter unterstützt und somit die zentrale Stellung der Tachymetrie innerhalb des Zusammenspiels der verschiedenen Vermessungsmethoden ausgebaut werden kann. Dabei wurde insbesondere die Iterationsschleife „Messen-Berechnen-Positionieren“ zur Entwicklung (teil-) automatischer Vermessungsabläufe herangezogen. Es wurde gezeigt, dass ein Grossteil aller Absteckungsarbeiten an Bauwerken auf ein und dasselbe Grundprinzip zurückgeführt werden kann. Gerade in der Möglichkeit der Absteckung liegt der große Vorteil der Tachymetrie gegenüber den anderen aufgeführten Vermessungsmethoden. Aufbauend auf dem Verfahren der automatischen Absteckung wurde das von [BUCHMANN, 1996] vorgestellte Verfahren des Linienscannens, bei dem das Tachymeter außerhalb der Schnittebene postiert werden kann, weiterentwickelt. Abschließend wurden verschiedene Verfahren der indirekten Punktbestimmung vorgestellt. Alle wurden in das Vermessungssystem TOTAL so integriert, dass der Anwender sie sofort vor Ort einsetzen kann. Beim neu entwickelten Extrapolationsstab wird dabei konsequent die Möglichkeit der reflektorlosen Entfernungsmessung genutzt, beim „automatischen Auslenken“ zusätzlich noch die Positionierungsmöglichkeiten aufgrund der Motorisierung des Tachymeters.

4 Video-Tachymetrie

Wie schon im Titel ausgedrückt, steht die Synthese geodätischer und photogrammetrischer Elemente im Mittelpunkt dieser Arbeit. Im folgenden Kapitel wird das in 2.3 konzipierte modulare Vermessungssystem durch die Integration von „intelligenter“ Tachymetrie und photogrammetrischen Elementen in seiner Endstufe realisiert. Einleitend werden im Abschnitt „Stand der Technik“ bestehende Vermessungssysteme vorgestellt, die Theodolite bzw. Tachymeter mit Kameras kombinieren. Danach folgt die Beschreibung der Adaption der (drei) internen Kameras an das entwickelte Vermessungssystem. Im dritten Abschnitt werden dann diverse Lösungen zur Integration von Bilddaten sowohl interner als auch externer Kameras in das Vermessungssystem erarbeitet (Tachymetersteuerung, georeferenziertes Bildarchiv). Insbesondere wird gezeigt, wie die Bilddaten der internen Kameras genutzt werden können, um direkt bei der tachymetrischen Erfassung der Geometrie eines Objektes das entstehende Modell mit photorealistischer Textur zu belegen.

4.1 Stand der Technik

Im Folgenden sollen verschiedene Vermessungssysteme vorgestellt werden, bei denen Theodolite bzw. Tachymeter mit elektronischen Kameras kombiniert worden sind. Die einzelnen Systeme unterscheiden sich zum Teil deutlich im gerätetechnischen Aufbau wie auch im angestrebten Anwendungsbereich.

4.1.1 Serien-Produkte

Die (wenigen) bisherigen Serienprodukte, die Theodolite mit einer Kamera kombinierten, kommen hauptsächlich in mobilen Industriemesssystemen zum Einsatz: Durch Messung der Richtungen von zwei verschiedenen Gerätestandpunkten zu einem klar definierten Objektpunkt können (sofern die Theodolite gegenseitig orientiert sind und die Distanz zwischen ihnen bekannt ist) mit Hilfe des Vorwärtsschnittes die 3D-Koordinaten eines Objektpunktes bestimmt werden (Abb. 4-1).

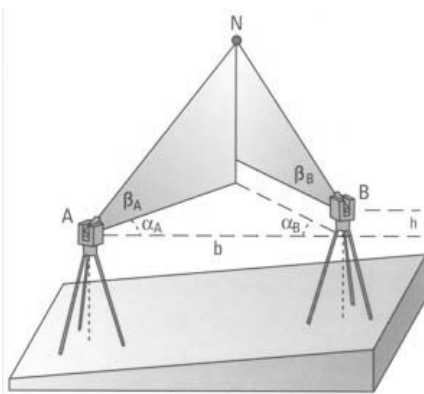


Abb. 4-1: Schema Industriemesssystem



Abb. 4-2: KERN E2-SE

KERN E2-SE

Im Jahre 1987 stellte die Firma Kern mit dem E2-SE einen Videotheodolit (Abb. 4-2) vor, der über einen externen Rechner gesteuert werden kann [GOTTWALD, 1987]. Neu für ein Seriengerät war damals (neben dem Einbau einer CCD-Kamera) die Motorisierung der Achsen, die eine Positionierung im Genauigkeitsbereich des Winkelmesssystems ermöglichen musste. Die „manuelle“ Positionierung des Instruments konnte ausschließlich mit Hilfe eines Joysticks erfolgen. Das (manuell) fokussierte Bild wurde dabei durch einen Strahlenteiler im Verhältnis 50:50 in ein visuell mit dem Okular zu betrachtendes und ein auf dem CCD-Array abgebildetes Bild aufgeteilt. Das Videosignal konnte zum einen auf einem Monitor betrachtet werden, zum anderen konnte es mit Hilfe von Bildbearbeitungsinstrumenten ausgewertet werden.

In erster Linie wurden diese Systeme innerhalb der oben beschriebenen Industriemesssysteme eingesetzt. Die dazu entwickelte Software SPACE ermöglichte verschiedene automatische Messungsabläufe. So konnten z.B. auf dem Objekt angebrachte kreisrunde, retroreflektierende Folien oder projizierte Laserpunkte detektiert werden. Beachtens-

wert war auch der Profil-Mode zur 3D-Oberflächenvermessung: Ein vorgegebenes „Fenster“ wurde von einem „Master“-Instrument mit Laserpointer zur Signalisierung in Profilen abgetastet. Die „Slave“-Instrumente folgten automatisch. Über Vorwärtsschnitt konnten die 3D-Koordinaten der Oberflächenpunkte berechnet werden.

LEICA TM3000V

[KATOWSKI, 1989] stellte das automatische Messsystem Wild Leitz ATMS vor. Dabei wurden Theodolite aus der Wild Leitz TM3000-Baureihe mit einer CCD-Kamera ausgerüstet, auf deren CCD-Chip das Sehfeld des Fernrohrs abgebildet wird (Abb. 4-3). Ähnlich dem KERN-E2 SE kann dieses System ausschließlich über joystick- bzw. softwaregesteuerte Motoren positioniert werden. Die Abbildung enthält das Bild des angezielten Objektes sowie den als Ersatz der Strichplatte in das Fernrohr eingebauten Referenzrahmen. Mit Hilfe eines Optikkopplers kann wahlweise das Bild der (exzentrisch angeordneten) Weitwinkeloptik auf das CCD-Array abgebildet werden (Abb. 4-4). Auch dieses, mit einem Laserpointer versehene System ist (mit entsprechender Software für die Bildbearbeitung und Weiterverarbeitung der Messwerte) vornehmlich für den Einsatz in Industriemesssystemen gedacht.

Zahlreiche Forschungsarbeiten am Institut für Geodäsie und Geophysik der Technischen Universität Wien beschäftigten sich mit der Optimierung eines Industriemesssystems auf Grundlage des (mittlerweile zum Leica-Konzern gehörenden) TM3000V. Insbesondere wurde nach Möglichkeiten gesucht, auf eine Signalisierung der Messpunkte (durch Messmarken bzw. Laserpointer) zu verzichten. Dabei wurde erforscht, wie mit Hilfe von Bildbearbeitungsalgorithmen markante und identische Punkte in den jeweiligen Bildern der Videotheodolite identifiziert werden können [MISCHKE, 2000], [ROIC, 1996], [FABIANKOWITSCH, 1990].



Abb. 4-3: LEICA TM3000V

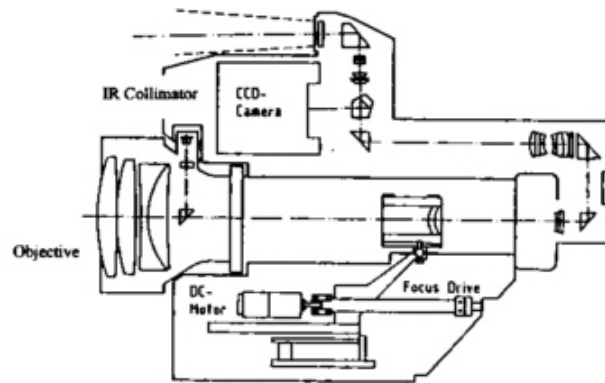


Abb. 4-4: Strahlengang

4.1.2 Spezial-Konstruktionen

HAZMAP

In [CHAPMAN et al. 1999] wird das photogrammetrische Auswertesystem HAZMAP vorgestellt. Es basiert aufnahmeseitig auf digitalen Kameras, die kalibriert auf einem servomotorgesteuerten digitalen Theodoliten montiert sind und somit per se Panoramabilder von jeder Station erzeugen können. Mit dem System HAZMAP wird das Konzept verfolgt, von technischen Anlagen umfassende, orientierte Bildarchive anzulegen, und die Bilder nur im Bedarfsfall geometrisch auszuwerten, also keine komplette, aufwändige 3D-Modellierung der gesamten Anlage durchzuführen. Eine direkte Bestimmung von Objektkoordinaten vor Ort ist aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur Streckenmessung nicht möglich.

SCHIRMER

In der Dissertation „Universaltheodolit und CCD-Kamera – ein unpersönliches Meßsystem für astro-geodätische Beobachtungen“ [SCHIRMER, 1994] wurde eine CCD-Kamera an einen KERN DKM 3-A Universaltheodolit adaptiert (Abb. 4-5). Ziel dieser Arbeit war es, ein entsprechendes Beobachtungssystem zusammenzustellen, zu kalibrieren und in einer Erprobung die Funktionsfähigkeit nachzuweisen. Darin wird in einem ausführlichen Exkurs gezeigt, wie aus den Bildkoordinaten und den Kreisablesungen Horizontal- und Vertikalrichtungen gebildet werden können.

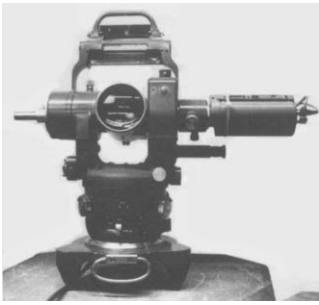


Abb. 4-5: Konstruktion nach Schirmer



Abb. 4-6: Konstruktion nach Uffenkamp

UFFENKAMP

[UFFENKAMP, 1995] stellt ein Konzept vor, eine opto-elektronische Kamera langer Brennweite auf ein zweiachsiges, uneingeschränkt stationierbares Schwenk-Neige-System mit präziser Richtungsmessung zu montieren. In der experimentellen Realisierung wurde dazu eine ROLLEI VC METRIC mit 756 x 581 Bildelementen anstelle des Zielfernrohres eines Theodolits GEODIMETER CD 400 SERVO direkt an dessen Kippachse montiert (Abb. 4-6). Als besonderer Vorteil dieses Konzeptes gegenüber einem Videotheodolit wird hierbei die Anwendung der Réseatechnik aufgeführt, die eine mechanisch einfache Möglichkeit zur Fokussierung bei konstanter Abbildungsgeometrie erlaubt. Der opto-elektronische Sensor wird dazu hinter einer fest mit dem Objektiv verbundenen Réseaplatte axial in Aufnahme richtung verschoben. Die Orientierung des Sensors zu jeder Fokusposition gelingt durch Messung der auf den Sensor projizierten Réseaukreuze.

HOVENBITZER

Ein Messsystem, welches mittels Vorwärtsschnitt nichtsignalisierte Oberflächenpunkte bestimmt, wird in [HOVENBITZER, 2003] vorgestellt (Abb. 4-7). Als Basissensor dient diesem hybriden System ein elektronisches Tachymeter (GEODIMETER 520), dessen Achsen durch Servomotoren angetrieben werden. Eine hochauflösende CCD-Zeile wird als bildgebender Sensor eingesetzt. Diese CCD-Zeile ist unter dem Fernrohr des Tachymeters angebracht und die steuerbaren Achsbewegungen des Tachymeters ermöglichen ein Scannen des Objektes. Ebenso ist in einem gewissen Abstand zur CCD-Zeile eine Projektionseinrichtung am Tachymeter montiert (Abb. 4-8). Die Projektion von mehreren Strichmustern, welche einen binären Code darstellen, ermöglicht die Zuordnung der zum Vorwärtsschnitt nötigen Winkelwerte einer Projektionszeile auf dem Objekt.

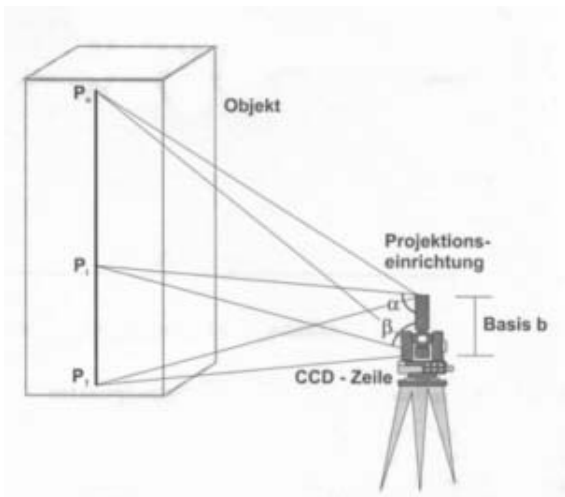


Abb. 4-7: Projektion nach Hovenbitzer

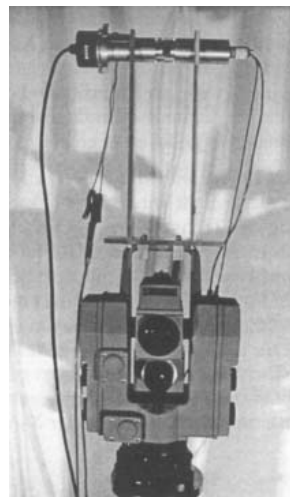


Abb. 4-8: Konstruktion nach Hovenbitzer

4.1.3 Systeme zur Zielpunkterfassung und –verfolgung (ATR-Funktion)

Zahlreiche elektronische Tachymeter der neuesten Generation bieten die Möglichkeit der automatisierten Suche bzw. Verfolgung von Zielpunkten. [STAIGER, 1997] stellt dazu einige unterschiedliche Lösungsansätze vor, die alle auf kooperativen Zielpunkten basieren. „Kooperativ“ heißt in diesem Zusammenhang, dass sie entweder codiert oder reflektierend sind, bzw. selbst Signale aussenden oder mit positionsempfindlichen Sensoren (aktive Zielmarke) ausgestattet sind. Der Suchvorgang kann grundsätzlich in eine Grobsuche (nach deren Abschluss sich das Ziel im Gesichtsfeld des Fernrohres befindet) und eine Feinsuche unterteilt werden. Bei der Feinsuche kommen häufig kameraähnliche Systeme zum Einsatz, die in den Strahlengang des Fernrohres integriert sind. Insbesondere besteht die automatische Zielerfassung ATR (Auto Target Recognition) von Leica im wesentlichen aus einer CCD-Kamera, die wie der elektronische Distanzmesser ins Fernrohr integriert ist. Damit wird die Ablage eines vom Tachymeter koaxial ausgesandten Laserstrahls bezüglich der optischen Fernrohrachse bestimmt.

[WASMEIER, 2004] untersucht das Potenzial der CCD-Kamera zur automatischen Zielerfassung eines Tachymeters (Leica TCA2003) bei der automatisierten Auswertung von Echtzeitszenarien. Dazu wurde das Instrument mit einem separaten Videoausgang nachgerüstet. Die Qualität der Bilder ist durch zwei wesentliche gerätetechnische Faktoren begrenzt: Zum einen wird bei der Aufspaltung der einfallenden Strahlung hauptsächlich der Anteil des nahen Infrarot zur Kamera weitergeleitet. Für die Detektion eines reflektierten Infrarotsignals ist das wünschenswert, für die Aufzeichnung von natürlichen Szenen – vor allem hinsichtlich des Bildkontrastes – aber ein erheblicher Nachteil. Zum anderen sind die CCD-Bilder nicht fokussierbar. Deshalb können nur Ziele in großer Entfernung (ab ca. 400 m) ausreichend scharf abgebildet werden. Es wurde ein exemplarischer Algorithmus entwickelt, der die Spitzen von Kirchtürmen erkennt, daraus die anzuzielenden Punkte (Turmknauf, -kreuz) extrahiert und das Fadenkreuz des Fernrohres darauf positioniert.

4.1.4 Das Bochumer System

Mitte der neunziger Jahre ist von der Arbeitsgruppe Geodäsie der Ruhr-Universität Bochum ein System zur dreidimensionalen Objekterfassung konzipiert und realisiert worden, das fortan ständig weiterentwickelt wird [BUCHMANN, 1996], [SCHERER, 2001a]. Den Kern dieses Systems bildet ein reflektorlos messendes Tachymeter, bei dem die Richtungen (horizontal, vertikal) vom PC vorgegeben und über Servomotoren eingestellt werden können.

Da es bis Mitte 1994 kein Gerät auf dem Markt gab, das die wesentlichen Anforderungen der reflektorlosen Messung und PC-gesteuerter Ausrichtung gleichzeitig erfüllte, handelte es sich bei der ersten Gerätegeneration um eine Eigenentwicklung, bei der ein Distanzmesser IBEO-PULSAR 50 in eine selbst konstruierte Drehsteuerung eingebaut wurde. Die Steuerung erfolgte über einen Joystick, als Zielvorrichtung diente der eingeschaltete Laserpointer. Ein Zielfernrohr war nicht vorhanden.

Die zweite Gerätegeneration basierte auf der Totalstation GEODIMETER DR 486, die so modifiziert wurde, dass gegenüber dem Standardmodell auch Zielungen in Zenitnähe möglich waren. Dieses System wurde schließlich versuchsweise mit einer exzentrisch angebrachten CCD-Kamera nachgerüstet.

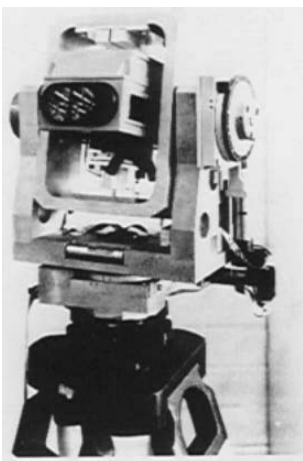


Abb. 4-9: Drehsteuerung mit PULSAR 50



Abb. 4-10: Modifiziertes GEODIMETER DR 486



Abb. 4-11: Erweiterung um CCD-Kamera

Nachdem die Firma Leica 1998 das erste voll funktionstüchtige PC-steuerbare berührungslos messende Serienmodell TCRM vorgestellt hat, diente dieses als Grundlage für die weiteren Entwicklungen des Vermessungssystems, die wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Arbeit sind.

Dieses System ist das einzige der hier vorgestellten, bei dem (wie im Weiteren ausführlich beschrieben) die gemessene Distanz zu einem Oberflächenpunkt Eingang in den Regelkreis zur Steuerung der Anzielung gefunden hat.

4.1.5 Tabellarische Zusammenfassung

Die folgende Tabelle fasst kurz die Hauptanwendungen, die Art der Kameras sowie die Funktion der Kameras für die vorgestellten Vermessungssysteme zusammen.

System	Hauptanwendung	Art der Kamera	Funktion der Kamera
KERN E2-SE	Industriemesssystem	Zentrisch im panfokalen Fernrohr	Zielhilfe Fernsteuerung Zielerkennung
Leica TM3000V	Industriemesssystem	Zentrisch im panfokalen Fernrohr Exzentrische Weitwinkeloptik	Zielhilfe Fernsteuerung Zielerkennung
Hazmap	Indizierte, orientierte Bilder für spätere photogrammetrische Auswertung	exzentrisch eingebaute CCD-Kameras	Bildaufnahme
Schirmer	Astronomisch-geodätische Beobachtungen	CCD-Kamera (im Strahlengang)	Bildaufnahme
Uffenkamp	Orientierte Bilder für spätere photogrammetrische Auswertung	Zentrische, metrische CCD-Kamera	Bildaufnahme
Hovenbitzer	Formerfassung mittels Scannen	Exzentrische Zeilenkamera in Verbindung mit Mustergeber	Entfernungsmessung durch Triangulation
ATR-Funktion	Tachymetrie	CCD-Kamera, nicht fokussierend, auf IR-Signal optimiert	Verfolgung des Reflektors
Bochum	Tachymetrie Formerfassung mittels Scannen	Exzentrische CCD-Kamera	(in Erprobung)

Die meisten der vorgestellten Systeme zielen entweder darauf ab, den Beobachter zu entlasten bzw. zu ersetzen oder Bildmaterial einer orientierten Kamera zu liefern. Damit sind die Möglichkeiten der Integration tachymetrischer und photogrammetrischer Methoden lange noch nicht ausgeschöpft. Aufbauend auf dem Bochumer System, das bislang nur versuchsweise mit einer CCD-Kamera ausgestattet war, das aber im Gegensatz zu den anderen Systemen über die Möglichkeit der reflektorlosen Distanzmessung verfügt, soll die Integration dahin gehend vertieft werden, dass das System sowohl über Werkzeuge zur Beobachterunterstützung und zum Aufbau eines Bild-Archivs (Monitoring) verfügt, darüber hinaus aber auch direkt zu Visualisierungszwecken eingesetzt werden kann.

4.2 Interne Kameras

Der Einbau von drei Kameras stellt die wesentliche Hardware-Erweiterung des vorgestellten Vermessungssystems dar. Dabei handelt es sich um eine Weitwinkel-, eine Tele- und eine Okularkamera.

Die Videobilder der Kameras werden auf dem Monitor eines angeschlossenen Notebooks angezeigt und erfüllen verschiedene Funktionen: Sie dienen dazu, die Zielung und Steuerung vom Bildschirm aus vorzunehmen und sie können zur Dokumentation der angemessenen Punkte abgespeichert werden (georeferenziertes Bildarchiv). Sie können dazu benutzt werden, ein entstehendes Flächenmodell direkt mit photorealistischer Textur zu belegen und Richtungsmessungen können direkt über das Kamerabild vorgenommen werden, ohne das Fernrohr exakt auf den anzumessenden Punkt ausrichten zu müssen.

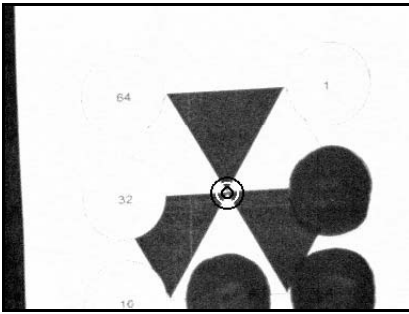


Abb. 4-12: Okularkamera



Abb. 4-13: Telekamera



Abb. 4-14: Weitwinkelkamera

Abb. 4-12 bis Abb. 4-14 zeigen die Erfassung ein und derselben Zielmarke mit den verschiedenen Kameras. Die Dreistufigkeit der Bilder ermöglicht eine sichere Identifizierung des Zielpunktes, besonders von nicht signalisierten („natürlichen“) Punkten auf sich wiederholenden Strukturen wie Backsteinwänden.

In diesem Kapitel werden die verwendete Hardware und die Einbeziehung der Kamerabilder in das Vermessungssystem vorgestellt. Bei der Entwicklung der Hardware stand immer der Gedanke im Vordergrund, mit möglichst wenigen mechanischen Eingriffen und weitgehender Verwendung von Standard-Bauteilen ein modulares System zu schaffen, das vom Anwender selbst optimal für die jeweilige Vermessungsaufgabe konfiguriert werden kann. Es wird gezeigt, welche Bauteile dafür verwendet wurden und wie diese mechanisch in das Vermessungssystem integriert worden sind.

Als nächstes werden die Kamerabilder mit einem virtuellen Strichkreuz zur Anzielung versehen. Dabei werden die notwendigen Justierungen und Kalibrierungen vorgestellt und es wird die Problematik der Exzentrizitäten der Kameras gegenüber der Zielachse des Fernrohrs behandelt.

Die Steuerung des Tachymeters über den Bildschirm wird in einem weiteren Abschnitt dargestellt. Zur Nutzung der Bildkoordinaten für die Anzielung eines Punktes ist die Beziehung zwischen Bildkoordinaten und Richtungen des Tachymetersystems herzustellen. Es werden zunächst die theoretischen Grundlagen für eine idealisierte Kamera (im Schnittpunkt der Achsen des Tachymeters gelegen, keine Linsenverzeichnungen) hergeleitet. Als nächstes wird gezeigt, wie die Verzeichnungen und nach der Justierung verbleibende Restfehler mit Hilfe empirisch bestimmter „Korrektionsmatrizen“ berücksichtigt werden. Dazu wird eine halbautomatische Kalibrieremethode zur empirischen Erfassung der Zielabweichungen vorgestellt.

4.2.1 Beschreibung der Hardware-Sensor-Techniken

Für das Vorhaben, Kameras in das Vermessungssystem zu integrieren, stehen grundsätzlich zwei verschiedene digitale Sensoren zur Verfügung: CCD- und CMOS-Sensoren.

Bei der digitalen Fotografie wird das durch das Objektiv auf den Sensor einfallende Licht von den Bildelementen des Sensors, den so genannten Pixel (picture element), als elektrische Ladung registriert. Diese Ladungen werden ausgelesen, verstärkt und schließlich bei der Analog-Digital-Wandlung in die Bildinformation umgesetzt. Aus einer Ladung wird so schließlich ein digitaler Zahlenwert, der auf einer Speicherkarte oder einer Festplatte abgelegt oder über eine Datenleitung verschickt werden kann. Prinzipiell läuft dieser Vorgang bei beiden Sensortechnologien gleich ab. CMOS-Bildsensoren und CCD-Bildsensoren unterscheiden sich allerdings in ihrer Architektur und folgen deshalb bei der Umsetzung von Licht in Bildinformation einem eigenen „Workflow“. Die Abkürzung CCD steht für Charge Coupled Device (ladungsggekoppelte Halbleiter), CMOS für Complementary Metal Oxide Semiconductor (komplementärer Metalloxid-Halbleiter).

Bei CCD-Sensoren müssen zunächst alle elektrischen Ladungen ausgelesen werden und können anschließend erst verstärkt, das heißt in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Im Unterschied dazu besitzt jedes einzelne Bildelement des CMOS-Sensors eine eigene Verstärkereinheit für die elektrischen Ladungen. Die Verstärkung erfolgt für jedes Pixel separat. Dies ermöglicht, dass ein CMOS-Sensor wesentlich schneller ausgelesen werden kann. CMOS-Sensoren benötigen zudem eine geringere Spannung und weniger Strom als ein CCD-Sensor. Außerdem können zusätzliche Schaltkreise auf dem CMOS-Sensor integriert werden, die bei einem CCD-Sensor ausgelagert werden müssen. Hierzu zählt etwa die Belichtungskontrolle, die Kontrastkorrektur oder die Analog-Digital-Wandlung. Dies spart nicht nur Kosten, sondern erlaubt auch eine deutlich kompaktere Bauweise der Kamera-Module auf CMOS-Basis.

Den Vorteilen der CMOS-Technologie gegenüber der CCD-Technologie stehen die Nachteile einer geringeren Lichtempfindlichkeit, ein reduzierter Dynamikumfang sowie die stärkere Anfälligkeit für Rauschen gegenüber [AGFANET].

Wahl des Technik

Für die geplante Anwendung, digitale Kameras in ein handelsübliches Vermessungsinstrument zu integrieren, spielte die Größe der Kameras eine entscheidende Rolle. Die notwendigen Umbauten am Tachymeter durften seine Grundfunktionen nicht beeinträchtigen. Dies konnte nur durch den Einsatz der CMOS-Technologie gewährleistet werden.

4.2.2 Kameramodule

Bei allen drei eingebauten Kameras handelt es sich um baugleiche CMOS-Farb-Module. Nach Herstellerangaben hat das Kameramodul in Verbindung mit dem dazugehörigen Weitwinkelobjektiv (Brennweite 6 mm) einen Öffnungswinkel von $51^\circ \times 43^\circ$. Daraus ergibt sich eine rechnerische Chipgröße von 5,72 mm x 4,73 mm. Übertragen auf das Bildformat einer Kleinbildkamera (36 x 24 mm) würde die Brennweite somit ca. 37 mm entsprechen.

Die Videosignale der Kameras werden mit Hilfe der PCMCIA-Framegrabber-Karte FG-30 der Firma HaSoTec (Rostock) in Digitalbilder umgesetzt. Die Bilder haben eine Größe von 384 x 288 Pixel. Es wurde bewusst auf die höhere Bildqualität, die CCD-Kameras liefern könnten, verzichtet, da diese in der Regel wesentlich voluminöser und somit nicht zum Einbau in das Tachymeter geeignet sind.

Während die Weitwinkel- und die Telekamera fest im Fernrohrkörper des Tachymeters installiert sind, kann die Okularkamera mit wenigen Handgriffen gegen das Okular ausgetauscht werden.

Die Kameras sind softwaremäßig in das Vermessungssystem eingebunden, d.h. aus dem Steuerprogramm heraus kann jeweils eine einzelne Kamera aufgerufen werden. Helligkeit, Kontrast, Farbdichte u. dgl. werden zwar schon automatisch vom Kameramodul geregelt, können aber auch vom Benutzer beeinflusst werden.

4.2.2.1 Okularkamera

Die Okularkamera verfügt über keine eigene Optik. Das Okular-Modul wurde so konzipiert, dass es im Austausch gegen das Standard-Okular in den Strahlengang des Fernrohres eingebracht werden kann. Der CMOS-Chip liegt dabei in der Brennebene des Fernrohrokulars bzw. in der Bildebene des Objektivs.

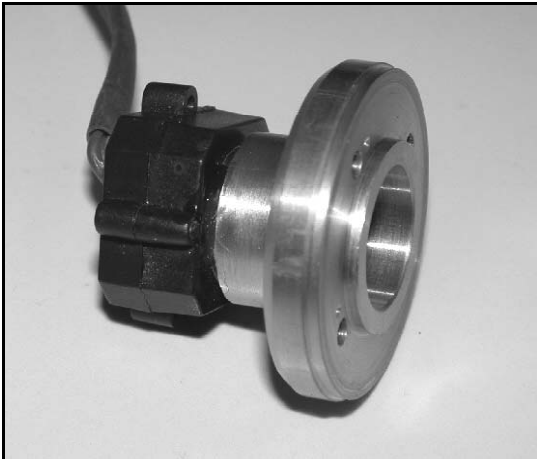


Abb. 4-15: Okularkamera



Abb. 4-16: Einbau

Aufgrund der geringen Baugröße des Moduls ist es auch weiterhin möglich, das Fernrohr des Tachymeters in beiden Richtungen durchzuschlagen. Das Bild dieser Kamera kann mit Hilfe der Fernrohr-Optik fokussiert werden. Dies kann von Hand oder durch eine speziell entwickelte Autofokussierung erfolgen.

Autofokussierung der Okularkamera

Die Autofokussierung der Okularkamera arbeitet nach dem Prinzip der Zuordnung einer bestimmten Fokuseinstellung zu einer gemessenen Strecke. Dazu wurde das Fernrohr des Tachymeters mit einem Schrittmotor zur Fokussierung

ausgerüstet. Dem modularen Aufbau des gesamten Systems folgend, wurde die Autofokussierung mechanisch so gestaltet, dass der Benutzer entscheiden kann, ob und wann er mit ihrer Unterstützung arbeiten will. Dazu hat er die Möglichkeit, die Getriebeverbindung zwischen dem Schrittmotor und dem Fernrohrtubus, der mit einem Zahnkranz versehen wurde, mechanisch zu entkoppeln. Die Steuerung des Motors erfolgt über den Drucker-Port des Notebooks.

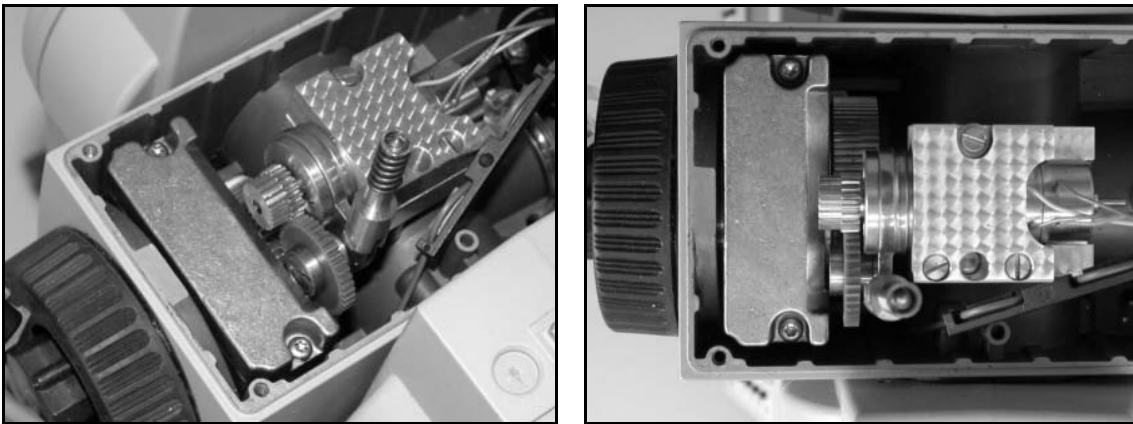


Abb. 4-17: Getriebe der Autofokussierung

Der Motor ist in der Lage, das Fernrohr in 1150 Schritten von Null auf Unendlich umzufokussieren. Durch die Gegenüberstellung einer gemessenen Distanz mit der Fokuseinstellung des dazugehörigen, scharfen Bildes wurde empirisch eine ausgleichende Ablaufkurve ermittelt, die einer gemessenen Strecke eine bestimmte Fokuseinstellung zuweist:

$$x = 1161 - \frac{1611}{s^{1,18}} \quad (4-1)$$

mit: x = Fokuseinstellung
 s = gemessene Strecke

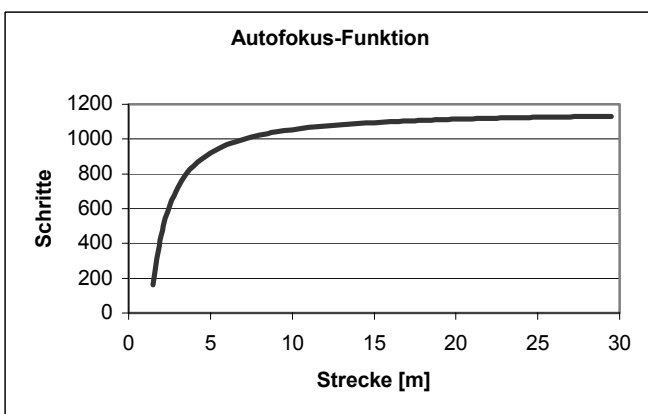


Abb. 4-18: Autofokus-Funktion

4.2.2.2 Exzentrische Kameras



Abb. 4-19: Kameras im Gerätedeckel



Abb. 4-20: Anordnung der Kameras

Die Weitwinkel- und die Telekamera konnten in den Deckel des Fernrohrkörpers des Leica TCRM eingebaut werden. Dazu wurde der flache Standard-Deckel gegen einen höheren ausgetauscht, der sonst nur bei Geräten mit automatischer Zielverfolgung (mehr Raum für unterzubringende Elektronik) verwendet wird. In diesen Deckel wurde der Datenausgang für die Videosignale sowie die Stromversorgung der Kamera und der Autofokussierung integriert.

Als Objektiv für die Weitwinkelkamera wurde das oben beschriebene Standard-Objektiv mit einer Brennweite von 6 mm (entsprechend Kleinbild 37 mm) verwendet. Für die Telekamera wurde eigens ein Objektiv gefertigt, das einen Öffnungswinkel von ca. 12° (entsprechend Kleinbild 170 mm) aufweist.

Die Fokussierung beider Kameras ist fest. Es hat sich gezeigt, dass die Unendlich-Stellung der Weitwinkelkamera in der Praxis für annähernd alle Entfernungsbereiche gute Bilder liefert. Die Telekamera wurde so fokussiert, dass diese bei einer Entfernung von ca. 15 m die optimale Bildqualität liefert.

