



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Hochschule Neubrandenburg
Studiengang Vermessungswesen

Bachelorarbeit

**Vergleich zwischen Laserscanning und Tachymetrie
bei einer Gebäudeaufnahme**

zum

Erlangen des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

Vorgelegt von: Andreas Aust



Jan Walter



Betreuer: Prof. Dr.-Ing. W. Heger
Prof. Dr.-Ing. H.-J. Larisch

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2009-0009-9

Neubrandenburg, März 2009

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Neubrandenburg, den 17.03.2009

Andreas Aust

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Neubrandenburg, den 17.03.2009

Jan Walter

Vorwort

Die Bachelorarbeit beschreibt zwei Verfahren zur dreidimensionalen Gebäudeaufnahme und die Prozesse der anschließenden Visualisierung. Zur Erfassung der Objektpunkte kamen ein Tachymeter und ein Laserscanner zum Einsatz. Die durchgeführten Schritte werden miteinander verglichen und in Hinsicht auf ihre Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit untersucht.

Diese Bachelorarbeit entstand in Kooperation zwischen Andreas Aust und Jan Walter. Zu Beginn jedes Abschnitts der nachfolgenden Kapitel ist der jeweilige Verfasser in der Fußnote vermerkt, wenn diese Textpassage nicht durch Zusammenarbeit entstanden ist.

Wir bedanken uns besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Dieter Lankow für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung. Weiter danken wir Herrn Dipl.-Ing. Martin Kiskemper, der uns jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand, Herrn Sebastian Geschwind (Feinwerktechniker) für die Anfertigung einer speziellen Messvorrichtung, unseren Betreuern, Familien und Freunden, die uns während dieser Zeit unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 6 |
| 1.1 | Projektbeschreibung | 7 |
| 1.2 | Gebäudebeschreibung | 7 |
| 2 | Grundlagen | 11 |
| 2.1 | Bedeutung von 3D-Modellen | 11 |
| 2.2 | Anwendung Laserscanning in der Wirtschaft | 12 |
| 2.3 | Tachymetrie | 13 |
| 2.4 | Phasenvergleichsverfahren | 14 |
| 2.5 | 3D-Polygonzug | 16 |
| 2.6 | Zwangszentrierung und Steckzapfensysteme | 17 |
| 2.7 | Definition Bezugssysteme | 19 |
| 3 | Verwendete Messtechnik | 21 |
| 3.1 | Tachymeter Leica TCRP1203 | 21 |
| 3.2 | Laserscanner Leica HDS6000 | 22 |
| 3.3 | Leica Träger GZR3 | 24 |
| 3.4 | Leica Prismen GPR1 | 25 |
| 3.5 | Prüfung und Kalibrierung der Messgeräte | 27 |
| 4 | Verwendete Software | 29 |
| 4.1 | Cremer Commander, Credit und Caplan | 29 |
| 4.2 | DXF-Transducor | 30 |
| 4.3 | Autodesk AutoCAD | 33 |
| 4.4 | Leica Cyclone | 33 |
| 5 | Vorbereitung und Durchführung der Messungen | 35 |
| 5.1 | Vorbereitungen | 35 |
| 5.2 | Aufbau des Festpunktfeldes | 37 |
| 5.3 | Durchführung der Tachymetermessung | 39 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.4 | Durchführung der Scannermessung | 41 |
| 5.5 | Durchführung der Gebäudeinnenaufmessung | 42 |
| 6 | Auswertung der Messdaten | 44 |
| 6.1 | Auswertung der Tachymetermessung | 44 |
| 6.1.1 | Auswertung der Festpunktfeldmessung | 44 |
| 6.1.2 | Auswertung der Gebäudeaufnahme | 47 |
| 6.1.3 | Erstellung des 3D-Modells | 49 |
| 6.1.4 | Probleme bei der Durchführung, Auswertung und Modellierung | 50 |
| 6.1.5 | Überprüfung der Reflexionseigenschaften verschiedener Materialien | 52 |
| 6.1.6 | Überprüfung auf Abweichung des Laserstrahls | 56 |
| 6.2 | Auswertung der Laserscannermessung | 59 |
| 6.2.1 | Verknüpfung der Standpunkte | 59 |
| 6.2.2 | Modellierung der Punktwolken | 60 |
| 6.2.3 | Probleme bei der Auswertung und Modellierung | 61 |
| 7 | Vergleich beider Aufnahmeverfahren | 64 |
| 7.1 | Koordinatenbestimmung einer Einzelmessung | 64 |
| 7.2 | Vergleich von Spannmaßen zu Modellmaßen | 68 |
| 7.3 | Zusammenfassender Vergleich | 69 |
| 8 | Schlussfolgerung | 73 |
| | Literaturverzeichnis | 74 |
| | Abbildungsverzeichnis | 76 |
| | Tabellenverzeichnis | 78 |
| | Anhang | 79 |

Kapitel 1

Einleitung

Das Aufmessen von Gebäuden ist längst nicht mehr nur Aufgabe der Liegenschaftsvermessung, wo der Nachweis von der Lage der Gebäude in amtlichen Karten und Plänen und deren Zusatzinformationen (Geschosszahl, Dachform) im Vordergrund steht. Mit der immer moderner werdenden Messtechnik und der Weiterentwicklung der Auswertungssoftware ergeben sich auch für die Bereiche der Ingenieurvermessung immer neuere Anwendungsgebiete zur Erfassung und Darstellung von Objekten. Hierbei geht es nicht nur um die örtliche Lage eines Bauwerkes sondern um eine verformungsgerechte Aufnahme sowie einer dreidimensionalen Visualisierung des Objektes.

Besonders hohe Genauigkeitsanforderungen von unter einem Millimeter werden dabei an die verformungsgerechte Aufnahme von Ingenieurbauwerken (zum Beispiel Brücken, Tunnel, Staudämme) gestellt. Durch die Erfassung der inneren Geometrie in einem bestimmten Zeitintervall, aufgenommen mit einem Tachymeter oder einem Nivelliergerät, können Rückschlüsse auf das Deformationsverhalten des Bauwerkes getroffen werden.

Werden Anforderungen an eine räumliche Erfassung von Objekten gestellt, kommen vorrangig Laserscanner zur Anwendung. Weiterhin lassen sich hierbei auch Grundvermessungen (Grund- und Aufriss) durchführen, um beispielsweise exakte Pläne von Baudenkmalern oder Altbauten zu erstellen. Für räumliche Aufnahmen in kleinerem Umfang können auch Tachymeter mit einer reflektorlosen Distanzmessung verwendet werden. Größere Objekte (zum Beispiel Städte) werden mittels AIRBORNE LASER-SCANNING bzw. fotogrammetrisch durch Überfliegung aufgemessen.

Durch die Kombination von Tachymetrie (Polygonzug), Laserscanning sowie ggf. einer fotogrammetrischen Aufnahme können Gebäude direkt im jeweiligen Bezugssystem aufgemessen und dreidimensional dargestellt werden. Je nach Anforderung können zusätzlich Grundrisse oder Gebäudeschnitte (horizontal und vertikal) an beliebigen Stellen angelegt werden.

1.1 Projektbeschreibung¹

In dieser Bachelorarbeit wird ein Vergleich zwischen einem Laserscanner und einem Tachymeter angestellt. Dabei kamen ein Ingenieurtachymeter TCRP1203 und ein Laserscanner HDS6000 zur Anwendung, jeweils von der Firma LEICA GEOSYSTEMS AG. Ziel war das verformungsgerechte Aufmaß eines Gebäudes und dessen Visualisierung in Form eines dreidimensionalen Modells.

Als Messobjekt diente das Funktionshaus der BETHESDAKLINIK in Neubrandenburg, da dieses vom Aufbau in seiner Geometrie komplex und umfangreich gestaltet ist. Die komplette Außenfassade des Pflegegebäudes sowie die im Osten und Westen angrenzenden Innenhöfe wurden aufgemessen. Mit dem Laserscanner wurden zusätzlich das Foyer und der Patientenflur in der Ebene E 0 (Erdgeschoss) aufgenommen.

Als Ergebnis sind Aussagen über den zeitlichen Aufwand der Messung, der Auswertung und die ermittelten Genauigkeiten getroffen worden. Um die Messgenauigkeiten der örtlichen Gebäudeaufnahme besser beurteilen zu können, wurden Testmessungen unter idealen Bedingungen im Ingenieurlabor im Haus 2 der Hochschule Neubrandenburg (Fachbereich Landschaftsarchitektur, Geoinformatik, Geodäsie, Bauingenieurwesen) durchgeführt. Zudem wurden Spannmaße am Gebäude abgegriffen, die mit den Modellmaßen verglichen wurden. Aus den Ergebnissen der Auswertung und der Untersuchungsmessungen wurden Aussagen über die Wirtschaftlichkeit und die Anwendungsgebiete der Messverfahren getroffen.

Die Idee, eine dreidimensionale Gebäudeaufnahme mit zwei unterschiedlichen Messverfahren als Thema dieser Bachelorarbeit zu wählen, entstand durch ein persönliches Gespräch mit dem Geschäftsführer Herrn Dieter Lankow vom Ingenieurbüro VERMESSUNGS-SERVICE LANKOW. Zum damaligen Zeitpunkt arbeitete Herr Lankow auf dem Gelände des Klinikums Neubrandenburg. Die Aufgabe des Vermessungsbüros bestand darin, die anrechenbaren Geschossflächen, getrennt nach Brutto- und Netto-Geschossflächen, für die Abwasserbeseitigungsabgabe des Schmutzwassers auf dem Gelände des Klinikums zu ermitteln. Die Bestimmung der Netto-Geschossflächen beinhaltet die Nutzflächen, die Funktionsflächen und die Verkehrsflächen pro Objekt auszuweisen.

1.2 Gebäudebeschreibung²

Die BETHESDAKLINIK (Haus G) ist Teil des DIETRICH-BONHÖFFER-KLINIKUMS (siehe Abbildung 1.1) in Neubrandenburg und liegt im Stadtgebiet Neubrandenburg Ost. Der

¹von Andreas Aust

²von Andreas Aust

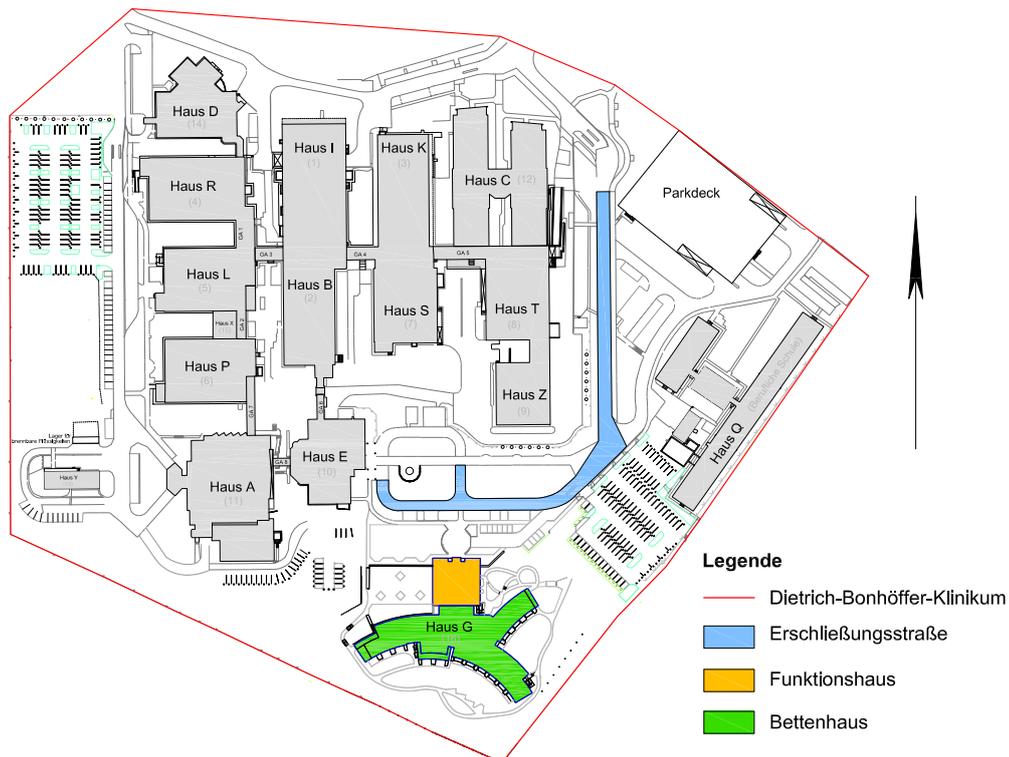


Abbildung 1.1: DIETRICH-BONHÖFFER-KLINIKUM [Quelle: ING.-BÜRO LANKOW]

Gebäudekomplex befindet sich im Süden des Klinikgeländes und ist an einer Hanglage errichtet worden. Die Höhendifferenz zwischen der Ober- und Unterkante beträgt rund zehn Meter. Der Komplex befindet sich in der Gemarkung Neubrandenburg, Flur 6 und besteht aus den Flurstücken 38/12 und 38/13.

Die Planung zum Bau der BETHESDAKLINIK wurde durch den KLINIK-SERVICE-NEUBRANDENBURG im Jahre 1999 vorgenommen. Es handelt sich hierbei um eine geriatrische Rehabilitationsklinik, die sich in unmittelbarer Nähe zum eigentlichen Klinikum befindet, um den Patienten eine klinikumsnahe Behandlung zu ermöglichen. Der medizinische Bereich der Geriatrie (auch Altersmedizin oder Altersheilkunde genannt) befasst sich mit der Lehre von den Krankheiten alter Menschen und soll im Gegensatz zur heilenden Palliativmedizin die Beschwerden nur lindern. In dieser geriatrischen Klinik wird den Menschen wieder zu einem besseren Leben verholfen, in dem sie auf ihren neuen Alltag vorbereitet werden. Ein wesentlicher Unterschied zu einer normalen Klinik ist der, dass die Patienten hier weitestgehend alleine wohnen und essen können und trotzdem zielgerichtet auf ihre Krankheit hin rehabilitiert werden. [19, 20]

Innerlich und äußerlich unterscheidet sich die BETHESDAKLINIK grundlegend von den übrigen Gebäuden des Klinikums. Letztere besitzen eine rechteckige Grundfläche

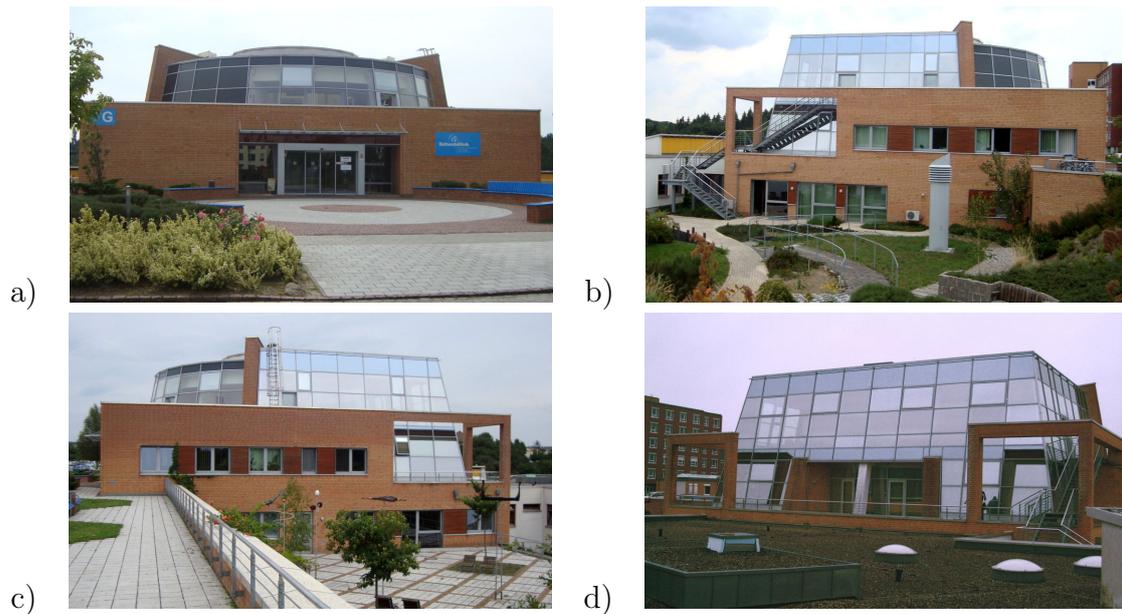


Abbildung 1.2: Funktionshaus - Ansicht a) Nord, b) Ost, c) West, d) Süd

und sind als Hochbauten konstruiert. Die wesentliche Strukturierung der Raumaufteilungen sowie der tragenden Wände ist bei allen Etagen nahezu unverändert.

Die BETHESDAKLINIK hingegen ist architektonisch in ihrer Form und Raumaufteilung wesentlich anspruchsvoller konstruiert und erbaut. Im Grunde genommen besteht die BETHESDAKLINIK aus zwei verschiedenen Gebäudesegmenten (siehe Abbildung 1.1).

Nördlich zur Erschließungsstraße gerichtet befindet sich das Funktionshaus (Erschließungsturm). Dieses Gebäude bildet den Haupteingang zur Klinik und stellt eine Verbindung zum Bettenhaus dar. Das Funktionshaus besitzt vier Etagen, von denen zwei Kellergeschosse sind. In den jeweiligen Ebenen befinden sich die Praxen der Ärzte, Therapieräume, ein Gymnastikraum, mehrere Technikräume und ein Seminarraum.

Die tragenden Konstruktionen der Etagen E 0, E -1 und E -2 (1. und 2. Untergeschoss) bestehen aus einem Stahlskelettrahmen mit ausgefächtem Mauerwerk. Die mit einer Wärmedämmung isolierten Außenwände bestehen aus Klinkern. Die funktionalen Nebenräume, wie zum Beispiel sanitäre Anlagen, sind im Trockenbau ausgeführt. Die Ebene E 1 (1. Obergeschoss) besteht aus einer Stahlskelettkonstruktion mit Vollverglasung, welche auf der Nordseite als Rundbau ausgeführt ist (siehe Abbildung 1.2 a). Auf der Ost-, West- und Südseite bildet diese Konstruktion ebene Flächen (siehe Abbildung 1.2 b bis d), wobei die südliche Fläche bis zur Ebene E 0 hinuntergezogen ist.

Nach Süden schließt sich das Bettenhaus ab der Ebene E -1 an die Rückseite des Funktionshauses an. Aufgrund der Hanglage besitzt dieses Gebäude eine gebogene und lang gestreckte Form, die sich dem topografischen Geländeverlauf anpasst. Im Gegen-

satz zum Funktionshaus ist das Bettenhaus als zweigeschossiges Gebäude ohne Kellerräume erbaut worden. Hier befinden sich hauptsächlich die Patientenzimmer, aber auch Therapie- und Technikräume und der Speisesaal. Die tragenden Konstruktionen bestehen auch hier aus einem Stahlskelettrahmen mit ausgefächtem Mauerwerk. Analog zum Funktionshaus sind die Nebenräume ebenfalls als Trockenbau ausgeführt. Die Außenfassade besteht aus einem weißen Strukturputz mit einer Wärmedämmschicht. Die Patientenzimmer sind größtenteils südlich, mit Blick auf das gegenüberliegende Waldgebiet ausgerichtet. Sie sind als Ein- bzw. Zwei-Bett-Zimmer eingerichtet und besitzen je nach Etage entweder eine Terrasse oder einen Balkon, welche die sonnige Lage noch besser nutzbar machen. [19]

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Bedeutung von 3D-Modellen¹

Bereits im 17. Jahrhundert entstanden die ersten perspektivischen Ansichten von Städten in Form von Kupferstichen. Vergleichbare Darstellungen sind bis heute zum Beispiel in touristischen Karten sehr beliebt. Mangels einfacher Reproduktionstechniken findet man “echte” dreidimensionale Modelle, etwa von Städten, meist nur als Unikate in Rathäusern oder Museen. Dank der digitalen Entwicklung gewinnen virtuelle dreidimensionale Modelle zunehmend an Bedeutung. Sie bieten die Möglichkeit zu automatischen Auswertungen und Simulationen und sind damit für Stadtplaner und Politiker eine bessere Diskussionsgrundlage als zweidimensionale Stadtpläne. Sichtachsen und die Sichtbarkeit von Neubauprojekten oder die Einbettung in die Umgebung können so besser beurteilt werden. Durch die Verknüpfung von statistischen Daten können Siedlungsdichten, Gebäudevolumen etc. besser berechnet und veranschaulicht werden. Rettungs- und Sicherheitskräfte können damit in Ausbildungssimulationen trainiert werden. Navigationssysteme in Autos können mit Hilfe der Daten solcher Modelle Informationen räumlich darstellen. Mobilfunknetzbetreiber verwenden dreidimensionale Modelle, um mittels Simulationen der Ausbreitung von Funkwellen geeignete Standpunkte für Sender zu planen. Bei der Umweltplanung und Untersuchung des Stadtklimas oder der Lärm- und Schadstoffbelastungen hat sich die Verwendung von 3D-Stadtmodellen als nützlich herausgestellt. Auch beim Katastrophenmanagement können mittels dieser Modelle wichtige Informationen gewonnen werden, um zum Beispiel den Flutverlauf bei einem Hochwasser besser vorhersagen zu können. [18]

3D-Modelle bieten somit die Möglichkeit, Situationen theoretisch durchzuspielen und bei Planungen auf eventuelle Probleme aufmerksam zu machen. Produktionspro-

¹von Jan Walter

zesse werden mittels solcher Simulationen, beispielsweise in der Automobilindustrie, analysiert und optimiert, um so Kosten und Zeitaufwand zu senken. [17]

Auch bei der Bundeswehr plant man den Einsatz von dreidimensionalen Stadtmodellen, um etwa Evakuierungsszenarien im Ausland besser planen zu können. Die Visualisierung von wichtigen Gebäuden wie Botschaften spielt dabei eine wesentliche Rolle. Es wurde erkannt, dass ein bestimmtes System (BLENDER) aus der Spielewelt dreidimensionale Stadtmodelle viel besser darstellt als herkömmliche Systeme. Mit einem solchen Projekt beschäftigt sich beispielsweise eine Arbeitsgruppe der Hochschule Neubrandenburg in Zusammenarbeit mit der Bundeswehr. [3]

2.2 Anwendung Laserscanning in der Wirtschaft²

Mittels dreidimensionaler Modelle von Fabrikhallen oder Anlagen, die teilweise halbautomatisiert aus Laserscandaten generiert werden, können für spätere Neu- und Umbaumaßnahmen problemlos 2D-Konstruktionspläne erstellt oder der Ist-Zustand einer Fabrik oder Anlage dokumentiert werden.

In der Architektur- und Bauingenieurbranche können heutzutage aus 3D-Modellen Grundrisse, Frontansichten und Höhenschnitte erzeugt werden. Die Gebäude- und Raumplanung kann somit vollkommen virtuell vorgenommen werden, wodurch ganze Räume oder Gebäude vor ihrer eigentlichen Entstehung begehbar werden.