Exzentrischer Einbau der Weitwinkel- und der Telekamera

In den folgenden Abbildungen ist die exzentrische Lage der Kameraachse gegenüber der Zielachse des Tachymeters schematisch dargestellt. Mit dH ist der Höhenversatz der Kamera gegenüber der Zielachse (bei Zenitdistanz 100 gon) bezeichnet, mit dL der Abstand der Kamera zur Stehachse (bei Zenitdistanz 100 gon) und mit dQ der Seiten- bzw. Querversatz der Kamera gegenüber der Zielachse. Diese Werte finden ihre Berücksichtigung bei der im Weiteren aufgeführten Berechnung der Position und Orientierung der Kamera sowie bei der Berechnung der Lage eines virtuellen Strichkreuzes im Bild. In Anlehnung an die Definition der Zielachse nach [WITTE / SCHMIDT, 2000] ist hierbei die Zielachse die Verbindungslinie zwischen dem im Unendlichen liegenden Punkt, der in der Strichkreuzmitte des Okulars abgebildet wird und der Strichkreuzmitte selbst. Für die weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit wird die Zielachse hinreichend genau durch den sichtbaren (sauber justierten) Laserstrahl des Entfernungsmessers verkörpert.

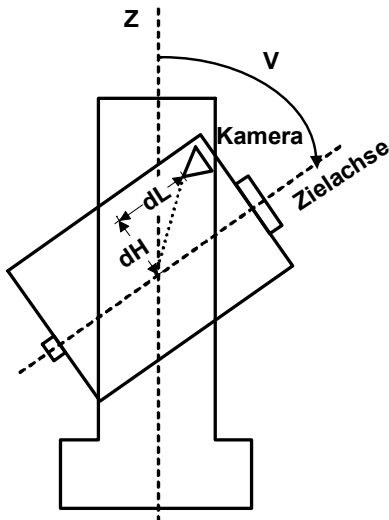


Abb. 4-21: Exzentrische Kamera Seitenansicht

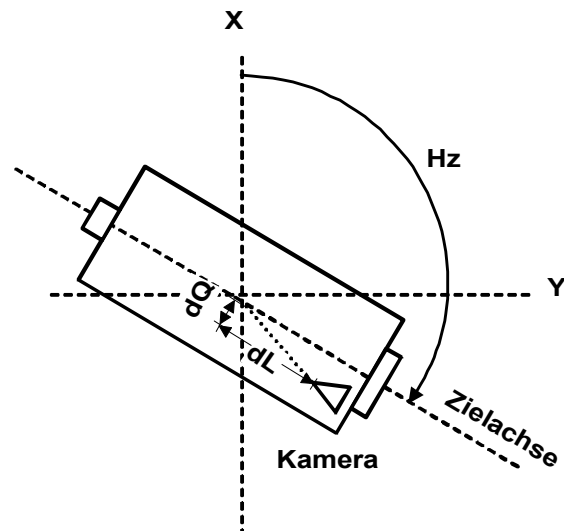


Abb. 4-22: Exzentrische Kamera Aufsicht

4.2.3 Kalibrierung und Justierung der Kameras

Nach DIN 1319 Teil 1 versteht man unter Kalibrieren das Feststellen der Messabweichungen zwischen den durch das Messgerät angezeigten und den richtigen oder als richtig geltenden Werten. Es erfolgt kein technischer Eingriff am Messgerät. Demgegenüber bedeutet Justieren, ein Messgerät so einzustellen oder abzugleichen, dass die Messabweichungen möglichst klein werden oder dass die Beträge der Messabweichungen vorgegebene Grenzwerte nicht überschreiten [WITTE / SCHMIDT, 2000].

Durch die Kalibrierung und Justierung der Kameras wird die Beziehung zwischen den Achsen der Kamera und den Achsen des Tachymeters hergestellt. Insbesondere wird dabei die Lage des Strichkreuzes im Bild für die Entfernung Unendlich bestimmt. So kann man unter Justierung den mechanischen Teil, unter Kalibrierung den rechentechnischen Teil der Aufgabe verstehen, das Kamerabild mit einem Strichkreuz zu versehen.

Eine Justierung der Kameras wird immer dann notwendig, wenn mechanische Veränderungen an den Kamerabefestigungen vorgenommen wurden. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn das Standard-Okular gegen die Okularkamera ausgetauscht wurde, aber auch nach dem Abnehmen des Instrumentendeckels, an dem die Einbaukameras befestigt sind. Davon abgesehen sollte die Überprüfung und ggf. Justierung der Kameras in den gleichen Zeitintervallen durchgeführt werden, die im allgemeinen für die Überprüfung und Justierung von Vermessungsinstrumenten anzusetzen sind.

4.2.3.1 Virtuelles Strichkreuz

Alle drei Kamerabilder verfügen über virtuelle Strichkreuze. Diese werden so in das jeweilige Bild eingeblendet, dass sie die jeweilige (u.U. entfernungsabhängige) Position des mit der Zielachse anvisierten Punktes annehmen. Auch wenn diese Zielhilfe aus praktischen Gründen (bessere Einstellmöglichkeit sowohl dunkler als auch heller Ziele) die Form dreier konzentrischer Kreise unterschiedlicher Farbe hat (siehe Abb. 4-12 bis Abb. 4-14), soll dafür weiterhin der im Vermessungswesen übliche Begriff „Strichkreuz“ benutzt werden.

Während das Strichkreuz der Okularkamera eine feste Position hat, ändern sich die Positionen der Strichkreuze der Weitwinkel- und der Telekamera, wie später beschrieben, wegen deren Exzentrizität entsprechend der Entfernung zum Ziel.

4.2.3.2 Kamerakonstante c

Als wichtigste Kenngröße der inneren Orientierung definiert die Kamerakonstante c den Abstand zwischen Bildebene und Projektionszentrum. Bei Fokussierung auf Unendlich entspricht sie etwa der Brennweite f . Diese Größe wird im allgemeinen in mm angegeben und beträgt z.B. bei Kleinbild-Kameras (Bildformat 36mm x 24mm) für Standardobjektive 50 mm, für Teleobjektive > 90 mm und für Weitwinkelobjektive 18 – 35 mm [LUHMANN, 2000].

Der Betrag der Kamerakonstanten c kann auf verschiedene Weise ermittelt werden: aus Herstellerangaben, mit Hilfe photogrammetrischer Kalibrierungs-Programme und der Kalibrierung unter Einsatz der Richtungsmessung mit dem Tachymeter.

Die Kamerakonstante kann mit Hilfe des Tachymeters auf einfache Weise in guter Näherung bestimmt werden, indem die Differenz der Bildkoordinaten zweier Punkte (ein Punkt in der geschätzten Bildmitte und ein Punkt am Bildrand) ermittelt und der dazugehörige Winkel gemessen wird. Dabei sollten die beiden Zielpunkte möglichst nur horizontale oder vertikale Differenzen aufweisen.

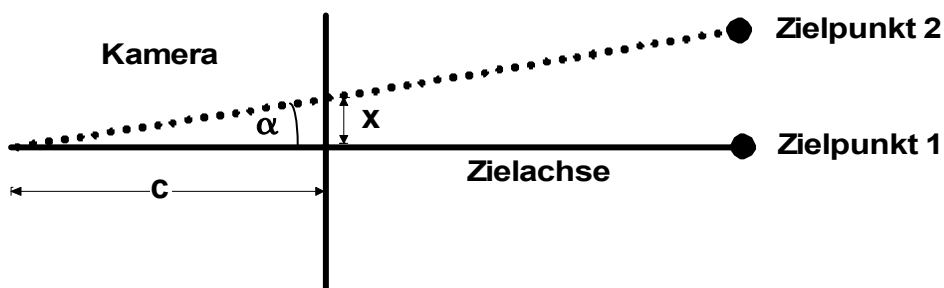


Abb. 4-23: Ermittlung der Kamerakonstanten durch Richtungsmessung

Im vorgestellten Vermessungssystem wurde dazu folgende Kalibrieroutine implementiert, die nur ein einziges markantes Zielzeichen benötigt: Nachdem das Tachymeter auf ein Zielzeichen in Horizontnähe eingestellt wurde, wird es automatisch um bestimmte Winkelbeträge in der Horizontalrichtung und in der Zenitdistanz bewegt und die zugehörigen Bildkoordinaten des nun an einer anderen Stelle abgebildeten Zielzeichens werden gemessen. Es erfolgt eine automatische Berechnung der Kamerakonstanten mit Mittelbildung.

Bei gemessenem Winkel α zwischen der Kameraachse und dem abgebildeten Punkt kann die Kamerakonstante c wie folgt berechnet werden:

$$c = x \tan \alpha \quad (4-2)$$

Da die Größe x (die Bildkoordinaten in Bezug auf das virtuelle Strichkreuz) in Pixel gemessen wird, liegt auch der Wert der Kamerakonstanten in Pixel vor. Eine Umrechnung dieses Wertes in Millimeter (unter Zuhilfenahme der Chipgröße laut Herstellerangaben in Millimetern) ist gegebenenfalls zum Vergleich mit den Ergebnissen anderer Kalibrierarten (z.B. dem „Camera-Calibrator“ des Programms „PhotoModeler“) von Interesse, nicht aber für die weiteren Berechnungen.

Für die verschiedenen installierten Kameras des Systems wurden folgende Kamerakonstanten bestimmt (zum Vergleich sind die Werte in mm für eine Kleinbildkamera angegeben):

Weitwinkel:	402,2 pixel	(KB: 37,7 mm)
Tele:	1753 pixel	(KB: 164,3 mm)
Okular:	16324 pixel	(KB: 1530 mm)

Telekamera: X = 191 pixel
Y = 109 pixel

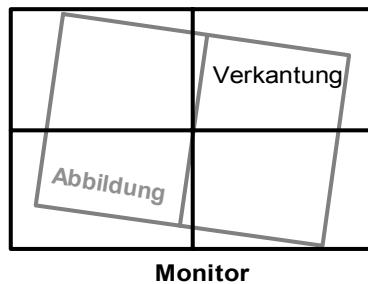


Abb. 4-25: Verkantung

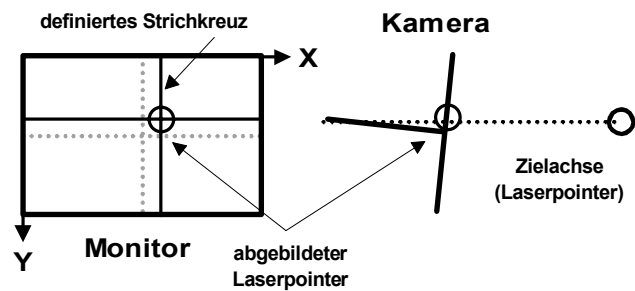


Abb. 4-26: Verschwenkung gegenüber der Zielachse

Entfernungsabhängige Parallaxe der Weitwinkel- und der Telekamera:

Die Weitwinkel- und die Telekamera sind aus konstruktiven Gründen exzentrisch zum Schnittpunkt von Stehachse und Kippachse des TCRM eingebaut (siehe Abb. 4-21 und Abb. 4-22). Das führt dazu, dass ein endlich weit entfernter Zielpunkt entfernungsabhängig abgebildet wird (siehe Abb. 4-27). Es ist daher notwendig, die Bilder mit einem virtuellen Strichkreuz zu überlagern, das diese Parallaxe berücksichtigt.

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den Laserfleck bei unterschiedlichen Entfernungen, aufgenommen mit der eingebauten Tele-Kamera. Die Position des Strichkreuzes bezieht sich dagegen auf einen unendlich weit entfernten Punkt. Deutlich zu erkennen ist der Einfluss der Parallaxe aufgrund der exzentrischen Kameraposition.

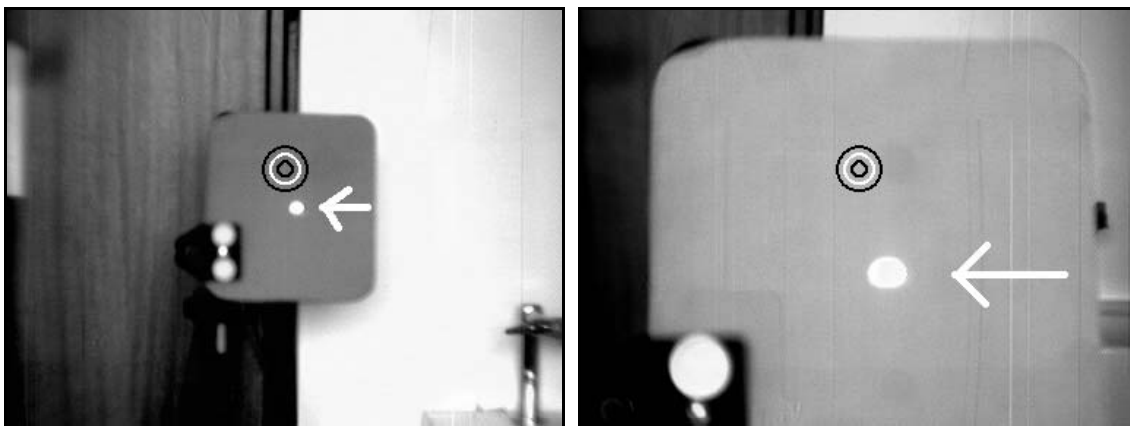


Abb. 4-27: Telekamera, Entfernungen 3,26 m / 1,27 m

Zur Bestimmung der entfernungsabhängigen Strichkreuzposition wird die Strecke zum anvisierten Punkt gemessen. Wie in Abb. 4-28 dargestellt, wird daraufhin die Position des Schnitts der Zielachse mit dem Objekt (Laserfleck) im Bild berechnet. Der Versatz in Längsrichtung dL (Abstand der Kamera von der Stehachse) bleibt bei der Berechnung wegen seiner geringen Größe gegenüber der Objektentfernung unberücksichtigt.

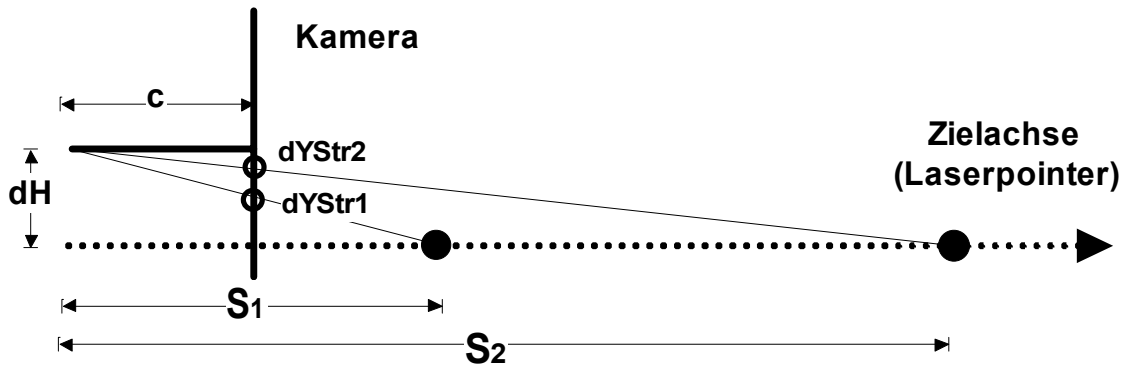


Abb. 4-28: Entfernungabhängiges virtuelles Strichkreuz (Höhen-Exzentrizität)

Der Parallaxenausgleich wird wie folgt berechnet:

$$dX_{Str} = c \cdot \frac{dQ}{S} \quad (4-3)$$

$$dY_{Str} = c \cdot \frac{dH}{S} \quad (4-4)$$

mit:

dX_{Str} , dY_{Str} : Strichkreuzversatz in X und Y

dQ , dH : Quer- und Höhenversatz der Einbaukameras

Weitwinkel: $dQ = 0,014$ m, $dH = 0,047$ m

Tele: $dQ = -0,014$ m, $dH = 0,047$ m

S: Strecke zum Zielpunkt

c: Kamerakonstante

Die Quer- und Höhenversätze der Kameras wurden durch mechanische Messung ermittelt. Dabei wurde als Projektionszentrum die Mitte des Kameramoduls (ohne Objektiv) angenommen. Für die beiden Einbaukameras ergeben sich damit folgende Funktionen für den Parallaxenausgleich des virtuellen Strichkreuzes:

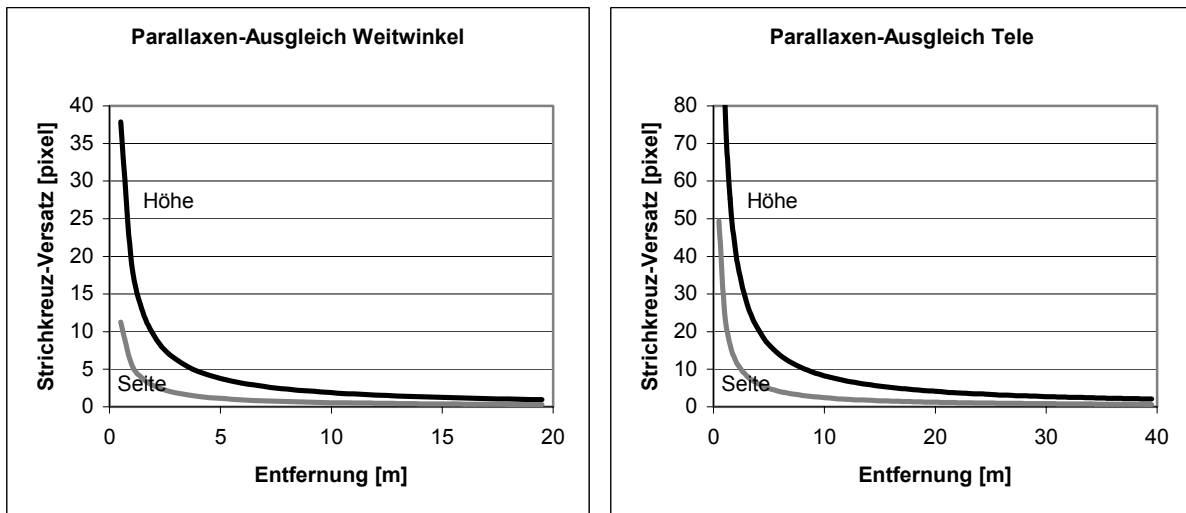


Abb. 4-29: Parallaxenausgleich für virtuelles Strichkreuz

Deutlich zu erkennen ist das starke Anwachsen des Strichkreuzversatzes bei kurzen Entfernungen. Nach Berücksichtigung des Parallaxenausgleichs stimmt die Lage des Strichkreuzes des Kamerabildes mit dem Laserfleck, der die Zielachse verkörpert, überein (Abb. 4-30 im Vergleich zu Abb. 4-27).

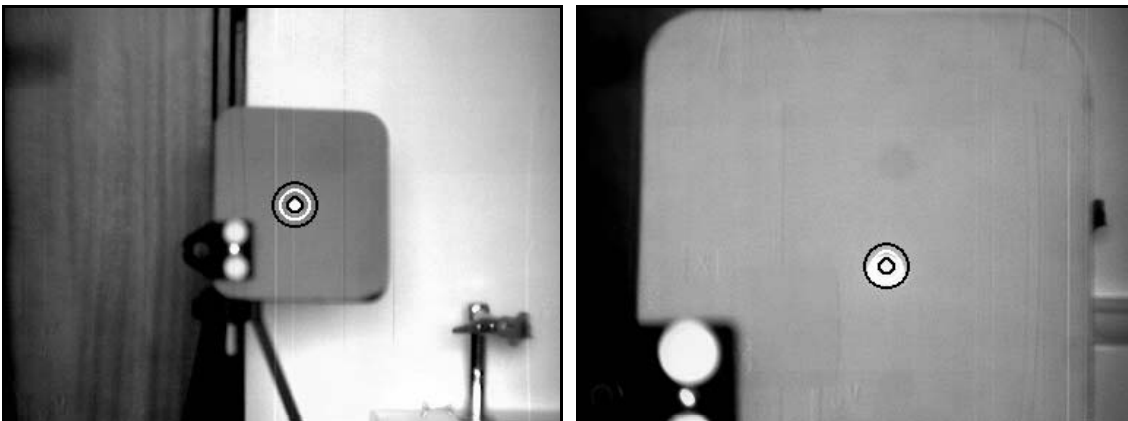


Abb. 4-30: Korrigierte Parallaxe, Entfernungen 3,26 m / 1,27 m

4.2.4 Unterschied Bildhauptpunkt / virtuelles Strichkreuz

In den bisherigen Überlegungen wurde der Einfluss der Lage des Bildhauptpunktes auf die Abbildung vernachlässigt. Als Bildhauptpunkt wird der Lotfußpunkt des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem bezeichnet, der bei gebräuchlichen Kameras näherungsweise in der Bildmitte liegt [LUHMANN, 2000].

So wurde der Bildhauptpunkt (im Folgenden „tatsächlicher“ Bildhauptpunkt genannt) in den bisherigen Überlegungen zum leichteren Verständnis mit der Position des Zentrums des (variablen) virtuellen Strichkreuzes (im Folgenden „virtueller“ Bildhauptpunkt genannt) gleichgesetzt.

Für die weiteren Überlegungen, insbesondere für die Erarbeitung des Zusammenhangs zwischen Bildkoordinaten und Richtungen im Tachymetersystem, ist zu untersuchen, welchen Einfluss die Lage des Bildhauptpunktes auf die Abbildungsgeometrie hat. Ziel ist, es herauszufinden, unter welchen Umständen die Differenz zwischen optischem (tatsächlichem) Bildhauptpunkt und der Lage des virtuellen Strichkreuzes bei Berechnungen vernachlässigt werden kann. Dazu wird im Folgenden untersucht, wie groß die Differenz einer abgebildeten Strecke (zwischen einem Punkt in der Bildmitte und einem Punkt am Bildrand) bei Verwendung des tatsächlichen und des virtuellen Bildhauptpunktes ist.

Die Lage des tatsächlichen Bildhauptpunktes wurde dabei mit Hilfe eines photogrammetrischen Kalibrierprogramms ermittelt.

Kalibrierung der Weitwinkelkamera mit photogrammetrischen Methoden

Zur Gewinnung von Vergleichswerten wurde die eingebaute Weitwinkelkamera mit Hilfe des „Camera-Calibrators“ des Photogrammetrieprogramms „PhotoModeler“ kalibriert. Radiale und tangentiale Verzeichnungen blieben bei dieser Kalibrierung unberücksichtigt. Es ergaben sich folgende Werte:

Bildweite: 6,0670 mm (384 Pixel)

Bildhöhe: 4,4000 mm (288 Pixel)

Daraus ergibt sich ein Durchschnittswert von 64,3 Pixel pro mm

Hauptpunkt X: (von links) 3,0396 mm (192 Pixel)

Hauptpunkt Y: (von oben) 2,3249 mm (152 Pixel)

Verschwenkung der Kamera

Sowohl bei der Justierung des Kamerabildes auf einen unendlich weit entfernten Punkt (vgl. Abb. 4-26) als auch beim Parallaxenausgleich (vgl. Abb. 4-28) wird das virtuelle Strickkreuz als vermeintlicher (virtueller) Bildhauptpunkt definiert. Somit wird eine virtuelle Kamerageometrie angenommen, die von der tatsächlichen abweicht (Abb. 4-31).

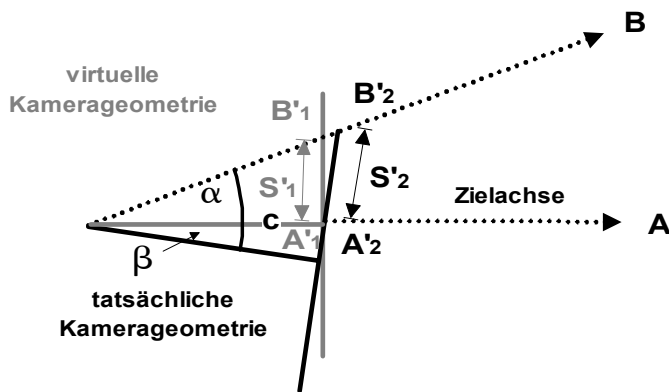


Abb. 4-31: Tatsächliche und virtuelle Kamerageometrie

Bei der Justierung auf Unendlich wurden, wie in 4.2.3.4 beschrieben, die Koordinaten $X = 199$ und $Y = 135$ für die Lage des virtuellen Hauptpunktes ermittelt. Damit besteht in X-Richtung eine Differenz von 7 Pixel und in Y-Richtung eine Differenz von 17 Pixel zwischen virtuellem und tatsächlichem Hauptpunkt. Diese Differenz nimmt bei kürzeren Zielweiten aufgrund des Parallaxenausgleichs (vgl. Abb. 4-29) ab; der virtuelle Bildhauptpunkt nähert sich somit dem tatsächlichen an. Bei ca. 2 m wird diese Differenz zu Null und nimmt dann wieder zu.

Mit der (durch Tachymeterkalibrierung ermittelten) Brennweite von 402 Pixel ergibt sich der maximale Verschwenkungswinkel β zwischen virtueller und tatsächlicher Kamerageometrie (aufgrund der Differenz von 17 Pixel zwischen virtuellem und tatsächlichem Bildhauptpunkt) zu $2,4^\circ$. Es sollen nun die Bildstrecken S'_1 und S'_2 berechnet werden. Der mit dem virtuellen Strickkreuz anvisierte Punkt A wird in der tatsächlichen Kamerageometrie nicht im Bildhauptpunkt sondern im Punkt A'_2 abgebildet, der Punkt B im Punkt B'_2 . Gegenüber der Abbildung der virtuellen Kamerageometrie vergrößert sich die Bildstrecke. Es gilt:

$$S'_1 = c \cdot \tan(\alpha) \quad (4-5)$$

$$S'_2 = c \cdot (\tan(\alpha + \beta) - \tan(\beta)) \quad (4-6)$$

Bei einem Winkel α von 20° (entspricht einem Abstand von 145 Pixel vom Zentrum des Strickkreuzes) für einen Punkt am Bildrand und dem maximalen Verschwenkungswinkel von $2,4^\circ$ ergibt sich eine Streckendifferenz von 2,5

Pixel. Bei einem Winkel α von 10° (70 Pixel) beträgt die Streckendifferenz nur noch 0,7 Pixel. Diese, zumindest im mittleren Bildbereich, relativ kleinen Beträge erlauben es, bei den kommenden Untersuchungen den Bildhauptpunkt mit dem Ursprung des virtuellen Strichkreuzes gleichzusetzen, da dieser Effekt gerade am Bildrand von anderen Verzeichnungseffekten deutlich überlagert wird. Bei Kameras mit größerer Brennweite (Telekamera, Okularkamera) werden diese Differenzen von ihrer Größe her irrelevant.

4.2.5 Geometrischer Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten und Theodolit-Richtungen

Im folgenden Abschnitt wird die Beziehung zwischen Bildkoordinaten und Theodolit-Richtungen untersucht. Insbesondere wird gezeigt, dass es sich dabei nicht um eine (wie häufig angenommen) tangentielle Beziehung handelt. Zur theoretischen Ableitung dieser Beziehung wird von einer idealisierten Kamera ohne Verzeichnungen ausgegangen, die zentrisch im Mittelpunkt des Achssystems des Tachymeters gelagert ist (Abb. 4-33). Die Anpassung an die realen, exzentrisch gelagerten Kameras des vorgestellten Vermessungssystems erfolgt, wie später beschrieben, mit Hilfe von empirisch bestimmten „Zielabweichungsmatrizen“.

Um in den folgenden Abbildungen und Formeln Verwechslungen zwischen der Koordinate „Z“ und dem Zenitwinkel „Z“ zu vermeiden, wird der Zenitwinkel mit dem (bei der Anzeige von Theodoliten und Tachymetern üblichen) Buchstaben „V“ bezeichnet.

4.2.5.1 Tangentiales Modell

Die Transformation der Bildkoordinaten in das System der Theodolit-Achsen erfolgt durch Berechnung der Ablagegrößen dH_z und dV . Nach [REITERER et al. 2003] versteht man unter den Ablagegrößen jene Winkelverbesserungen, um welche das Fernrohr gedreht werden müsste, damit die Zielachse genau den markierten Bildpunkt anvisiert.

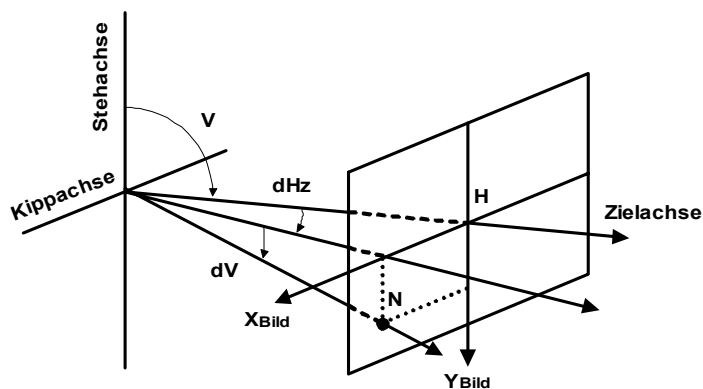


Abb. 4-32: Ablagegrößen nach [FABIANKOWITSCH, 1990]

Eine Beziehung zwischen Bildkoordinaten und Ablagegrößen der Form

$$\tan(dH_z) = X_{\text{Bild}} / c \quad (4-7)$$

$$\tan(dV) = Y_{\text{Bild}} / c \quad (4-8)$$

stellt ein gute Näherung bei kleinen Ablagegrößen (Okular- und Telekamera) in Horizontnähe dar.

4.2.5.2 Erweitertes Modell

Diese tangentialen Beziehungen verlieren bei zunehmendem Abstand vom Horizont, insbesondere beim Einsatz von Weitwinkelkameras, an Gültigkeit. Wie in der folgenden Abbildung zu erkennen ist, handelt es sich bei der Beziehung

zwischen Bildkoordinaten und Ablagegrößen um eine Projektion der Kugel-Meridiane (dH_z und dV) auf eine tangentielle Abbildungsfläche. Diese Projektion ist vergleichbar mit der aus der Kartennetzentwurfslehre bekannten schiefachsigen gnomonischen Abbildung und wird im Folgenden erläutert:

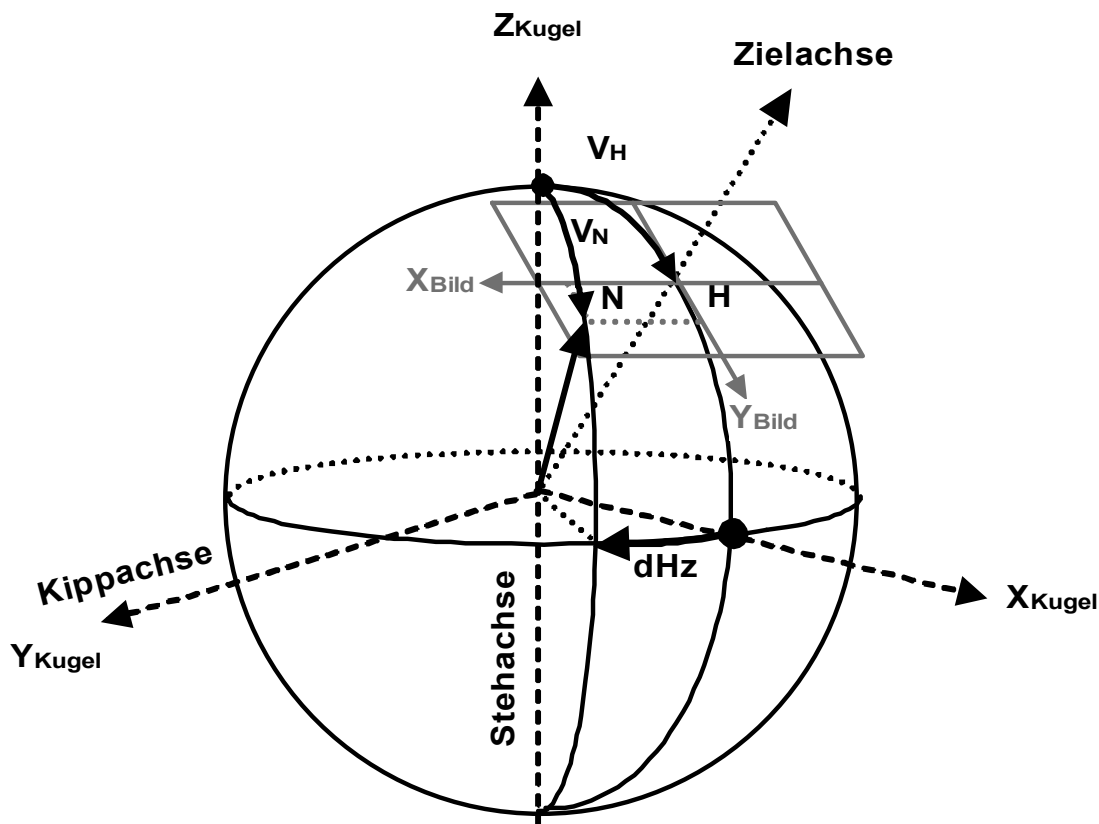


Abb. 4-33: "Kugel-System" des Tachymeters

Koordinatensysteme

Im (geodätisch orientierten) Koordinatensystem „Kugel“ bildet die momentane, horizontale Zielrichtung die X-Achse, die Z-Achse zeigt zum Zenit, die Y-Achse steht senkrecht dazu. Der Radius der Kugel entspricht der Kamerakonstanten c . Die Zielachse durchstößt die Kugel im Punkt H, der den Ursprung des Bildkoordinatensystems bildet. Die X-Achse des Bildes weist (vom Kugelmittelpunkt aus betrachtet) nach rechts, die Y-Achse nach unten.

Gnomonische Abbildung

[HAKE, 1982] erläutert die schiefständige gnomonische Abbildung in zwei Schritten. Im ersten Schritt (Abb. 4-34) zeigt er die Projektion des Gitternetzes aus dem Zentrum einer Einheitskugel auf eine im Pol anliegende Tangentialebene. Dabei bezeichnet λ die geographische Länge, δ die geographische Breite. Die Abbildungsgleichungen für die Polarkoordinaten α und m lauten:

$$\alpha = \lambda, \quad m = \tan \delta \quad (4-9)$$

Die Umrechnung in rechtwinklige Koordinaten der Tangentialebene erfolgt mit Hilfe der Formeln

$$x = m \cos \alpha \quad \text{und} \quad y = m \sin \alpha \quad (4-10)$$

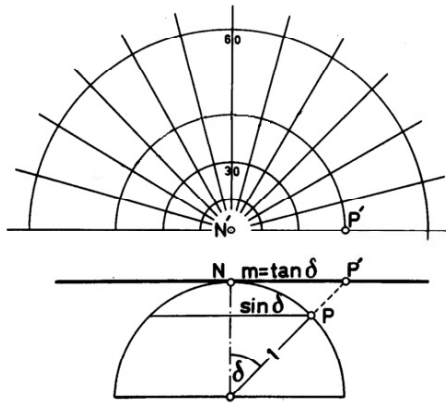


Abb. 4-34: Polständige gnomonische Abbildung

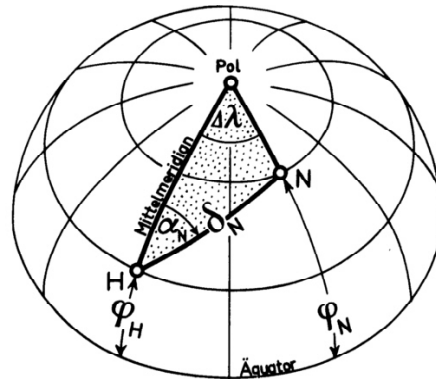


Abb. 4-35: Schiefachsige Lage des Berührungspunktes H

Im zweiten Schritt führt er die Abbildungsgleichungen für die schiefachsige Lage auf (Abb. 4-35).

Bei azimutalen Abbildungen in schiefachsiger Lage gelten die Abbildungsgleichungen im System der Netzmeridiane und -breiten, die auf den Hauptpunkt $H(\varphi_H, \lambda_H)$ als Berührungspunkt der Abbildungsebene bezogen sind. Für Netzpunkte N mit bekannten geographischen Koordinaten φ_N, λ_N sind daher zunächst die sphärischen Polarkoordinaten α_N, δ_N als Koordinaten des oben dargestellten Systems zu berechnen. Nach den Regeln der sphärischen Trigonometrie ergibt sich mit $\Delta\lambda = \lambda_H - \lambda_N$ für die schiefachsige Lage

$$\cos \delta_N = \sin \varphi_H \cdot \sin \varphi_N + \cos \varphi_H \cdot \cos \varphi_N \cdot \cos \Delta\lambda \quad (4-11)$$

und

$$\cos \alpha_N = \frac{\sin \varphi_N - \sin \varphi_H \cdot \cos \delta_N}{\cos \varphi_H \cdot \sin \delta_N} \quad \text{bzw.} \quad \sin \alpha_N = \frac{\sin \Delta\lambda \cdot \cos \varphi_N}{\sin \delta_N} \quad (4-12)$$

Bezogen auf die Achsen und Richtungen eines Tachymeters, wie sie in (Abb. 4-33) dargestellt sind, müssen folgende Umstellungen in den Formeln vorgenommen werden:

$$\varphi_H = \pi/2 - VH, \quad \lambda_H = 0, \quad \lambda_N = -dHz \quad (4-13)$$

Die folgenden Abbildungen zeigen die mit Hilfe der gnomonischen Abbildung in das Bild der Weitwinkelkamera projizierten Meridiane (dHz) und Breitenkreise (dV) in Bezug auf den mit dem virtuellen Strichkreuz eingestellten Punkt bei unterschiedlichen Zenitdistanzen V. Der Gitterabstand beträgt dabei jeweils 10 gon.