Im Bereich des Denkmalschutzes werden durch Lasermesssysteme Bestands- und Schadenserfassungen durchgeführt, wobei durch sehr hohe Abtastraten und einer Entfernungsauflösung von wenigen Millimetern selbst eine Erfassung von feinsten Strukturen und Details möglich ist. Damit erhält man eine Grundlage für eine originalgetreue Rekonstruktion von ganzen Objekten oder auch nur Teilen davon, und das zu jeder Zeit. Mit diesen Daten können auch virtuelle Realitäten geschaffen werden, die nicht nur in der Film- und Computerindustrie genutzt werden, sondern auch in der Architektur.

In der Filmbranche haben diese virtuellen Realitäten einen entscheidenden Vorteil: Durch sie lassen sich Spezialeffekte (Explosionen etc.) mit digitaler Technik realisieren, ohne dabei Gefahrensituationen für andere reale Objekte (Gebäude, Denkmäler, Fahrzeuge etc.) oder beteiligte Menschen zu schaffen. Damit wird eine Möglichkeit zur Verfügung gestellt, mit der man Szenarien entwerfen kann, deren Realisierung früher undenkbar gewesen wäre.

Das Verfahren des 3D-Laserscannings wird ebenso in den Bereichen Infrastruktur und Landschaft bei der Vermessung von Schienen-, Straßennetzen, Tunneln, Städten

²von Jan Walter

und Brücken, Bäumen und Wäldern (Inventur, Holzqualität) oder auch bei Langzeitentfernungsmessungen (Gebäude, Erdreich etc.) verwendet.

Aufgrund der hohen Datenerfassungsrate ist eine präzise 3D-Umgebungsvermessung auch von bewegten Plattformen aus möglich – bei Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h. Dies spielt besonders bei Tunnel-, Bahn- und Straßenvermessungen eine wichtige Rolle. Laserscannersysteme dienen dabei der Geometrieerfassung und liefern unabhängig von der Beleuchtung hochauflösende Grauwertbilder.

Auch im Bereich der Forensik gewinnen Laserscannersysteme an Bedeutung. Ermittler erhalten damit ein Werkzeug, das in nur wenigen Minuten genaue Messdaten von Tat-, Unfall- und Ereignisorten sowohl in der freien Natur als auch in Innenräumen aufnimmt. Den Sachbearbeitern dienen diese Daten zur schnellen Ermittlungsunterstützung, um den jeweils vermessenen Ort "messtechnisch einzufrieren" und zu dokumentieren. Diese Auswertungen sind gerichtlich anerkannt. Die Erfassung von Bremsspuren oder Deformationen an Fahrzeugen ist ebenso möglich. Dadurch kann die Frage nach den möglichen Unfallursachen leichter beantwortet und die Abläufe besser analysiert werden.

Genauso ist die vollständige Spurensicherung an Ereignisorten und die Geometrieerfassung vor Ort von großer Bedeutung. In der Regel wird beim Einsatz eines Laserscanners ein Tatort von verschiedenen Standpunkten erfasst, die durch Verknüpfen jedem Betrachter einen Eindruck der gesamten Lage vor Ort geben. Dabei sind Laserscanner inzwischen so flexibel einsetzbar, dass sogar in engsten Räumen (zum Beispiel unter einem Stuhl) einwandfrei gearbeitet werden kann. Aus den erfassten Punktwolken (Listen von kartesischen 3D-Koordinaten) können noch am Ereignisort 3D-Pläne, Grundrisse, Horizontal- und Vertikalschnitte geliefert werden.

Durch die Kombination von 2D-Fotos (beispielsweise aus Bildern einer Überwachungskamera) mit den Laserscannerdaten kann in einer Spezialsoftware eine virtuelle Figur so in der Punktwolke positioniert und anhand des Fotos angepasst werden, dass zum Beispiel die Tätergrößenbestimmung im Rahmen der gewünschten Genauigkeit erfolgt. Das hat nicht nur eine immense Zeitersparnis zur Folge, sondern bietet auch den Vorteil, dass der Täter nicht aufrecht stehen muss. [23]

2.3 Tachymetrie³

Unter dem Begriff Tachymetrie (griechisch: Schnellmessung) versteht man ein klassisches Messverfahren zur Bestimmung der Lage- und Höhenkoordinaten eines Geländepunktes durch das gleichzeitige Messen von Entfernung, Horizontalrichtung und Hö-

³von Andreas Aust

henunterschied mit einem Tachymeterinstrument. Dabei wird jeder Neupunkt durch Polarkoordinaten festgelegt, wobei sich der Nullpunkt des Koordinatensystems im Instrumentenstandpunkt befindet.

Für die Durchführung von Tachymeteraufnahmen in besonders bewegtem Gelände wurden früher Theodolite oder Bussolen mit einer speziellen optischen Streckenmeseinrichtung genutzt. Heutzutage werden elektronische Tachymeter mit einer elektronischen Strecken- und Winkelmeseinheit eingesetzt. Der wesentliche Vorteil der elektronischen Tachymeter gegenüber den optischen Tachymetern ist, dass größere Reichweiten in kürzeren Messzeiten mit höherer Genauigkeit erzielt werden können und zudem der Datenfluss vollständig automatisiert verläuft. In fast flachem bis ebenem Gelände finden die Nivelliergeräte mit einem Horizontalteilkreis ihren Hauptanwendungsbereich.

Die topografische Vermessung verfolgt das Ziel, Geländeformen (zum Beispiel Kuppe, Sattel) und wesentliche topografische Merkmale (zum Beispiel Gebäude, Straßen-, Wege- und Gewässerläufe) nach Lage und Höhe zu erfassen und diese für die Herstellung und Aktualisierung in amtlichen topografischen Landeskartenwerken darzustellen. Des Weiteren werden für bautechnische Planungen und Ausführungen (zum Beispiel Ingenieurbauten) aktuelle Lage- und Höhenpläne (Tachymeterpläne) benötigt, die als Grundlage in den Maßstäben 1:500 bis 1:5000 hergestellt werden und einen für den jeweiligen Zweck abgestimmten Inhalt besitzen. Neben der analogen Kartenform werden auch in zunehmendem Maße digitale Messergebnisse in Form eines digitalen Geländemodells (DGM) benötigt. Inhaltlich umfasst das DGM sowohl das digitale Höhenmodell (DHM) als auch das digitale Situationsmodell (DSM).

Die Wahl des Aufnahmeverfahrens richtet sich nach Form und Größe des Messobjektes und den Neigungs- und Sichtverhältnissen im Gelände. Für besonders langgestreckte und linienhafte Objekte (zum Beispiel Straßen, Eisenbahnschienen) wendet man das Verfahren der Längs- und Querprofilmessung an. Für die Erfassung von großflächig ausgedehnten Objekten (zum Beispiel Sportanlagen, Grünflächen) kann die Aufnahme des Geländes durch ein Flächennivellement, Tachymetrie, GPS oder durch Fotogrammetrie erfolgen. [2, 5, 21]

2.4 Phasenvergleichsverfahren⁴

Das Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens findet in vielen Messgeräten Anwendung und soll nachfolgend beschrieben werden.

Beim Phasenvergleichsverfahren wird auf eine kontinuierlich ausgestrahlte Trägerwelle ein sinusförmiges Signal aufmoduliert. Daraufhin dient die aufmodulierte Welle als

⁴von Jan Walter

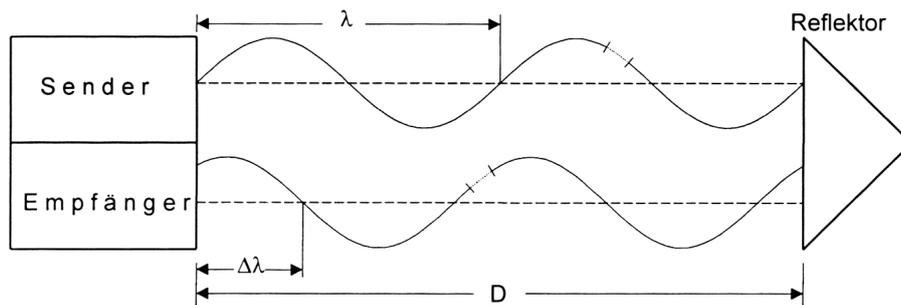


Abbildung 2.1: Messprinzip [4]

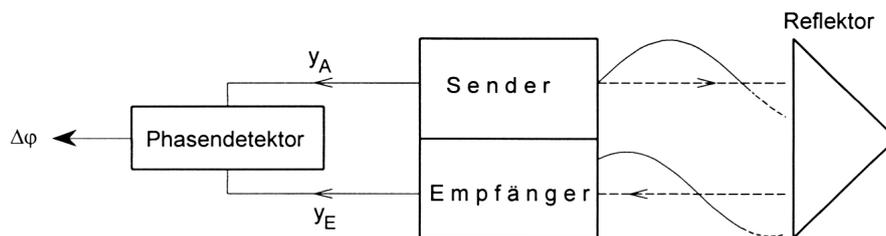


Abbildung 2.2: Phasenvergleich [4]

Maßeinheit für die Streckenmessung. Die Wellenlänge λ wird dabei nach der einfachen Beziehung

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

durch eine vorgegebene Wellenlänge festgelegt.

Die vom Sender abgestrahlte Messwelle wird vom Ziel zum Empfänger reflektiert (siehe Abbildung 2.1). Die über die doppelte Messstrecke D gelaufene Welle trifft dort mit einer Phasenverschiebung gegenüber der ausgesandten Welle ein. Dabei setzt sich die durchlaufene Strecke $2D$ aus einem Vielfachen N der Modulationswellenlänge λ und dem der Phasenverschiebung entsprechenden Wellenreststück $\Delta\lambda$ zusammen.

$$2D = N \cdot \lambda + \Delta\lambda \quad \text{oder} \quad D = N \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{\Delta\lambda}{2}$$

Es müssen also das Wellenreststück $\Delta\lambda$ und die Anzahl N ermittelt werden.

Zunächst wird das Wellenreststück $\Delta\lambda$ durch Messen der Phasenverschiebung zwischen ausgesandter und empfangener Welle bestimmt (siehe Abbildung 2.2).

Mit den nachfolgenden Formeln werden das ausgesandte Sinussignal y_A und das empfangene Signal y_E beschrieben:

$$y_A = A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{mit} \quad \omega = 2\pi f$$

$$y_E = \bar{A} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_{2D}).$$

Somit ist das empfangene Signal gegenüber dem ausgesandten um ϕ_{2D} phasenverschoben mit

$$\phi_{2D} = N \cdot 2\pi + \Delta\phi.$$

Hierbei entspricht 2π einer vollen Wellenlänge λ . Der Phasendetektor kann von der Phasenverschiebung ϕ_{2D} nur den Anteil $\Delta\phi$ bestimmen. Aus dem Anteil $\Delta\phi$ wird $\Delta\lambda$ wie folgt berechnet:

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \lambda$$

Durch die Bestimmung des Wellenreststückes $\Delta\lambda$ ist das Ergebnis noch nicht eindeutig, da die Anzahl N der ganzen Wellenlängen bzw. Phasenverschiebungen bisher noch unbekannt ist. Wenn man die Maßstabswellenlänge λ so wählen könnte, dass sie größer als die zu messende doppelte Maximaldistanz wäre, würde man ein eindeutiges Ergebnis erhalten. Dann entspräche die gemessene Phasenverschiebung $\Delta\phi$ und damit das Wellenreststück $\Delta\lambda$ der gesuchten doppelten Strecke $2D$. Dem steht jedoch entgegen, dass die Auflösung bei der Phasenmessung auf etwa $1/5000$ bis $1/10000$ der verwendeten Maßstabswellenlänge beschränkt ist. Somit wäre bei einer Maßstabswellenlänge von zum Beispiel 10 km eine Messung nur auf 1 m bis 2 m genau und nur die Bestimmung des Grobwertes möglich. [4]

2.5 3D-Polygonzug⁵

Ein 3D-Polygonzug unterscheidet sich von einem normalen Linienpolygonzug (2D) dadurch, dass für die Berechnung der Neupunktkoordinaten nicht nur der Brechungswinkel β und die Schrägstrecke d gemessen werden, sondern zusätzlich auch die Zenitdistanz (Vertikalwinkel) z (siehe Abbildung 2.3). Somit ist ein 3D-Polygonzug eine Kombination aus polaren Anhängen und trigonometrischer Höhenbestimmung.

Ein wesentlicher Vorteil der trigonometrischen Höhenbestimmung gegenüber dem geometrischen Nivellement ist, dass längere Entfernungen (Zielweiten) und größere Höhenunterschiede mit weniger Instrumentenaufstellungen überbrückt werden können. Die eingesparte Zeit erhöht die Wirtschaftlichkeit maßgeblich.

⁵von Andreas Aust

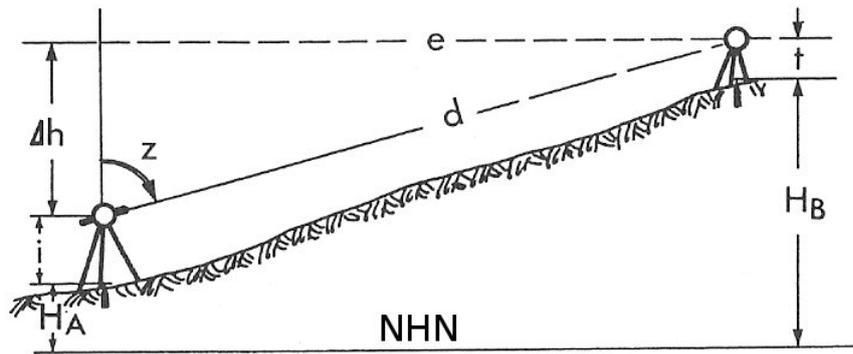


Abbildung 2.3: Prinzip der trigonometrischen Höhenmessung [21]

$$\Delta h = \cot z \cdot e = \cos z \cdot d$$

$$H_B = H_A + i + \Delta h - t$$

Die Genauigkeiten der gemessenen Höhenunterschiede hängen vor allem von den Zielweiten ab. Bei Zielweiten bis zu 250 m sind Standardabweichungen in der Höhe von $\sigma \leq 5 \text{ mm}$ zu erreichen. Ab 250 m Entfernung wirken sich besonders die Erdkrümmung und die Refraktion auf das Ergebnis aus und verfälschen dieses, sodass nur noch Genauigkeiten von 1 cm – 2 cm zu erwarten sind. Aber nicht nur die Erdkrümmung und die Refraktion haben Einfluss auf das Ergebnis. Ebenso wirken sich vorhandene Instrumentenfehler (Stehachs-, Zielachs- und Kippachsfehler), eine ungenaue Bestimmung der Kippachshöhe oder auch eine unsichere Aufstellung des Stativs negativ auf das Ergebnis aus.

Das Anlegen und Messen eines Polygonzuges bezeichnet man als Polygonieren. Die Polygonierung wird für vermessungstechnische Aufgaben verwendet, wie zum Beispiel das Anlegen und Verdichten von Lagefestpunktnetzen, die Bestimmung von Aufnahme-standpunkten im Rahmen der Tachymetrie, die Lagebestimmungen von Trassenpunkten und das Anlegen und Verdichten von Baulagenetzen. [21]

2.6 Zwangszentrierung und Steckzapfensysteme⁶

Das Messen unter Zwangszentrierung bezeichnet eine Anwendung, bei der eine gleichbleibende Zentrierung des Dreifußes über einem Bodenpunkt garantiert werden soll. Bei Mehrfachaufstellungen wird das Stativ mit Dreifuß und Zentriereinrichtung einmalig über dem Bodenpunkt aufgebaut, sodass die Messgeräte (Theodolit, Tachymeter)

⁶von Andreas Aust

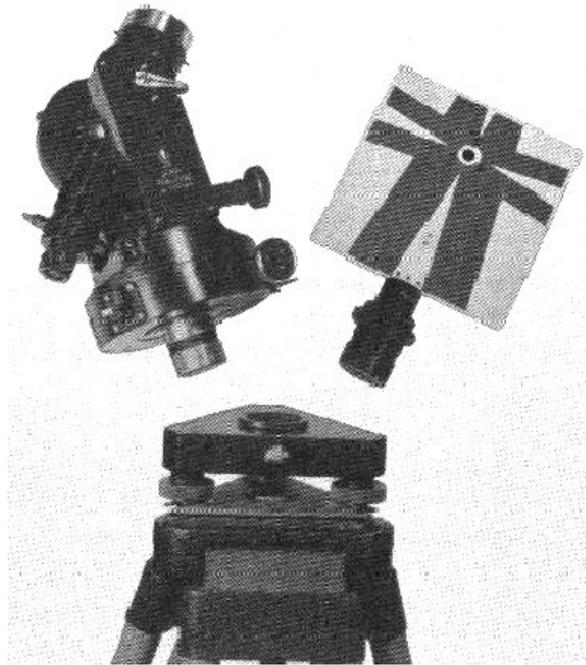


Abbildung 2.4: Zwangszentrierung mit zentralem Steckzapfen und seitlicher Klemme [5]

und die Zieleinrichtungen (Zieltafeln, Reflektoren) mittels ihrer mechanischen Einrichtung untereinander in den Dreifußen ausgetauscht werden können. Dadurch bleibt die einmal vorgenommene Zentrierung zwangsläufig innerhalb von hundertstel bis zehntel Millimeter an der gleichen Position erhalten. [2, 5, 16]

Ein Vorteil der Zwangszentrierung liegt in der Zeitersparnis, da auf einem Punkt mit Mehrfachaufstellung nur einmal zentriert werden muss. Außerdem wird die Messgenauigkeit gesteigert, da sich die Einflüsse von Zentrierungsungenauigkeiten auf das Messergebnis verringern. Somit ergibt sich die Möglichkeit, bei umfangreichen Polygonzügen sehr rationell zu arbeiten. [21]

Prinzipiell unterscheidet man heute zwischen Steckzapfensystem und Drei-Klauen-System. Bei dem Steckzapfensystem handelt es sich um einen zylindrischen Steckzapfen mit 34 mm Durchmesser und einer Steckhülse im Dreifuß mit seitlicher Klemmvorrichtung (siehe Abbildung 2.4). In der Steckhülse ist eine Anlegekante eingearbeitet, an der der Steckzapfen durch die seitliche Klemme symmetrisch angedrückt wird. So entsteht eine Dreipunktauflage. Die Anlegekante schließt mit der Stehachse einen Winkel von 100 gon ein. Diese Art der Zwangszentrierung wird in Instrumenten der Firmen BREITHAUPT, ZEISS JENA und ZEISS OBERKOCHEN angewendet. [2, 5]

Bei der tellerförmigen oder Drei-Klauen-Zwangszentrierung besteht der Dreifuß aus einer tellerförmig ausgebildeten Auflagefläche, auf der die Messinstrumente mit ihrer

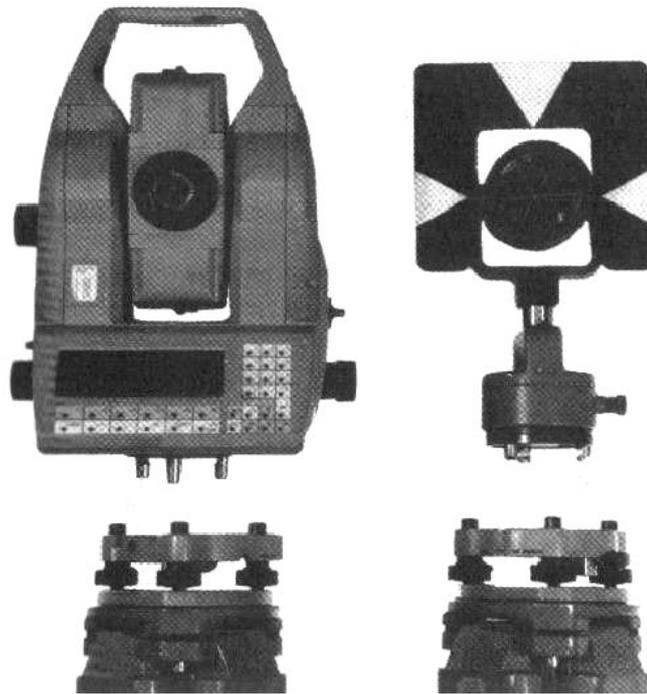


Abbildung 2.5: Zwangszentrierung mit drei Halteklauen und zentral gelagertem Drehverschluss [21]

plan geschliffenen Grundplatte in drei Punkten aufgesetzt werden (siehe Abbildung 2.5). Die Zentrierungsgenauigkeit zwischen dem Innendurchmesser des Dreifußes und dem Außendurchmesser des Zentrierflansches des Instrumentes liegt etwa bei $0,1\text{ mm}$. Ein zentral gelagerter Drehverschluss verriegelt die drei Zapfen (Halteklauen) des Zentrierflansches in der Zentrierbuchse des Dreifußes. Diese Art der Zwangszentrierung wird in Instrumenten von WILD/LEICA, NIKON, PENTAX, SOKKIA, KERN und TOPCON angewendet. [2, 5]

2.7 Definition Bezugssysteme

Laut MÖSER [15] ist ein geodätisches Bezugssystem bzw. Referenzsystem ein physikalisch definiertes Bestimmungssystem zur Festlegung der räumlichen Positionen, der Lage, der Höhe oder der Schwere von Punkten.

Zu den wesentlichen Bestandteilen eines Bezugssystems gehören der Bezugsrahmen und das Koordinatensystem. Der Bezugsrahmen legt die äußere Grenze eines vereinbarten Bezugssystems durch ausgewählte und identifizierbare Bezugspunkte fest. Die Bestimmung dieser Koordinaten erfolgt dabei durch geodätische Messungen. Das Koordinatensystem ist der räumliche Anteil eines Bezugssystems, in dem Punkte innerhalb des Bezugsrahmens mit Koordinaten versehen werden. Das Bezugssystem legt den Ur-

sprung sowie die fundamentale Richtung des Koordinatensystems fest und beinhaltet alle Parameter (zum Beispiel Konstanten, Modelle und Algorithmen), um beobachtete Größen in einem bestimmten System festzulegen.

Je nach Art der Bestimmungsgröße unterscheidet man zwischen einem Lagebezugssystem, einem Höhenbezugssystem oder einem Schwerebezugssystem.

Kapitel 3

Verwendete Messtechnik

3.1 Tachymeter Leica TCRP1203¹

Das Tachymeter TCRP1203 (siehe Abbildung 3.1) ist eine vielseitig einsetzbare Totalstation aus der TPS1200 Serie der Firma LEICA GEOSYSTEMS AG. Im Vergleich zum einfachen elektronischem Tachymeter TC1200 derselben Reihe verfügt das TCRP1203 zusätzlich über die Fähigkeit Strecken reflektorlos zu messen. Zudem ist es motorisiert, besitzt eine automatische Zielerfassung (ATR, englisch: Automatic Target Recognition), die POWERSEARCH-Funktion und eine Zieleinweishilfe (EGL, englisch: Emitting Guide Light). Mit diesen Funktionen und der Fernbedienung RX1220, die mit ihrer Halterung an einem 360° Reflektorstab befestigt wird, kann mit dem TCRP1203 im Einmann-Betrieb gearbeitet werden. Weiter bietet es die Möglichkeit, durch Aufstecken eines GPS-Systems (GPS1200) tachymetrische Messungen mit GPS-Daten zu kombinieren. Die Verbindung dieser beiden Geräte wird als SmartStation bezeichnet.

Das TCRP1203 wird mit einer Lithium-Ionen-Batterie betrieben, die nach den Herstellerangaben mindestens 5 Stunden halten soll.