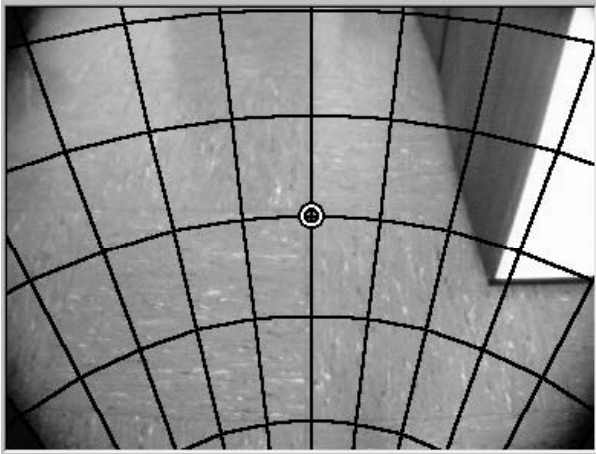


Abb. 4-36: Gitterlinien für $V = 150$ gon

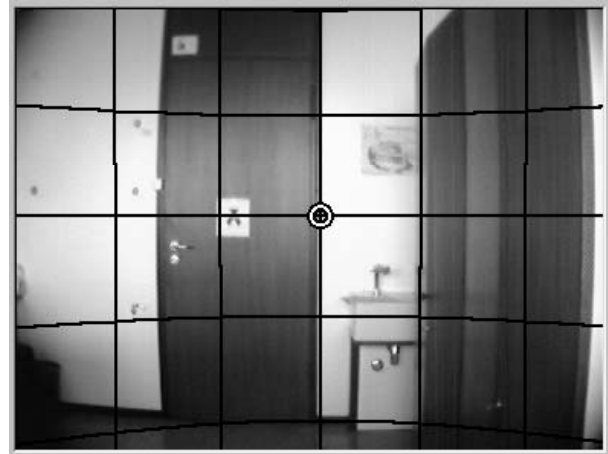


Abb. 4-37: Gitterlinien für $V = 100$ gon

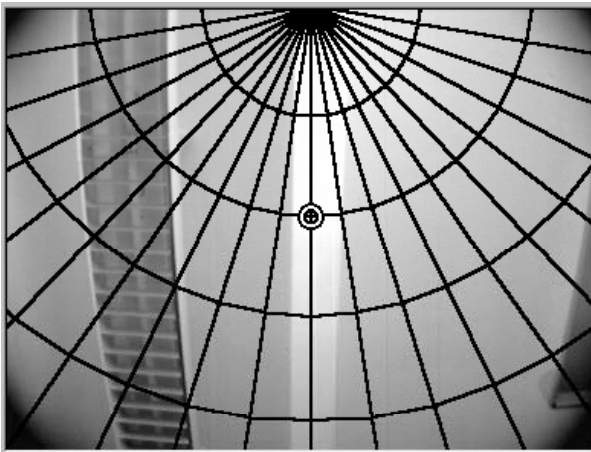


Abb. 4-38: Gitterlinien für $V = 20$ gon



Abb. 4-39: Gitterlinien für $V = 10$ gon

Die Bilder zeigen, welche Bewegungen das Tachymeter in Horizontalrichtung (Breitenkreise) und Vertikalrichtung (Meridiane) auszuführen hat, um vom derzeit anvisierten Punkt zu einem anderen abgebildeten Punkt zu gelangen. Dabei sind die in den Bildern erkennbaren radialen Verzeichnungen noch nicht berücksichtigt. In Abb. 4-39 ist der Pol des Gitternetzes zu erkennen, der dem Zenit des Instrumentenstandpunktes entspricht.

Berechnung der Ablagegrößen

Die Berechnung der Ablagegrößen dH_z und dV aus den Bildkoordinaten erfolgt in zwei Schritten:

Im ersten Schritt werden die räumlichen Koordinaten des Bildpunktes N im „Kugel“-System des Tachymeters (Abb. 4-33) berechnet. Wie in Abb. 4-41 zu erkennen ist, befindet sich der Bildpunkt außerhalb der Kugel.

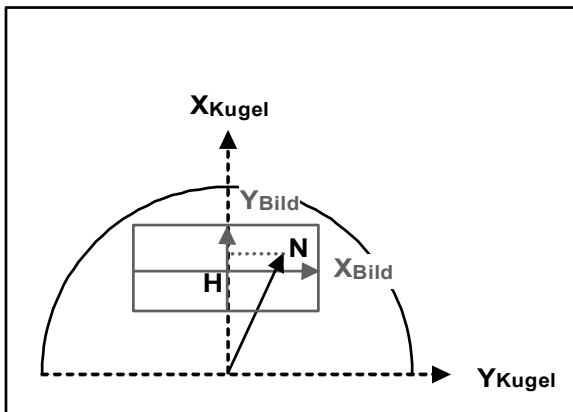


Abb. 4-40: Projektion in die YX-Ebene der Kugel

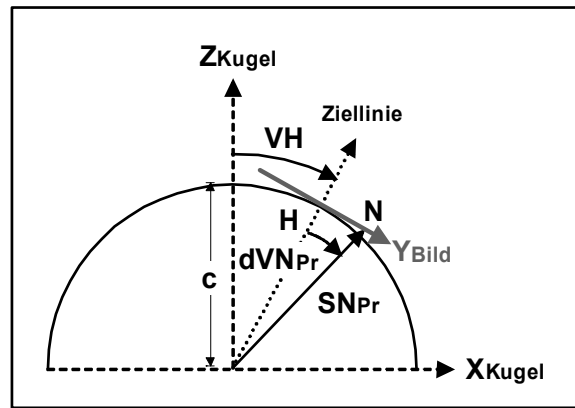


Abb. 4-41: Projektion in die XZ-Ebene der Kugel

Die Projektion auf die YX-Ebene (Abb. 4-40) zeigt, dass die Y-Koordinate im „Kugel“-System unabhängig von der Zenitdistanz V direkt aus der X-Koordinate des Bildes hergeleitet werden kann:

$$YN_{Kugel} = XN_{Bild} \quad (4-14)$$

Die Berechnung der X- und Z-Koordinate im Kugelsystem erfolgt in der XZ-Projektion (Abb. 4-41). Dazu werden der Differenzwinkel dVN_{Pr} und die Strecke SN_{Pr} vom Kreismittelpunkt bis zum Bildpunkt N in der XZ-Projektion berechnet („Pr“ steht für Projektion):

$$dVN_{Pr} = \arctan(YN_{Bild} / c) \quad \text{Differenzwinkel zum Punkt N in der XZ-Ebene} \quad (4-15)$$

$$SN_{Pr} = \sqrt{c^2 + YN_{Bild}^2} \quad \text{Strecke zum Punkt N in der XZ-Ebene} \quad (4-16)$$

$$XN_{Kugel} = SN_{Pr} \cdot \sin(VH + dVN_{Pr}) \quad (4-17)$$

$$ZN_{Kugel} = SN_{Pr} \cdot \cos(VH + dVN_{Pr}) \quad (4-18)$$

In einem zweiten Schritt werden für diesen Punkt die Ablagegrößen dHz und dV berechnet. Dazu bedient man sich der allgemeinen vermessungstechnischen Formeln für die Absteckung eines Raumpunktes:

$$dHzN_{Kugel} = \arctan(YN_{Kugel} / XN_{Kugel}) \quad \text{Ablage } dHzN \quad (4-19)$$

$$SN_{hor} = \sqrt{YN_{Kugel}^2 + XN_{Kugel}^2} \quad \text{Horizontalstrecke zum Punkt N} \quad (4-20)$$

$$VN_{Kugel} = \arctan(SN_{hor} / ZN_{Kugel}) \quad \text{Zenitdistanz zum Punkt N} \quad (4-21)$$

$$dVN_{Kugel} = VN_{Kugel} - VH_{Kugel} \quad \text{Ablage } dVN \quad (4-22)$$

Darstellung der Ablagegrößen

Die folgenden Abbildungen zeigen schematisch für verschiedene Zenitdistanzen V die Ablagegröße dHz , die zur Anzielung eines 100 / -100 Pixel aus der Bildmitte entfernten Punktes notwendig ist.

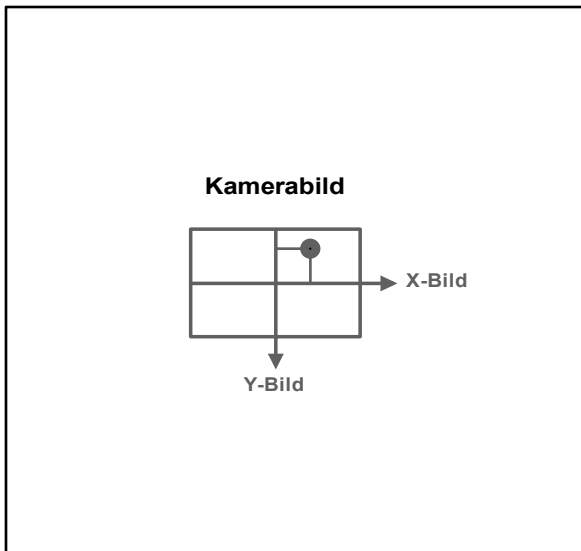


Abb. 4-42: Ansicht aus dem Kugelmittelpunkt

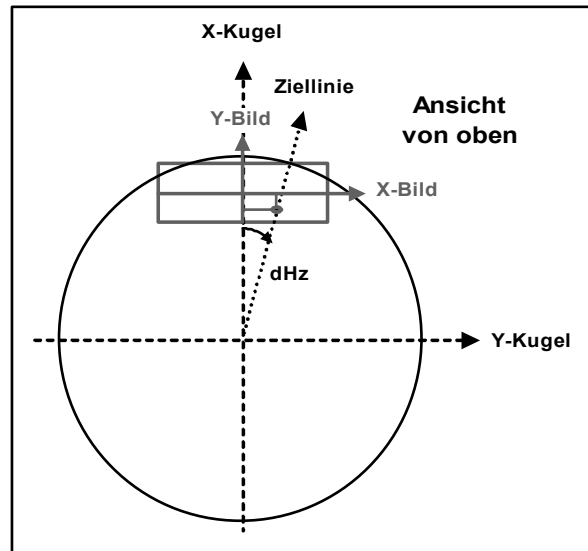


Abb. 4-43: Kugel von oben, Zenitdistanz ca. 50 gon

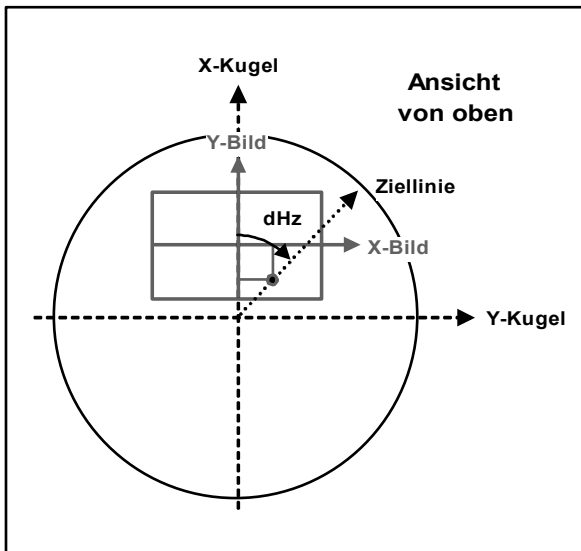


Abb. 4-44: Kugel von oben: Zenitdistanz ca. 20 gon

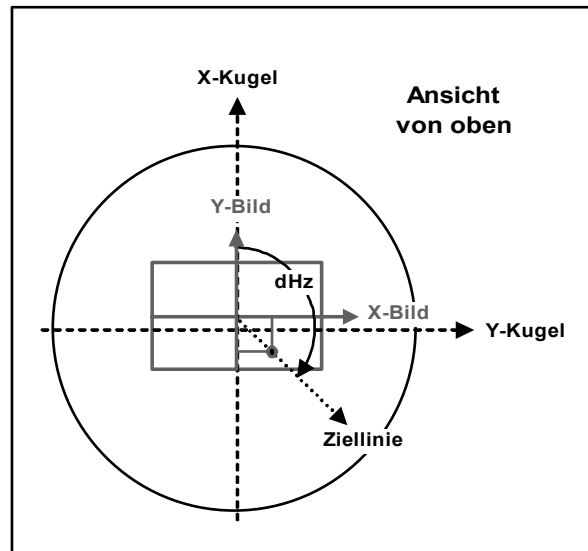


Abb. 4-45: Kugel von oben: Zenitdistanz ca. 5 gon

Deutlich zu erkennen ist das starke Anwachsen von dHz bei Überschreitung des Zenits. In Abb. 4-46 ist die Entwicklung der Ablagegrößen dHz und dV exemplarisch für den Bildpunkt 100 / -100 (Weitwinkel- bzw. Okularkamera 384*288 Pixel) in Abhängigkeit der Zenitdistanz dargestellt.

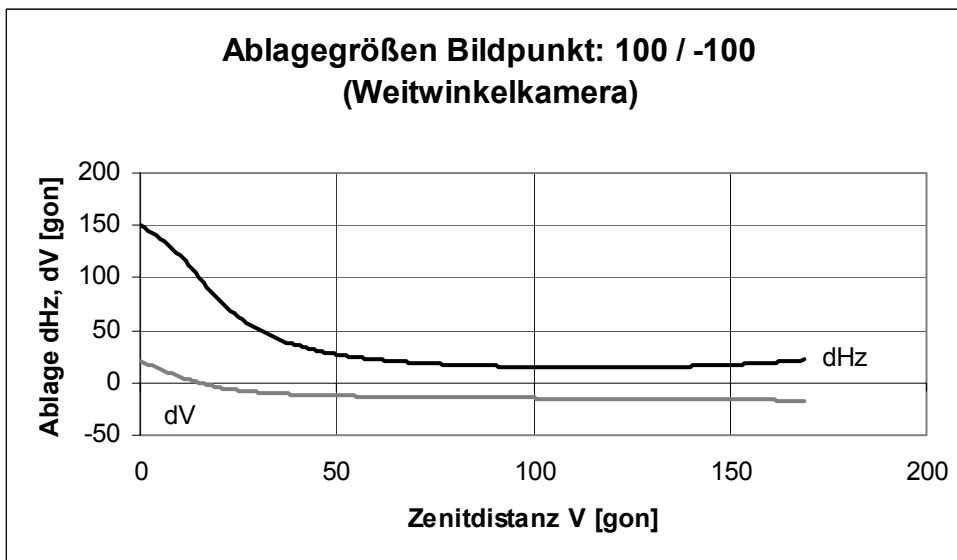


Abb. 4-46: Ablagegrößen der Weitwinkelkamera

Zu erkennen ist, dass nur in Horizontnähe ein konstantes Verhältnis zwischen Bildkoordinate und Ablagegröße besteht. Insbesondere dann, wenn der anzusteuende Bildpunkt den Zenit überschreitet, muss das Tachymeter eine sehr große Drehbewegung durchführen.

Beim wesentlich engeren Bildausschnitt der Okularkamera setzt die große Drehbewegung erst in unmittelbarer Zenitnähe ein (Abb. 4-47). Jedoch ist auch schon bei „mäßigen“ Zenitdistanzen deutlich zu erkennen, dass kein konstantes Verhältnis zwischen Bildkoordinate und Ablagegröße besteht (Abb. 4-48).

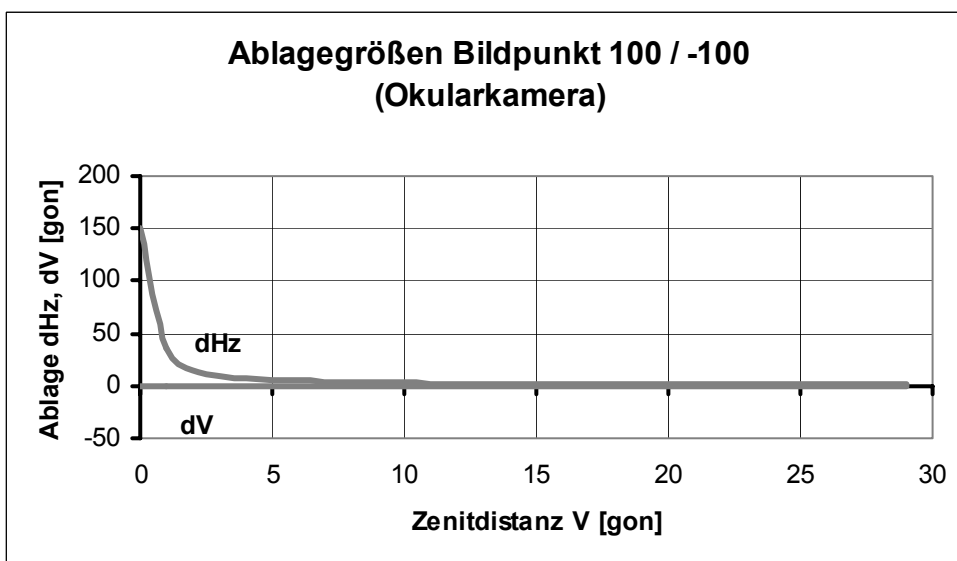


Abb. 4-47: Ablagegrößen der Okularkamera in Zenitnähe

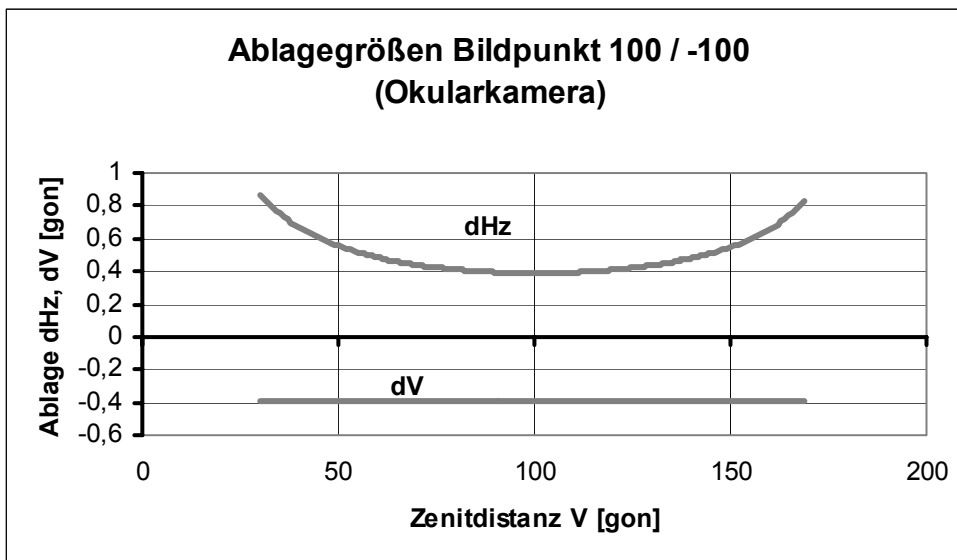


Abb. 4-48: Ablagegrößen der Okularkamera in Horizontnähe

4.2.6 Abweichung der Kamerabilder von der Idealgeometrie

Trotz Beachtung der im letzten Abschnitt aufgeführten geometrischen Zusammenhänge wird es bei realen Kameras aus den verschiedensten Gründen zu Abweichungen bei der Ansteuerung eines Zielpunktes kommen. Dieser Abschnitt zeigt auf, welche Gründe zu den verbleibenden systematischen Abweichungen führen und wie diese Abweichungen korrigiert werden können.

4.2.6.1 Abbildungsfehler

Nach [LUHMANN, 2000] entstehen Abweichungen von der idealen zentralperspektivischen Abbildung (Abbildungsfehler) im wesentlichen aufgrund folgender physikalischer Effekte:

- Radial-symmetrische Verzeichnung
- Radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung
- Affinität und Scherung

Die radial-symmetrische Verzeichnung entsteht überwiegend durch Brechungsänderungen an den Linsen des Objektivs und ist sowohl von der aktuellen Fokussierung als auch von der Objektentfernung bei konstanter Fokussierung abhängig. Sie stellt im allgemeinen den größten Fehlereinfluss dar.

Die radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung wird vor allem durch Dezentrierung der Linsen im Objektiv verursacht.

Affinität und Scherung beschreiben Abweichungen des Bildkoordinatensystems von Orthogonalität und Gleichmäßigkeit der Koordinatenachsen. Digitale Aufnahmesysteme können diese Charakteristik durch eine ungleichmäßige Anordnung der Sensorelemente aufweisen. Gleiches gilt für die Auswertung von Videobildern, die mit einem Frame Grabber digitalisiert worden sind.

Die zahlreichen Abbildungsfehler, die insbesondere bei den im vorgestellten System verwendeten preiswerten Kameras und Optiken von geringer Qualität auftreten, könnten nur unter großem Aufwand isoliert betrachtet werden. Stattdessen wurde ein halbautomatisches Kalibrierverfahren entwickelt, bei dem für jede der Kameras empirisch eine Korrektionsmatrix ermittelt wird.

4.2.6.2 Zielabweichung

Als Zielabweichung wird das Maß verstanden, um das ein einzustellender Punkt vom Strichkreuz abweicht, nachdem das Tachymeter seine Bewegung nach in 4.2.5.2 beschriebenen geometrischen Zusammenhängen (Umkehrung der gnomonischen Projektion) durchgeführt hat. Die Zielabweichung wird in Pixel angegeben und besteht aus einer X- und einer Y-Komponente. Die Hauptursachen für die Zielabweichung liegen in den oben beschriebenen (und nicht einzeln berücksichtigten) Abbildungsfehlern, in der nach der mechanischen Justierung verbleibenden, geringfügigen Kantung und verbleibenden Restsystematiken aufgrund des exzentrischen Einbaus der Kameras. Diese Abweichungen sind abhängig von der Bildposition des einzustellenden Punktes.



Abb. 4-49: Einzustellende Zielmarke (Pfeil)



Abb. 4-50: Zielabweichung ohne Korrektur

Zur Erfassung der Zielabweichungen werden die einzelnen Kamerabilder von einem Raster (z.B. 60 x 60 Pixel) überzogen. Für diese Rasterpunkte werden mittels einer halbautomatischen Kalibrier-Routine Korrekturwerte für die Zuordnung Bildkoordinaten / Ablagegrößen ermittelt. Zwischen den Rasterpunkten wird bei der späteren Zielung der Korrekturwert des Bildpunktes durch bilineare Interpolation (siehe Abb. 4-56) ermittelt.

4.2.6.3 Kalibrier-Routine

Bei der Kalibrier-Routine wird ein zweites Strichkreuz in das Kamerabild eingeblendet. Es nimmt dabei nacheinander die verschiedenen Positionen eines zuvor festgelegten Rasters ein (Abb. 4-51). Dieses „wandernde“ Strichkreuz soll im Folgenden als „exzentrisch“, das ursprüngliche Strichkreuz als „zentrisch“ bezeichnet werden. Mit dem exzentrischen Strichkreuz wird durch Bewegung des Tachymeters von Hand ein Zielzeichen eingestellt. Daraufhin bewegt sich das Tachymeter entsprechend den zuvor beschriebenen geometrischen Zusammenhängen (Umkehrung der gnomonischen Projektion) und der einzustellende Punkt befindet sich jetzt in der Nähe des zentrischen Strichkreuzes (Abb. 4-52). Die verbleibenden Abstände vom nun eingestellten Zielpunkt zum zentrischen Strichkreuz bilden die Korrekturwerte.



Abb. 4-51: Raster mit exzentrischem Strichkreuz



Abb. 4-52: Unkorrigierte automatische Einstellung

Abb. 4-51 zeigt das Kamerabild nach manueller Anzielung der Zielmarke im Bildpunkt $-180 / -120$. Abb. 4-52 zeigt die unkorrigierte automatische Einstellung der Zielmarke. Der X- und Y-Abstand zur Zielmarke wird nach Anfahren der Zielmarke auf dem Bildschirm ermittelt und als Korrekturwert für den Punkt $-180 / -120$ gespeichert.

Diese Prozedur wird für jeden Rasterpunkt wiederholt, wobei der Beobachter vom System in der Weise unterstützt wird, dass das Tachymeter automatisch näherungsweise auf die jeweilige Zielposition ausgerichtet wird. Die Speicherung der Korrekturwerte erfolgt in Form einer Datei, die dem jeweiligen untersuchten Rasterpunkt einen Korrekturwert in X- und in Y-Richtung zuweist. Alle Korrekturwerte beziehen sich auf das virtuelle Strichkreuz für die Entfernung unendlich.

4.2.6.4 Darstellung der Korrekturwerte

Die Korrekturwerte können grafisch in Form eines Gitters dargestellt werden, an dessen Knotenpunkten der jeweilige Korrekturwert als Vektor eingetragen ist. Bei der Darstellung der Korrekturwerte in Abb. 4-53 bis Abb. 4-55 wurde die Lage des virtuellen Strichkreuzes durch einen Kreis hervorgehoben.

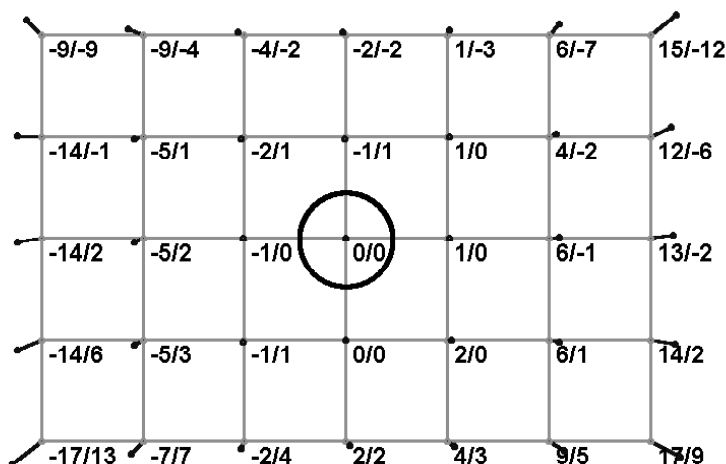


Abb. 4-53: Korrekturmatrix der Weitwinkelkamera (Raster 60×60 Pixel)

Abb. 4-53 zeigt die Korrekturwerte für die X- und Y-Bildkoordinaten eines Rasters von 60×60 Pixel für das Weitwinkelfeld. Deutlich erkennbar sind radiale Effekte sowie eine leichte Drehung und Stauchung.

Die im Folgenden dargestellten Korrekturwerte für das Bild der Telekamera und der Okularkamera (Raster jeweils 50×50) zeigen deutlich kleinere Abweichungen.

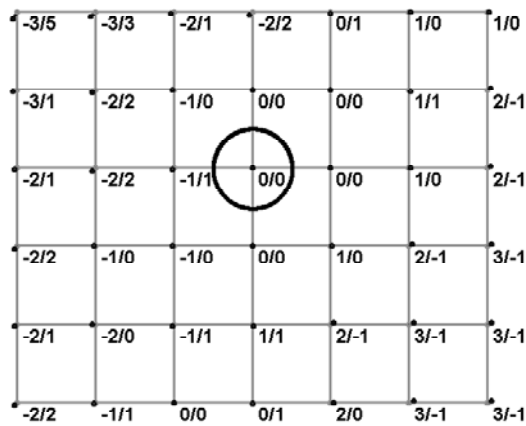


Abb. 4-54: Korrekturmatrix der Telekamera

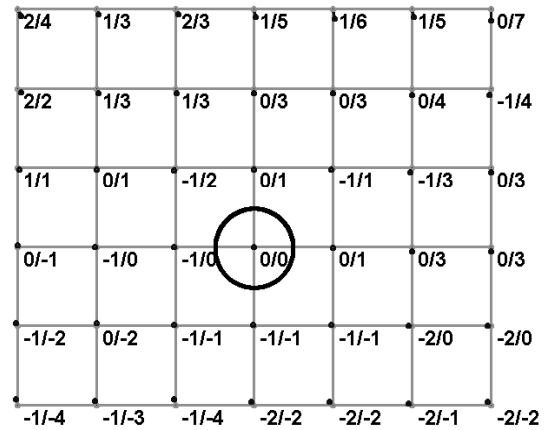


Abb. 4-55: Korrekturmatrix der Okularkamera

4.2.6.5 Anbringen der Korrekturwerte

Beim Anfahren eines einzustellenden Zielpunktes mit dem Cursor auf dem Bildschirm werden die zum jeweiligen Bildpunkt gehörenden Korrekturwerte durch bilineare Interpolation innerhalb der Maschen der Korrekturmatrizen berechnet (siehe Abb. 4-56).

Dazu werden beim Aufbau der Datenverbindung zwischen dem TCRM und dem Notebook die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Korrekturmatrizen eingelesen und es werden zwei interne Korrekturmatrizen (getrennt für die Korrektur in X- und in Y-Richtung) erstellt. Die Berechnung des jeweiligen Korrekturwertes für einen auf dem Monitor mit dem Cursor angefahrenen Bildpunkt erfolgt mit Hilfe der bilinearen Interpolation. Der interpolierte Korrekturwert entsteht aus dem gewichteten Mittel der Korrekturwerte der benachbarten Rasterpunkte, wobei das Gewicht durch den jeweils überdeckten Flächenanteil bestimmt wird [LUHMANN, 2000].

Abb. 4-56 zeigt die Interpolation für die Rasterweite 1. Bei anderen Rasterweiten sind die Beträge dx und dy zur Normierung innerhalb der Maschen durch die Rasterweite zu dividieren.

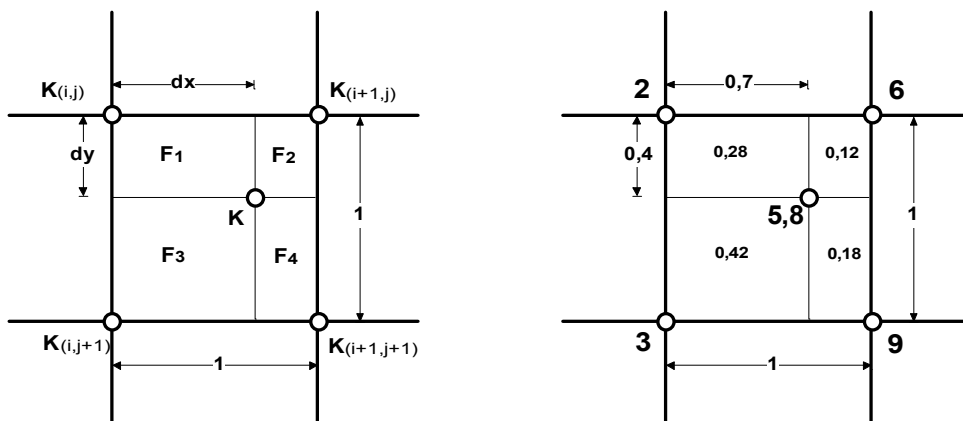


Abb. 4-56: Bilineare Interpolation: Schema / Beispiel

Die Interpolationsvorschrift lautet:

$$K = F_1 \cdot K_{(i+1,j+1)} + F_2 \cdot K_{(i,j+1)} + F_3 \cdot K_{(i+1,j)} + F_4 \cdot K_{(i,j)} \tag{4-23}$$

4.2.7 Zusammenfassende Darstellung der Kalibrier Routinen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, wie die drei Kameras (Weitwinkel-, Tele-, und Okularkamera) in das System integriert worden sind. An dieser Stelle wird noch einmal kurz zusammengefasst, welche Exzentren bekannt sein müssen, welche Justierungen vorzunehmen sind, welche Parameter durch Kalibrierung ermittelt werden müssen, und welche Schritte notwendig sind, um die Beziehung zwischen Bildkoordinaten und Theodolit-Richtungen herzustellen.

Messung der Exzentren:

- Höhenabweichung dH und Querabweichung dQ der Projektionszentren der Kameras gegenüber der Zielachse

Mechanische Justierungen:

- Beseitigung der Kantung (4.2.3.4)

Kalibrierungen:

- Kamerakonstante c (4.2.3.2)
- Lage der virtuellen Strichkreuze für die Entfernung Unendlich (4.2.3.4)
- Zielabweichungsmatrizen (4.2.6.4)

Bei jeder Zielung durchzuführende Schritte:

nur exzentrische Kameras (Beseitigung der Strichkreuz-Parallaxe)

- Messen der Entfernung zum aktuellen Zielpunkt
- Berechnung der Lage des virtuellen Strichkreuzes in Abhängigkeit von der Kamerakonstanten, der Höhen- und Querabweichung und der Entfernung (4.2.3.4)

alle Kameras

- Ermittlung der Bildkoordinaten durch Anfahren des Zielpunktes mit dem Cursor auf dem Monitor
- Anbringen der Korrekturwerte mit Hilfe der Zielabweichungsmatrizen (4.2.6.5)
- Messen der aktuellen Horizontalrichtung und Zenitdistanz
- Berechnung der tangentialen Raumkoordinaten des Bildpunktes des anzufahrenden Punktes im „Kugelsystem“ des Tachymeters (4.2.5.2)
- Berechnung der Theodolit-Richtungen zu den Raumkoordinaten des Bildpunktes
- Einstellen der berechneten Theodolit-Richtungen

Sofern der neu einzustellende Zielpunkt die gleiche Entfernung vom Tachymeter hat, wie der Punkt, der zu Beginn des Zielvorgangs im Zentrum des virtuellen Strichkreuzes lag, wird auch bei der Verwendung der exzentrisch eingebauten Kameras das virtuelle Strichkreuz mit der Zielachse (Laserstrahl) übereinstimmen. Sollten die Entfernungen vom Tachymeter aus sehr unterschiedlich sein, wirkt die entfernungsabhängige Parallaxe und die Zielachse schneidet das Objekt nicht im mit dem virtuellen Strichkreuz anvisierten Zielpunkt sondern geringfügig daneben. Der Zielvorgang ist dann ggf. zu wiederholen.

4.3 Integration von Bilddaten

Im Zusammenwirken der Vermessungsmethoden besteht seit jeher eine enge, normalerweise jedoch einseitige Beziehung zwischen Tachymetrie und Photogrammetrie: Die Tachymetrie liefert die notwendigen Passpunkte für die Photogrammetrie. Die Ergebnisse der Photogrammetrie können jedoch auch dazu genutzt werden, den Bearbeiter bei der tachymetrischen Aufnahme zu unterstützen.

In diesem Kapitel werden Techniken vorgestellt, die dazu dienen, Bild- und Geometriedaten zu verknüpfen. Dabei ist vorausgesetzt, dass die zu verarbeitenden Originalbilder in digitaler Form vorliegen und die Ergebnisse ebenso digital ausgegeben werden. Des Weiteren wird hier ausschließlich auf die Methoden der Nahbereichsphotogrammetrie eingegangen, der große Bereich der Aero-Photogrammetrie bleibt ausgespart.

Als bekannte Grundtechniken der Nahbereichsphotogrammetrie (z.B. [LUHMANN, 2000]) werden die ebene Projektivtransformation (Abbildung von Ebenen auf Ebenen mit Hilfe von vier Passpunkten) und die Einzelbildauswertung mit orientierter Kamera und bekanntem Oberflächenmodell (parametrische Abbildung) vorgestellt. Diese beiden Techniken haben eine sehr enge Bindung zur Tachymetrie, weil die wesentlichen, formbeschreibenden 3D-Punkte für die Bearbeitung bereits vorliegen müssen und nicht, wie in der Mehrbildphotogrammetrie, mit Hilfe photogrammetrischer Methoden (Vorwärtsschnitt, Bündelblockausgleichung) bestimmt werden.

Es wird gezeigt, wie durch Kombination mehrerer entzerrter Bildbereiche Orthophotos erzeugt und wie sie zur virtuellen Modellierung von Objekten eingesetzt werden können.

Entzerrte Bildbereiche und Orthophotos bilden das Bindeglied zur Kombination der Photogrammetrie mit anderen Vermessungsmethoden. So sind diese beiden Produkte z.B. eine Grundlage für ein Handaufmaß.

In dieser Arbeit wird erstmals gezeigt, wie entzerrte Bildbereiche und orientierte Einzelbilder genutzt werden können, ein reflektorlos messendes, motorisiertes Tachymeter zu steuern. Ebenso wird hier eine neuartige Methode vorgestellt, die es ermöglicht, direkt bei der tachymetrischen Erfassung eines Objektes das entstehende Modell mit photorealistischer Textur zu versehen, ohne eine manuelle Referenzierung zwischen Objekt- und Bildkoordinaten vorzunehmen.

4.3.1 Ebene Projektivtransformation (Vierpunkt-Entzerrung)

Die ebene Projektivtransformation (die aus Gründen der Anschaulichkeit im Folgenden auch als „Vierpunkt-Entzerrung“ bezeichnet wird), ist dazu geeignet, Bilder von ebenen Bereichen zu entzerren. Im Folgenden werden die mathematischen Grundlagen dieser Projektion vorgestellt, die Auswirkung von Unebenheiten des Objektes auf die Entzerrung wird untersucht, es werden die Vor- und Nachteile dieser Methode aufgeführt und die Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Vermessungsmethoden aufgezeigt.

4.3.1.1 Mathematische Grundlagen

Bei der ebenen Projektivtransformation werden mit Hilfe der Formeln der projektiven Geometrie Ebenen auf Ebenen abgebildet. Dazu werden die 2D-Objektkoordinaten und die entsprechenden Bildkoordinaten von vier Punkten benötigt. Sofern die Objektkoordinaten in 3-dimensionaler Form vorliegen, müssen diese durch eine räumliche Koordinatentransformation verebnet werden.

Bildkoordinaten sind so umzuformen, dass sie ihren Ursprung im Bildhauptpunkt haben. Eine eventuell vorhandene Linsenverzeichnung ist vorher zu korrigieren.

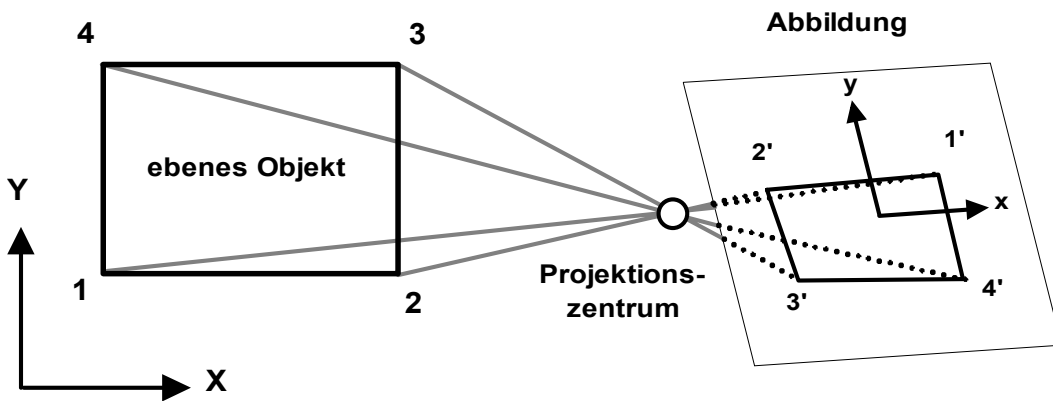


Abb. 4-57: Ebene Projektivtransformation

Die Projektivtransformation beschreibt die zentralprojektive Abbildung zweier ebener Koordinatensysteme aufeinander. Sämtliche Abbildungsstrahlen durchlaufen geradlinig das Projektionszentrum.

Die Transformationsvorschrift lautet [LUHMANN, 2000, Gl. 2.12]:

$$X = \frac{a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y}{1 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y} \quad (4-24)$$

$$Y = \frac{b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y}{1 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y} \quad (4-25)$$

Mit:

X, Y: ebene Objektkoordinaten

x, y: auf den Bildhauptpunkt bezogene Bildkoordinaten

$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_1, c_2$: Transformationskoeffizienten

Das System ist nicht linear. Durch Multiplikation mit dem Nenner und Umstellung kann jedoch folgende lineare Form abgeleitet werden, die sich als Beobachtungsgleichung für ein Ausgleichssystem eignet:

$$a_0 + a_1x + a_2y - X - c_1xX - c_2yX = 0$$

$$b_0 + b_1x + b_2y - Y - c_1xY - c_2yY = 0$$

[LUHMANN, 2000, Gl. 2.13]

Zur Bestimmung der acht Koeffizienten

$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_1, c_2$,

müssen vier identische Punkte vorliegen, von denen nicht drei auf einer Geraden liegen dürfen.

Eine direkte, nicht-iterative Bestimmung der Koeffizienten gelingt mit Hilfe folgender Bestimmungsgleichungen:

$$a_0 + a_1x_i + a_2y_i - c_1x_iX_i - c_2y_iX_i = X_i \quad (4-26)$$

$$b_0 + b_1x_i + b_2y_i - c_1x_iY_i - c_2y_iY_i = Y_i \quad (4-27)$$

[LUHMANN, 2000, Gl. 4.69],

die direkt nach dem Schema

$$\hat{A} \cdot \hat{x} = l$$

mit:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -y_1X_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 & -x_1Y_1 & -y_1Y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & 0 & 0 & 0 & -x_2X_2 & -y_2X_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 & -x_2Y_2 & -y_2Y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & 0 & 0 & 0 & -x_3X_3 & -y_3X_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_3 & y_3 & -x_3Y_3 & -y_3Y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & 0 & 0 & 0 & -x_4X_4 & -y_4X_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_4 & y_4 & -x_4Y_4 & -y_4Y_4 \end{bmatrix}, \hat{x} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}, l = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ X_3 \\ Y_3 \\ X_4 \\ Y_4 \end{bmatrix} \quad (4-28)$$

gelöst werden können:

$$\hat{x} = \hat{A}^{-1} \cdot l$$

Nach diesen Formeln kann für jeden Bildpunkt der entsprechende Objektpunkt berechnet werden. Wie jedoch in 4.3.6.2 beschrieben wird, ist es geschickter, nach der indirekten Transformationsmethode für jeden Punkt des Ergebnisbildes den dazugehörigen Farbwert im Originalbild zu suchen. Dazu sind in den Formeln lediglich die Objektkoordinaten gegen die Bildkoordinaten auszutauschen.

Objektkoordinaten der Entzerrungspunkte

Die zur Vierpunkt-Entzerrung notwendigen Objektkoordinaten können auf verschiedene Weise bestimmt werden. Dabei ist zu unterscheiden, ob das Ergebnis der Entzerrung ein einzelnes Bild sein soll, ein Teil eines Bildmosaiks oder ein Teil eines texturierten Modells.

Zur Erstellung eines einzelnen entzerrten Bildes reicht die Bestimmung der Entzerrungspunkte in ebenen Koordinaten aus. Besonders einfach ist dies, wenn die Entzerrungspunkte am Objekt ein Rechteck bilden. Doch auch ein beliebiges (ebenes) Viereck kann durch die Messung der vier Seiten und einer Diagonalen eindeutig bestimmt werden.

Sollen mehrere entzerrte Bilder zu einem Bildmosaik zusammengesetzt werden, so sind für alle Passpunkte die ebenen Objektkoordinaten zu bestimmen. Dies kann (z.B. bei Fassaden) durch den Einsatz von Messband, Lot und Nivellier oder mit Hilfe tachymetrischer Methoden erfolgen.

Sofern das entzerrte Bild Teil einer 3D-Visualisierung sein soll, sind die vier Entzerrungspunkte in 3D-Koordinaten eines übergeordneten Koordinatensystems zu ermitteln. Sowohl bei der Erstellung von Bildmosaiken als auch bei der Verwendung der entzerrten Bilder in einer 3D-Visualisierung ist durch ein entsprechendes Speicherkonzept sicherzustellen, dass die Bildkoordinaten der Entzerrungspunkte den entsprechenden Objektkoordinaten zugeordnet werden.

4.3.1.2 Lageversatz von Punkten außerhalb der Ebene

Objektpunkte, die außerhalb der durch die Passpunkte aufgespannten Ebene liegen, sind bei der Abbildung mit Hilfe der Vierpunkt-Entzerrung mit einem Lagefehler behaftet. Seine Größe ist im wesentlichen davon abhängig, wie weit außerhalb der Passpunktebene der Objektpunkt liegt, wie weit von der Bildmitte entfernt er abgebildet wird und wie sehr die Bildebene gegenüber der Passpunktebene verschwenkt ist.

Am einfachsten kann dieser Fehler für den häufigen Fall einer annähernden Parallelität von Passpunktebene und Bildebene abgeschätzt werden. Seine Größe richtet sich in diesem Fall nach dem Abstand von der Passpunktebene (dh), der Lage im Bild (r'), der Brennweite (c) der Kamera sowie der Aufnahmeentfernung (h).

Lageversatz bei Parallelität von Bild- und Passpunktebene

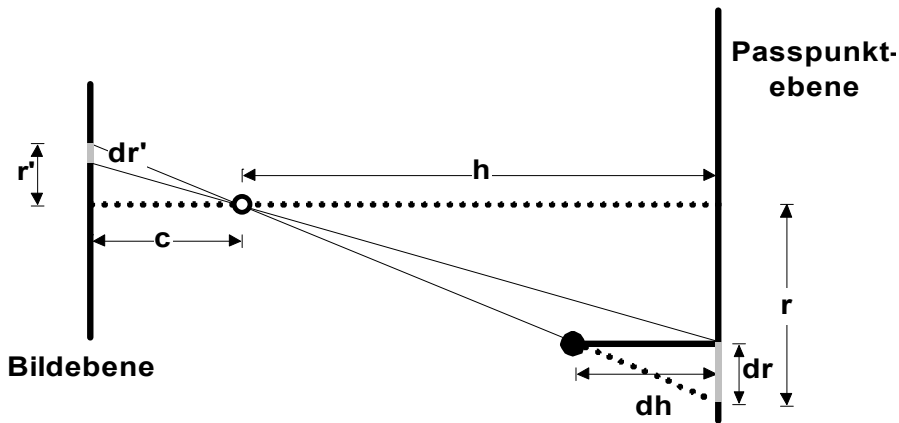


Abb. 4-58: Lageversatz

Nach Abb. 4-58 gilt für den resultierenden Lageversatz:

$$\frac{dr'}{r'} = \frac{dr}{r} = \frac{dh}{h}, \quad \text{somit gilt: } dr' = r' \frac{dh}{h} \quad (4-29)$$

Als Beispiel sei die Auswirkung einer Abweichung eines Objektpunktes, der 10 cm außerhalb der Passpunktebene liegt, bei einer Aufnahmeentfernung von 10 m aufgeführt. Wird dieser Punkt am Rand eines Kleinbildfilmes (18 mm Abstand zu Bildmitte) abgebildet, so beträgt sein Lagefehler 0,018 mm. Je näher der abgebildete Punkt zur Bildmitte liegt, desto kleiner wird der Lagefehler. Beim Einsatz einer Kamera mit längerer Brennweite kann bei gleichem Bildausschnitt eine größere Aufnahmeentfernung gewählt werden. Dies führt nach den obigen Formeln zu einem geringeren Lageversatz als bei kurzen Brennweiten.

Lageversatz bei Schrägaufnahme

Sofern die Aufnahmerichtung nicht senkrecht zur Passpunktebene (und somit die Bildebene nicht parallel zur Passpunktebene) ist, kommt es für einen außerhalb der Passpunktebene liegenden, in der Bildmitte abgebildeten Punkt zu folgendem Lageversatz:

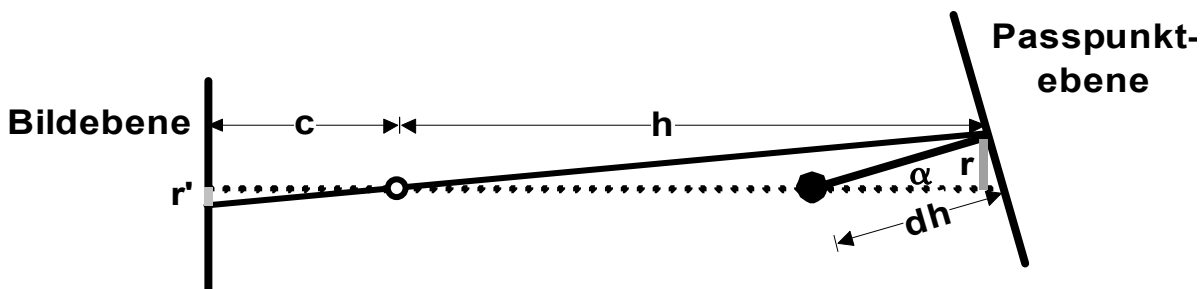


Abb. 4-59: Lageversatz bei Schrägaufnahme

Nach obiger Abbildung gilt:

$$r' = \frac{c}{h} \cdot r = \frac{c}{h} \cdot dh \cdot \sin \alpha \quad (4-30)$$

4.3.1.3 Empfehlungen und Beispiele

Aus den Betrachtungen zum Lageversatz ergeben sich folgende Empfehlungen für die Aufnahme und Entzerrung nicht vollkommen ebener Flächen:

- Die Aufnahme sollte mit möglichst langer Brennweite erfolgen.
- Die Aufnahme­richtung sollte möglichst senkrecht zur Fläche verlaufen.

Somit ist für jede Entzerrung nicht vollkommen ebener Objekte entsprechend den Anforderungen an die Bildqualität zu entscheiden, ob die Tiefenabweichung von Objektpunkten von der Passpunktebene vernachlässigt werden kann.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Entzerrung einer Fassade und die Überlagerung des entzerrten Photos mit Vektordaten. Besonders im Bereich des Firstes, der nicht in der Passpunktebene liegt, ist der vorhin beschriebene Lageversatz deutlich zu erkennen und zeigt somit bereits visuell die Grenzen dieser Entzerrungsmethode auf.



Abb. 4-60: Original



Abb. 4-61: Entzerrung



Abb. 4-62: Überlagerung

4.3.1.4 Beurteilung der Methode:

Neben dem recht übersichtlichen Formelwerk zeichnet sich die Methode der ebenen Projektivtransformation vor allem dadurch aus, dass sie ohne Angaben zur Position und Orientierung der Kamera (äußere Orientierung) auskommt. Angaben zu den Abbildungseigenschaften der Kamera (innere Orientierung) sind nur dann notwendig, wenn starke Linsenverzeichnungen zu korrigieren sind. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist die Tatsache, dass auch Punkte außerhalb des durch die Passpunkte begrenzten Bereiches geometrisch korrekt abgebildet werden, sofern sie sich in der selben Ebene wie die Passpunkte befinden.

Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass nur Punkte, die hinlänglich genau in der Ebene der Passpunkte liegen, geometrisch korrekt abgebildet werden. Punkte, die außerhalb der Ebene liegen, werden dagegen zum Teil grob falsch abgebildet. Dies kann zu Irritationen und Fehlinterpretationen führen, wenn die Benutzer der Ergebnisse mit dieser Methode wenig vertraut sind.

Die Methode kann überall dort angewandt werden, wo hinlänglich ebene Objekte mit relativ geringem Aufwand geometrisch korrekt dargestellt werden sollen. Dabei kann das entzerrte Photo selbst schon das angestrebte Endergebnis des Arbeitsprozesses sein [BENNING, 1995], es kann als Grundlage für eine Vektorisierung dienen oder in Kombination mit der abgeleiteten Vektorisierung dargestellt werden.

Typische Anwendungen sind dabei die Entzerrung von Wandmalereien oder Bodenmosaiken (Entzerrung als eigenständiges Endergebnis), Fassadenpläne (meist vektorisiert) und Schadenskartierungen an Wänden (Überlagerung von Vektor- und Bilddaten).

4.3.2 Orthophotos

Bei einem Orthophoto handelt es sich um ein differentiell entzerrtes Photo, das die Oberfläche eines Objektes in einer Parallelprojektion darstellt. Üblicherweise werden dabei differentiell kleine Oberflächenstücke unter Nutzung ihrer räumlichen Koordinaten individuell abgebildet.

In diesem Abschnitt der Arbeit wird ein einfaches Verfahren vorgestellt, das sich besonders für die Orthophotoherstellung von Objekten eignet, die aus nur wenigen Ebenen bestehen. Ein solches Photo kann durch die Kombination mehrerer mit Hilfe der ebenen Projektivtransformation (Vierpunkt-Entzerrung) umgebildeter Oberflächenbereiche erzeugt werden. Es ist dabei möglich, die Bildinformation aus verschiedenen Originalbildern zu beziehen. Dazu sind folgende Schritte notwendig:

- Alle räumlichen Koordinaten des abzubildenden Objektes sind in die Abbildungsebene zu projizieren.
- Es ist festzulegen, mit wie vielen Pixel pro Meter die verebnete Objektfläche belegt werden soll (Bildmaßstab).
- Die einzelnen ebenen Bereiche werden mit Hilfe der ebenen Projektivtransformation auf die Abbildungsebene umgebildet.
- Bei der Umbildung wird der Bezug des Ergebnisbildes zum Koordinatensystem der Abbildungsebene festgehalten (z.B. die Koordinate der oberen linken Bildecke), ebenso wird der festgelegte Bildmaßstab mitgeführt.
- Die Bereiche des Ergebnisbildes, die in die spätere Bildkombination übernommen werden sollen, sind zu markieren.
- Bei der Bildkombination sind Methoden der Bildbearbeitung anzuwenden, die es erlauben, mehrere polygonal begrenzte Bildausschnitte gemeinsam darzustellen.

Im Folgenden ist die Erzeugung eines Orthophotos für ein leicht nachvollziehbares Beispiel dargestellt: Abb. 4-64 und Abb. 4-67 zeigen die Photos eines einfachen Objektes aus zwei verschiedenen Aufnahmepositionen. Diese Photos sind bereits von Abbildungsfehlern aufgrund der Linsenverzeichnung befreit.

Die räumlichen Koordinaten der Eckpunkte des Objektes sowie der Passpunkte sind bekannt. Als Ergebnisbild ist eine Parallelprojektion des Objektes in die Ebene der Passpunkte (Papierebene) angestrebt.

Abb. 4-63 zeigt die in die Abbildungsebene projizierte Geometrie des Objektes.

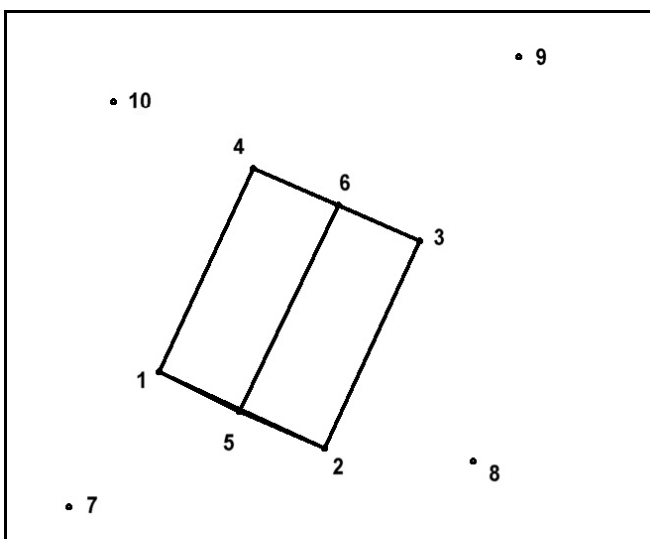


Abb. 4-63: Abbildungsebene

Bei Betrachtung der durch das Objekt verdeckten Bereiche in den beiden Originalbildern wird deutlich, dass für eine vollständige orthogonale Darstellung des Objektes und seines Hintergrundes beide Bilder herangezogen werden müssen.

Beide Bilder wurden jeweils auf zwei verschiedene Ebenen umgebildet: Zum einen mit Hilfe der Passpunkte 7, 8, 9 und 10 (Abb. 4-65 und Abb. 4-68) auf die „Grundebene“ zum anderen mit Hilfe der in die Abbildungsebene projizierten Objektpunkte 1, 5, 6 und 4 (Abb. 4-66) bzw. 5, 2, 3 und 6 (Abb. 4-69) auf die jeweiligen „Dachebenen“.

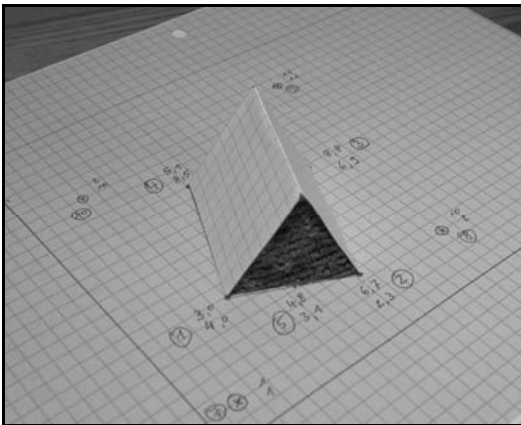


Abb. 4-64: Originalbild A

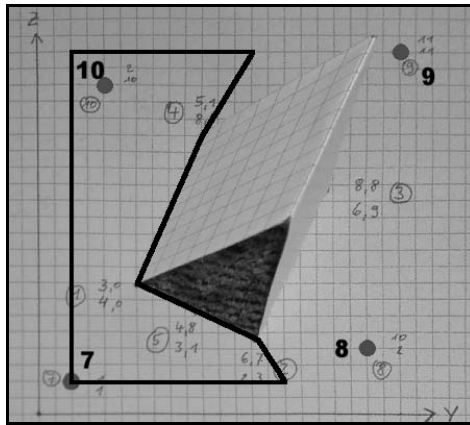


Abb. 4-65: Entzerrung auf Grundebene

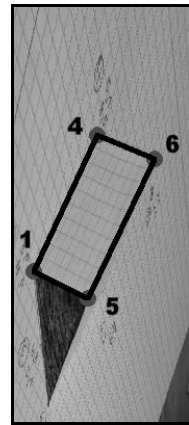


Abb. 4-66: Entzerrung auf Dachebene 1

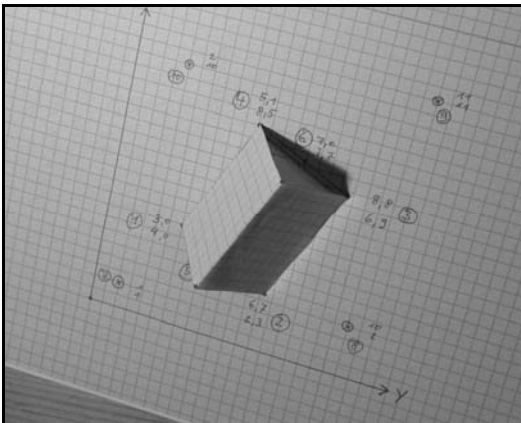


Abb. 4-67: Originalbild B

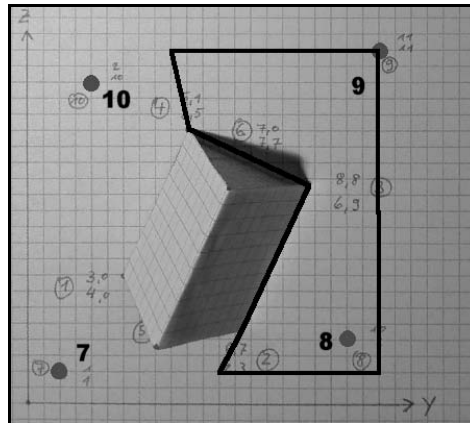


Abb. 4-68: Entzerrung auf Grundebene

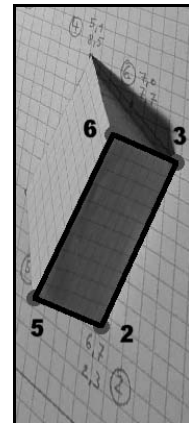


Abb. 4-69: Entzerrung auf Dachebene 2

Diese vier entzerrten Bereiche können dann zu einem einzigen Bild kombiniert und nach Wunsch mit der Vektorgrafik überlagert werden:

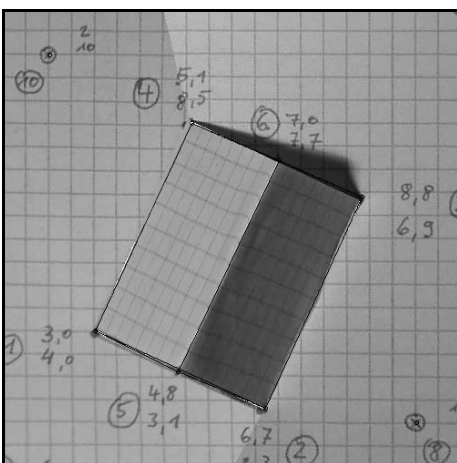


Abb. 4-70: Zusammengesetztes Orthophoto

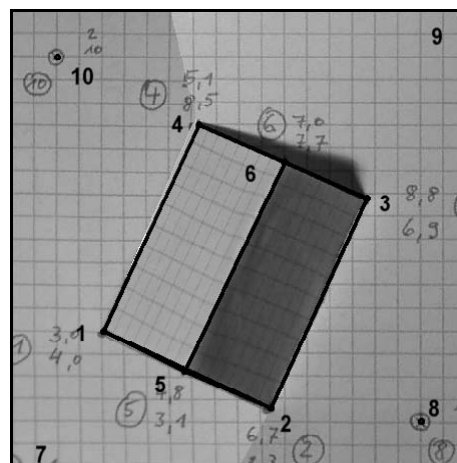


Abb. 4-71: Überlagerung mit Vektorgrafik

Ein auf diese Weise erzeugtes Orthophoto kann innerhalb des Vermessungssystems in ähnlicher Weise genutzt werden wie die zuvor beschriebenen Einzelentzerrungen: Auch hier können neue (zweidimensionale) Vektordaten durch Messung im Bild erzeugt werden. Sie erlauben somit ein Handaufmaß auf der Grundlage des Orthophotos.

4.3.3 Orientierung externer Bilder zur parametrischen Entzerrung

Im Abschnitt 4.3.1 (ebene Projektivtransformation) wurden die geometrischen Grundlagen erörtert, die notwendig sind, um die Farbinformation externer Bilder für die Farbbelegung einer einzigen ebenen Fläche zu nutzen. Soll die Farbinformation eines Bildes dagegen für ein Objektmodell, das aus einer Vielzahl modellierter Flächen oder anderer geometrischer Grundformen besteht, herangezogen werden, ist es notwendig, auf die Grundlagen der zentralperspektiven Abbildung einzugehen. Nach kurzer Definition der Begriffe „innere“ und „äußere“ Orientierung wird gezeigt, wie ein Raumpunkt mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen in einem Photo abgebildet wird.

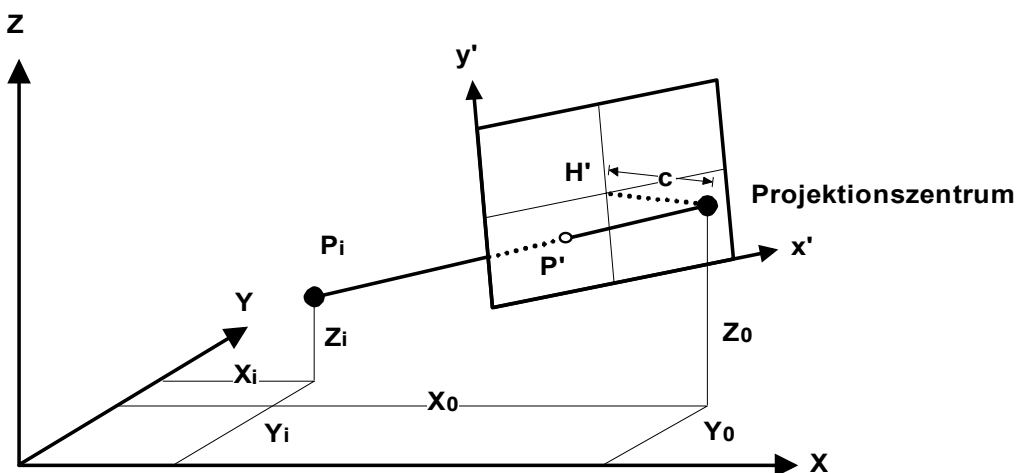


Abb. 4-72: Abbildung eines Raumpunktes

4.3.3.1 Innere Orientierung

Die Parameter der inneren Orientierung einer Aufnahmekamera beschreiben die Lage des Projektionszentrums im kamerafesten Bildkoordinatensystem sowie Abweichungen vom mathematischen Modell der Zentralperspektive:

Bildhauptpunkt H' :

Lotfußpunkt des Projektionszentrums 0 im Bildkoordinatensystem mit den Koordinaten x'_0 und y'_0 , der bei gebräuchlichen Kameras näherungsweise in der Bildmitte liegt.

Kamerakonstante c :

Lotrechter Abstand des Projektionszentrums von der Bildebene.

Parameter von Bildfehler beschreibenden Funktionen:

Funktionen oder Parameter, die Abweichungen vom zentralperspektiven Modell, in erster Linie den Einfluß der radial-symmetrischen Verzeichnung, beschreiben (siehe auch 4.2.6).

Bestimmung der inneren Orientierung

Die Bestimmung der inneren Orientierung der verwendeten Kameras erfolgte als Testfeldkalibrierung mit Hilfe des Unterprogramms „Camera-Calibrator“ des Photogrammetrieprogramms „PhotoModeler“. Dazu wurde ein Testbild

unter 9 verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen und halbautomatisch ausgewertet. Bei Zoom-Kameras ist darauf zu achten, dass die Aufnahmen bei klar definierten Zoom-Stellungen (z.B. maximaler Weitwinkel) gemacht werden. Streng genommen darf auch nur eine bestimmte Fokussierung gewählt werden. In der Praxis gab es jedoch bei den verwendeten Amateur-Kameras keine Probleme, zumal für diese Kameras bereits ab ca. 10 m der Bereich „unendlich“ beginnt.

4.3.3.2 Äußere Orientierung

Durch die sechs Parameter der äußeren Orientierung werden die Position und die Ausrichtung des räumlichen Bildkoordinatensystem im übergeordneten Objektkoordinatensystem beschrieben:

Position:

Die Position wird durch die Koordinaten X_0 , Y_0 und Z_0 des Projektionszentrums O bestimmt.

Ausrichtung:

Die Ausrichtung der Kamera wird durch die nacheinander durchgeführten Drehungen um die drei Achsen des räumlichen Koordinatensystems beschrieben. Der Winkel κ entspricht der Drehung um die Z-Achse, der Winkel φ der Drehung um die Y-Achse, der Winkel ω der Drehung um die X-Achse.

$$\mathbf{R}_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}, \mathbf{R}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}, \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-31)$$

Daraus ergibt sich eine Drehmatrix \mathbf{R} mit:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (4-32)$$

[LUHMANN, 2000, Gl. 2.20]

Bestimmung der äußeren Orientierung

Die Berechnung der äußeren Orientierung erfolgt nach dem Verfahren des räumlichen Rückwärtsschnitts auf Basis der im nächsten Abschnitt beschriebenen Kollinearitätsgleichungen. Mit einem an der Ruhr-Universität Bochum entwickelten Programm werden nach Eingabe von mindestens vier 3D-Passpunkten und den dazugehörigen Bildkoordinaten bei bekannter innerer Orientierung die Parameter der äußeren Orientierung ausgegeben. Dabei findet eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate statt.

4.3.3.3 Abbildung eines Punktes

Die Abbildung eines 3D-Punktes erfolgt mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen. Es gilt:

$$x_i' = x_0 - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X_i - X_0) + r_{21} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{31} \cdot (Z_i - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_i - X_0) + r_{23} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_i - Z_0)} \quad (4-33)$$

$$y_i' = y_0 - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X_i - X_0) + r_{22} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{32} \cdot (Z_i - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_i - X_0) + r_{23} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_i - Z_0)} \quad (4-34)$$

Alternativ kann die Abbildung eines Punktes auch mit Hilfe der Matrizenmultiplikation formuliert werden:

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}^T \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}, \quad x_i' = x_0 - c \cdot \frac{\bar{x}}{\bar{z}}, \quad y_i' = y_0 - c \cdot \frac{\bar{y}}{\bar{z}} \quad (4-35)$$

Beispiel:

Die folgende Abbildung zeigt ein mit Hilfe von vier Passpunkten orientiertes Photo, in das die bekannten Raumpunkte unter Anwendung der Kollinearitätsgleichungen abgebildet worden sind.

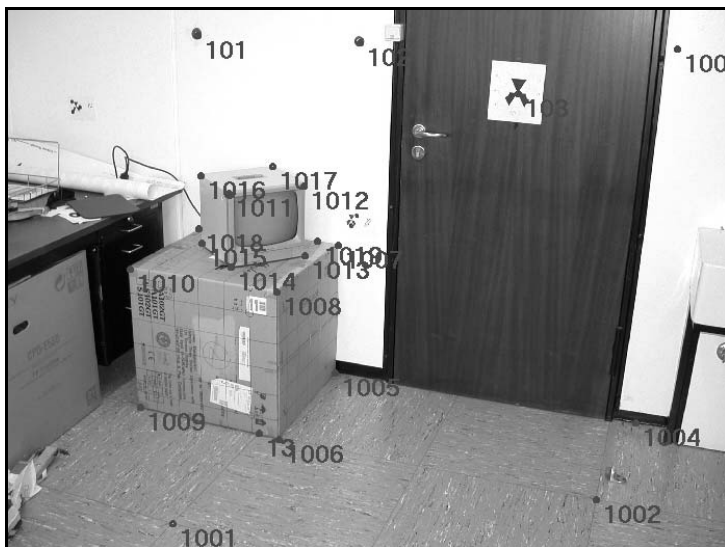


Abb. 4-73: Abgebildete Raumpunkte

4.3.4 Tachymetersteuerung mit Hilfe externer Bilder

Wie bereits in 4.2 beschrieben, zeichnet sich das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vermessungssystem dadurch aus, dass ein reflektorlos messendes, motorisiertes Tachymeter durch die grafische Bedienungsfläche eines Notebooks gesteuert werden kann. Neben der Anzielung mit Hilfe der Bilder der eingebauten Kameras können auch die Bilder externer Kameras genutzt werden. Dabei kann grundsätzlich zwischen drei Methoden, die im Weiteren ausführlich beschrieben sind, unterschieden werden:

Bei der ersten Methode wird auf der (mit einem entzerrten Bild hinterlegten) grafischen Bedienoberfläche ein Punkt ausgewählt, dessen 3D-Koordinaten bekannt sind. Das Programm berechnet darauf hin (bei bekanntem Standpunkt und bekannter Orientierung des Tachymeters) die Absteckungsrichtungen und stellt das Fernrohr auf diesen Punkt ein.

Die zweite Methode setzt voraus, dass der abzusteckende Punkt in (der Nähe) derjenigen Ebene liegt, die momentan auf der (mit einem entzerrten Bild hinterlegten) grafischen Bedienoberfläche angezeigt wird. Dies erlaubt die Absteckung bisher noch nicht koordinatenmäßig bestimmter Punkte.

Die Absteckung noch nicht koordinatenmäßig bestimmter Punkte kann auch mit der dritten Methode durchgeführt werden: In einem zuvor orientierten Bild des Objektes wird ein Punkt ausgewählt und mittels iterativer Streckenmessung am Objekt abgesteckt.

Voraussetzung für alle im Folgenden näher beschriebenen Methoden ist eine zuvor durchgeführte Stationierung und Orientierung des Tachymeters.

4.3.4.1 Punkt mit bekannten 3D-Koordinaten

Bei der Auswahl eines Punktes mit bekannten 3D-Koordinaten mit Hilfe der grafischen Bedienoberfläche wird derjenige Punkt aus der Datei ausgewählt, welcher der momentanen Cursorposition in der entsprechenden Darstellungsebene am nächsten liegt. Dem Programm steht somit ein Punkt mit drei räumlichen Koordinaten zur Absteckung zur Verfügung. Abb. 4-74 zeigt einen solchen gewählten Punkt.



Abb. 4-74: Punkt aus Datei (3D)

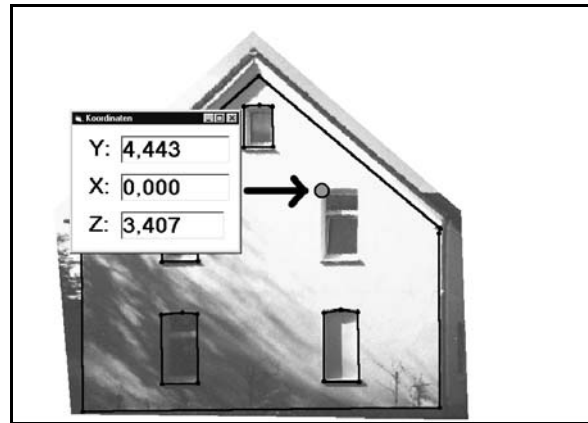


Abb. 4-75: Punkt aus Grafik (2D)

4.3.4.2 Punkt aus Grafik

Bei dieser Methode wird die Cursorposition auf der grafischen Oberfläche in zweidimensionale Objektkoordinaten umgerechnet. Dies setzt voraus, dass der abzusteckende Punkt in (der Nähe) der definierten Abbildungsebene liegt. In Abb. 4-75 wurde die Abbildungsebene (aus Gründen der Anschaulichkeit) so gewählt, dass die Y-Achse des Koordinatensystems entlang der Fassade verläuft und die X-Achse ins Gebäude zeigt. Auf diese Weise wird allen grafisch ermittelten Punkten die X-Koordinate Null zugewiesen. Somit stehen wieder drei räumliche Koordinaten zur Absteckung zur Verfügung. Sofern der anvisierte Punkt nicht exakt in der Abbildungsebene liegt, kommt es in Abhängigkeit von Kamera- und Tachymeterstandpunkt (vgl. 4.3.1.2) zu Abweichungen bei der Absteckung. In erster Linie dient diese Methode zur groben Anzielung eines Punktes, die dann mit Hilfe einer Visur durch das Okular oder mit der eingebauten Okularkamera präzisiert wird.