Die Richtungsmessgenauigkeit des Tachymeters beträgt $3''$ bzw. 1 mgon . Der elektronische Zwei-Achskompensator mit einer Einstellgenauigkeit von $1''$ bzw. $0,3\text{ mgon}$ arbeitet in einem Bereich von $4'$ bzw. $0,07\text{ gon}$.

Die Distanzmessung funktioniert nach dem Phasenvergleichsverfahren (Abschnitt 2.4) mit einem koaxialen, unsichtbaren infraroten Laser. Dabei können in Abhängigkeit von den verwendeten Reflektoren oder Prismen Strecken von bis zu 3000 m bestimmt werden, günstige atmosphärische Bedingungen vorausgesetzt. Im normalen Messmodus beträgt die Standardabweichung $2\text{ mm} + 2\text{ ppm}$, wobei das Ergebnis typischerweise nach $1,5$ Sekunden vorliegt.

¹von Jan Walter



Abbildung 3.1: TCRP1203 [9]

Bei der reflektorlosen Messung wird zwischen zwei Betriebsarten unterschieden: PINPOINT R100 oder PINPOINT R300. PINPOINT R100 funktioniert nach dem Phasemessprinzip. In dieser Betriebsart können bei günstigen Reflexionseigenschaften der Oberfläche, auf die gemessen wird, bis zu 170 m überbrückt werden. PINPOINT R300 arbeitet mit dem von LEICA entwickelten Verfahren SYSTEM ANALYZER, welches Phasen- und Impulsmessverfahren kombiniert. Dabei werden Frequenzen von mindestens 100 MHz für die Distanzmessung benutzt. Je nach Stärke des empfangenen Signals werden zwischen vier (bei hohen Signalstärken) und zehn (bei niedrigen Signalstärken) Modulationsfrequenzen für die Bestimmung der Distanz benutzt. Auf diese Weise ist es möglich, reflektorlos in wenigen Sekunden auch auf über 500 m entfernte Objekte zu messen und ein genaues Ergebnis im mm -Bereich zu erhalten. [13] Für die reflektorlose Messung bei Strecken unter 500 m arbeitet das TCRP1203 mit einer Genauigkeit von $3\text{ mm} + 2\text{ ppm}$. Bei Distanzen über 500 m verspricht der Hersteller eine Genauigkeit von $5\text{ mm} + 2\text{ ppm}$. Dabei dauert die Einzelmessung für einen Punkt im Schnitt 3 bis 6 Sekunden, höchstens jedoch 12 Sekunden. Beide Betriebsarten arbeiten mit einem koaxialen, sichtbaren roten Laserstrahl.

[9, 10]

3.2 Laserscanner Leica HDS6000²

Der Laserscanner LEICA HDS6000 ist ein Scanner aus der HDS (engl. für: High-Definition Surveying) Baureihe und Nachfolger des HDS4500. Der HDS6000 ist ein

²von Jan Walter

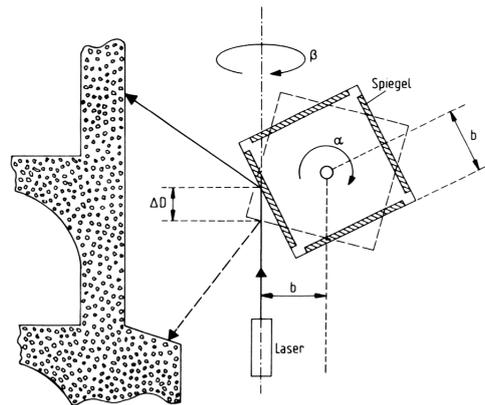


Abbildung 3.2: Prinzip der Strahlableitung für Laserscanner mit rotierendem Spiegel [21]

kompekter Phasen-Scanner mit extrem hoher Messrate. Das Phasenlaufzeitverfahren wird näher in Abschnitt 2.4 erklärt, wobei der Scanner reflektorlos bis zu 79 m misst. Der Laserscanner hat ein System mit "rotierendem Spiegel" (nach dem Funktionsprinzip in Abbildung 3.2), das ein Sichtfeld von 360 x 310 Grad abdeckt (siehe Abbildung 3.3). Das Messprinzip des Scanners beruht auf einer berührungslosen, rasterförmigen Abtastung mittels Laserstrahl zur Erfassung der Lage, Größe, Orientierung und Form von Objekten in einem vorher definierten Zielbereich.

Der Scanner hat fünf verschiedene Auflösungsstufen und kann bis zu 500.000 Punkte pro Sekunde erfassen. Die Zeit für die Erfassung eines Einzelpunktes liegt somit im Mikrosekundenbereich. Je nach Auflösungsstufe beträgt die Zeit für einen kompletten Scan des gesamten Sichtfeldes zwischen 25 Sekunden und 26 Minuten 40 Sekunden.

Der Scanner zeichnet sich durch sein kompaktes Design aus. Das Scanmodul, die Bedieneinheit, der Datenspeicher und die Stromversorgung sind in einem Instrument integriert. Der eingebaute Zwei-Achs-Neigungssensor mit einer Einspielgenauigkeit von 3,6" ermöglicht klassische Vermessungsmethoden wie Polygonierung und freie Stationierung. Das Gerät kann dabei über das integrierte Bedienfeld mit einem Display, kabellos über einen PDA oder mit einem über ein Netzkabel angeschlossenen Laptop gesteuert werden.

Die Sachkenntnis zur Herstellung dieses Scanners hat die Firma LEICA von der Firma ZOLLER+FRÖHLICH GMBH erworben. Der HDS6000 ist ein leicht modifizierter Nachbau des Z+F IMAGER 5006. Bei einem Vergleich der Bedienungsanleitung beider Geräte fällt beispielsweise auf, dass sich die technischen Daten bzw. die Hardwarespezifikationen wie Bedienelemente oder Anschlussmöglichkeiten gleichen. Die vom HDS6000 während eines Scanvorgangs gespeicherten Daten werden im ZFS-Dateiformat gespeichert, einem von ZOLLER+FRÖHLICH entwickelten Dateiformat.

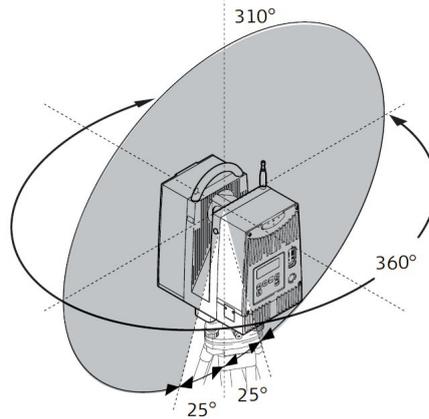


Abbildung 3.3: Sichtfeld HDS6000 [12]

Der Scanner arbeitet mit einem Laser der Laserklasse 3R, der bei allen Lichtverhältnissen eingesetzt werden kann. Er benötigt eine Betriebsspannung von 24 V und hat einen durchschnittlichen Stromverbrauch von 50 W . Die Stromversorgung erfolgt entweder über eine wechselbare interne Lithium-Ionen-Batterie, eine externe Batterie oder über eine 220 V Stromversorgung. Der Hersteller gibt für die interne Batterie eine durchschnittliche Betriebszeit von $1,5$ Stunden an, für die externe 4 Stunden. Beim Scannen mit Batterie sollte man einkalkulieren, dass nach jedem Scanvorgang Zeit benötigt wird, um die Daten auf den Laptop zu kopieren und somit nicht die gesamte Betriebszeit zum Scannen genutzt werden kann. [12, 22]

3.3 Leica Träger GZR3³

Der GZR3 der Firma LEICA GEOSYSTEMS AG (siehe Abbildung 3.4) ist ein drehbar gelagerter Träger zur Aufnahme von Reflektoren (zum Beispiel GPR1). Die dabei zu erreichende Zentriergenauigkeit des Reflektors liegt bei $0,3\text{ mm}$. Zudem besitzt dieser Träger ein optisches Lot und eine Röhrenlibelle für die gleichzeitige Zentrierung und Horizontierung eines Reflektors bzw. eines Stativs über einem Bodenpunkt. Der GZR3 kann ausschließlich als Nadirlot eingesetzt werden und erreicht dabei eine Lotungsgenauigkeit von $0,5\text{ mm}$ pro $1,5\text{ m}$. Bei der Libelle handelt es sich um eine einfache Röhrenlibelle mit einer Libellenangabe von $60''$. Durch die Verwendung eines Dreiklauen-Zwangszentrierungssystems kann der Träger in allen systemgleichen Dreifüßen, welche kein optisches Lot besitzen, eingesetzt werden.

[2, 16, 15, 21, 6, 8]

³von Andreas Aust



Abbildung 3.4: Reflektorträger GZR3

3.4 Leica Prismen GPR1⁴

Das LEICA Rundprisma GPR1 gehört zu den Reflektorarten der Tripelprismen. Diese Prismen werden heutzutage überwiegend bei der elektrooptischen Streckenmessung verwendet. Der gesamte Reflektor besteht aus dem eigentlichen Rundprisma GPR1, dem Einprismenhalter GPH1 und der abnehmbaren Zieltafel GZT4.

Ein Tripelprisma ist eine aus einem massiven Glaswürfel herausgeschliffene dreiseitige Pyramide, in der drei Prismenseiten im rechten Winkel zueinander stehen und so eine räumliche Ecke bilden. Ein von außen kommender Lichtstrahl wird an der Pyramidengrundfläche (E_1 , E_2 , E_3) bei dem Ein- und Austreten aus dem Prisma zweimal gebrochen und weitere dreimal an den senkrecht stehenden Innenwänden reflektiert. Der ausfallende Strahl läuft dabei stets parallel zur Einfallsrichtung und symmetrisch zum Zentralstrahl zurück (siehe Abbildung 3.5). Bei einer Drehung des Tripelprismas um eine beliebige Achse wird die Richtung des zurückgeworfenen Strahls nicht verändert. In einem Tripelprisma legen sämtliche Strahlen eines parallelen Strahlenbündels dieselbe optische Weglänge zurück. [2, 4]

Die Genauigkeiten eines Reflektors werden durch verschiedene Aspekte bestimmt. Ein Kriterium ist die Strahlabweichung. Sie ist die Winkeldifferenz zwischen dem auftreffenden und dem austretenden Lichtstrahl und ist ein Maß für die Schliffgenauigkeit eines Prismenglases. Eine höhere Abweichung in der Schliffgenauigkeit würde die Stärke des zum EDM-Messgerät reflektierten Signals reduzieren und so den Messbereich erheblich einschränken. Die GPH1 Reflektoren wurden mit höchster Genauigkeit hergestellt

⁴von Andreas Aust

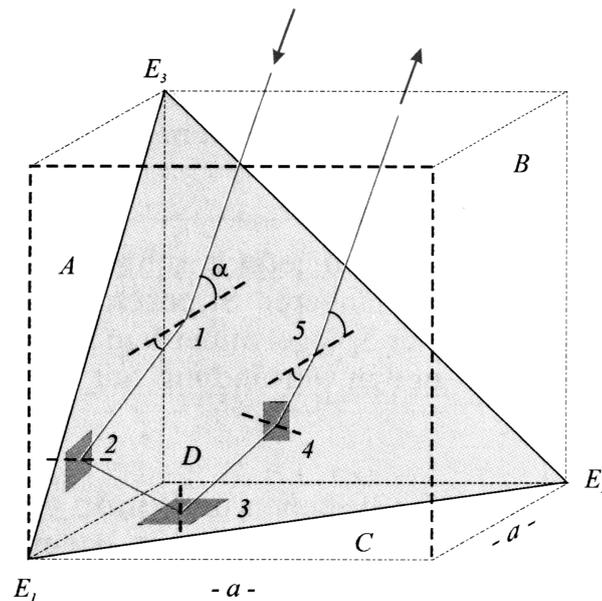


Abbildung 3.5: Tripelprisma [2]

und besitzen eine Strahlabweichung von zwei Bodensekunden. Auf einer Streckenlänge von 100 m würde sich dabei eine Abweichung von rund 1 mm ergeben.