4.3.4.3 Punkt aus orientiertem externen Bild

Die Absteckung mit Hilfe eines orientierten externen Bildes nutzt die im Kapitel Absteckung gewonnenen Erkenntnisse zur iterativen Bestimmung des Schnittpunktes einer Raumgeraden mit einer physischen Oberfläche. Durch die Bildkoordinatenmessung kann bei Kenntnis der Orientierung der Kamera eine Raumgerade bestimmt werden (Abb. 4-76).

Zur Berechnung der Raumgeraden wird ein „Bildvektor“ $[x', y', -c]$ mit der in 4.3.3.2 (Äußere Orientierung) beschriebenen Drehmatrix multipliziert:

$$\begin{bmatrix} \bar{X} - X_0 \\ \bar{Y} - Y_0 \\ \bar{Z} - Z_0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{bmatrix} \quad (4-36)$$

Die Koordinaten $\bar{X} - X_0, \bar{Y} - Y_0, \bar{Z} - Z_0$ bilden einen Punkt der Raumgeraden, die im Projektionszentrum ihren Ursprung hat.

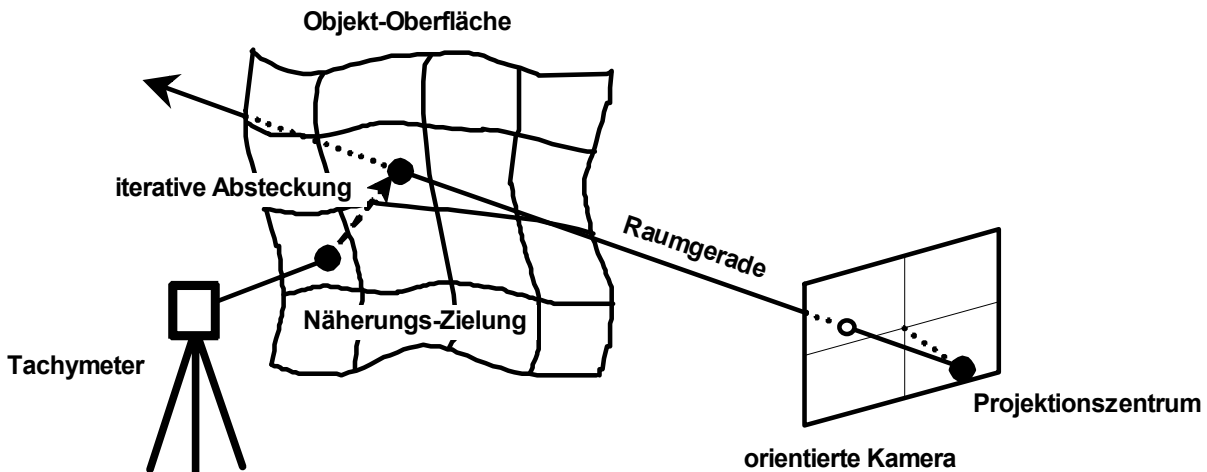


Abb. 4-76: Iterative Absteckung

Das angeschlossene Tachymeter durchläuft die Iterationsschleife „Messen-Berechnen-Positionieren“, wie in 3.2.2 (Iteration: Absteckung auf den Lotfußpunkt der Geraden) beschrieben, so lange, bis der Messfleck des Tachymeters auf die durch die Bildkoordinatenmessung definierte Raumgerade trifft.

4.3.5 Orientierung der Einbaukameras

Im Gegensatz zur Orientierung von Freihandaufnahmen mit Hilfe von Passpunkten kann die Orientierung von Bildern, die mit den ins Tachymeter eingebauten Kameras aufgenommen worden sind, direkt berechnet werden.

Die bereits in 4.2.2.2 erläuterten Abbildungen (Abb. 4-77 und Abb. 4-78) zeigen schematisch die Position einer exzentrisch eingebauten Kamera in Abhängigkeit von der mit dem Fernrohr angezielten Richtung.

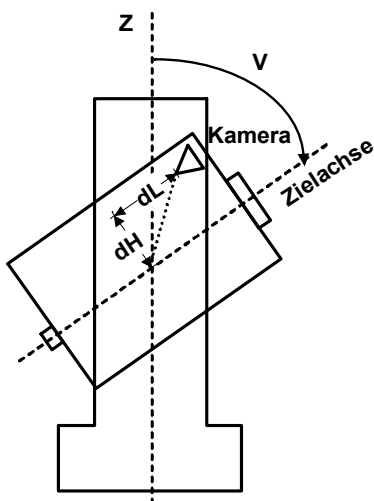


Abb. 4-77: Exzentrische Kamera: Seitenansicht

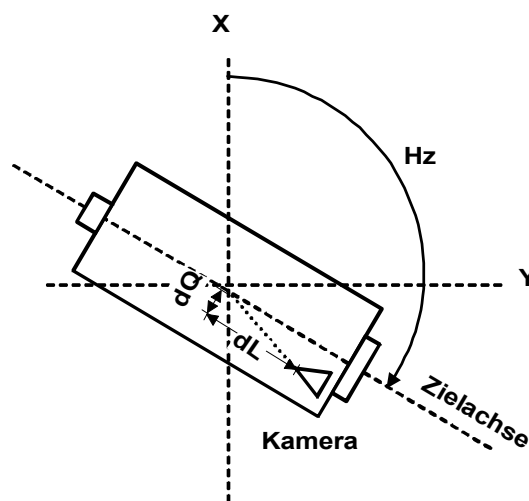


Abb. 4-78: Exzentrische Kamera: Aufsicht

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(100-V) & -\sin(100-V) \\ 0 & \sin(100-V) & \cos(100-V) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin V & -\cos V \\ 0 & \cos V & \sin V \end{bmatrix} \quad (4-38)$$

Die Drehmatrix \mathbf{R}_3 beschreibt die Drehung (Kantung) um die geodätische X-Achse (Z-Achse des Bildsystems)

$$\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-39)$$

Die Gesamt-Drehung wird durch die Multiplikation der Drehmatrizen in folgender Reihenfolge zusammengesetzt:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_1$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \kappa \cos Hz + \sin \kappa \cos V \sin Hz & -\sin \kappa \sin V & -\cos \kappa \sin Hz + \sin \kappa \cos V \cos Hz \\ \sin \kappa \cos Hz - \cos \kappa \cos V \sin Hz & \cos \kappa \sin V & -\sin \kappa \sin Hz - \cos \kappa \cos V \cos Hz \\ \sin V \sin Hz & \cos V & \sin V \cos Hz \end{bmatrix} \quad (4-40)$$

4.3.5.2 Abbildung

Die Abbildung der Raumpunkte erfolgt mit folgenden Abbildungsgleichungen:

$$x_i' = x_0 + c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X_i - X_0) + r_{21} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{31} \cdot (Z_i - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_i - X_0) + r_{23} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_i - Z_0)} \quad (4-41)$$

$$y_i' = y_0 + c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X_i - X_0) + r_{22} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{32} \cdot (Z_i - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_i - X_0) + r_{23} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_i - Z_0)} \quad (4-42)$$

Auf diese Weise kann für jede beliebige Fernrohrzielung sofort die Überlagerung des aktuellen Kamerabildes mit dem Datenbestand erfolgen. Die folgenden Abbildungen zeigen das Kamerabild der eingebauten Weitwinkelkamera mit abgebildeten Raumpunkten bei zwei verschiedenen Fernrohrstellungen.

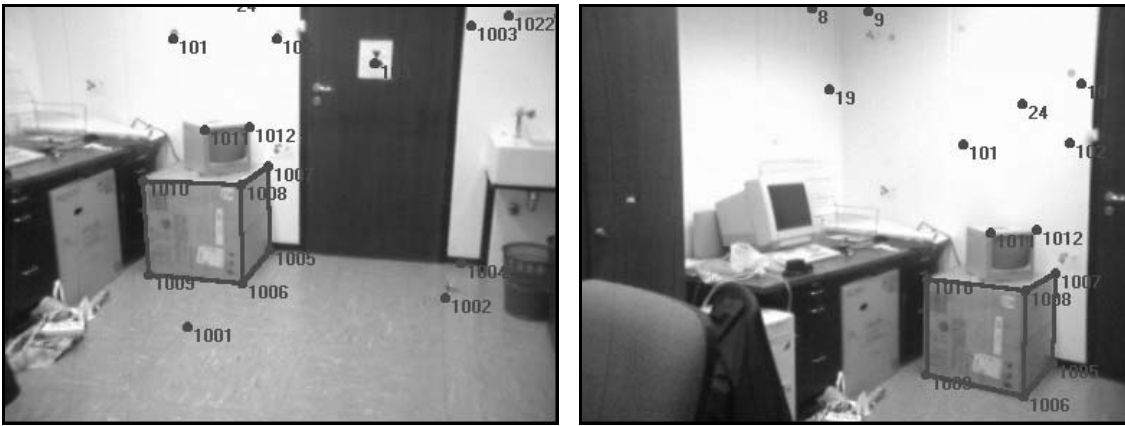


Abb. 4-80: Abgebildete Raumpunkte in verschiedenen Kamerapositionen

4.3.6 Belegung eines Objektes mit Bildinformation

Ziel der im Folgenden beschriebenen Bildbearbeitungsverfahren ist es, die Flächen eines CAD-Modells geometrisch korrekt und flächendeckend mit Farbinformation zu belegen. Photographien des Objektes stellen die Textur einer Fläche aufgrund der Zentralprojektion i.d.R. verzerrt dar. Eine Ausnahme bildet nur die streng parallele Aufnahme. Um ein geometrisch exaktes Ergebnis zu erhalten, ist die Zentralperspektive in eine orthogonale Abbildung zu überführen. Diese Umwandlung wird allgemein als Entzerrung bezeichnet [ROUS, 1999].

4.3.6.1 Bearbeitungsschritte

Für jede definierte, ebene Objektfläche soll ein Bild erstellt werden, das einer photographischen Aufnahme senkrecht zu dieser Fläche entspricht. Dazu sind die zu belegenden Objektflächen als ebene Flächen darzustellen („zu verebnen“). Danach ist die Größe und Auflösung des Bildes der verebneten Objektfläche (Ergebnisbild) zu definieren.

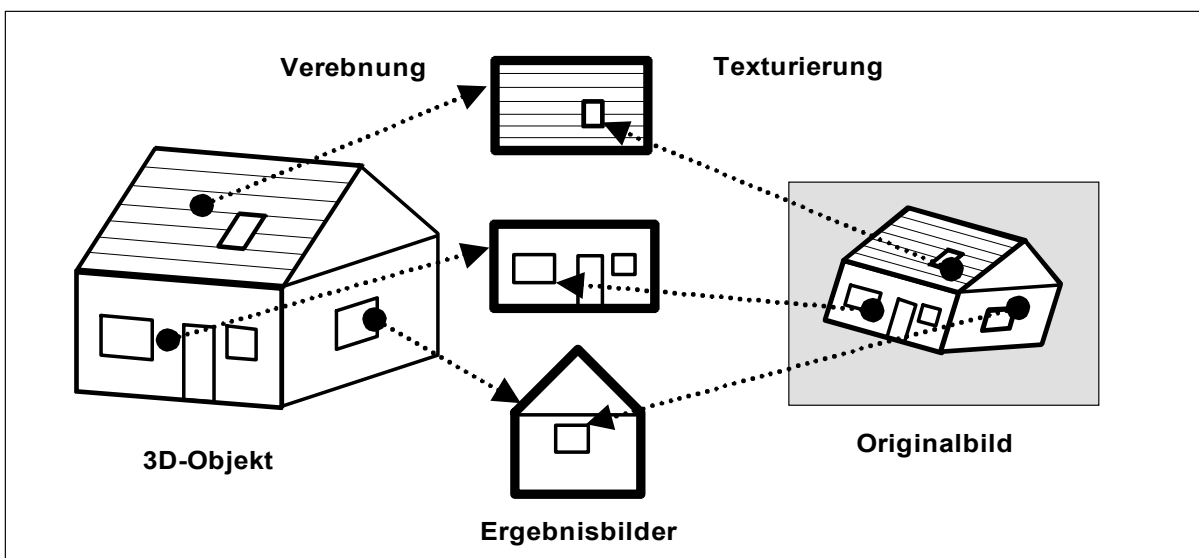


Abb. 4-81: Bildbelegung von ebenen Objektflächen

Die Größe des Ergebnisbildes (und damit der Bildmaßstab) ist abhängig von der weiteren geplanten Verwendung der Bilder: Für einfache Visualisierungen sind kleine Bilder von Vorteil, weil diese sich schneller verarbeiten lassen und wenig Speicherplatz beanspruchen. Große Bilder ermöglichen dagegen das bessere Erkennen von Details. Allgemein richtet sich die gewünschte Größe nach der gewünschten Auflösung. Dabei ist zu bedenken, dass es nicht sinnvoll ist,

die Fläche des Ergebnisbildes mit mehr Pixel zu belegen, als diese im Originalbild hat, weil damit die tatsächliche Detailauflösung nicht weiter gesteigert werden kann. Als Bildmaßstab eignet sich die Beziehung Pixel pro Meter des Objekts. So besagt z.B. der Bildmaßstab von 100 Pixel pro Meter, dass jeder einzelne Quadratzentimeter der verebneten Objektoberfläche einem Bildpunkt entspricht.

Nach der Festlegung des Bildmaßstabes und somit auch der Größe des Ergebnisbildes, wird die geometrische Beziehung zwischen dem Ergebnisbild und dem Originalbild hergestellt. Dies kann, wie beschrieben, mit Hilfe der ebenen Projektivtransformation oder der Kollinearitätsbedingungen geschehen.

4.3.6.2 Direkte und indirekte Transformationsmethoden

Um ein entzerrtes digitales Bild zu erzeugen, müsste jeder Bildpunkt des Originalbildes auf das Ergebnisbild projiziert werden (direkte Transformation). Dies kann jedoch, insbesondere wenn das zu erzeugende Bild größer ist als das Ausgangsbild, zu Lücken im zu erzeugenden Bild führen (Abb. 4-82).

Geschickter ist es, für jeden Punkt des Ergebnisbildes den dazugehörigen Farbwert im Originalbild zu suchen (indirekte Transformation). Damit ist sichergestellt, dass jeder Punkt des Ergebnisbildes mit Farbinformation belegt wird (Abb. 4-83). Zur Verbesserung der Bildqualität sollte zwischen den im Ausgangsbild gefundenen Farbwerten interpoliert werden.

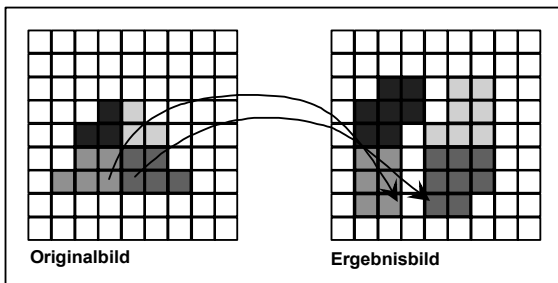


Abb. 4-82: Direkte Transformation

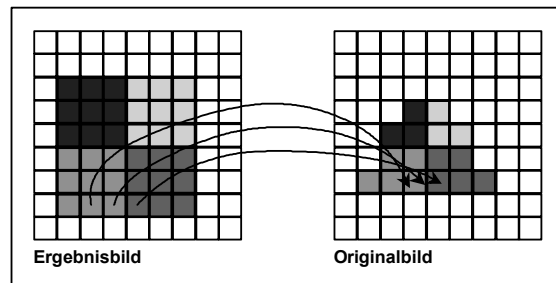


Abb. 4-83: Indirekte Transformation

4.3.6.3 Interpolation der Farbwerte

Beim oben beschriebenen Verfahren der Erzeugung eines Ergebnisbildes wird im Originalbild in der Regel keine ganzzahlige Pixelposition gefunden. Wählt man als Farbinformation die des nächsten Nachbarn (Interpolation 0. Ordnung), so ist dies mit wenig Rechenaufwand verbunden, lässt aber das Ergebnis „grobkörnig“ wirken. Insbesondere sind dabei Treppeneffekte bei schrägen Kanten zu beobachten. Die Bildqualität des Ergebnisbildes kann durch die Interpolation der Farbwerte des Ausgangsbildes deutlich gesteigert werden.

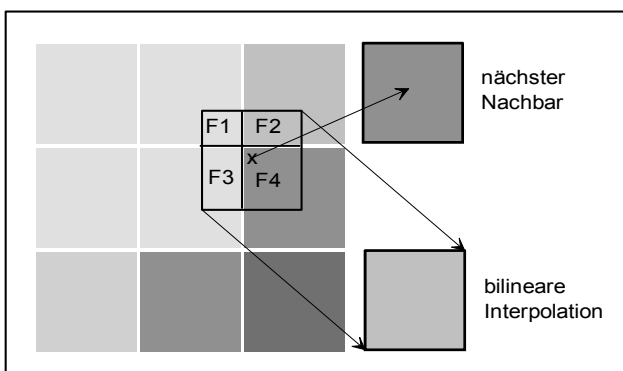


Abb. 4-84: Bilineare Interpolation

Die bilineare oder biquadratische Interpolation bezieht die 2x2 benachbarten Grauwerte einer berechneten Pixelposition in die Interpolation ein. Der interpolierte Grauwert entsteht aus dem gewichteten Mittel der benachbarten Grauwerte, wobei das Gewicht durch den jeweils überdeckten Flächenanteil bestimmt wird (siehe auch Abb. 4-56). Farbbilder

müssen vor der Interpolation in die drei Farbkanäle Rot, Blau und Grün getrennt werden. Die Interpolationsergebnisse werden dann wieder zu einem Farbwert zusammengesetzt.

4.3.7 Dreiecksbelegung mit Hilfe der parametrischen Entzerrung

Für die beabsichtigte Belegung eines geometrischen, in Dreiecke zerlegten Modells mit photorealistischer Textur ist es notwendig, die Farbinformation aus den Originalbildern geometrisch korrekt auf die verebneten Dreiecke abzubilden. Folgende Arbeitsschritte sind dazu durchzuführen, die in der dazugehörigen Skizze dargestellt sind:

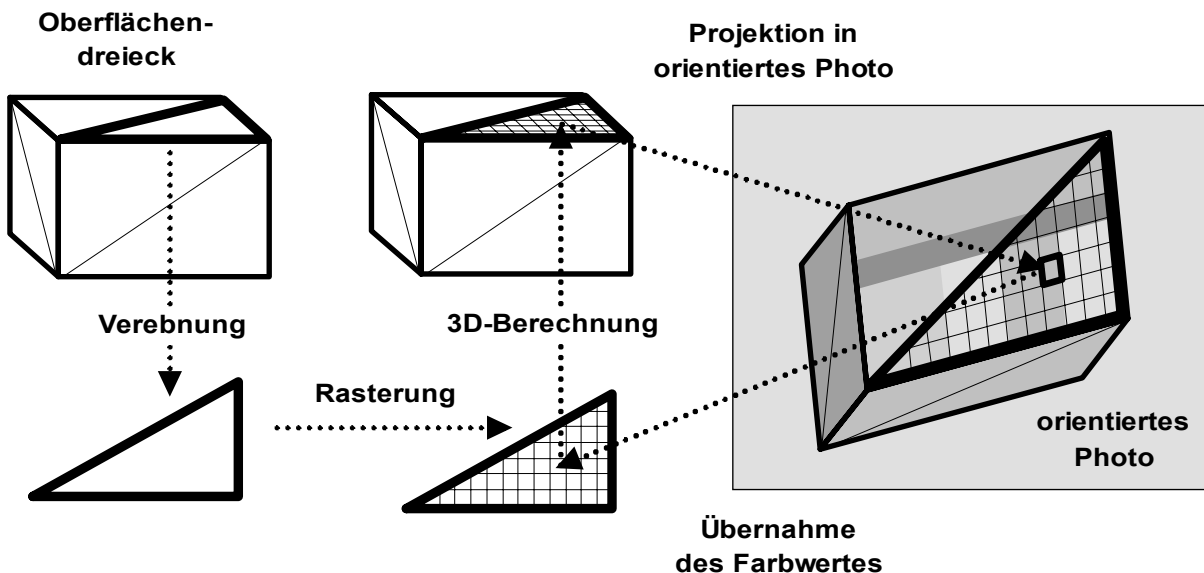


Abb. 4-85: Belegungsprozess

- Die Bilder sind nach den vorgestellten Orientierungsverfahren für externe oder interne Kameras zu orientieren.
- Jedes einzelne, räumliche Oberflächendreieck ist in die Ebene zu projizieren.
- Es wird ein Raster festgelegt, das bestimmt, mit wie vielen Pixel pro Meter das Dreieck belegt wird.
- Daraus ergeben sich der Bildmaßstab und die Größe des Ergebnisbildes, das es mit Farbinformation zu füllen gilt.
- Für jeden Rasterpunkt des verebneten Dreiecks werden dessen Raumkoordinaten berechnet.
- Jeder berechnete Raumpunkt wird mit Hilfe der Abbildungsgleichungen in das Originalbild projiziert. Der (evtl. interpolierte) Farbwert dieser Bildposition wird in das Ergebnisbild übernommen.

4.3.7.1 Verebnung der Raumdreiecke

Die Projektion eines Raumdreiecks in die Ebene kann, wie in Abb. 4-86 dargestellt, auf einfache Weise durch Berechnung der Höhe h und des Lotfußpunktes p des Punktes P_3 in Bezug auf die Strecke P_1 - P_2 mit Hilfe der drei Seitenlängen erfolgen.

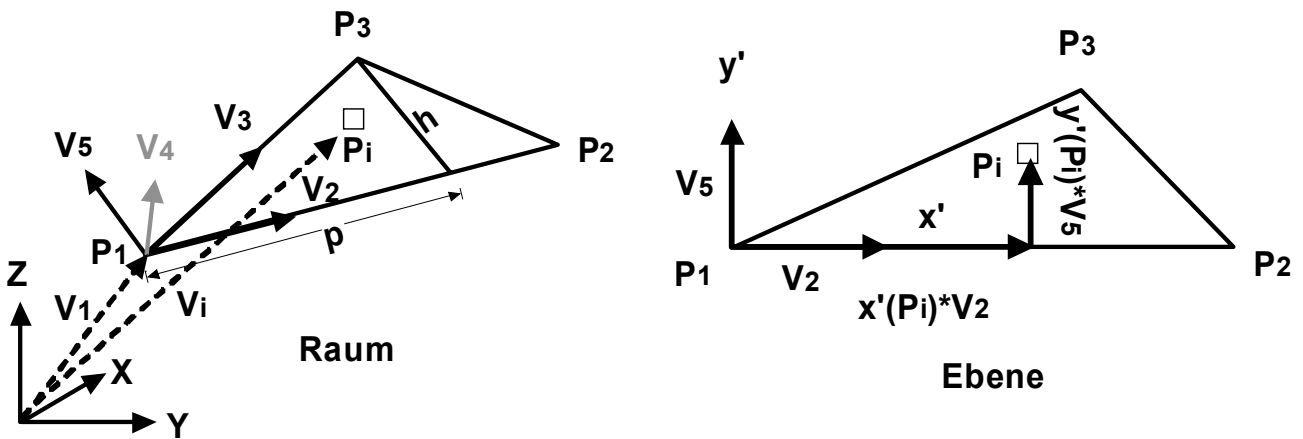


Abb. 4-86: Beziehung zwischen Raum- und Ebenendreieck

4.3.7.2 3D-Berechnung eines Rasterpunktes

Die Beziehung zwischen dem Raumdreieck und dem verebneten Dreieck (Abb. 4-86) kann über den Ortsvektor V_1 vom Koordinatenursprung zum Punkt P_1 und die Raumvektoren von P_1 zu den Punkten P_2 und P_3 , welche die Dreiecksebene aufspannen, hergestellt werden:

Bei V_2 und V_3 handelt es sich um Einheitsvektoren mit der Richtung von Punkt P_1 nach Punkt P_2 bzw. P_3 .

Senkrecht zu V_2 und V_3 wird der aus der Ebene herausragende Hilfsvektor V_4 berechnet. Wiederum senkrecht zu V_2 und V_4 der in der Dreiecksebene liegende Einheitsvektor V_5 . Die Vektoren V_2 und V_5 bilden somit die Achsen x' und y' des Koordinatensystems für das verebnete Dreieck.

Die Raum-Position eines im verebneten Dreieck definierten Punktes P_i (bzw. sein Ortsvektor V_i) kann somit wie folgt berechnet werden:

$$V_i = V_1 + x'(P_i) \cdot V_2 + y'(P_i) \cdot V_5 \quad (4-43)$$

4.3.7.3 Beispiel

Die folgenden Abbildungen zeigen ein orientiertes Bild mit abgebildeter Modellinformation sowie ein daraus abgeleitetes, verebnetes, mit Farbinformation belegtes Oberflächendreieck. Der Bildbelegungsprozess ist programmintern so organisiert, dass die längste Dreiecksseite immer unten liegt. Auf diese Weise wird verhindert, dass der berechnete Lotfußpunkt außerhalb der Dreiecksgrundseite liegt.

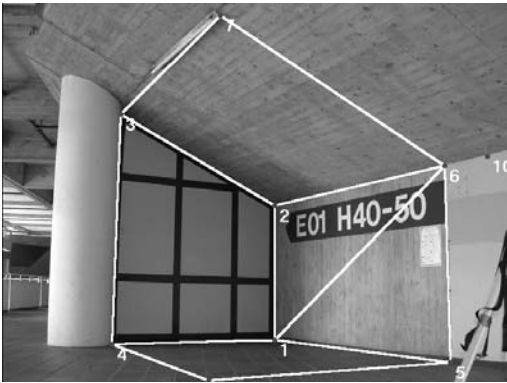


Abb. 4-87: Originalbild



Abb. 4-88: Texturiertes Dreieck

4.3.8 Direktmodellierung mit dem Video-Tachymeter

Wie in Abschnitt 4.3.5 gezeigt wurde, stehen die Orientierungsparameter der Einbaukameras jederzeit zur Verfügung. Somit kann jeder tachymetrisch bestimmte Punkt sofort in ein Video-Standbild eingeblendet werden. Eine (manuelle) Zuordnung von Bild- zu Raumkoordinate wird dadurch überflüssig. Der Anwender kann nun in einem Standbild allein durch tachymetrische Messung Dreiecke definieren, die nach der in Abschnitt 4.3.7 beschriebenen Methode mit Bildinformation belegt werden sollen.

Dreiecksketten

Sofern bereits Objektkoordinaten vorhanden sind, können diese im Bild durch einen Mausklick in der Nähe des Bildpunktes ausgewählt werden. Auf diese Weise muss z.B. bei einer Kette von Dreiecken nur jeweils derjenige Dreieckspunkt tachymetrisch gemessen werden, der die Spitze des neu hinzukommenden Dreiecks bildet.

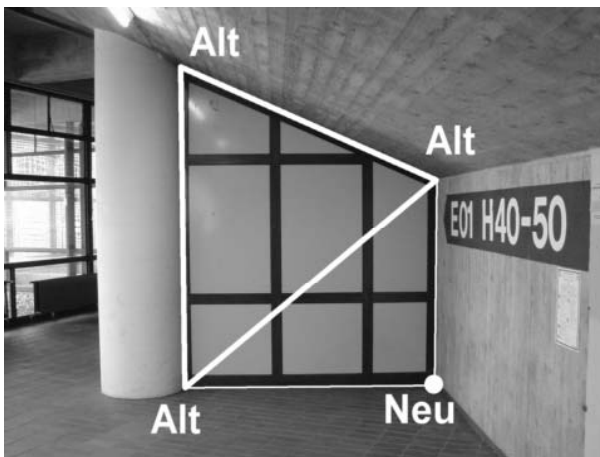


Abb. 4-89: Dreiecksketten

Beispiele

Die folgenden Dreiecksbilder sind durch die beschriebene Direktmodellierung erzeugt worden und können zu einem Modell zusammengesetzt werden.



Abb. 4-90: Dreiecksbilder der "Fachwerkwand"



Abb. 4-91: Dreiecksbilder der Seitenwand

4.3.9 VRML-Darstellung des Modells

Die Erstellung eines photorealistischen CAD-Modells eines Objektes ist vergleichbar mit dem Belegen eines Holzmodells des Objektes mit Bildern. In beiden Fällen ist es notwendig, über Photos zu verfügen, welche die Textur einer zu belegenden Fläche geometrisch korrekt wiedergeben.

In den vorangegangenen Abschnitten wurden zwei Möglichkeiten zur Erzeugung orthogonaler Ansichten einer texturierten Fläche vorgestellt: Die ebene Projektivtransformation (Vierpunkt-Entzerrung) und die geometrische Umbildung mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen in orientierten Bildern.

In diesem Abschnitt werden die logischen Schritte zur Erstellung eines photorealistischen CAD-Modells aufgeführt. Um die Modellierung unabhängig von einem bestimmten Anwenderprogramm in allgemeiner Form darzustellen, wird kurz die Skriptsprache VRML (Virtual Reality Modeling Language) vorgestellt. Es wird der (relativ übersichtliche) minimale Inhalt und Aufbau einer VRML-Datei zur Darstellung eines photorealistisch texturierten Modells aufgeführt und erläutert. Anhand eines Beispiels wird gezeigt, wie notwendig eine korrekte geometrische Umbildung der Bildbereiche ist und wie ein ebenes Polygon (Ergebnisbild einer Vierpunkt-Entzerrung) in einzelne Dreiecke zerlegt werden kann.

4.3.9.1 Skriptsprache VRML

Die Virtual Reality Modeling Language, kurz VRML, ist eine Skriptsprache zur Beschreibung von virtuellen 3D-Welten, die über das World Wide Web ausgetauscht werden können. Ähnlich wie HTML ist VRML keine Programmiersprache im herkömmlichen Sinn, sondern eine Beschreibungssprache, mit der man definiert, wie dreidimensionale Objekte auszusehen haben, wie sie in einer virtuellen Welt angeordnet sind und welche Wechselwirkung sie miteinander haben. Der Programmcode einer VRML-Datei wird Quelltext genannt. Der Quelltext wird stets in einem Standardtextformat, dem ASCII-Format abgespeichert und kann so plattformunabhängig interpretiert werden. [DÄBLER, 1999]

Für die Darstellung von VRML-Welten benötigt man neben einem Webbrowser ein VRML-Plug-In wie z.B. den „Cosmo Player“ der Firma SGI. Da auch viele andere Graphik-Programme VRML-Dateien im- und exportieren können, stellt dieses Datenformat eine sehr interessante Abbildungsmöglichkeit für graphisch-räumliche Informationen dar.

Beispiel

Die folgende Abbildung zeigt die Modellierung eines Innenraumes mit VRML und die Betrachtung des Modells unter einer frei gewählten Perspektive mit dem „Cosmo Player“.

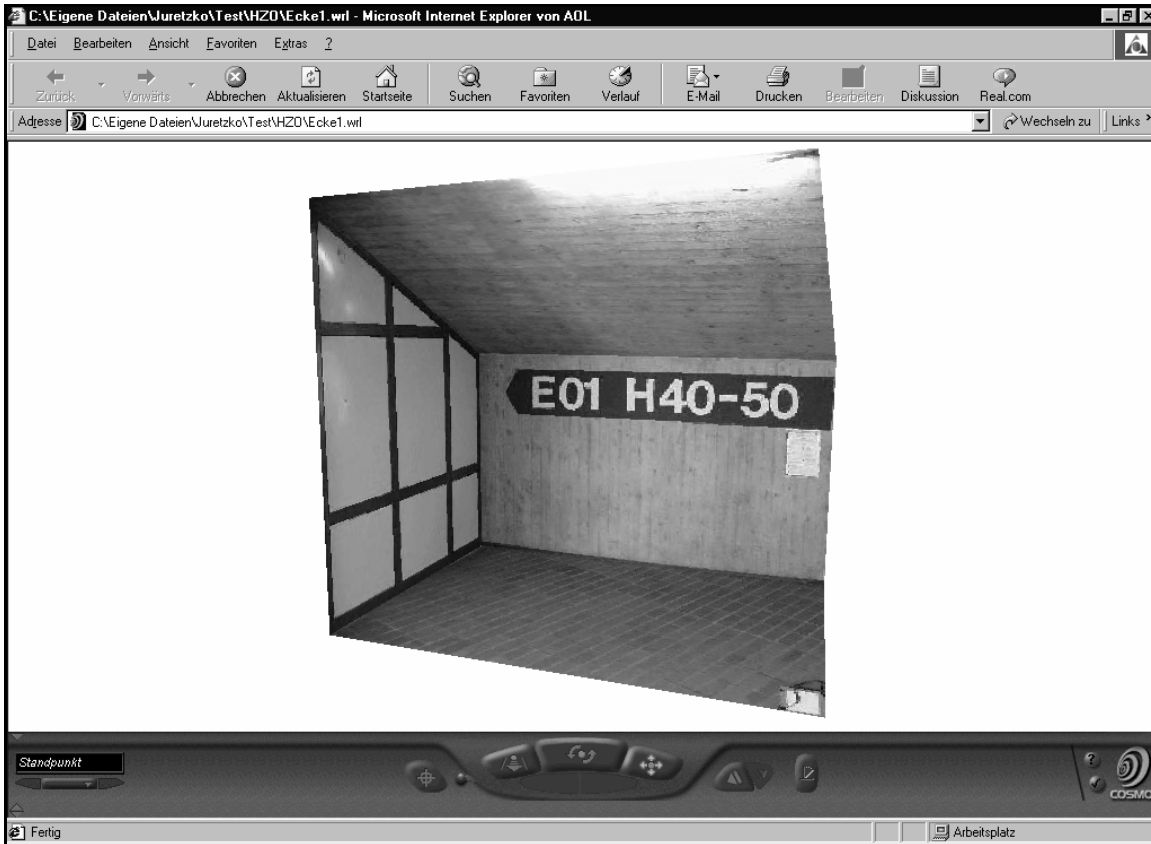


Abb. 4-92: Virtuelle Szene

Der Quelltext zur Beschreibung dieser Szene gliedert sich in einzelne „Knoten“ und ist hier auszugsweise aufgelistet. Die Kommentare sind durch eckige Klammern gekennzeichnet.

```
#VRML V2.0 utf8          [VRML-Kopf]
Background { skyColor 1.0 1.0 1.0 } [Hintergrund]
Viewpoint { [Blickpunkt]
  position 1.700 -1.216 8.253
  description "Grundriss"

##### Dreiecke #####

Shape {
  appearance Appearance {
    texture ImageTexture { url "HZO-4-3-2-1.jpg" } [Foto zur Texturbelegung]
  }
  geometry IndexedFaceSet { [Raum-Koordinaten des
    coord Coordinate { [Bildkoordinaten]
      point [
        0.004 -2.429 -1.640, # 0
        0.000 0.000 -1.653, # 1
        -0.006 0.001 0.339, # 2
      ]
    }
    texCoord TextureCoordinate { [Bildkoordinaten]
      point [
        0.11764 0.08963, # 0
        0.86996 0.08683, # 0
        0.86996 0.64425, # 0
      ]
    }
  }
  solid TRUE
```

```

coordIndex [      [Reihenfolge der
  0, 1, 2, 0, -1,   Eckpunkte]
]
texCoordIndex [
  0, 1, 2, 0, -1,
]
}
}

```

Auf diese Weise werden alle Dreiecke des Modells in eine ASCII-Datei geschrieben. Die zugehörigen Bilder werden separat gespeichert.