Die reflektierenden Oberflächen des Prismenkörpers besitzen eine spezielle Reflexionsbeschichtung aus Kupfer, welche vor allem die Infrarot-Strahlen sehr gut reflektiert. Zudem ist sie sehr robust und korrosionsbeständig. Durch diese Kupferbeschichtung werden vor allem die Distanzmessung, die Zielverfolgung (ATR) und die Zielsuche (POWERSEARCH) wesentlich verbessert.

Des Weiteren verfügt die Vorderfläche des Prismas über eine Antireflex-Beschichtung. Diese Beschichtung ist sehr hart und schützt die Oberfläche vor Kratzern. Ohne diese Beschichtung würde die Vorderfläche des Prismas das EDM-Signal teilweise reflektieren und bei kurzen Entfernungen zu falschen Messergebnissen in der Distanzmessung führen.

Ein weiteres Kriterium ist die Zentriergenauigkeit. Sie ist ein Genauigkeitsmaß für die Größe der Differenzen zwischen dem optischen Mittelpunkt des Prismas und den mechanischen Achsen des Prismenhalters. Der GPR1 besitzt eine Zentriergenauigkeit von 1 mm .

Die maximale Reichweite, die mit einem GPR1-Reflektor unter Infrarotmessung erreicht werden kann, liegt bei 3500 m .

[6, 7, 8]

3.5 Prüfung und Kalibrierung der Messgeräte

Die Genauigkeiten der Messergebnisse hängen in erster Linie von den Genauigkeiten der verwendeten Messtechnik ab. Fehlerhafte oder dejustierte Messgeräte können die Messergebnisse verfälschen und die Messgenauigkeiten nachhaltig beeinflussen. Daher ist es notwendig, die verwendeten Messgeräte im Vorfeld auf ihre zugesicherten Eigenschaften hin zu überprüfen. Im Mess- und Kalibrierlabor der Hochschule Neubrandenburg konnten diese Prüfungen unter gleich bleibenden raumklimatischen Bedingungen durchgeführt werden.

Um die sichere Aufstellung und die feste Lage der Messinstrumente über einen längeren Zeitraum hinweg zu garantieren, mussten hohe Anforderungen an die Holz-Stative (LEICA GST20) gestellt werden. Im Wesentlichen wurden daher die Stellschrauben am Stativkopf und an den Stativbeinen kontrolliert. Die Stativbeine mussten sich leicht ausfahren lassen und sich dennoch beim Anziehen der Stellschraube fest verschließen ohne nachzugeben. Beim Anheben des Stativkopfes sollten sich die drei Beine gleichmäßig langsam schließen. War dies nicht der Fall, wurden Nachbesserungen an den Stellschrauben vorgenommen.

Bei der Überprüfung des Tachymeters wurde eine interne elektronische Prüfung und Justierung des Kompensator-Indexfehlers in Längs- und Querrichtung, des Höhenindexfehlers, des Kipp- und Stehachsfehlers vorgenommen. Die neu ermittelten Parameter unterschieden sich nur minimal und ersetzten die im Gerät gespeicherten.

Auf Grundlage der genaueren elektronischen Libelle ($2''/2mm$) im Tachymeter konnten die Dosenlibellen ($6'/2mm$) in den Dreifüßen überprüft werden. Dazu wurden die Dreifüße auf einem Messpfeiler geschraubt und mittels der elektronischen Libelle horizontalisiert. Anschließend wurde das Tachymeter aus dem Dreifuß entnommen. Für den Fall, dass die Libellenblase der Dosenlibelle nicht mittig im Einstellkreis stand, musste die Libelle über die zwei Kreuzlochschrauben nachjustiert werden.

Danach erfolgte die Überprüfung der Röhrenlibelle und des optischen Lotes der Prismenträger GZR3. Dazu wurde der Prismenträger in einen Dreifuß eingesetzt und über die Röhrenlibelle horizontalisiert. Nachdem der Spielpunkt bestimmt war, konnte die Libellenblase mit Hilfe der Kreuzlochschrauben auf den Normalpunkt eingestellt werden. Für die Überprüfung des optischen Lotes wurde der Prismenträger in eine speziell dafür vorgesehene Messvorrichtung eingesetzt. Die Messvorrichtung bestand aus einem Dreifuß, der an einem Messpfeiler befestigt wurde und einer in Bodennähe beleuchteten Strichkreuzplatte. Das Strichkreuz des Prismenträgers wurde dazu in einer Lage auf das beleuchtete Strichkreuz eingestellt. Bei der Drehung des Prismenträgers um $100 gon$ bzw. $200 gon$ konnte festgestellt werden, ob das Strichkreuz im Okular auswandert und

dadurch seine Position verändert. Um die Abweichungen zu beseitigen, wurden die Strichkreuze mittels Verstellung der Justierschrauben zur Deckung gebracht.

Weiterhin wurden die Messgeräte sowie die verwendeten Reflektoren auf äußere Schäden untersucht und gegebenenfalls ausgetauscht.

Kapitel 4

Verwendete Software

4.1 Cremer Commander, Credit und Caplan

Für die Auswertung der tachymetrischen Messdaten wurden vorwiegend drei Programme der Firma CREMER PROGRAMMENTWICKLUNG GMBH verwendet, die speziell für den Einsatz im Vermessungswesen zur Lösung aller gängigen Aufgaben entwickelt wurde: CREMER COMMANDER, CREDIT und CAPLAN.

Der CREMER COMMANDER ist eine Art Dateimanager mit einer zweigeteilten Ansicht. Auf der linken Seite befindet sich ein Dateiverzeichnis zum Anlegen und Verwalten von Projekten und Dateien. Die rechte Seite besteht aus vier verschiedenen Reitern. Man hat hier die Auswahl zwischen einem zweiten Dateiverzeichnis, einer Druckoption für das linke Verzeichnisfenster, einem Formeleditor und den Programmen. Zudem können hier noch weitere Hilfsprogramme installiert und gestartet werden.

Das Fenster "Programme" untergliedert sich in die Hauptprogramme CREDIT und CAPLAN. In dem Bearbeitungsprogramm CREDIT (*Cremers Editor*) lassen sich Daten unterschiedlicher Formate ineinander konvertieren und für weitere Anwendungen kompatibel machen. Das Auswertungsprogramm CAPLAN (*Cremers Auswertung und Planerstellung*) besteht aus zwei verschiedenen Modulen. Im Projektfenster erfolgt das Einlesen der Rohdaten sowie die Berechnung und Protokollierung des Auswertungsablaufes. In dem Planfenster können die vermessungstechnischen Leistungen in einem Lageplan kartiert werden. Die Zeichenelemente (zum Beispiel Symbole, Texte, Flächen) werden in einer durchgängigen Layerstruktur festgelegt. Für die Auswertung der Messdaten unterstützt CAPLAN unter anderem die Dateiformate der Instrumentenhersteller LEICA, SOKKIA, TRIMBLE, TOPCON, MINKA und ZEISS. Durch die Verwendung zusätzlicher Lizenzen (zum Beispiel KOTRAN, DIRAUS, NIVAUS, NETZ1L, usw.) können weitere Aufgabenspektren abgedeckt werden. Das Bearbeitungsfenster der beiden Mo-

dule besteht aus einer Menüleiste, einem Detailfenster, einer Punktnummernliste bzw. einer Planliste und einem Übersichtsfenster.

Aufgrund des vielseitigen Anwendungsbereiches in der Ingenieurvermessung wird das Hauptprodukt CAPLAN in vielen Firmen und auf Großbaustellen eingesetzt. Als Anwendungsbeispiele seien hier der Gotthard-Tunnel (Schweiz), der Durban Harbour Tunnel (Südafrika), Epping und nicht zuletzt der Rail Link in Sydney (Australien) erwähnt. [1]

4.2 DXF-Transducor¹

Um die Messdaten aus dem Tachymeter weiter zu verarbeiten, wurde das Computerprogramm DXF-TRANSDUCOR (“transducor” englisch für: Wandler) entwickelt.

Dieses Programm liest die Messdaten nach der Auswertung, die mit dem Computerprogramm CAPLAN erfolgte, aus der K-Datei ein und erzeugt eine DXF-Datei. Durch das bei der Messung verwandte Codierungssystem, welches in Abschnitt 5.3 näher erklärt wird, können die aufgenommenen Linien und Punkte je nach Bedeutung in entsprechenden Ebenen beziehungsweise Layern gespeichert werden. Diese DXF-Datei kann in dem Programm AUTOCAD eingelesen und das so entstandene Gebäudeskelett weiter bearbeitet werden.

Der DXF-TRANSDUCOR besteht aus zwei Programmteilen: dem Konverterteil (siehe Abbildung 4.1a) und dem Konfigurationsteil (siehe Abbildung 4.1b).

In dem Konfigurationsteil kann eingestellt werden:

- ob nach dem Öffnen der K-Datei eine Fehleranalyse durchgeführt werden soll,
- ob eventuelle Fehler in der K-Datei in einer Protokolldatei gespeichert werden sollen,
- ob die Messpunkte und Punktnummern in der DXF-Datei gespeichert werden sollen,
- und ob die Messpunkte und Punktnummern in der DXF-Datei angezeigt werden sollen, wenn sie mit gespeichert werden.

Die bei der Messung verwendeten Punkt- und Linienarten müssen mit zugehöriger Ebenenbezeichnung in die entsprechenden Eingabefelder eingetragen werden, um die verschiedenen Punkt- und Linienarten in eindeutig benannten, separaten Layern in der DXF-Datei zu speichern. Dazu muss für jede Punkt- und Linienart neben dem

¹von Jan Walter

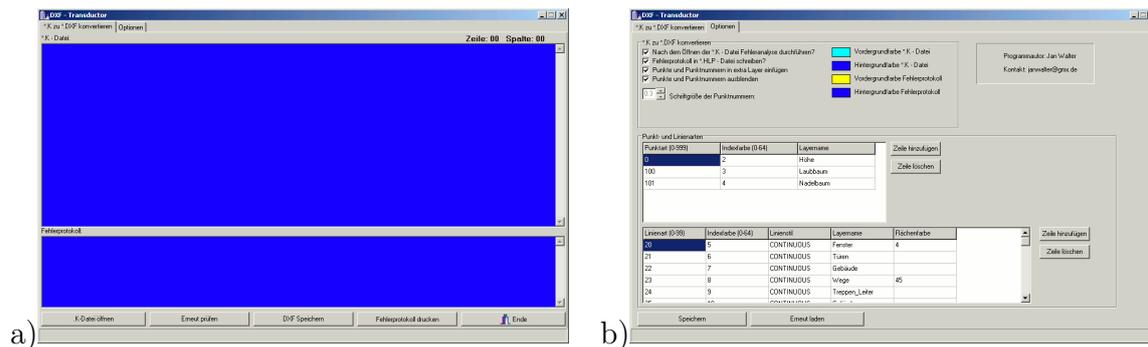


Abbildung 4.1: DXF-TRANSUDUCOR

Layernamen eine Farbe angegeben werden. Zusätzlich muss bei den Linienarten ein in AUTOCAD definierter Linienstil angegeben werden. Es ist weiterhin möglich, zusammenhängende Linien, die den Umring einer Fläche aus drei oder vier Punkten bilden, vom DXF-TRANSUDUCOR als solche mit einer anzugebenden Farbe in einem eigenen Layer generieren zu lassen. Steht also in der Spalte “Flächenfarbe” eine Zahl, werden Linien für diese Linienart auf entsprechende Eigenschaften hin geprüft.