4.3.9.2 Polygone

Prinzipiell ist VRML bei der Verknüpfung von Raum- und Bildbereichen nicht auf Dreiecke beschränkt, sondern kann auch Polygone verarbeiten. Die notwendige Zerlegung der Polygone in Dreiecke führt das Darstellungsprogramm dann selbständig aber für den Anwender nicht immer nachvollziehbar durch. Insbesondere hat sich gezeigt, dass konkave Formen oftmals falsch belegt werden. Daher ist es ratsam, alle Formen in Dreiecke zu zerlegen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Eckpunkte immer gegen den Uhrzeigersinn eingegeben werden, da die Textur sonst auf der Rückseite des Raumdreiecks abgebildet wird.

Polygon-Zerlegung

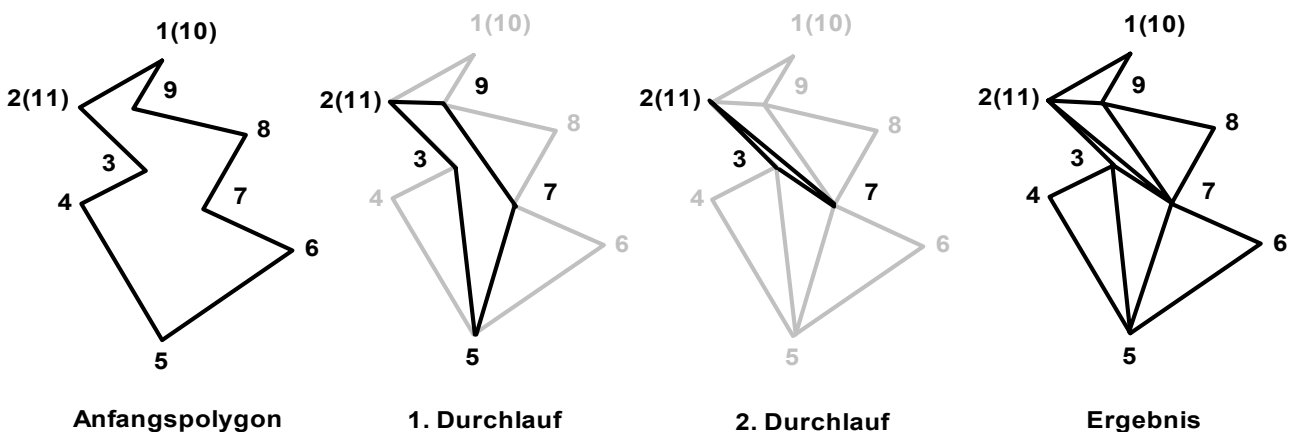


Abb. 4-93: Ablauf einer Polygonzerlegung

Die Zerlegung eines Polygons in einzelne Dreiecke kann nach folgendem Schema ablaufen:

- Die Eckpunkte werden gegen den Uhrzeigersinn in einer Tabelle abgespeichert. Die Tabelle ist dabei über den letzten Punkt hinaus wieder mit den Anfangspunkten zu ergänzen.
- Beginnend mit dem ersten Punkt werden nun folgende Tests durchgeführt:
 - Bildet dieser Punkt mit den zwei nachfolgenden Punkten der Tabelle ein gegen den Uhrzeigersinn orientiertes Dreieck?
 - Befindet sich kein anderer Punkt des Polygons innerhalb des Dreiecks?
 - Werden beide Tests bestanden, so wird der mittlere Punkt des Dreiecks aus der Tabelle gestrichen.
 - Im Beispiel bildet das Dreieck 1-2-3 zwar ein gegen den Uhrzeigersinn orientiertes Dreieck, der Punkt 9 liegt jedoch innerhalb dieses Dreiecks. Das Dreieck 2-3-4 ist im Uhrzeigersinn orientiert. Somit ist der Punkt 4 des Dreiecks 3-4-5 der erste Punkt der aus der Tabelle gestrichen wird.
- Wird kein Punkt des Dreiecks gestrichen, wird die Untersuchung beginnend mit dem 2. Punkt des Dreiecks fortgesetzt. Kommt es dagegen zu einer Streichung wird die Untersuchung mit dem 3. Punkt als Anfangspunkt eines weiteren Dreiecks fortgesetzt.

- Ist der letzte Punkt der Tabelle erreicht (im Beispiel Punkt 9), werden die Anfangspunkte der Liste als nachfolgende Punkte betrachtet (Punkt 1 und 2). Damit ist ein Durchlauf abgeschlossen.
- Es folgen weitere Durchläufe, bis nur noch ein einziges Dreieck übrig bleibt.

4.3.9.3 Perspektivische Korrektur:

Bei der Belegung eines Modells mit photorealistischer Textur steht man im allgemeinen vor dem Problem, dass das Ausgangsbild perspektivische Verzerrungen aufweist (Abb. 4-94).



Abb. 4-94: Starke perspektivische Verzerrung

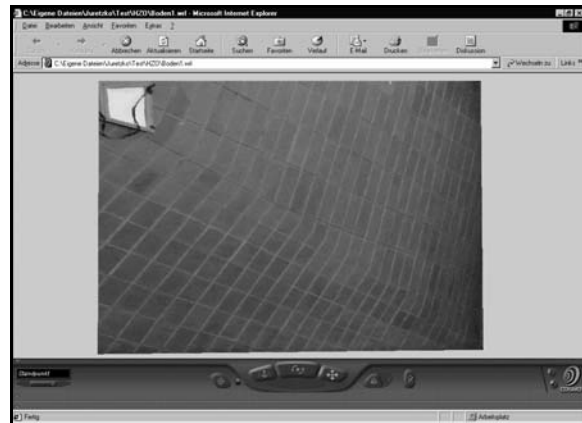


Abb. 4-95: Fehlerhafte Darstellung im VRML-Browser

Da im VRML-Modell keine Informationen zur Aufnahmesituation (innere und äußere Orientierung der Kamera) vorgesehen sind, bleiben diese Verzerrungen bei der Darstellung im VRML-Browser erhalten (Abb. 4-95). Daher ist es notwendig, die perspektivische Verzerrung mit den bereits vorgestellten Methoden der geometrischen Umbildung vorab zu korrigieren. Dies kann entweder für jedes einzelne Texturdreieck oder wie im vorliegenden Fall für eine gesamte Ebene geschehen.

Die folgende Abbildung zeigt den mit Hilfe der Vierpunkt-Entzerrung umgebildeten Fußboden aus dem Originalbild in Abb. 4-94, der zur Modellierung der Szene in Abb. 4-92 benutzt wurde.

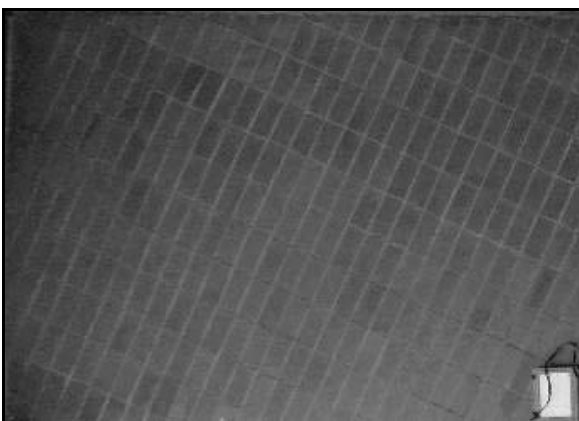


Abb. 4-96: Vierpunkt-Entzerrung

4.3.10 Zusammenfassende Wertung zur „Integration von Bilddaten“

Die vorgestellten Techniken zur punktweisen Belegung eines CAD-Modells mit Farbinformation sind in dieser oder ähnlicher Form bereits Bestandteil zahlreicher Photogrammetrie-Programme wie z.B. „PhotoModeler“. Diese

Programme haben in der Regel folgenden Ansatz: Photos werden mit Hilfe von Passpunkten und unter Verwendung der Bündelblockausgleichung orientiert. Mit Hilfe des Vorwärtsschnittes entsteht punktweise ein Modell, auf dessen Oberfläche die Bildinformation projiziert wird. Somit besteht eine klare Trennung der Arbeitsschritte „Aufnahme“ und „Auswertung“.

In dieser Arbeit ist mit der Direktmodellierung (4.3.8) ein Verfahren entwickelt worden, das es erlaubt, die Erfassung der Geometrie und der Textur eines Objektes in **einem einzigen** Arbeitsgang vor Ort vorzunehmen. Entscheidend ist dabei die Tatsache, dass das mit Kameras bestückte Tachymeter Bilder liefert, deren innere und äußere Orientierung jederzeit bekannt ist. Sobald Objektkoordinaten durch das reflektorlos messende Tachymeter bestimmt werden, wird die Position dieser Punkte direkt ins Kamerabild eingeblendet. Auf diese Weise erübrigt sich eine (manuelle) Zuordnung von Objekt- und Bildkoordinate durch den Benutzer. Gleiches gilt, wenn für das Bild einer externen Kamera vorab die Orientierungsparameter ermittelt worden sind.

Des Weiteren wurde gezeigt, wie das motorisierte Tachymeter mit Hilfe orientierter externer Bilder gesteuert werden kann.

Damit wird deutlich, wie eng sich die beiden oft konkurrierend dargestellten Techniken Photogrammetrie und Tachymetrie verknüpfen lassen und welches Entwicklungspotential die Kombination dieser beiden Techniken beinhaltet.

4.4 Zusammenfassung des Kapitels

Im abgeschlossenen Kapitel wurde die Integration von „intelligenter“ Tachymetrie mit photogrammetrischen Elementen erforscht. Nach der Vorstellung bestehender Vermessungssysteme, bei denen Theodolite bzw. Tachymeter mit Kameras kombiniert worden sind (ohne dass dabei die reflektorlose Distanzmessung eingesetzt wird), wurde gezeigt, wie das in dieser Arbeit konzipierte modulare Vermessungssystem durch den Einbau dreier Kameras hardwaremäßig realisiert wurde. Dabei wurde insbesondere die Ableitung von geodätischen Richtungswerten aus Bildkoordinaten herausgearbeitet. Mit Hilfe dieser Beziehungen ist es möglich, Anzielungen des Tachymeters „per Mausklick“ von einem angeschlossenen PC aus vorzunehmen.

Nach der kurzen Vorstellung einiger photogrammetrischer Grundbegriffe und –techniken wurde gezeigt, wie auch Bilder externer Kameras zur Steuerung des Tachymeters genutzt werden können und wie die Bilder der internen Kameras mit Punkten und Linien des Datenbestandes überlagert werden. Im Weiteren wurde die Belegung eines Objektes mit Bildinformation beschrieben. Aus der engen hergestellten Verbindung zwischen Tachymetrie und Photogrammetrie ist ein neuartiges Verfahren hervorgegangen, bei dem ein entstehendes 3D-Modell in einem einzigen Arbeitsschritt während der tachymetrischen Aufnahme direkt mit photorealistischer Textur versehen werden kann.

5 Verifizierung der Praxistauglichkeit des realisierten Systems

Anhand von drei Beispielen aus verschiedenen Anwendungsbereichen wird die Praxistauglichkeit des in dieser Arbeit konzipierten und realisierten Vermessungssystems verifiziert: Das erste Beispiel zeigt die Anlage und Dokumentation eines auf die reflektorlose Messung abgestimmten Festpunktnetzes unter weitgehendem Verzicht auf künstliche Vermarkungen. Im zweiten Beispiel wurde aufbauend auf diesem Festpunktnetz die Kuppel des Pantheons in Rom untersucht und bildlich dokumentiert. Das dritte Beispiel ist im Bereich der Altbausanierung angesiedelt und widmet sich den Vermessungsarbeiten im Zuge der Verkleidung eines Gebäudes mit industriell vorgefertigten, großen Fassadenelementen.

5.1 Festpunktnetz

Der folgende Abschnitt beschreibt die Konzeption, Messung, Dokumentation und Berechnung eines Festpunktnetzes für die Detailaufnahme eines Bauwerkes mit Hilfe der reflektorlosen Video-Tachymetrie.

Die Detailaufnahme komplexer Bauwerke erfordert auch mit dem sehr flexiblen Verfahren der (reflektorlosen) Tachymetrie eine Vielzahl von Instrumentenstandpunkten. Der optimale Instrumentenstandpunkt für die jeweilige kleinräumige Detailaufnahme kann in den seltensten Fällen schon im Vorfeld der Vermessung abgeschätzt und vermarktet werden. Das in der Kataster- und Ingenieurvermessung seit Jahren erfolgreich praktizierte Verfahren der „freien Stationierung“, bei dem die Position und Orientierung des Tachymeters aus Richtungs- und Streckenmessungen zu bekannten Punkten berechnet wird, erlaubt dagegen eine sehr flexible Wahl des Instrumentenstandpunktes für die Detailaufnahme. Grundvoraussetzung für die „freie Stationierung“ ist, dass mindestens zwei Festpunkte vom jeweiligen Instrumentenstandpunkt aus angemessen werden können (wobei dann schon eine redundante Beobachtung vorliegt).

Die bislang übliche Vermarkung von Festpunkten in Form von Bodenpunkten erfordert beim Vorgang der Orientierung des Vermessungsinstrumentes den Aufbau von Stativen über dem Zielpunkt bzw. das Aufsuchen dieses Zielpunktes mit einem Stabstativ. Seltener ist die Vermarkung von Festpunkten als Wandpunkt. Meist besteht die Vermarkung in diesem Fall aus einem Mauerbolzen mit der Möglichkeit der Aufnahme eines speziellen Prismenhalters. Im Folgenden wird gezeigt, wie ein Festpunktnetz ohne die Verwendung von Retroreflektoren unter konsequenter Nutzung der neuen Möglichkeiten aufgebaut werden kann.

5.1.1 Beispielnetz Pantheon

Für Arbeiten im Bereich der Bauforschung am Pantheon in Rom sollte ein Festpunktnetz geschaffen werden, das die im Weiteren beschriebenen Forderungen erfüllt. Insbesondere wurde Wert darauf gelegt, dass der optische Gesamteindruck des Gebäudes nicht durch auffällige Zielmarken gestört wird und keine Eingriffe in die Bausubstanz vorgenommen werden.

Die folgenden Netzbilder wurden mit einem Rasterbild des Pantheon-Grundrisses hinterlegt. Dieses graphische Hilfsmittel soll lediglich die Problematik des Netzaufbaus verdeutlichen, es ist nicht das Ergebnis einer im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Bauaufnahme. Dies erklärt einige geometrische Unstimmigkeiten zwischen Vermessungsnetz und Bauwerk (z.B. Sichten durch Säulen).

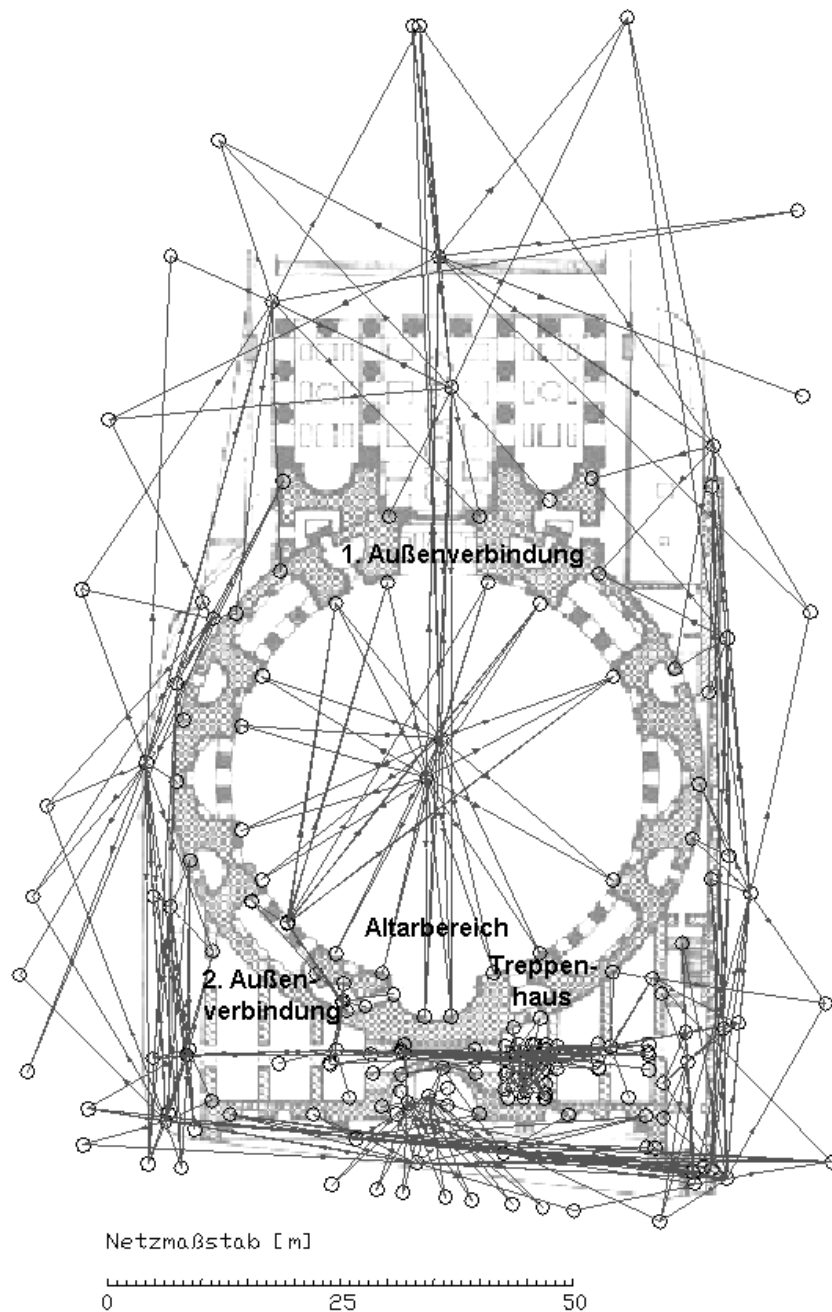


Abb. 5-1: Netzgestalt

5.1.2 Punktauswahl

Bei der Auswahl der Festpunkte waren folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- Um Fehlmessungen zu vermeiden, mussten die Festpunkte so ausgewählt sein, dass der Laserstrahl möglichst senkrecht auf die (ebene) Oberfläche der Markierung traf. Dies galt sowohl für die Messung des Festpunktnetzes als auch für die spätere „freie Stationierung“ innerhalb des Netzes.
- Von jedem zukünftig notwendigen Gerätestandpunkt für die Detailaufnahme aus sollten mindestens zwei, besser drei Festpunkte sichtbar sein.

- Jeder Festpunkt sollte während der Aufmessung des Netzes von mindestens zwei Gerätestandpunkten aus anzielbar sein.
- Die Festpunkte sollten so liegen, dass zum einen der Publikumsverkehr im Gebäude sich nicht störend auf die Messung auswirkte, und dass zum anderen das Publikum nicht wesentlich durch die Vermessungsarbeiten gestört wurde.
- Als Festpunkte waren nach Möglichkeit solche Punkte zu wählen, die - wie im folgenden Abschnitt beschrieben - keine auffällige Vermarkung benötigten.

Die Auswahl, Vermarkung und Dokumentation der Festpunkte wurde im beschriebenen Beispiel zeitgleich mit der Messung durchgeführt.

5.1.3 Vermarkungen

Zu den wesentlichen Anforderungen an die Vermarkung von Festpunkten zählen deren Stabilität und Identifizierbarkeit. Die Festpunkte sollten in solchen Teilen des Bauwerks vermarktet werden, bei denen eine Eigenbewegung auszuschließen ist. Hinsichtlich der Ausformung der Vermarkungen gerät man insbesondere bei historisch wertvollen Bauwerken in einen Zielkonflikt: Aus Gründen der Stabilität, der Auffindbarkeit und dem Schutz vor Verwechslungen sollten die Vermarkungen möglichst auffällig und massiv sein, aus Rücksicht auf den optischen Gesamteindruck und die Unversehrtheit des Bauwerks dagegen möglichst dezent.

Die Option der reflektorlosen Distanzmessung erlaubt eine Vielzahl verschiedener Vermarkungen. Durch den Verzicht auf die Verwendung von Retroreflektoren ist es zum einen unnötig, spezielle Aufnahmeeinrichtungen für diese Reflektoren anzubringen, zum anderen dürfen sich die gewählten Festpunkte an unzugänglichen Stellen des Gebäudes oder seiner Umgebung befinden. Im Folgenden wird zwischen drei verschiedenen Vermarkungsarten unterschieden: Synthetische Ziele (Zielmarken), Ziele, die durch Markierung hervorgehoben sind (Farbpunkte) und „natürliche Ziele“, deren Gestalt dazu geeignet ist, einen Raumpunkt hinreichend genau und dauerhaft zu definieren.

5.1.3.1 Synthetische Ziele

Zielmarken zeichnen sich dadurch aus, dass sie einen Raumpunkt sehr scharf definieren und sich durch ihre Gestaltung klar von ihrer Umgebung abheben. Sie können zudem noch dahingehend optimiert sein, unter bestimmten Lichtverhältnissen und in bestimmten Entfernungsbereichen besonders gut angezielt zu werden. Gerade bei der reflektorlosen Distanzmessung ist auf eine gewisse Minimalgröße zu achten. Der Laserfleck des Entfernungsmessers muss auch bei schrägen Visuren vollständig auf der Zielmarke liegen, so dass Fehlmessungen vermieden werden.

Beim Festpunktnetz des Pantheons kamen schachbrettartige, rot-weiße, kunststoffbezogene Alu-Quadrate mit einer Seitenlänge von 4 cm zum Einsatz, die mit einem Spezialkleber auf dem Mauerwerk befestigt wurden. Zur eindeutigen Identifizierung waren sie mit einer laufenden Nummer gekennzeichnet. Sie wurden im Außenbereich des Gebäudes angebracht. An diesen Positionen war es aufgrund der Oberflächenstruktur des Mauerwerks nicht möglich, anderweitig klar definierte Punkte zu finden. Die Farbkombination rot-weiß wurde gewählt, weil befürchtet wurde, dass die schwarzen Flächen bei schwarz-weißen Zielmarken in Extremsituationen unnötig viel Energie des Laserstrahls absorbieren könnten.



Abb. 5-2: Synthetischer Punkt

5.1.3.2 Markierungen

Als Zwischenstufe zwischen synthetischen und „natürlichen“ Zielen wurden Oberflächen mit einem Lackstift markiert. Der Fleckdurchmesser der Markierung betrug ca. 3 mm. Die Markierungen wurden an solchen Stellen vorgenommen, die im Umkreis von mindestens 3 cm eine ebene Oberfläche hatten. Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass auch bei einem schräg auftreffenden Laserstrahl Fehlmessungen vermieden werden. Zur eindeutigen Identifizierung wurde die Punktnummer auf einem Klebestreifen neben der Markierung notiert. Diese dauerhaften Markierungen wurden an Stellen im Innenbereich des Bauwerks angebracht, die kunsthistorisch von untergeordneter Bedeutung und zudem nicht dem allgemeinen Publikum zugänglich sind.

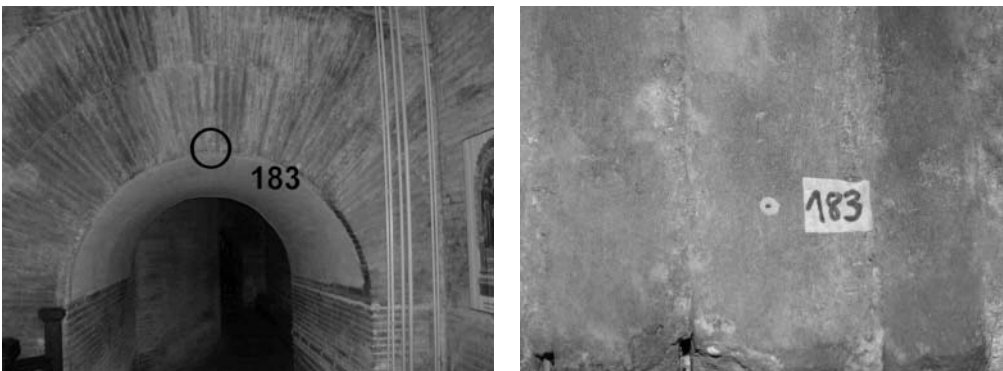


Abb. 5-3: Markierung

5.1.3.3 „Natürliche“ Ziele

Bei „natürlichen“ Zielen handelt es sich um Punkte, die aufgrund ihrer Ausgestaltung einen Raumpunkt hinreichend genau definieren, sich klar von ihrer Umgebung abheben und sicher gegen Verwechslungen sind. Zudem muss die Oberfläche in ihrer nächsten Umgebung wegen der Ausdehnung des Laserflecks des Distanzmessers hinreichend glatt sein. Es sollten nur solche Ziele ausgewählt werden, bei denen zu erwarten ist, dass sie über lange Jahre hinweg nicht verändert werden. So sind zum Beispiel in die Fassade eines frisch renovierten Hauses eingelassene Steinplatten besser geeignet als Schilder oder Verzierungen an einem renovierungsbedürftigen Gebäude.

Für diese Art von Zielen gab es zahlreiche Anwendungsgebiete: Im Innenraum des Pantheons, der dem Publikum zugänglich ist, sollte auf Markierungen jeglicher Art verzichtet werden, um den optischen Gesamteindruck und die Bausubstanz nicht zu beschädigen. Im Außenbereich konnte man durch den Verzicht auf Markierungen an Privathäusern langwierige Diskussionen um deren Anbringung umgehen.

Im Innenbereich wurden markante Stellen der Marmorverkleidung gewählt, im Außenbereich Ecken von Buchstaben oder Ziffern der marmornen, in die Fassade der Häuser eingelassenen Straßenschilder und Hausnummern.

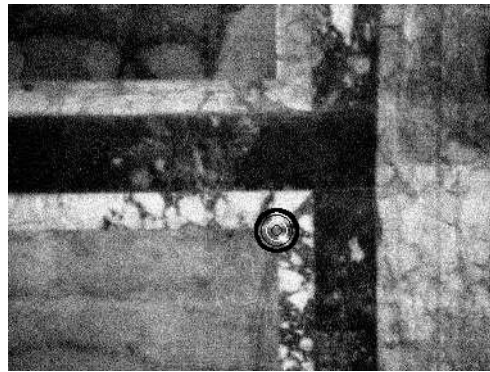
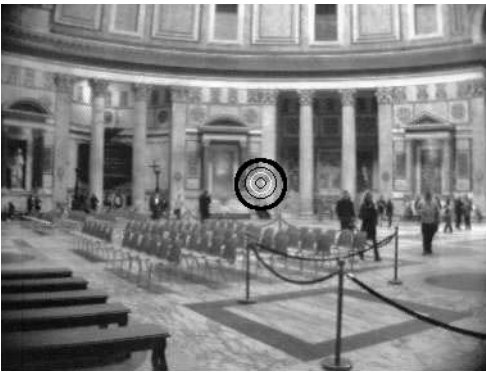


Abb. 5-4: "Natürlicher" Punkt (Innenbereich)



Abb. 5-5: "Natürlicher" Punkt (Außenbereich)

5.1.4 Durchführung der Messung

Bei der Durchführung der Messungen zur Netzbestimmung waren folgende extreme Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Wegen logistischer Probleme (kurzfristiger Einsatz, Mitführen der Gerätschaft als „Handgepäck“ im Flugzeug) konnten nur ein Tachymeter, ein Reflektor mit Zwangszentrierungseinrichtung sowie zwei Geräte-Stativ eingesetzt werden.
- Die Messung wurde von nur zwei Personen durchgeführt.
- Die Abgrenzung gegenüber dem Publikum und dem Straßenverkehr war auf ein Minimum beschränkt.
- Zur örtlichen Arbeit standen nur zwei Arbeitstage zur Verfügung.
- Aufgrund der geschlossenen Bauweise bestanden nur zwei Möglichkeiten, den Innenraum des Gebäudes mit dem Außenbereich zu verbinden.

Diese (aus messtechnischer Sicht sehr einschränkenden) Randbedingungen sind jedoch durchaus typisch für den vermessungstechnischen Einsatz im Bereich der Bauforschung und der Archäologie, insbesondere bei Auslandsprojekten.

Die Messungen zu den Festpunkten und zwischen den Gerätestandpunkten wurden grundsätzlich nur in einer Fernrohrlage durchgeführt. Dazu war es notwendig, mögliche Gerätefehler mit Hilfe der geräteinternen Kalibrierroutinen zu bestimmen und intern zu berücksichtigen. Insbesondere war es erforderlich, den sichtbaren Laserstrahl des Distanzmessers kollinear zentrisch zur optischen Achse des Fernrohrs zu justieren.

Während der Messung wurde versucht, die Gerätestandpunkte weitgehend in Form von zwangszentrierten Polygonzügen miteinander zu verbinden (ohne jedoch den jeweiligen Standpunkt zu vermarken). Auf jedem neuen Gerätestandpunkt wurde eine Orientierung des Gerätes durchgeführt (ggf. mit Hilfe der „freien Stationierung“). Auf diese Weise

lagen schon vor der Netzauswertung sehr gute Näherungskordinaten für jeden aufgemessenen Punkt vor. Dies erlaubte (insbesondere bei der Verwendung motorisierter Tachymeter) ein sehr schnelles und sicheres teilautomatisches Anzielen der Punkte von anderen Standpunkten aus.

5.1.5 Dokumentation der Messwerte und Zielpunkte

Bei der Messung des Festpunktnetzes wurde auf den möglichen Anschluss eines Notebooks und die damit verbundene Online-Darstellung der Messwerte verzichtet und nur mit den internen Programmen des Tachymeters gearbeitet. Auf diese Weise konnten die Gerätestandpunkte sehr schnell gewechselt werden und die Geräte auch an sehr problematischen Stellen (Treppenhaus, Stützmauer an enger, befahrener Straße) aufgebaut werden.

Der Hauptnachteil des Verzichtes auf den Anschluss eines Notebooks war die fehlende Möglichkeit, die Zielpunkte direkt mit den im Tachymeter eingebauten Kameras zu dokumentieren. Die Dokumentation erfolgte stattdessen mit einer externen Digitalkamera und Eintrag der Bildnummern und Punktnummern in eine Skizze.

5.1.6 Auswertung der Messung

Die Lage-Ausgleichung des Netzes wurde mit dem Programm „Netz2D“ des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe berechnet. Es wurden folgende a priori Genauigkeiten eingeführt:

- Richtungsgenauigkeit: 2 mgon
- Entfernungsunabhängiger Anteil der Zieleinstellgenauigkeit: 0,7 mm
- Konstanter Anteil der Streckenmessgenauigkeit: 1,3 mm
- Streckenabhängiger Anteil: 1 ppm

Die Ausgleichung der Höhe erfolgte mit einem Programm der Arbeitsgruppe Geodäsie der Ruhr-Universität Bochum. Die folgenden Abbildungen beschränken sich auf die Darstellung der Lage-Ausgleichung.

Es wurden zwei verschiedene Versionen des Netzes ausgewertet: Die erste Version enthielt alle (von wenigen Fehlern bereinigten) Messwerte, in der zweiten Version wurden die Messungen zwischen den Gerätestandpunkten nicht mit einbezogen. Damit sollte untersucht werden, ob diese Messungen zur Berechnung des Netzes notwendig sind und wie groß ihr Einfluss auf die Genauigkeit der Netzpunkte ist.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Fehlerellipsen der Netzpunkte der beiden Versionen.

Netzmessung mit Verbindungen zwischen den Gerätestandpunkten

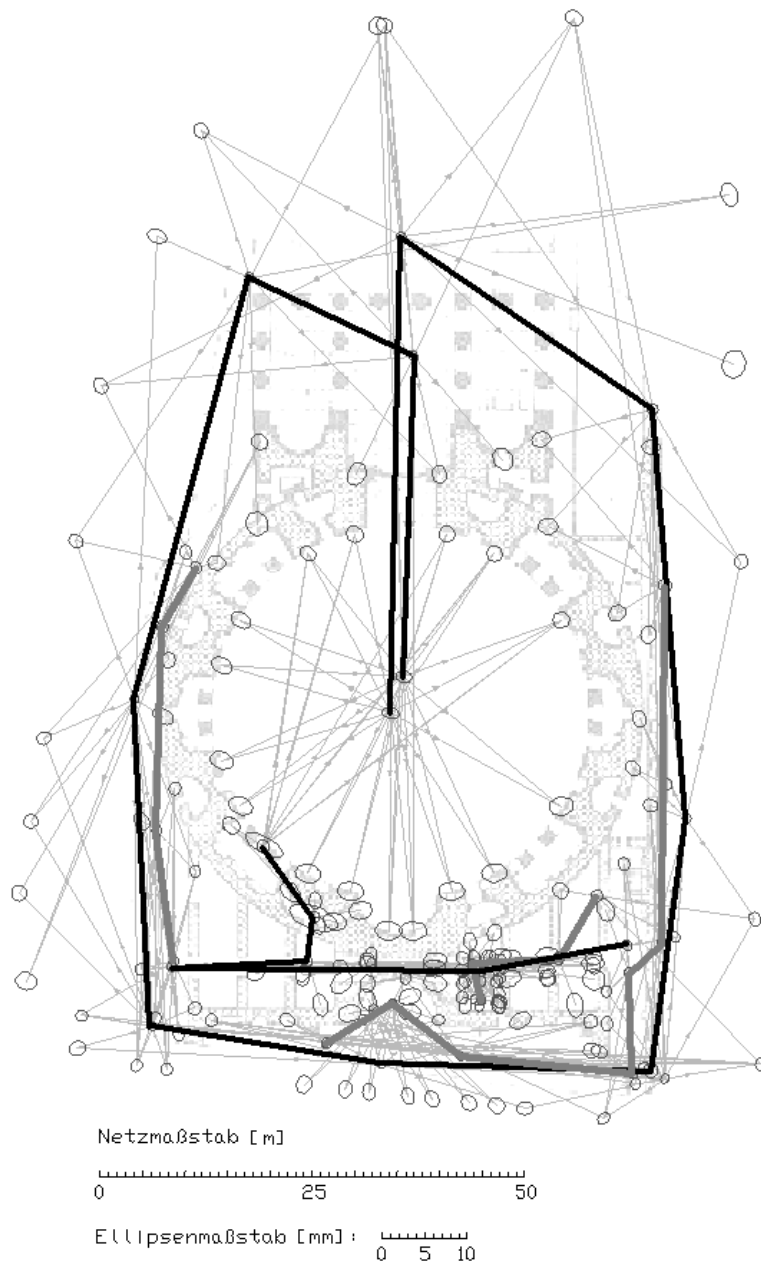


Abb. 5-6: Version 1: Mit Verbindungen zwischen den Standpunkten

Die einzelnen, zum Teil in verschiedenen Ebenen verlaufenden, Polygonzüge sind zur Unterscheidung in unterschiedlichen Grautönen dargestellt.

Netzmessung ohne Verbindungen zwischen den Gerätestandpunkten

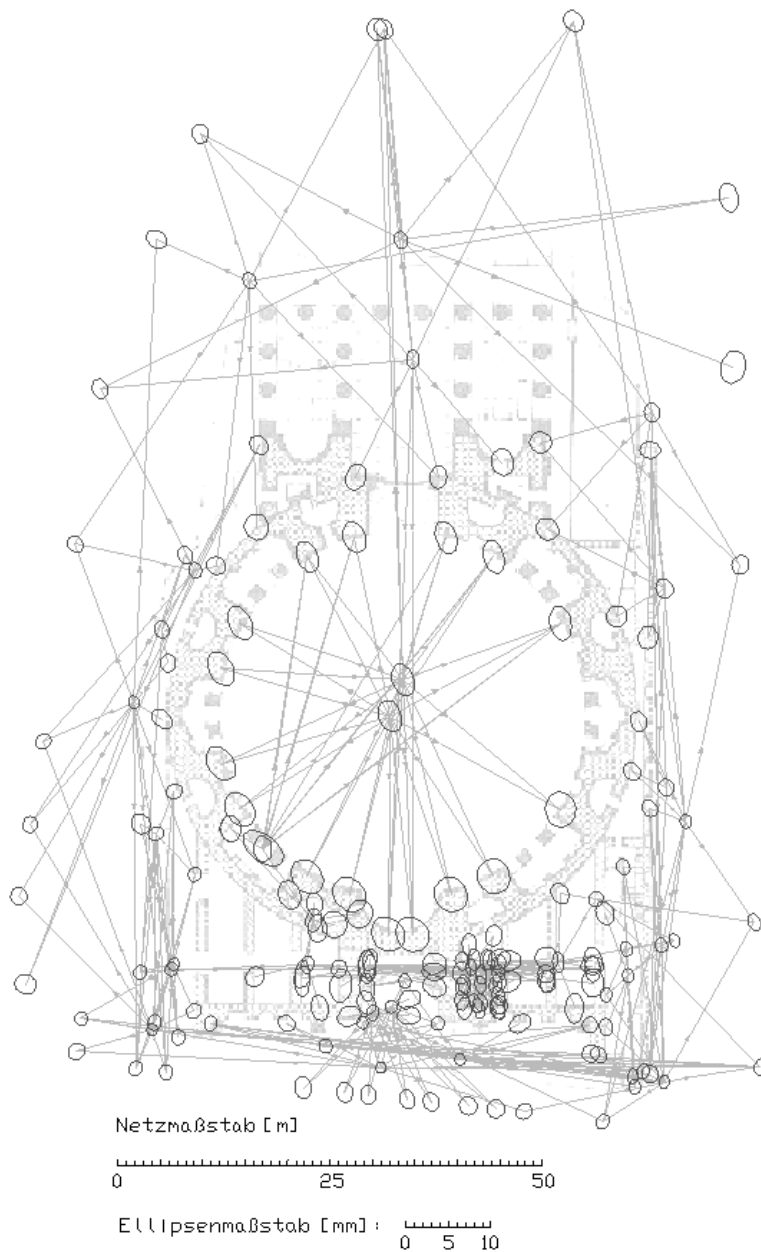


Abb. 5-7: Version 2: Ohne Verbindung zwischen den Standpunkten

Analyse der Ergebnisse

Der Blick auf die Fehlerellipsen der beiden ausgewerteten Versionen lässt die hohe Genauigkeit und Homogenität des Netzes deutlich werden. Die Fehlerellipsen der Version mit Verbindung zwischen den Gerätestandpunkten (Version 1) haben im Durchschnitt einen Radius kleiner 2 mm und sind geringfügig kleiner als die Fehlerellipsen der Version ohne Verbindung (Version 2). Die deutlichsten Unterschiede in der Größe der Fehlerellipsen zeigen sich bei den „natürlichen“ Punkten des Innenraums zwischen den beiden gerechneten Versionen. Insgesamt sind auch keine signifikanten Genauigkeits-Unterschiede zwischen synthetischen, markierten und „natürlichen“ Punkten festzustellen.

Aus den Ergebnissen kann keine eindeutige Empfehlung für die Verwendung zwangszentrierter (Teil-) Polygonzüge abgeleitet werden. Gerade in Bereichen mit viel Publikumsverkehr ist aber die Benutzung eines zweiten Stativs mit erheblichem logistischen Mehraufwand (Absperrung, Bewachung) verbunden.

5.1.7 Bewertung der Methode

Es wurde eine Methode erarbeitet, die es erlaubt, mit Hilfe der reflektorlosen (Video-)Tachymetrie mit minimalem Einsatz von Gerätschaft, Personal und Zeit auch unter erschwerten äußeren Bedingungen ein sehr dichtes, genaues, homogenes und stabiles, für die „freie Stationierung“ optimiertes Festpunktnetz zu installieren. Insbesondere die Verwendung „natürlicher“ Festpunkte bietet eine nahezu unbegrenzte Flexibilität in der Netzgestaltung und eine erhebliche Verringerung des Arbeitsaufwandes: Erstens entfallen dabei die Arbeitsschritte zur Anbringung der Markierungen. Zweitens werden der optische Gesamteindruck und die Bausubstanz des zu vermessenden Objektes in keiner Weise beeinträchtigt. Und drittens bedarf es keiner Absprachen mit Denkmalpflegern oder Privatleuten über die Anbringung von Markierungen.

Damit existiert auch für ein langfristig angelegtes Monitoring ein Grundlagennetz, auf das für spätere Analysen (so auch Deformationsuntersuchungen) jederzeit zurückgegriffen werden kann.

5.2 Anwendungsbeispiel Pantheon

Das Pantheon in Rom, ein zylindrischer Backsteinbau mit Giebelvorhalle, zwischen 118 und 128 n. Chr. errichtet, ist der größte Rundtempel und Kuppelbau der Antike. Der Innenraum wird von einer halbkugelförmigen Kuppel mit Kassettendecke (kreisrunde Lichtöffnung im Scheitel, Durchmesser 9 m) überwölbt. Durchmesser und Höhe sind gleich: 43,2 m. [MEYERS GROßES TASCHENLEXIKON]

Im Rahmen der Bauforschung an diesem großartigen Monument sollte in einer ersten Arbeitsphase die Lage der Kassetten, deren Gestalt und die Form der Kuppel ermittelt werden. Des weiteren sollte jede einzelne Kassette fotografiert und das Bild georeferenziert und somit in das Gesamtsystem eingebunden werden.

Vor Beginn der eigentlichen Bauwerksvermessung musste ein Festpunktnetz geschaffen werden, das es erlaubt, die noch nicht absehbare Zahl der einzelnen Detail-Vermessungen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten in ein gemeinsames, sehr genaues geometrisches Bezugssystem einzubinden (siehe 5.1).

5.2.1 Aufmaß der Kassetten

Das Aufmaß der Kassetten erfolgte von mehreren Gerätestandpunkten aus, die jeweils mit Hilfe der „freien Stationierung“ bestimmt wurden. Es wurden jeweils die äußeren vier Ecken einer Kassette reflektorlos angemessen. Dabei erwiesen sich die ins Tachymeter eingebauten Kameras für die Anzielung als äußerst hilfreich. Zum einen konnten damit die sehr steilen Visuren rasch gemessen werden. Zum anderen bestand jederzeit die Möglichkeit, das aktuelle Kamerabild mit der Vektorgrafik der bereits aufgenommenen Punkte und Verbindungen zu überlagern (vgl. 4.3.5.2). Auf diese Weise hatte man stets einen guten Überblick über den Arbeitsfortschritt und konnte sicher die sehr ähnlich aussehenden Kassetten unterscheiden.



Abb. 5-8: Überlagerung des aktuellen Kamerabildes

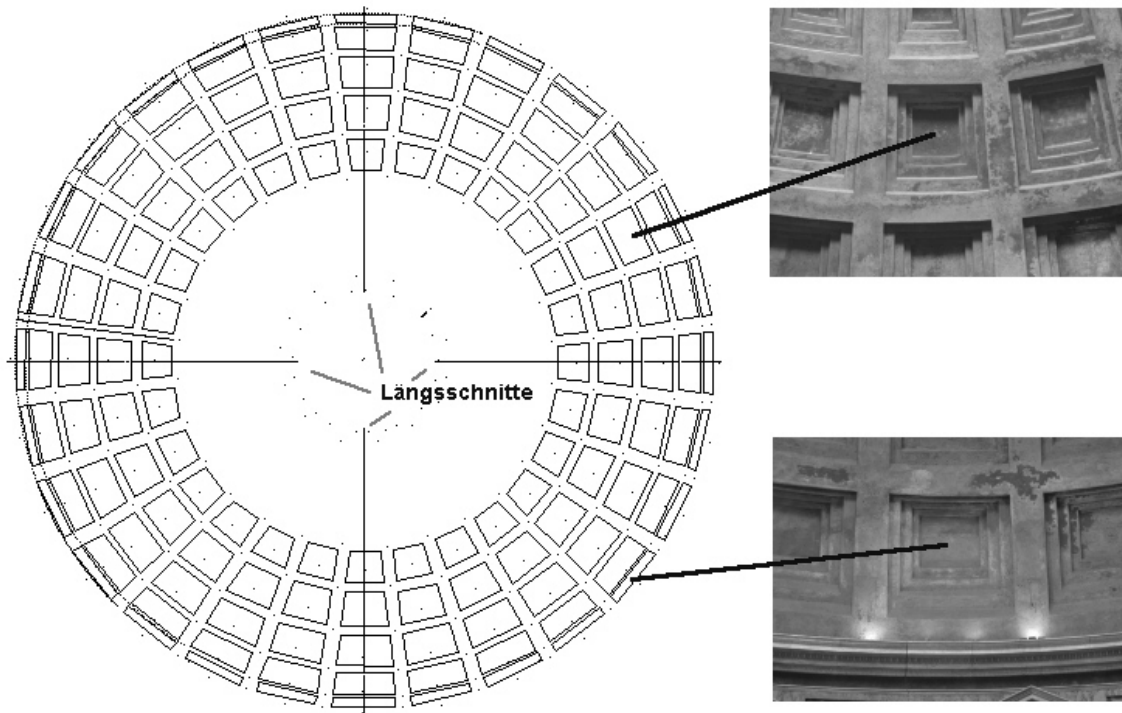


Abb. 5-9: Kassetten im Grundriss mit georeferenzierten Bildern

5.2.2 Profile

Mit der in 3.3.2 aufgeführten Methode wurden die im Grundriß in Abb. 5-9 dargestellten Längsschnitte durch die Kuppel gemessen. Dabei betrug der Punktabstand jeweils 3 cm.

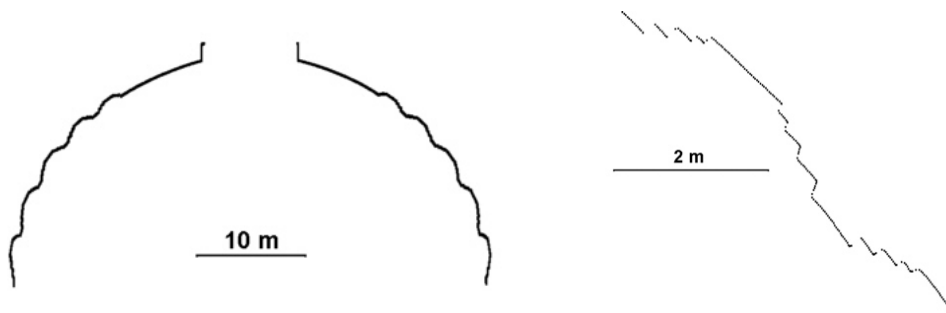


Abb. 5-10: Kuppelform / Detail

5.2.3 Formbestimmung der Kuppel

Die Kuppel des Pantheons wird allgemein als Halbkugel beschrieben. Zur genaueren Bestimmung der Form wurden die Nervaturkreuze zwischen den 128 Kassetten sowie zwei Dutzend Punkte an der kreisförmigen Öffnung der Kuppel (Opaion) vermessen.

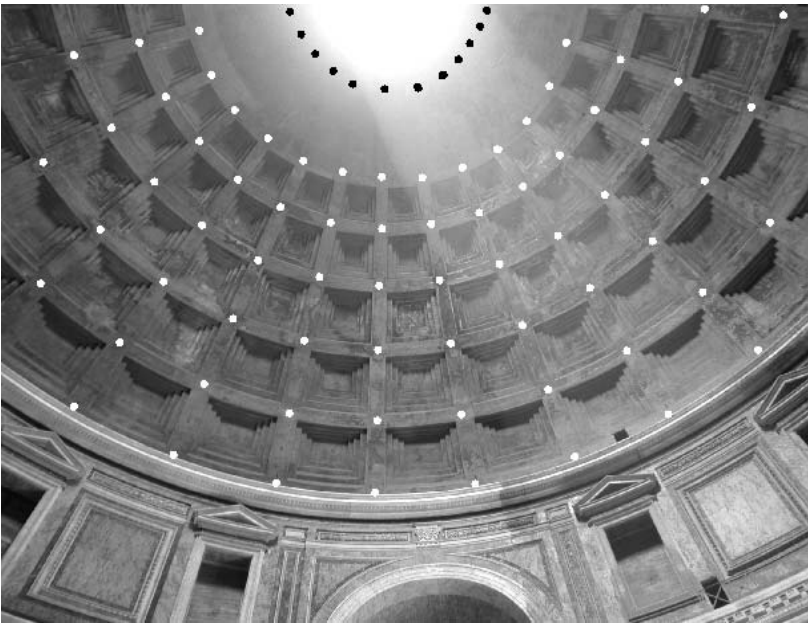


Abb. 5-11: Lage der Beobachtungspunkte (Ausschnitt)

Die Darstellung der Vermessungsergebnisse als Oberflächenmodell bzw. die Höhenliniendarstellung können dem Betrachter noch keinen Eindruck der Deformationen geben, da diese in der Grobform der Halbkugel untergehen. Im Folgenden sind zwei unterschiedliche Darstellungsformen gewählt worden, welche die Abweichung der tatsächlichen Oberfläche von einer ausgleichenden Kugel hervorheben: Zum einen wurden diese Abweichungen 10-fach überhöht auf der Kugel dargestellt (Abb. 5-12). Das ermöglicht eine räumliche Darstellung der Oberfläche wie in

Abb. 5-14, bzw. eine Höhenliniendarstellung wie in Abb. 5-15. Bei der anderen Darstellungsform wurde die Halbkugel nach einem mittabstandstreuen Azimutalentwurf (Abb. 5-13) in die Ebene abgebildet und die Abweichungen von der ausgleichenden Kugel als Isohypsen dargestellt (Abb. 5-16).

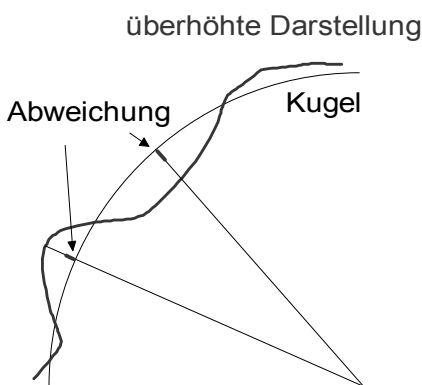


Abb. 5-12: Prinzip der Deformations-Überhöhung

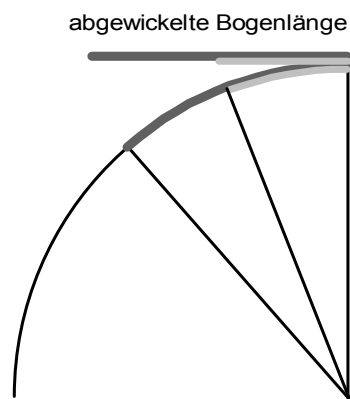


Abb. 5-13: Abgewickelte Bogenlänge

Das Oberflächenmodell der Halbkugel mit den überhöhten Deformationen wird im Folgenden aus vier verschiedenen Blickwinkeln betrachtet. Dabei symbolisiert das „X“ die Lage des Eingangs.

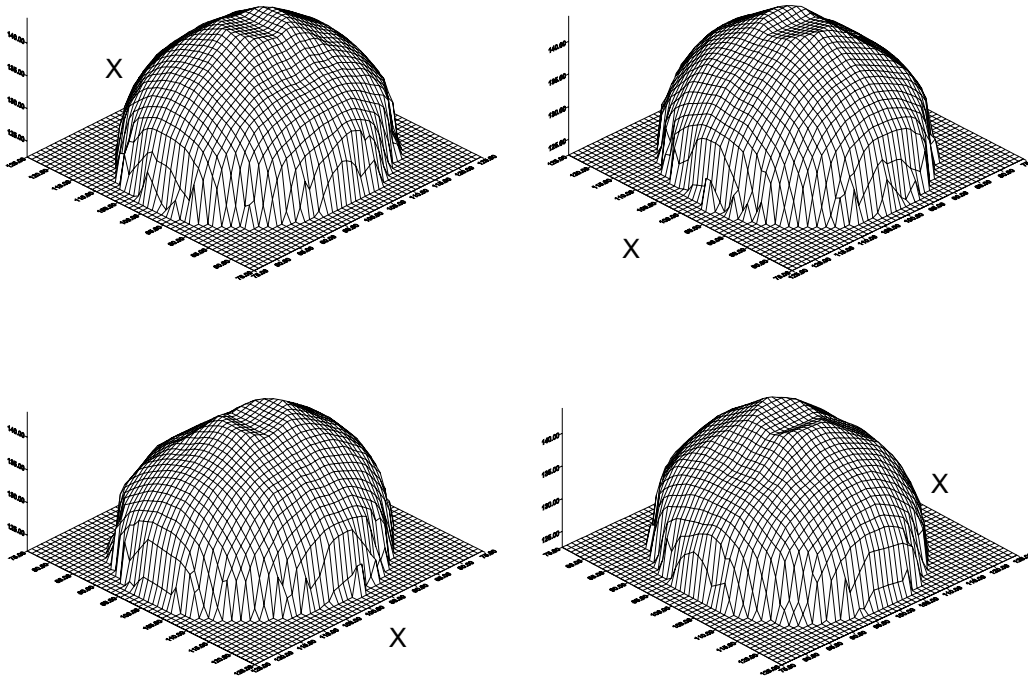


Abb. 5-14: Überhöhte Deformationen aus verschiedenen Blickwinkeln

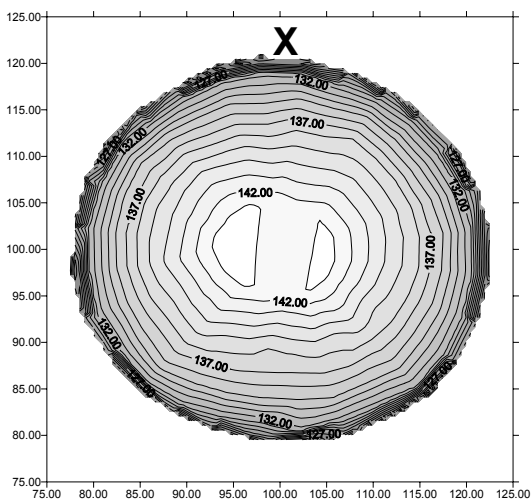


Abb. 5-15: Höhenlinien bei 10-facher Überhöhung

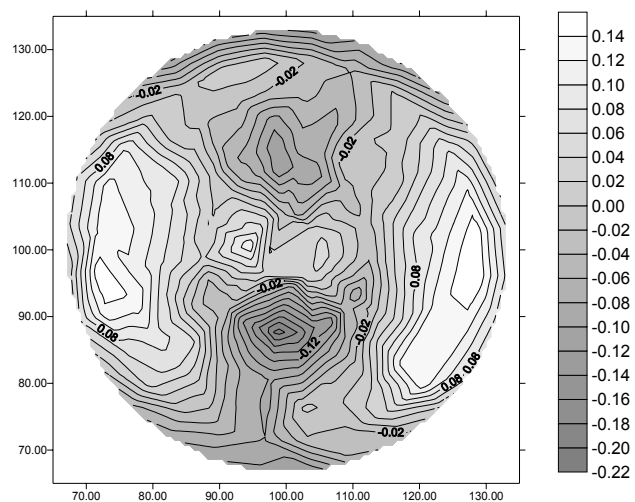


Abb. 5-16: Abweichungen von der Kugel

Aufgrund des hohen erreichten Automationsgrades und des Bedienkomforts des Vermessungssystems (freie Stationierung, automatische Positionierung zu bekannten Punkten, visuelle Kontrolle der Anzielung über Monitor) wäre eine Wiederholungsmessung zur Untersuchung der Kuppeldeformation in sehr kurzer Zeit möglich.

5.3 Anwendungsbeispiel Fassadenerneuerung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojektes „Energiegerechte Außenwandsanierung mit industriellen Vorfertigungstechniken“ (Zusammenarbeit des Instituts für Baukonstruktionen/Ingenieurholzbau/Bauphysik und der Arbeitsgruppe Geodäsie der Ruhr-Universität Bochum) kam dem geodätischen Projektpartner die Aufgabe zu, ein geschlossenes Messsystem zu entwickeln, das sowohl die Aufmessung als auch Absteckungen an der Fassade erlaubt.

Ziel des Projektes war es, renovierungsbedürftige Mehrfamilienhäuser mit großflächigen, industriell vorgefertigten Fassadenelementen zu bekleiden [REYER et al., 2003]. Dazu war es notwendig, die Dimensionen der Fassade und ihrer Öffnungen mit einer Genauigkeit von 2-3 mm zu erfassen. Des Weiteren waren die Unebenheiten der Fassade zu bestimmen. Aus der so erfassten tatsächlichen Geometrie des Gebäudes war ein Modell für die Konstruktion der Fassadenelemente zu extrahieren. Letztendlich war es Aufgabe der Vermessung, die Positionen der Befestigungspunkte der fertigen Fassadenelemente an der (unebenen) Fassade abzustecken. An das zu entwickelnde Messsystem wurden folgende weitere Anforderungen gestellt:

- Hohe Zuverlässigkeit
- Automatisierung, Datenfluss
- Verwendung von Standard-Hardware
- Flexibel
- Schnell

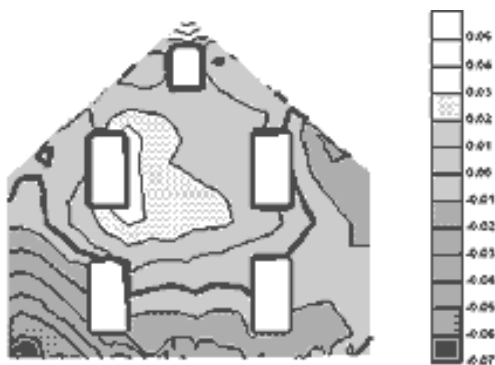


Abb. 5-17: Isolinien Darstellung der Unebenheiten

5.3.1 Vergleich der Vermessungsmethoden für die Fassadenaufnahme

Im ersten Schritt wurden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Vermessungsmethoden (Handaufmaß, Photogrammetrie, Tachymetrie, Laserscannen) im Kontext zu diesem speziellen Projekt untersucht.

Handaufmaß

Beim Handaufmaß wurde überlegt, die notwendigen vertikalen Bezugsebenen mit Hilfe von Rotationslasern und durch Fluchten zu realisieren und dann Einzelmaße zu messen. Dabei wären verhältnismäßig kostengünstige und dem Bauhandwerker gut vertraute, konventionelle Vermessungsinstrumente wie Nivellier, Rotationslaser, Messband, DISTO und Wasserwaage zum Einsatz gekommen. Hierfür hätten jedoch Gerüste aufgebaut werden müssen. Die Aufbereitung der Daten hätte mit handelsüblichen Konstruktions- und Zeichenprogrammen wie z.B. AutoCAD erfolgen können.

Dieses Verfahren scheiterte an den Genauigkeitsansprüchen und der fehlenden Automatisierungsmöglichkeit.

Photogrammetrie

Zur photogrammetrischen Erfassung hätte es der Aufnahme der Fassaden mit hochwertigen photogrammetrischen Kameras aus verschiedenen Richtungen bedurft. Mit Hilfe photogrammetrischer Auswerteprogramme hätte dann ein Modell des Gebäudes erstellt werden können. Dieses Verfahren ist jedoch kaum dazu in der Lage, die Unebenheiten - insbesondere einer untexturierten Fassade - mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen. Es ist auch nicht dazu geeignet, Absteckungen durchzuführen. Zudem sind zur hochgenauen Bildorientierung und Modellbildung in der Regel (einige wenige) tachymetrisch bestimmte Passpunkte notwendig.

Laserscannen

Das Laserscannen wäre mit seiner schnellen Arbeitsweise und der extrem hohen Punktdichte hervorragend dazu geeignet gewesen, die Unebenheiten der Fassade zu bestimmen. Die hochgenaue Lokalisierung wichtiger Details (Fensteröffnungen usw.) hätte allerdings aufwendiger Nachbereitung bedurft. Neben den hohen Kosten für die Anschaffung des Aufnahmesystems und der entsprechenden Auswertesoftware liegt der Hauptnachteil dieser Methode in der fehlenden Möglichkeit der Absteckung von Punkten.

Tachymetrie

Die Tachymetrie als bewährtes und sehr flexibles Aufnahmeverfahren eignet sich hervorragend für die dreidimensionale Erfassung markanter Einzelpunkte. Dies gilt insbesondere für Geräte mit reflektorloser Distanzmessung. Die Erfassung der Unebenheiten der Fassade kann bei Instrumenten, die sich mit Hilfe von Servomotoren steuern lassen, weitgehend automatisch erfolgen. Der wesentliche Vorteil dieser Methode gegenüber den anderen ist die Möglichkeit der Absteckung von Punkten auf der Fassade.

Die Abwägung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Vermessungsmethoden zeigte die Erfordernis der Kombination von Tachymetrie mit Elementen der Photogrammetrie und des Laserscannens. Somit stellt diese Vermessungsaufgabe einen Idealfall für den Einsatz des entwickelten Vermessungssystems dar.

5.3.2 Tachymetrische Fassadenvermessung

Die tachymetrische Vermessung eines Gebäudes (mehrere Fassaden) zum Zwecke der angestrebten Fassadenerneuerung gliedert sich in folgende drei Arbeitsschritte:

- Anlage eines Festpunktnetzes rund um das Gebäude
- Aufnahme der wesentlichen Einzelpunkte
- Aufnahme von Oberflächenpunkten zur Beschreibung der Unebenheiten

Anlage eines Festpunktnetzes

Die Anlage eines Festpunktnetzes (siehe 5.1) dient dazu, bei der folgenden Aufnahme der Einzelpunkte und Oberflächenpunkte sowie der späteren Absteckung den Instrumentenstandpunkt frei zu wählen und damit auf eventuelle Sichtbehinderungen flexibel reagieren zu können. Als Zielpunkte dienen hierbei Zielmarken, die auf die Fassade aufgeklebt und reflektorlos angemessen werden. Aufgrund der sehr hohen Genauigkeitsanforderungen und der i.d.R. unproblematischen logistischen Situation werden auch die Verbindungen zwischen den Instrumentenstandpunkten, z.B. in Form eines Ring-Polygonzugs, gemessen, wobei die jeweiligen Instrumentenstandpunkte unvermarkt bleiben.

Aufnahme der wesentlichen Einzelpunkte

Aufzunehmen sind die Eckpunkte der Fassaden, die Fenster- und Türöffnungen sowie sämtliche Bauteile, die in die geplante Fassadenverkleidung eindringen oder sie durchdringen wie z.B. Abluftrohre. Die Distanzmessung erfolgt reflektorlos, wobei man sich der Problematik der Ausdehnung des Laserflecks bewusst sein muss und entsprechende Strategien zur Vermeidung von Fehlmessungen einzusetzen hat (vgl. Kapitel „Distanzmessteil“ 3.1.3 und „Sonderlösungen“ 3.4).

Sofern das Vermessungsinstrument mit internen Videokameras ausgerüstet ist, bereitet auch das Anzielen hoch gelegener Punkte keine Schwierigkeit. Ist dies nicht der Fall, kann ein Steilsichtokular eingesetzt werden. Alternativ

dazu kann die Anzielung mit Hilfe des sichtbaren Laserstrahls erfolgen. Spezielle „Laser-Sichtbrillen“, optimiert für die Wellenlänge 633 nm, heben den Laserfleck insbesondere bei größeren Entfernungen und heller Beleuchtung deutlicher hervor und erleichtern so die Arbeit.

Aufnahme der Oberflächenpunkte

Zur Aufnahme der Oberflächenpunkte werden die entsprechenden Bereiche der Fassade definiert und es wird eine Rasterweite festgelegt, mit der die Oberfläche dann automatisch abgetastet wird (vgl. 3.3).

5.3.3 Modellierung

Das Ziel der Modellierung ist es, das „unebene“ Gebäude mit Vertikalebene zu umschließen, welche die einzelnen Fassaden in ihrem vordersten Punkt tangieren. Für diese Ebenen ist die Bezeichnung „Vorderste-Punkt-Ebene“ (VPE) eingeführt worden. In diese Ebenen werden die Fassadenumrisse, Öffnungen und Durchdringungselemente projiziert. Dem Planer der Fassadenelemente steht somit ein nur noch zweidimensionales Modell jeder einzelnen Fassade zur Verfügung.

Zur Ermittlung der VPE wird jede einzelne Fassade des Gebäudes als Vertikalebene durch zwei Oberflächenpunkte definiert. Abb. 5-18 zeigt schematisch den Grundriss eines Gebäudes, bei dem die Abweichung der tatsächlichen Oberfläche von den definierten Vertikalebene stark überhöht dargestellt ist. Im nächsten Berechnungsschritt wird derjenige Oberflächenpunkt mit dem größten Abstand zur definierten Ebene ermittelt. Durch diesen Punkt wird eine Vertikalebene parallel zu der zuvor definierten Fassadenebene gelegt. Die so erzeugten VPE werden dann miteinander verschnitten (Abb. 5-19).

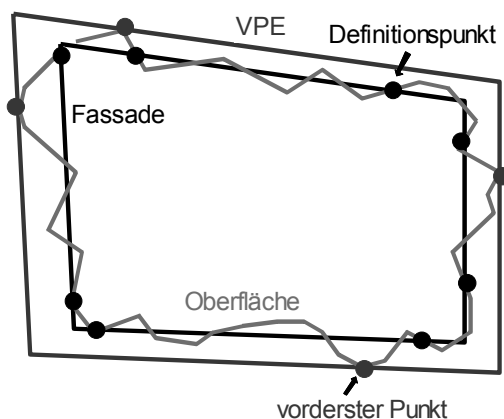


Abb. 5-18: Schematischer Grundriss

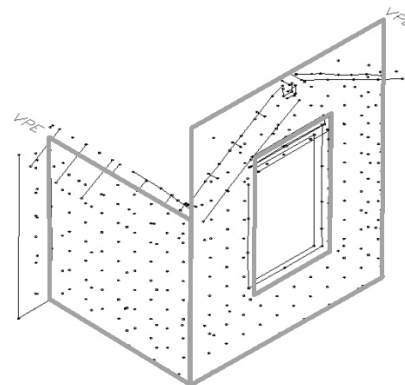


Abb. 5-19: Vorderste-Punkt-Ebene (VPE)

5.3.4 Absteckung

Die fertig gestellten Fassadenelemente sind mit fest eingebauten Aufhängevorrichtungen versehen und werden mit einem „Druckknopf-System“ an der Fassade befestigt. Die Aufgabe für den Vermessungsingenieur besteht darin, die Positionen der Befestigungselemente an der (unebenen) Fassade zu vermarken. Dazu werden die (im zweidimensionalen System der einzelnen VPE vorliegenden) Koordinaten der Befestigungspunkte in das (dreidimensionale) Koordinatensystem des Gebäudes transformiert. Die nun vorliegenden Absteckpunkte liegen alle in der physisch nicht existenten VPE. Bei der örtlichen Absteckung müssen die Absteckpunkte senkrecht zur VPE auf die tatsächliche Fassadenoberfläche projiziert werden. Dies erfolgt nach dem in 3.2.3 beschriebenen Verfahren „Absteckung von Punkten des 2D-Entwurfs“. Der sichtbare Laserfleck des Distanzmessers wird dabei solange automatisch iterativ nachgeregelt, bis die entsprechende Position senkrecht zur Absteckungsebene erreicht ist (Abb. 5-20). Aufgrund der hohen Genauigkeitsansprüche empfiehlt sich die Verwendung von Absteckmarken, die auf die Fassade geklebt werden (Abb. 5-21).

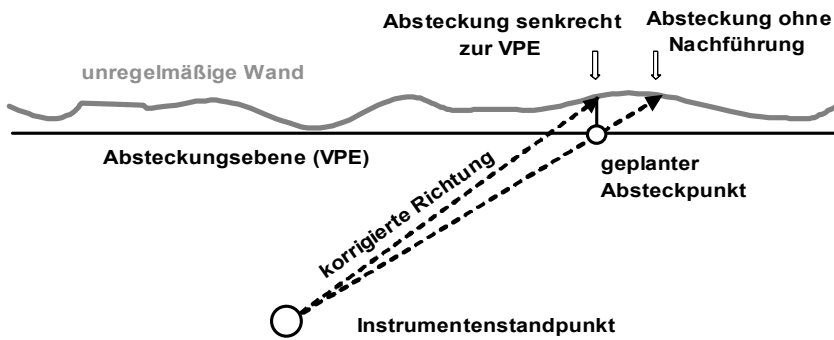


Abb. 5-20: Iterative Absteckung eines Befestigungspunktes (Grundriss)



Abb. 5-21: Absteckmarke

Zugleich wird bei dieser Prozedur der Abstand des Oberflächenpunktes von der Absteckungsebene ermittelt und liefert damit eine wichtige Einstellgröße für die Abstandshalter der Fassadenelemente (Abb. 5-21). Durch die Einstellung der Abstandshalter wird erreicht, dass die Fassadenelemente nach ihrer Montage tatsächlich in einer (Vertikal-) Ebene liegen.

5.3.5 Bildüberlagerung

Neben den beschriebenen notwendigen Arbeitsschritten der Vermessung, Modellierung und Absteckung wurde bei diesem Projekt auch die Einbeziehung von Bilddaten erprobt. Durch die Überlagerung eines entzerrten Photos der Fassade mit der Vektorgrafik des Fassadenaufmaßes bzw. der geplanten Fassadenelemente (Abb. 5-22, vgl. auch 4.3.1) konnten in einfacher Weise Plausibilitätskontrollen vorgenommen werden. Insbesondere konnte geprüft werden, ob die Öffnungen und Durchdringungselemente der Fassade vollständig und lagerichtig erfasst worden sind.



Abb. 5-22: Überlagerung eines entzerrten Photos mit Fassadenaufmaß und geplantem Element (rechts)

5.3.6 Bewertung der Methode

Die problemlos durchgeführte Anbringung der Fassadenelemente an den verschiedenen Testfassaden des Projektes ist ein Beleg für die hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Vermessung. Der vermessungstechnische Aufwand kann aufgrund der innovativen Software-Lösung sehr gering gehalten werden: Das Aufmaß eines kleineren Mehrfamilienhauses kann ein Vermessungsingenieur an einem Tag durchführen. Für die Auswertung sind in etwa 2 Stunden anzusetzen. Der Zeitaufwand für die Absteckung ist in erster Linie von der Anzahl und Erreichbarkeit der anzuzeichnenden Absteckungspunkte abhängig. Auch hier ist aufgrund von praktischen Erfahrungen davon auszugehen, dass innerhalb weniger Stunden die Befestigungspunkte der Fassadenelemente für ein kleineres Mehrfamilienhaus abgesteckt werden können.

5.4 Zusammenfassung des Kapitels

Mit den aufgeführten Beispielen aus den Bereichen Bauforschung und Altbauinstandsetzung wurde das breite Einsatzspektrum der Video-Tachymetrie verdeutlicht. So konnten mit dem realisierten System für alle relevanten Bereiche einer Vermessung von der Anlage eines Festpunktnetzes über die Formerfassung bis hin zu Absteckungen neue und leistungsfähige Verfahren entwickelt werden.

Durch die Nutzung der reflektorlosen Entfernungsmessung beim Aufbau von Festpunktnetzen kann weitgehend auf künstliche Vermarkungen verzichtet werden. Die Einbeziehung von Bilddaten in das Vermessungssystem erlaubt dabei die leichte und sichere Identifizierung der „natürlichen“ Festpunkte. Am Beispiel des Pantheons wird deutlich, dass mit Hilfe des Linienscans unregelmäßige Formen sehr detailliert und genau beschrieben werden können. Die eingebauten Kameras unterstützen dabei den Anwender bei problematischen Zielungen, durch die Georeferenzierung der Bilder externer Kameras kann auf einfache Weise eine bildliche Dokumentation des Objektes erfolgen. Das dritte Beispiel der Fassadenerneuerung zeigt den weiten Einsatzbereich der „intelligenten Tachymetrie“ besonders deutlich. Vor allem ist die Möglichkeit der einfachen, sicheren und genauen Absteckung ein herausragendes Merkmal dieser Methode.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit wurde ein Vermessungssystem konzipiert, entwickelt und erprobt, das die Vorteile der in der Bauwerksvermessung gebräuchlichen Vermessungsverfahren - Handaufmaß, Photogrammetrie, Tachymetrie und Laserscannen - integriert. Dadurch ist das Vermessungssystem in der Lage, eine sehr große Bandbreite der Anforderungen seitens der unterschiedlichen Intentionen an eine Vermessung abzudecken.

Zunächst wurde das Zusammenspiel zwischen der Motivation für eine Vermessung, dem Objekt, das sich in einem bestimmten räumlichen Umfeld befindet, den Vermessungsmethoden und den angestrebten Ergebnissen der Vermessung analysiert. Daraus und aus der Analyse der Verbindungen zwischen den einzelnen Vermessungsmethoden wurde das Konzept eines modular aufgebauten dreistufigen Vermessungssystems abgeleitet.

Es folgte als nächstes die Untersuchung der Möglichkeiten einer konsequenten Nutzung des Potenzials moderner (reflektorlos messender, servomotorgesteuerter) Tachymeter zu Automatisierungszwecken. Schwerpunkte bildeten dabei die umfassende Darstellung der iterativen Absteckung, der damit eng verbundenen Möglichkeit des linienhaften Scannens sowie die einfache automationsgerechte Lösung häufig auftretender Probleme bei der Objekterfassung.