Der Konverterteil besteht aus zwei übereinanderliegenden Textfeldern. Im oberen Feld werden die Daten nach dem Einlesen angezeigt und können editiert werden. Im unteren Feld werden mögliche Fehlermeldungen ausgegeben. Unter diesen Textfeldern sind fünf Schaltflächen mit folgenden Funktionen angeordnet:

- [K-Datei öffnen]: mit dieser Schaltfläche wird ein Dateidialog geöffnet, in dem die K-Datei ausgewählt und geöffnet wird.
- [Erneut prüfen]: mit dieser Schaltfläche wird die K-Datei geprüft bzw. erneut geprüft, wenn zuvor in der K-Datei eventuelle Fehler im obigen Textfeld korrigiert wurden.
- [DXF Speichern]: hiermit wird die DXF-Datei aus den Daten der K-Datei erzeugt und gespeichert.
- [Fehlerprotokoll drucken]: mit dieser Schaltfläche kann das Fehlerprotokoll ausgedruckt werden.
- [Ende] ermöglicht die Beendigung des Programms.

Die K-Datei enthält in einem eindeutigen Format die Punktnummer, Rechts- und Hochwert, die Höhe und den Code. Bei der Fehleranalyse wird die K-Datei auf Konsistenz geprüft. Es wird analysiert, ob Punktnummern nur einmal bei der Messung vergeben wurden und ob alle Linien korrekt anfangen bzw. geschlossen sind. Ist dies nicht der Fall, weil bei der Messung beispielsweise ein falscher Code in das Tachymeter

eingetragen wurde, wird eine entsprechende Fehlermeldung mit Angabe der Art des Fehlers und der Zeilennummer aus der K-Datei ausgegeben.

Bei Betätigung der Schaltfläche [DXF Speichern] wird zunächst die DXF-Datei erzeugt und anschließend gespeichert. Dabei wird ein stark reduziertes, älteres AUTOCAD-DXF-Format erzeugt, welches von aktuellen AUTOCAD-Versionen jedoch problemlos eingelesen werden kann. Zudem sind die DXF-Spezifikationen wesentlich übersichtlicher im Vergleich zu denen aktueller AUTOCAD-Versionen und für diese Anwendung mehr als ausreichend. Die DXF-Datei besteht aus vier verschiedenen Abschnitten oder auch Sektionen: HEADER, TABLES, BLOCKS, ENTITIES.

Im ersten Abschnitt HEADER wird die DXF-AUTOCAD-Version definiert. Dabei wird die Version Release 12 gewählt. Auf die Speicherung bzw. Festsetzung der durch AUTOCAD in dieser Datei aktuell benutzten Farbe und des aktuellen Bildschirmabschnittes wird verzichtet.

Die nachfolgende Sektion TABLES definiert die Ebenen bzw. Layer mit Namen, Farbe und Linienstil, wobei die Angaben dafür im Konfigurationsteil gespeichert sein müssen. Wird dort angegeben, dass bestimmte Linienarten auf geschlossene Flächen hin untersucht werden sollen, werden hierfür ebenfalls eigene Layer definiert. Dazu wird der Name der Linienart herangezogen und um die Bezeichnung “-FLAECHE” erweitert. Der Layer heißt dann zum Beispiel “FENSTER-FLAECHE”.

In dem Abschnitt BLOCKS werden im allgemeinen Grafikelemente abgelegt, die in der Zeichnung als Blöcke definiert werden. Dies geschieht aber nur, wenn explizit im Konfigurationsteil angegeben wurde, dass Punktnummern mit abgespeichert werden sollen. Andernfalls bleibt dieser Abschnitt ohne weitere Angaben.

Im letzten Abschnitt ENTITIES werden Punkte in entsprechenden Layern gespeichert. Gleiches gilt für die aus den Teillinien zusammengesetzten Polylinien. Zudem werden, wenn in der Konfiguration angegeben, geschlossene Linien als Flächen abgespeichert. Die gesamte Punktmenge wird ebenfalls in einem zusätzlichen Layer mit Angabe der Punktnummer gesichert, wenn dies zuvor eingestellt wurde.

Die Sektionen werden nach ihrer Erstellung zusammengesetzt und in eine Datei geschrieben, deren Name zuvor in einem sich automatisch öffnenden Dateidialogfenster angegeben werden musste. Dabei wird als Dateiname der Name der K-Datei vorgeschlagen, dessen Erweiterung lediglich durch ein “DXF” ausgetauscht wurde. Somit braucht man in dem Dialogfenster nur das Speichern zu bestätigen, wenn man nicht einen anderen Namen wählen möchte.

Eine sinnvolle Erweiterung in dem Programm wäre beispielsweise eine Funktion, die auch geschlossene Linien, die aus mehr als drei oder vier Teillinien bestehen, als eine Fläche oder mehrere Teilflächen speichert. Dies würde in der Nachbearbeitung eine

wesentliche Zeitersparnis bedeuten, wenn das entstehende Modell nicht nur als Skelett erzeugt werden soll. Das Problem ist jedoch nicht trivial, da die aufgenommenen Punkte selten in einer Ebene liegen. Dieses könnte umgangen werden, indem die Gesamtfläche in Teilflächen zerlegt wird, wie beispielsweise bei der Polygon-Triangulation, wo konkave und konvexe Linienabschnitte berücksichtigt werden.

4.3 Autodesk AutoCAD

“AUTOCAD gilt als weltweiter Industriestandard für PC-basierte CAD Software und wurde von AUTODESK (San Rafael, Kalifornien, USA) entwickelt. AUTOCAD wurde auf der COMDEX 1982 als erstes PC-CAD-System vorgestellt und wird heute in den Bereichen Architektur und Maschinenbau bis hin zum Vermessungswesen und zur Kartographie zum Konstruieren, Modellieren, Zeichnen, Bemessen, Rendern sowie Verwalten eingesetzt und ist inzwischen mit einem Anteil von mehr als 60% zum Marktführer beim PC-basierten CAD geworden” [14]

Das ursprünglich als einfaches CAD-Programm (CAD, englisch: Computer Aided Design) entwickelte AUTOCAD ist ein Programm zum computergestützten Konstruieren: Dies umfasst das Erstellen technischer Zeichnungen sowie das Modellieren von 3D-Objekten. Das vektororientierte und layergestützte Programm basiert auf einfachen skalierbaren Objekten wie Linien, Polylinien, Kreisen, Bögen und Beschriftungselementen. Diese bilden wiederum die Grundlage für kompliziertere 3D-Objekte.

Heute besitzt AUTOCAD überdies weitere branchenspezifische Zusatzmodule und Erweiterungen für individuelle Anforderungen der Ingenieure, Architekten, Designfachleute oder Geoinformatiker. Die von AUTOCAD entwickelten Dateiformate DWG und DXF bilden den heutigen Standard zum Austausch von CAD-Daten.

4.4 Leica Cyclone²

Die meisten CAD- und Modellierungsprogramme konstruieren die Geometrien aus wenigen Eckpunkten und schätzen den Rest mit Hypothesen der Gestalt. Design- oder Modellierungssoftwarepakete helfen dem Nutzer, bestimmte neuartige Modelle aus Entwürfen oder Ideen zu erstellen, die meist wenig mit der Realität zu tun haben. LEICA CYCLONE bietet eine hochleistungsfähige Arbeitsumgebung, um eine mit einem “High Definition Surveying (HDS)”-System aufgemessene Punktwolke zu manipulieren und zu bearbeiten. Dabei ermöglicht CYCLONE dem Benutzer exakte Visualisierung, Navigation, Vermessung und Modellierung von dreidimensionalen Objekten und Szenen.

²von Jan Walter

CYCLONE besteht aus vielen Programmmodulen, von denen nachfolgend nur einige kurz beschrieben werden sollen. Der Navigator ist das Herzstück der Anwendung. Er bietet die Möglichkeit, in lokalen und über ein Netzwerk angeschlossene CYCLONE-Datenbanken zu navigieren. Der Navigator wird außerdem benutzt, um eine Verbindung zwischen einem angeschlossenen Computer und einem bekannten Scanner herzustellen und Objekte wie Datenbanken, Projekte, ModelSpaces, ModelSpace Views, ScanWorlds und Registrations zu erzeugen. Zudem können damit alle Daten gesteuert und organisiert werden. Im Modul ScanControl werden die Scanvorgänge gesteuert. Zu diesen Vorgängen zählen zum Beispiel das Erzeugen eines Vorschau-Scans, das gezielte Scannen bestimmter Zielmarken oder das Durchführen von hochauflösenden Scans ausgewählter Bereiche. Das ModelSpace-Fenster beinhaltet eine große Sammlung von Einstellmöglichkeiten und Werkzeugen zur Betrachtung und Bearbeitung der Scans. Hier kann beispielsweise ein Nutzerkoordinatensystem erzeugt werden oder auf bestimmte ausgewählte Punkte der Punktwolke ein Modellkörper oder eine Fläche aufmodelliert werden. Es ist ebenfalls möglich, gezielt Punktbereiche zu löschen, die zur weiteren Bearbeitung nicht benötigt werden. Im Registration-Fenster können die Koordinatensysteme der einzelnen Scans über gemeinsame Punkte ineinander transformiert und so die Scans zusammengesetzt werden. [11, 12]

Kapitel 5

Vorbereitung und Durchführung der Messungen

5.1 Vorbereitungen¹

Eine gründliche Vorbereitung bildet die Planungsgrundlage für das gesamte Projekt und soll einen reibungslosen Ablauf aller Vermessungsleistungen garantieren. Um einen ersten Eindruck vom Umfang des Messobjektes zu erhalten, fand im Vorfeld eine örtliche Begehung statt. Da im Bereich der BETHESDAKLINIK noch kein örtliches Bezugssystem vorhanden war, bestand die erste Aufgabe darin, ein lokales und bauwerksnahes Netz anzulegen. Mit Hilfe eines Plans vom Messobjekt konnten die Netzpunkte entsprechend der örtlichen Gegebenheiten festgelegt und vermarktet werden. Die Netzpunkte wurden so angelegt, dass mit möglichst wenigen Standpunkten das gesamte Messobjekt erfasst werden kann. Dieses lokale Festpunktfeld bildete die Grundlage für die Messungen mit dem Tachymeter und dem Laserscanner. Zusätzlich wurde das Messobjekt zur weiteren Planung fotografisch dokumentiert. Gleichzeitig dienen die Aufnahmen einem späteren Vergleich mit den 3D-Modellen.

Des Weiteren war die Frage zu klären, mit welchen Genauigkeiten die 3D-Modelle dargestellt werden sollen bzw. dargestellt werden können. Da dieses Projekt mit minimalem vermessungstechnischen Aufwand erfolgen sollte, musste bereits vorab eine Genauigkeits- und Fehleranalyse durchgeführt werden. Da sowohl das Tachymeter als auch der Laserscanner nach dem Prinzip der reflektorlosen Distanzmessung arbeiten, sind bei den Streckenmessungen Standardabweichungen von 3 mm bis 5 mm zu erwarten. Da beim Tachymeter nur relevante Objektpunkte angemessen werden und die Außenhülle des Gebäudes aus einer Klinkerfassade besteht, die mit einer unregelmäßigen Metallverkleidung nach oben hin abschließt, beträgt die Anzielgenauigkeit nicht

¹von Andreas Aust

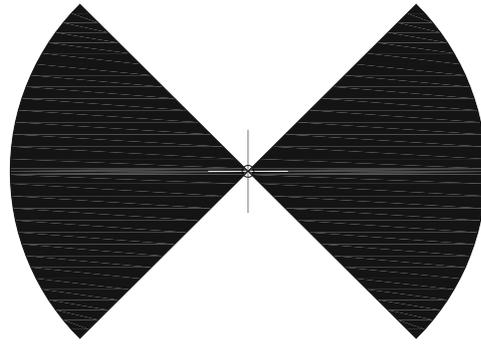


Abbildung 5.1: Zielmarke

mehr als 1 cm bis 3 cm . Die Gründe liegen zum einen darin, dass bei der reflektorlosen Distanzmessung eine Außenkante oder eine Außenecke nicht direkt angemessen werden kann, da sonst die Gefahr besteht, dass ein Teil des Laserstrahls an dem Objekt vorbei misst und einen dahinter liegenden Punkt erfasst. Beim Laserscanner besteht dieser Fehlereinfluss nicht, da dieser eine Punktwolke erzeugt, die aus Millionen von Einzelpunkten besteht und eine eindeutigere geometrische Form des jeweiligen Objektes wiedergibt.