Die Erweiterung des tachymetrischen Vermessungssystems um interne und externe Kameras bildete den Hauptteil dieser Arbeit. Als erstes erfolgte eine Zusammenstellung bestehender Kombinationen von Theodoliten und Kameras. Danach wurden die Adaption der internen Kameras und deren Justierung und Kalibrierung beschrieben und der Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten und Theodolit-Richtungen erarbeitet. Es wurde gezeigt, wie das Tachymeter mit Hilfe der Bilder interner und externer Kameras gesteuert werden kann und wie diese Bilder genutzt werden können, Orthophotos zu erzeugen und Modelle mit photorealistischer Textur zu belegen. Insbesondere wurde mit der Direktmodellierung eine neuartige Methode entwickelt, bei der die jederzeit orientierten Bilder der internen Kameras genutzt werden, um ein geometrisches Modell direkt bei dessen Aufmessung mit photorealistischen Texturen zu versehen.

Abschließend zeigen einige aufgeführte Beispiele die Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten und verifizieren die Praxistauglichkeit des entwickelten Vermessungssystems.

Wesentliche Fortschritte des integralen Systems sind in den folgenden beiden Unterabschnitten hervorgehoben.

6.1 Neue Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden

Die in 2.2 aufgeführten Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden konnten durch die Ausrüstung des Tachymeters mit internen Kameras sowie die Einbeziehung externer Kameras in das Gesamtsystem wesentlich erweitert werden (siehe

Abb. 6-1). Die zentrale Stellung der (Video-)Tachymetrie wurde etabliert und dahingehend ausgebaut, dass nun die tachymetrisch bestimmten Punkte des Festpunktfeldes (auf das auch alle anderen Vermessungsmethoden zugreifen) bildlich dokumentiert werden. Durch die automatische Absteckung regelmäßiger Gitter auf Oberflächen können das Handaufmaß und die Photogrammetrie weiter unterstützt werden. Zur Stärkung der Stellung der Tachymetrie trägt auch bei, dass das Scannen von Flächen und Linien in gewissem Umfang vom „intelligenten“ Tachymeter selbst durchgeführt werden kann.

Besondere Fortschritte wurden beim Ausbau der Verbindung Tachymetrie – Photogrammetrie erzielt. Zum einen wurden die Methoden der Photogrammetrie genutzt, um das Tachymeter über einen Bildschirm zu steuern, zum anderen konnte durch die wechselseitige Unterstützung von Photogrammetrie und Tachymetrie die Methode der Direktmodellierung entwickelt werden.

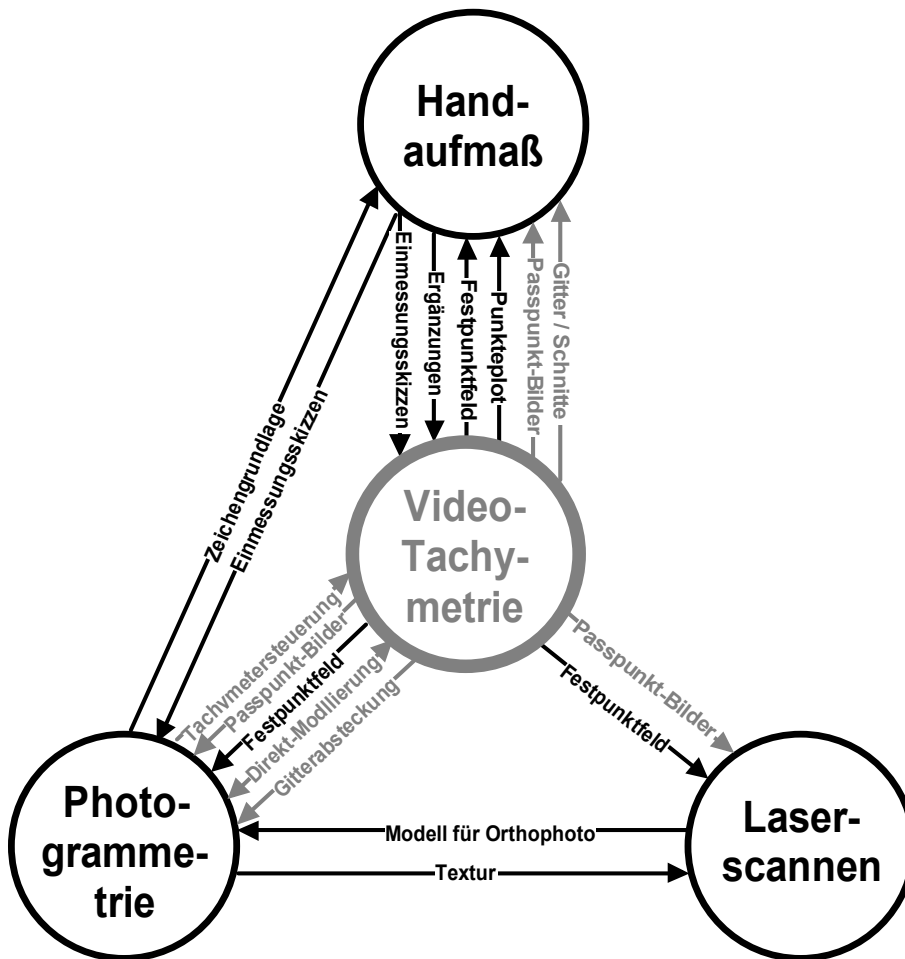


Abb. 6-1: Graue Schrift: neue, im Zuge dieser Arbeit entwickelte Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden

6.2 Das dreistufige modulare Konzept

Der Erfolg des Konzeptes des dreistufigen modularen Systemausbaus (vgl. 2.3) konnte durch verschiedene praktische Einsätze des Vermessungssystems überprüft werden. Die Vor- und Nachteile beim Einsatz der jeweiligen Stufen sind im Folgenden zusammengefasst.

Tachymeter ohne Steuerrechner (Stufe 1)

Bei dieser einfachsten Variante wurde ausschließlich die Funktionalität des Tachymeters und seiner internen Programme (Speichern der Messwerte, Stationierung, Berechnungen) genutzt. Dazu wurden (in der Arbeit nicht erwähnte) Programmkomponenten zur Aufbereitung der im Tachymeter gespeicherten Vermessungs-Rohdaten entwickelt. Das Haupteinsatzgebiet der Version ist die Erfassung (weniger) Einzelpunkte z.B. bei der Anlage eines Grundlagentznetzes.

Der Vorteil der Variante ist (neben dem geringeren Anschaffungspreis) vor allem logistischer Natur: Es werden keine Zusatzgeräte benötigt, die transportiert, aufgebaut, mit Energie versorgt und vor widrigen Witterungsbedingungen geschützt werden müssen. Der Nachteil besteht darin, dass keine sofortige Darstellung und Weiterverarbeitung der Messdaten erfolgen kann. Somit ist man bei der Kontrolle der Messwerte auf die wenigen Möglichkeiten der internen Programme angewiesen, die wichtige Möglichkeit der visuellen Plausibilitäts- und Vollständigkeitskontrolle entfällt. Die Dokumentation der aufgenommenen Punkte muss mit Hilfe von Handskizzen und Codierungen erfolgen. Automatische Vermessungsabläufe sind nur in sehr beschränktem Maße möglich, so z.B. das automatische Abstecken von bekannten Punkten.

Tachymeter mit externer Rechnersteuerung ohne Kameras (Stufe 2)

In der zweiten Ausbaustufe wurde die Möglichkeit der bidirektionalen Kommunikation zwischen dem Tachymeter und einem externen Rechner genutzt: Das Tachymeter sendet Messwerte und empfängt Positionierungsanweisungen, die es mit Hilfe der Servomotoren umsetzt.

Allein die Kommunikationsrichtung Tachymeter → Rechner führt schon zu einer erheblichen Steigerung der Funktionalität des Systems: Hiermit ist es möglich, die Messwerte sofort graphisch darzustellen und im Angesicht des Objektes dessen Modell zu erstellen. Es können somit auf einfache Weise sofort wichtige Kontrollmaße ermittelt werden. Die graphische Darstellung erlaubt aber vor allem eine sofortige Plausibilitäts- und Vollständigkeitskontrolle.

Mit der Kommunikationsrichtung Rechner → Tachymeter wird die Möglichkeit zu automatischen Vermessungsabläufen (vgl. 3.2 und 3.3) eröffnet. Diese bleiben nicht nur beschränkt auf das bloße Abstecken bekannter Punkte. Vielmehr ist das System durch die bidirektionale Kommunikation jetzt in der Lage, Soll- und Istwerte miteinander zu vergleichen und Korrekturwerte zu ermitteln. Dieses kann insbesondere zur automatischen Aufnahme von Schnitten durch ein Objekt und zu diversen Absteckungsaufgaben genutzt werden. Der Nachteil dieser Variante sind die höheren Anschaffungskosten eines Tachymeters mit Servomotoren sowie evtl. die Kosten und die erforderliche zusätzliche Logistik für das Mitführen eines Notebooks.

Tachymeter mit externer Rechnersteuerung und Kameras (Stufe 3)

In der differenziertesten Ausbaustufe wurde das Vermessungssystem mit drei Kameras versehen (vgl. Kap. 4): einer Weitwinkelkamera und einer Telekamera, die fest in das Gehäuse eingebaut sind und einer Okularkamera, die gegen das Standardokular ausgetauscht werden kann. Diese Ausbaustufe wurde durch die eigens entwickelte Autofokussierung der Okularkamera komplettiert. Die laufenden Bilder der Kameras können abwechselnd am Monitor angezeigt werden und lassen sich als Standbilder abspeichern. Durch Anklicken eines Bildpunktes auf dem Monitor kann das Tachymeter bewegt werden. Bereiche des Standbildes können als Fototextur für ein Modell genutzt werden. Damit erfährt das System eine wesentliche Erweiterung in den Punkten Dokumentation, Bedienung und Modellierung.

Die Vorteile dieser Variante sind die umfassende Dokumentation der Vermessungspunkte, ein hoher Bedienkomfort, die Darstellung schon gemessener Elemente im Kamerabild und die Möglichkeit zur weitgehenden photorealistischen Modellierung im Angesicht des Objektes. Derzeit nachteilig sind der notwendige Austausch des Fernrohr-Okulars gegen eine Okularkamera, die Kabelverbindung vom Fernrohr zum Notebook und die vorerst schlechtere Bildqualität des Okularbildes gegenüber einer Zielung mit dem Auge. Diese technischen Nachteile des Prototypen wird eine kommerzielle Geräteversion aber nicht aufweisen.

Modularer Aufbau

Bei der Entwicklung des Vermessungssystems wurde besonderer Wert auf Modularität gelegt. Da bei einer typischen Vermessungsaufgabe im Bereich der Bauaufnahme alle drei Ausbaustufen ihre besonderen Einsatzgebiete haben (Stufe 1: Grundlagennetz, Stufe 2: Erfassung der Geometrie, Stufe 3: Punktalben z.B. für das Monitoring, Visualisierung), ist es möglich, zwischen den Ausbaustufen nach Bedarf zu wechseln.

6.3 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, wie das Potenzial moderner, reflektorlos messender, servomotorgesteuerter Tachymeter zu Automationszwecken genutzt und wie es durch den Einbau von Kameras wesentlich erweitert werden kann. Die hier realisierte Integration tachymetrischer und photogrammetrischer Verfahren führte neben der Entwicklung von Werkzeugen zur Arbeitserleichterung, wie dem Anzielen mit Hilfe von Kamerabildern und der Anlage eines Bildarchives, zu der neuartigen Methode der photorealistischen Direktmodellierung mit Hilfe orientierter Bilder der Tachymeterkameras.

Bedauerlicher Weise haben die Instrumentenhersteller das Ende der 80er Jahre begonnene Konzept der Ausstattung hochwertiger Theodolite mit Kameras nicht weiterverfolgt. So blieb der Einsatz derartiger Systeme auf wenige Spezialanwendungen, insbesondere im Industriebereich, beschränkt. Doch gerade die enorme Steigerung der Leistungsfähigkeit von digitalen Kameras und der damit einhergehende Preisverfall während der letzten Jahre (die Tendenz kann sicherlich fortgesetzt werden) lassen hoffen, dass in Zukunft auch „Standard“-Tachymeter werksseitig (evtl. als Option) mit eingebauten Kameras ausgerüstet werden. Dazu beitragen kann auch die Tatsache, dass schon jetzt leistungsfähige Felderfassungs-PCs zur Verfügung stehen, die in der Lage sind, Videobilder anzuzeigen und zu verarbeiten. Durch den Einsatz von Bilderkennungs-Algorithmen, insbesondere im Bereich der Mustererkennung, könnte der Anwender in Zukunft weitgehend unterstützt werden. Vermessungsaufgaben ließen sich noch weiter automatisieren.

7 Literaturverzeichnis

Abkürzungen:

AVN	Allgemeine Vermessungsnachrichten
DGK	Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
DVW	Deutscher Verein für Vermessungswesen
GIM	Geomatics Information Magazine
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VGI	Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation
VPK	Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik
VR	Vermessungswesen und Raumordnung
ZfV	Zeitschrift für Vermessungswesen
ZPF	Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung

AFSHAR, MOHAMMADREZA / BOROUMAND, MEHDI / STUDNICKA, NIKOLAUS (2002): *Archeological Scanning of Persepolis*. GIM Juni 2002, S. 12-15

AGFANET: *Der digitale Film*. http://www.agfanet.com/de/cafe/photocourse/digicourse/lesson1/cont_chapter01.php3, recherchiert 2004

ASSENMACHER, LOTHAR (2002): *Laser der Klasse 3R – Der Einsatz von Tachymetern Leica TPS 1100 extended Range*. Der Vermessungsingenieur 6/2002, S. 456-458

ASSENMACHER, LOTHAR / MÜLLER, HUBERT / ZINNDORF, STEPHAN (1996): *Eine Komplettlösung für die Gebäudebestandserfassung*. AVN 1996, S. 380-383

BACIGALUPO, CINZIA / CESSARI, / LUCIANO (1998): *Digital Photogrammetry for Building Analysis*. GIM 1/1998, S. 78-79

BALL, STEVE (1996): *Autoscanning Laser Systems*. GIM 9/1996, S. 26-27

BENNING, WILHELM (1995): *Digitale Nahbereichsphotogrammetrie mit dem System PHOCAD – Dreidimensionale Dokumentation beliebiger Objekte*. VPK 7/95, S. 485 – 490

BINDSEIL, MARCUS (1999): *Vom Foto zum 3D-Modell, Architekturphotogrammetrie am Beispiel der Sophienkathedrale in Vologda/Russland*. In: Klemp, Dieter (Red.), „Modellieren und visualisieren auf Basis geodätisch-photogrammetrischer Messungen“, Wiesbaden: Chmielorz (VDV-Schriftenreihe Bd. 16), S. 89-94

BROCKMANN, GERD / WESTERWALBESLOH, LUDGER (2002): *Die „dynamische Wand“*. ZfV 4/2002, S. 221-225

BROCKMEYER, CLAUDIA (1997): *Von der photogrammetrischen Aufnahme bis zum digitalen 3D-CAD-Modell am Beispiel der Alten Synagoge Essen*. Der Vermessungsingenieur 6/1997, S. 320-323

BUCHMANN, PETER / SCHERER, MICHAEL (1994): *Baufaufnahme mit einem computergesteuerten 3D-Laserscanner*. Der Vermessungsingenieur 5/1994, S. 210-215

BUCHMANN, PETER (1996): *Entwicklung eines Meßsystems zur automatischen polaren Objekterfassung am Beispiel der Bauaufnahme*. München, DGK, Reihe C, Heft Nr. 456

CANZLER, ARMIN / BENECKE, CLAUDIA (1997): *Automatische Graphikerzeugung bei der registrierenden tachymetrischen Aufnahme*. AVN 8-9/1997, S. 282-285

CCES: Kompetenzcenter Ingenieurvermessung – Vermessung in den Bereichen Architektur, Denkmalpflege und Archäologie. <http://www.cces.de>, recherchiert 2004

CHAPMAN, DAVID / DEACON, ANDREW / KOTOWSKI, RÜDIGER (1999): *Zur Rolle 3D-indizierter Bildarchive im industriellen Anlagenmanagement*. In: Klemp, Dieter (Red.), „Modellieren und visualisieren auf Basis geodätisch-photogrammetrischer Messungen“, Wiesbaden: Chmielorz (VDV-Schriftenreihe Bd. 16), S. 95-106

- COLOMBO, LUIGI / MARANA, BARBARA (1999): *Realistic Visualisations of Harlequin on the Web*. GIM 3/1999, S. 62-63
- CRAMER, JOHANNES (1993): *Handbuch der Bauaufnahme: Aufmaß und Befund*. 2. Aufl., Stuttgart, Deutsche Verlags-Anstalt, 1993
- DÄBLER, ROLF (1999): *VRML – Das Einsteigerbuch*. Kaarst, bhv Verlags GmbH
- DIN 18710-3: *Ingenieurvermessung Teil 3: Absteckung: Definitionen, Absteckungsarten, Anforderungen an Absteckungen, Absteckungsgenauigkeit*. Norm-Entwurf, Ausgabe 1999-03
- DORFFNER, LIONEL / FORKERT, GERALD (1996): *Die digitale ebene Entzerrung – ein „Low Tech“ Auswerteverfahren der Photogrammetrie*. VGI 1/96, S. 57 – 62
- ECKSTEIN, GÜNTER / HOMOLKA, CLAUDIUS (1997): *Meßtechnische Untersuchungen zur Beurteilung der Gewölbeschäden im Chor der Michaelskirche in Leonberg-Eltingen*. VR 59/4 (Juni 1997), S. 184-200
- FABIANKOWITSCH, J. (1990): *Automatische Richtungsmessung mit digitalen Differenzbildern*. (Dissertation), TU Wien
- GRAMM, WILFRIED (1996): *Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis: Von der Fassadenaufnahme bis zur Planherstellung*. Der Vermessungsingenieur 5/1996, S. 221–223
- GOTTWALD, REINHARD (1987): *Kern E2-SE – Ein neues Instrument nicht nur für die Industrievermessung?* AVN 4/1987, S. 147-154
- GREFE, JOCHEN (1994): *Anforderungen an eine Software für die Bauaufnahme*. Der Vermessungsingenieur 5/1994, S. 206-207
- HARTERMANN, WOLFGANG (2000): *Das Digitale Gebäudemodell als Werkzeug in der Immobilienbewirtschaftung*. VR 62/1 Februar 2000, S. 28-32
- HAKE, GÜNTER (1982): *Kartographie I*. 6. Aufl. 1982, Berlin, New York, Verlag de Gruyter, (Sammlung Göschen ; 2165)
- HEILIGER, RALPH (1993): *Architektengerechte geodätische Gebäudebestandserfassung*. Der Vermessungsingenieur 4/1993, S. 172-177
- HEILIGER, RALPH (1994): *Architektur-Vermessung*. Der Vermessungsingenieur 5/1994, S. 197-200
- HEILIGER, R. / FRITZENSMEIER, K. / HEINZ, C. / LORSE, G. (1999): *Aktueller Stand und Anwendungsmöglichkeiten lasergestützter Meßsensoren in der Bau- und Objektvermessung*. Moderne Sensorik für die Bauvermessung: Tagung Duisburg, 3. und 4. März 1999 / VDI-Gesellschaft Bautechnik-Düsseldorf: VDI Verl., 1999; (VDI-Berichte; 1454), S. 297-306
- HEILIGER, RALPH (2001): *Architektur-Vermessung – Eine interdisziplinäre Herausforderung*. Der Vermessungsingenieur 4/01, S. 262-264
- HÖPER, DIETER / RIEDEL, BJORN / BRITZ, ULLRICH (1998): *Deformationsmessungen an Betonoberflächen mit einem reflektorlos messenden, automatisch gesteuerten Tachymeter*. In: Möser, Michael (Red.), „Mess-techniken und Auswertelgorithmen für die praktische Deformationsanalyse heute und morgen“, Stuttgart: Wittwer (DVW-Schriftenreihe, Bd. 30), S. 148-153
- HOVENBITZER, MICHAEL (1998): *Hybrides 3D-Koordinatenmeßsystem für den Nahbereich*. In: Heister, Hansbert / Sternberg, Harald (Red.), „Hybride Vermessungssysteme“, Stuttgart: Wittwer (DVW-Schriftenreihe, Bd. 29), S. 166-174
- HOVENBITZER, MICHAEL (2003): *Zur Automation berührungsloser 3D-Objekterfassung im Nahbereich*. DGK Reihe C, Heft 556, München
- HUEP, WOLFGANG (1995): *Zum Einsatz der reflektorlosen Tachymetrie bei der Gebäude-Bestandserfassung*. In: Schrader, Bodo (Red.), „Gebäudeinformationssysteme“, Stuttgart: Wittwer (DVW-Schriftenreihe, Bd. 19), S. 99-110
- INGENSAND, HILMAR. (1999): *Robotertachymeter – Polare Positioniersysteme der Zukunft*. Moderne Sensorik für die Bauvermessung: Tagung Duisburg, 3. und 4. März 1999 / VDI-Gesellschaft Bautechnik-Düsseldorf: VDI Verl., 1999; (VDI-Berichte; 1454), S. 33-47
- JURETZKO, MANFRED (2001): *The system TOTAL for recording the geometry and image data of historic buildings and monuments*. In: Albertz, Jörg (Ed.), “Proceedings of the XVIII. International Symposium CIPA 2001“ Potsdam, S. 611-613
- KATOWSKI, OLAF (1989): *Deformationsmessungen an Bauwerken mit dem automatischen Theodolitmess-System ATMS*. Optical 3-D Measurement Techniques; Eds. Gruen / Kahmen; Wichmann Verlag – Karlsruhe 1989, S. 393-403
- KATOWSKI, OLAF (1992): *Ein Präzisionspolar-Messsystem (PPMS) im Einsatz bei Überwachungsmessungen und dynamischer Absteckung*. Ingenieurvermessung 92 – Beiträge zum XI. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung; Kap. II 5; Hrsg. Matthias / Grün; Fred. Dümmers Verlag – Bonn 1992, II 5
- KATOWSKI, OLAF (1998): *Motorisierte Theodolitmesssysteme*. In: Heister, Hansbert / Sternberg, Harald (Red.), „Hybride Vermessungssysteme“, Stuttgart: Wittwer (DVW-Schriftenreihe, Bd. 29), S. 151-165
- KERN, FREDIE (2001): *Bauaufnahme der Synagoge in Wörlitz mittels reflektorloser Polaraufnahme*. In: Weferling, U. et al. (Hrsg.): Von Handaufmaß bis High Tech, Kolloquium an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2001, S. 198-205.
- KERN, FREDIE (2003): *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Nr. 19
- KISHIMOTO, HIROSHI (2001): *Precise reflectorless Distance Measurement*. GIM 9/2001 S.47-49

- KOGOJ, DUSAN (2001): *Fähigkeiten elektronischer Distanzmesser bei reflektorloser Distanzmessung*. AVN 5/2001 S. 186-190
- KÖHLER, MARTIN (1994): *Einige theoretische Grundlagen für die reflektorlose Messung mit dem Zeiss-Tachymeter RecElta RL*. Der Vermessungsingenieur 5/1994 S. 216-221
- KOLLER, KARIN / THÜR, HILKE (2001): *Bilddokumentation Archäologischer Baubefunde im 3-D-Modell Hanghaus 2 in Ephesos*. In: Weferling, U. et al. (Hrsg.): Von Handaufmaß bis High Tech, Kolloquium an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2001, S. 272-276
- KORTE, MICHAEL H. (1995): *Erfassungstechniken für die maßlich-graphische und alphanumerische Bestandsaufnahme*. In: Schrader, Bodo (Red.), „Gebäudeinformationssysteme“, Stuttgart: Wittwer (DVW-Schriftenreihe, Bd. 19), S. 111-124
- LUHMANN, THOMAS (2000): *Nahbereichsphotogrammetrie*. Heidelberg: Wichmann
- MADER, GERT THOMAS (2001): *Vergleich händischer und rechnergestützter Verfahren: Anwendung, Wirtschaftlichkeit*. In: Weferling, U. et al. (Hrsg.): Von Handaufmaß bis High Tech, Kolloquium an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2001, S. 99-110.
- MEIER-HIRMER, BIRGIT / MEIER-HIRMER, ROBERT (1996): *Untersuchungen zum Reflexionsverhalten des Zeiss-Tachymeters RecElta RL an strukturierten Oberflächen*. AVN 6/1996, S. 233-240
- MISCHKE, ALFRED (1996): *Distanzmessung mittels Autofokusfunktion einer CCD-Kamera*. AVN 1/1996 S. 31-39
- MISCHKE, ALFRED / KAHMEN, HERIBERT (1997): *A New Kind of Measurement Robot System for Surveying of Non Signalized Targets*. Optical 3D Measurement Techniques III; Wichmann Verlag; Heidelberg 1997; S. 311-317
- MISCHKE, ALFRED (2000): *Entwicklung eines Videotheodolit-Meßsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten*. (Dissertation) Wien, Technische Universität, Studiengang Vermessung u. Geoinformation, Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 54
- MÖSER, MICHAEL / MÜLLER, GERHARD / SCHLEMMER, HARALD / WERNER, HANS (2000): *Handbuch Ingenieurgeodäsie – Grundlagen*. Wichmann Verlag; Heidelberg
- NIEMEIER, WOLFGANG / WILD, PETER (1995). *Einsatz von Laserscannern für die Erfassung von Gebäudegeometrien*. In: Schrader, Bodo (Red.), „Gebäudeinformationssysteme“, Stuttgart: Wittwer (DVW-Schriftenreihe, Bd. 19), S. 155 – 168
- POMASKA, GÜNTER (1999): *Photorealistische Visualisierung mittels Textur-Mapping aus photogrammetrischen Aufnahmen*. In: Klemp, Dieter (Red.), „Modellieren und visualisieren auf Basis geodätisch-photogrammetrischer Messungen“, Wiesbaden: Chmielorz (VDV-Schriftenreihe Bd. 16), S. 81-88
- REITERER, ALEXANDER / KAHMEN, HERIBERT / EGLY, UWE / EITER, THOMAS (2003): *3D-Vermessung mit Videotheodoliten und automatisierte Zielpunkterfassung mit Hilfe von Interest Operatoren*. AVN 4/2003, S. 150-156
- REYER, ECKHARD / SCHERER, MICHAEL / BAMBERGER, CLAUS / JURETZKO, MANFRED / SCHILD, KAI/ SIEDER, MIKE / VÖLKNER, STEFAN (2003): *Energiegerechte Außenwandsanierung mit industriellen Vorfertigungstechniken*. Schriftenreihe des ehem. Lehrstuhls für Baukonstruktionen, Ingenieurholzbau und Bauphysik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 32, Hrsg: Reyer, E., Fraunhofer IRB Verlag
- RICHTER, REINHARD (2000): *Objektbestimmung mit berührungslosem Aufmaß*. VR 62/2 (April 2000), S. 104-112
- RICHTER, REINHARD (2001): *Polaraufnahme mit nicht-koaxialen Totalstationen*. Flächenmanagement und Bodenordnung 3/2001, S. 141-143
- ROIC, MIODRAG (1996): *Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten*. (Dissertation) Wien, Technische Universität, Studiengang Vermessung u. Geoinformation, Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 44
- ROSSIPAL-SEIFERT, SILKE (1998): *Deformationsmessungen an der Pfarr- und Stiftskirche in Laufen..* Der Vermessungsingenieur 5/1998, S.260-263
- ROUS, CLEMENS / SCHLÖSSER, DIRK (1999): *3D-Objektvisualisierung auf Basis des Internetstandards VRML*. In: Klemp, Dieter (Red.), „Modellieren und visualisieren auf Basis geodätisch-photogrammetrischer Messungen“, Wiesbaden: Chmielorz (VDV-Schriftenreihe Bd. 16), S. 41-53
- ROUS, CLEMENS (1999): *Einbindung digitaler entzerrter Bilder in virtuelle Welten*. In: Klemp, Dieter (Red.), „Modellieren und visualisieren auf Basis geodätisch-photogrammetrischer Messungen“, Wiesbaden: Chmielorz (VDV-Schriftenreihe Bd. 16), S. 54-60
- RUNNE, HEINZ (1993): *Geodätische Datengewinnung für Gebäudeinformationssysteme unter Anwendung reflektorloser tachymetrischer Verfahren*. (Dissertation) Braunschweig, Technische Universität, Geodätische Schriftenreihe, Heft 11
- SCHIRMER, WOLFGANG (1995): *Universaltheodolit und CCD-Kamera – ein unpersönliches Meßsystem für astronomisch-geodätische Beobachtungen*. DGK Reihe C, Heft 427, München
- SCHERER, MICHAEL (1995): *Ein Expertensystem zur Architekturaufnahme – Bausteine auf dem Weg dorthin*. ZfV 3/1995 S. 134-143
- SCHERER, MICHAEL (1996): *Automatische Objekterfassung durch Profilschannen*. In: Brandstätter, Gerhard / Brunner, Fritz K. / Schelling, Günther (Hrsg.), „Ingenieurvermessung 96 - XII. Internationaler Kurs für

- Ingenieurvermessung, Graz, 9.-14. September 1996“, Bonn: Fred. Dümmers Verlag (Dümmelbuch 7810), B 8
- SCHERER, MICHAEL / JURETZKO, MANFRED (2000): *Ein System zur hochgenauen polaren Fassadenvermessung*. In: Schnädelbach, Klaus / Schilcher, Matthäus (Hrsg.), „Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying“, Stuttgart: Wittwer, S. 400-405
- SCHERER, MICHAEL (2001a): *Ein System zur berührungslosen Erfassung geometrischer und bildhafter Bauwerksdaten*. In: Weferling, U. et al. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech, Kolloquium an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus*, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2001, S. 88-94.
- SCHERER, MICHAEL (2001b): *Objekterfassung: Was? – Wie? – Wozu? Eine Analyse mit Schwerpunkt bei der Bauaufnahme*. *Flächenmanagement und Bodenordnung* 4/2001 S. 188-199
- SCHERER, MICHAEL / JURETZKO, MANFRED / WASCHE, DETLEV (2003): *Extrapolationsstab und Verfahren zur Bestimmung von Raumkoordinaten*. Patentschrift DE 101 43 165 C 2
- SCHLEMMER, HARALD (1998): *Hybride Vermessungssysteme – Ein Überblick*. In: Heister, Hansbert / Sternberg, Harald (Red.), „Hybride Vermessungssysteme“, Stuttgart: Wittwer (DVW-Schriftenreihe, Bd. 29), S. 13-27
- SCHWARZ, WILLFRIED (1999a): *Stand und Entwicklung der Sensorvermessung*. *Moderne Sensorik für die Bauvermessung: Tagung Duisburg, 3. und 4. März 1999 / VDI-Gesellschaft Bautechnik-Düsseldorf: VDI Verl., 1999 (VDI-Berichte; 1454), S. 1 - 14*
- SCHWARZ, WILLFRIED (1999b): *Neuere Entwicklungen in der Ingenieurgeodäsie*. VR 61/4+5 (August 1999), S. 251-270
- SEATOVIC, DEJAN (1999): *Integration eines motorisierten Videotheodoliten in das Karlsruher Industriemesssystem*. Diplomarbeit am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (nicht veröffentlicht)
- SHEN, JUNFENG (1996): *Entwicklung eines dreidimensionalen Online-Meßsystems*. AVN 7/1996, S. 261-270
- STAIGER, RUDOLF (1998): *Verfahren der automatisierten Zielpunkterfassung und –verfolgung*. In: Heister, Hansbert / Sternberg, Harald (Red.), „Hybride Vermessungssysteme“, Stuttgart: Wittwer (DVW-Schriftenreihe, Bd. 29), S. 109 - 124
- UFFENKAMP, VOLKER (1995): *Konzeption, experimentelle Realisierung und Kalibrierung einer opto-elektronischen Schwenk-Neige-Kamera langer Brennweite*. DGK Reihe C, Heft 442, München
- VODOPIVEC, FLORJAN / KOGOJ, DUSAN (2000): *Die Geometriebestimmung des Kühlturms 4 des Wärmekraftwerkes SOSTANJ*. VR 62/1 Februar 2000, S. 51-58
- WANGERIN, GERDA (1992): *Bauaufnahme: Grundlagen, Methoden, Darstellung*. 2. Auflage, Braunschweig: Vieweg
- WASMEIER, PETER (2004): *Potenzial der Objekterkennung mit dem Servotachymeter TCA2003*. *Geomatique Suisse* 2/2004, S. 62-65
- WEFERLING, ULRICH (2002): *Bauaufnahme als Modellierungsaufgabe*. DGK Reihe C, Heft 561, München
- WEHR, ALOYSIUS (1998): *Scannertechniken zur dimensionellen Oberflächenbestimmung*. In: Heister, Hansbert / Sternberg, Harald (Red.), „Hybride Vermessungssysteme“, Stuttgart: Wittwer (DVW-Schriftenreihe, Bd. 29), S. 125 - 148
- WENDERLEIN, WERNER (2000): *Absteckbar ist alles, was berechenbar ist*. AVN 3/2000, S.91-93
- WIEDEMANN, ALBERT (2001): *Kombination von Laser-scanner-Systemen und photogrammetrischen Methoden im Nahbereich*. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 4/2001, S. 261-270
- WIEMANN, MANFRED (1995): *Die neue Freiheit: Messen mit und ohne Reflektor - Ein Testbericht über das RecElta RL von Zeiss*. *Der Vermessungsingenieur* 2/1995, S. 64-66
- WITTE, BERTOLD / SCHMIDT, HUBERT (2000): *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. *Vermessungswesen bei Konrad Wittwer*, Bd. 17, Stuttgart
- WULF, ULRIKE (2001): *Mit welcher Methode sollen wir Aufnahmen? Kombiniertes Einsatz von Aufnahmemethoden am Beispiel der „Domus Severiana“ auf dem Palatin in Rom*. In: Weferling, U. et al. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech, Kolloquium an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus*, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2001, S. 153-164.
- ZEISKE, KARL (1999): *TPS 1100 Professional Series – Eine neue Tachymetergeneration von Leica*. VR 61/2 (April 1999), S. 82 – 90
- ZÖLLER, BRUNO (1994): *Dokumentation durch Integration von Rasterbildern*. *Der Vermessungsingenieur* 5/1994, S. 208-209

Lebenslauf

26. September 1963:

Geboren in Euskirchen

1970 - 1983: Schulbildung

Grundschule in Metternich

Emil-Fischer-Gymnasium in Euskirchen, Abitur

1983 - 1986: Berufsausbildung

Ausbildung zum Vermessungstechniker bei ÖbVI Peter Teusner in Erftstadt

1986 - 1987: Wehrpflicht

Stabsdienstsoldat bei der Stabskompanie des Fernmeldekommandos 900 in Rheinbach

1987 - 1993: Studium

Studium des Vermessungswesens an der Universität Bonn, Diplom

1994 - 1996: Referendariat

Vorbereitungsdienst für die Laufbahn des höheren technischen Verwaltungsdienstes der Fachrichtung Vermessungs- und Liegenschaftswesen in Hessen, Große Staatsprüfung

1. April 1996 - 30. September 1997

Angestellt als Vermessungsassessor bei ÖbVI Peter Teusner in Erftstadt

1. Oktober 1997 – 31. Dezember 1998

Angestellt als Vermessungsassessor bei ÖbVI Friedrich Amberge in Siegburg

1. Januar 1999 – 30. September 2003

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe „Geodäsie im Bauwesen“ der Ruhr-Universität Bochum

Seit 1. Oktober 2003

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (TU)

Dank

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. An erster Stelle danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Scherer für die zahlreichen Anregungen, die hervorragende Zusammenarbeit und die Übernahme des Referates. Herrn Prof. Dr.-Ing. Bertold Witte möchte ich für die freundliche Übernahme des Korreferates meinen besten Dank aussprechen.

Meinen Bochumer Ex-Kollegen danke ich für die tatkräftige Unterstützung bei der Entwicklung des Vermessungssystems TOTAL: Herrn Dipl.-Ing. Detlev Waschke für die Arbeiten zur hard- und softwaremäßigen Adaption der Kameras, Herrn Dr.-Ing. Robert Theißen für die Entwicklung des Programms zur photogrammetrischen Orientierung, und Herrn Hermann Hesse für die feinmechanischen Arbeiten.

Ich bedanke mich beim *Bundesministerium für Bildung und Forschung* für die Förderung des F&E-Vorhabens „Energiegerechte Außenwandsanierung mit industriellen Vorfertigungstechniken“ und bei der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* für die Förderung des Projektes „Entwicklung eines Messsystems zur dreidimensionalen automatischen Erfassung von Bauwerken zur digitalen Modellbildung“, die die finanzielle Grundlage für meine Beschäftigung an der Ruhr-Universität Bochum geliefert haben.

Schließlich möchte ich mich auch bei Frau Prof. Dr.-Ing. Maria Hennes bedanken, die mir den zeitlichen Freiraum geboten hat, die Dissertation am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe fertig zu stellen.