Zum anderen spielt die Entfernung zwischen Stand- und Zielpunkt eine große Rolle. Bei dem Tachymeter bewirkt eine zunehmende Entfernung eine Vergrößerung des Laserpunktes, so dass dadurch ein falscher Punkt erfasst werden könnte. Beim Laserscanner kommt es zur Veränderung der Rasterweite, die eine detailgetreue Erfassung der Geometrie nachhaltig beeinflusst.

Eine weitere Fehlerquelle besteht in der Stationierung und Orientierung der Stand- und Anschlusspunkte. Um eine Stationierung der Messgeräte im Genauigkeitsbereich von einem Millimeter zu gewährleisten, bedarf es der Verwendung von einwandfreien Messtechniken. In diesem Zusammenhang wurde vor Beginn der Messung eine Geräteprüfung für alle Messinstrumente durchgeführt (siehe Abschnitt 3.5).

Auch die Bestimmung der Kippachshöhen kann sich negativ auf die Höhenmessung auswirken, da diese nur mit einem Gliedermaßstab gemessen und Genauigkeiten von höchstens 1 mm bis 2 mm erreicht werden.

Die daraus resultierende innere Netzgenauigkeit sollte sich im Rahmen von 1 mm bis 2 mm bewegen und damit unterhalb der Messgenauigkeit der reflektorlosen Entfernungsmessung liegen. Um diese Genauigkeiten gewährleisten zu können, muss redundant gemessen werden.

In Abhängigkeit all dieser Fehlereinflüsse und Genauigkeitsanforderungen ist damit zu rechnen, dass sich die Gesamtgeometrie der einzelnen 3D-Modelle in dem Genauigkeitsbereich von 2 cm bis 4 cm bewegen wird.

Eine weitere Aufgabenstellung dieses Projektes beinhaltet die Untersuchung beider Messverfahren auf ihre Wirtschaftlichkeit und ihre Messgenauigkeit. Die Wirtschaftlichkeit wird sich aus Umfang und Dauer der Gebäudeaufnahme und dessen Auswertung ergeben. Die zu erreichenden Messgenauigkeiten werden durch verschiedene Testmessungen ermittelt und für eine Genauigkeitsbetrachtung miteinander verglichen. Zu diesem Zweck und für die Gebäudeinnenaufmessung wurden spezielle Zielmarken in AUTOCAD (siehe Abbildung 5.1) konstruiert, die eine genaue Anzielung bei beiden Messverfahren ermöglichen sollte. Der Laserscanner HDS6000 benötigt für eine eindeutige Punktbestimmung Zielmarken mit einem „Schachbrettmuster“, welches am besten um einem Winkel von 50 gon verdreht ist. Diese Verdrehung ist notwendig, da der Laserscanner das Objekt in einem vertikalen Raster abtastet und durch die hellen und dunklen Flächen den Mittelpunkt der Zieltafel bestimmen kann. Für die Totalstation hingegen ist es ausreichend, die Zielmarke mit einem Punkt oder einem Kreuz zu versehen. Für die Gestaltung der Zielmarken wurden daher die Anzielungseigenschaften beider Verfahren vereint.

5.2 Aufbau des Festpunktfeldes²

Um ein dreidimensionales Modell des Gebäudes der BETHESDAKLINIK zu erzeugen, wurde das Bezugssystem als kombiniertes Lage- und Höhennetz (3D-Netz) aufgebaut.

Für die Gewährleistung einer hohen inneren Netzgenauigkeit müssen einige Grundvoraussetzungen bereits bei dem Aufbau des Netzes beachtet werden. Da wäre zunächst die Frage der richtigen Standpunktwahl. Standpunkte müssen so gewählt werden, dass eine optimale Sicht zu den Festpunktanschlüssen und Messpunkten des Objektes besteht. Zudem sollen sie die sichere Aufstellung des Messinstruments ermöglichen und jederzeit zugänglich sein.

Ebenso spielt die Art der Vermarkung eine entscheidende Rolle. Die Vermarkungen sollen die sichere Lage der Netzpunkte für einen längeren Zeitraum garantieren. Deshalb müssen die Vermarkungen der Festpunkte aus korrosionsbeständigem Material bestehen. Bei der Wahl der Vermarkungsart kommt es auf die Untergrundverhältnisse des Bodens im Bereich des Standpunktes an. Aufgrund lehmiger Bodenverhältnisse bei einigen Standpunkten kamen kostengünstige Kunststoffvermarkungen (“Möhren”)

²von Andreas Aust

zum Einsatz. Bei den festen Untergründen aus Betonstein wurden Nägel verwendet, die zwischen die Steine in die Pflasterfugen geschlagen wurden.

Die koordinatenmäßige Bestimmung der Netzkpunkte erfolgte in einer zusammenhängenden Messung. Ein wesentlicher Vorteil dabei war, dass die gesamte Messung unter gleichen meteorologischen Bedingungen durchgeführt werden konnte.

Um eine sehr genaue Aufstellung der Stative über den Bodenpunkten von unter einem Millimeter zu gewährleisten, kamen für die Horizontierung und Zentrierung vier geprüfte optische Lote (LEICA GZR3) zur Anwendung. Diese dienten auch gleichzeitig als Prismenträger für die GPH1-Reflektoren.

Die Bestimmung der lotrechten Instrumenten- bzw. Reflektorhöhe wurde über den Satz des Pythagoras berechnet. Dazu wurde mit einem Gliedermaßstab die Breite des Tachymeters bzw. der Zieltafel (GZT4) an der Kippachsmarkierung abgemessen und durch zwei geteilt. Mit diesem Abstand und der Schrägstrecke zwischen Bodenpunkt und Kippachsmarkierung konnte dann die Höhe bestimmt werden.

Um die Genauigkeiten des Netzes zu steigern, wurde das gesamte Festpunktfeld als ein lokales Netz mit frei gewählten Koordinaten angelegt. Solche lokalen Netze besitzen den Vorteil, dass sie von den Netzspannungen eines übergeordneten Netzes unabhängig sind. Zur Gewährleistung einer inneren Netzgenauigkeit von $1\text{ mm} - 2\text{ mm}$ wurden alle Netzkpunkte in einer Netzmessung mit hohem redundanten Anteil gemessen. Alle Standpunkte wurden soweit möglich von mindestens zwei weiteren Standpunkten aus in zwei Fernrohrlagen aufgemessen. Damit die geforderte Genauigkeit nicht überschritten wird, mussten die Messungen in Zwangszentrierung erfolgen. Die koordinatenmäßige Bestimmung der Netzkpunkte erfolgte nach dem Messverfahren eines 3D-Polygonzuges und mit dem Ingenieurtachymeter TCRP1203. Die Auswertung der Netzmessung wird in Abschnitt 6.1.1 erläutert.

Vor und während der Messung wurden stündlich der Luftdruck und die Lufttemperatur im Bereich des Gerätestandpunktes gemessen und die daraus resultierenden Korrekturparameter an die elektronisch gemessenen EDM-Strecken angebracht.

Da es anfangs geplant war, das Funktionsgebäude sowie das gesamte Bettenhaus vermessungstechnisch zu erfassen, wurde das Festpunktfeld um den gesamten Gebäudekomplex angelegt. Der zeitliche Aufwand zur Aufnahme des gesamten Gebäudekomplexes wäre zu hoch gewesen. Aus diesem Grund wurde nach Absprache mit den Betreuern nur das Funktionsgebäude sowie einige Teilbereiche des Bettenhauses dargestellt. Daher umfasst das Netz insgesamt elf Festpunkte (9001-9011) und drei weitere Verdichtungspunkte (8001-8003), die in Abbildung 5.2 dargestellt sind. Diese Verdichtungspunkte wurden im Nachhinein angelegt, da bei einer Messung mit dem HDS6000

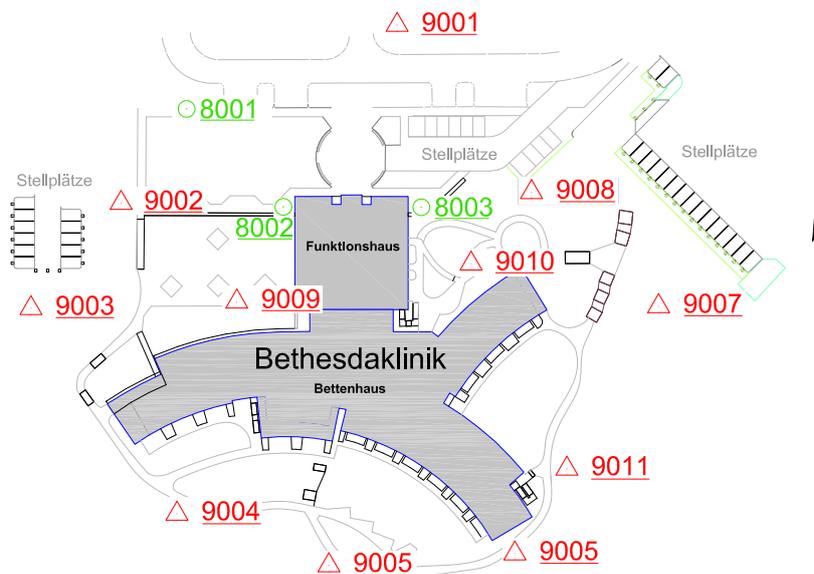


Abbildung 5.2: Örtliches Festpunktfeld [Quelle: ING.-BÜRO LANKOW]

festgestellt wurde, dass die Abstände der Netzkpunkte für eine Stationierung mit dem Laserscanner zu groß waren.

5.3 Durchführung der Tachymetermessung³

Die tachymetrischen Messungen basierten auf der Grundlage des ausgeglichenen Festpunktfeldes (siehe Abschnitt 6.1.1). Die aus der Netzausgleichung ermittelten Koordinaten der Festpunkte wurden unter einer speziellen Jobbezeichnung auf die Speicherkarte des Tachymeters exportiert. Jede neue Messung erhielt einen eigenständigen Messjob, dessen Name sich aus dem Datum des jeweiligen Messtages zusammensetzt.

Die Orientierungen und Stationierungen des Tachymeters fanden vorrangig auf einem koordinatenmäßig bekannten Punkt statt. Der Richtungsanschluss erfolgte generell zu mindestens zwei Fernzielen in zwei Fernrohrlagen, um das Prinzip der Nachbarschaft zu wahren und um eine bessere Netzeinpassung der einzelnen Standpunkte zu gewährleisten. Die angemessenen Fernziele sowie die dazu gehörigen Messdaten und die daraus resultierende Stationierungsgenauigkeit des Standpunktes werden automatisch in einer LOG-Datei angelegt. Die Bestimmung der Instrumenten- und Zielpunkthöhen erfolgte wie in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Um den Ablauf der tachymetrischen Messung zu vereinfachen, wurde mit einem Codesystem gearbeitet. Somit konnte bei der Aufnahme auf die Dokumentation der an-

³von Andreas Aust

| Punktart | Bedeutung |
|----------|-----------|
| 0 | Höhe |
| 100 | Laubbaum |
| 101 | Nadelbaum |

| Punktart | Bedeutung |
|----------|-------------------|
| 20 | Fenster (-rahmen) |
| 21 | Tür |
| 22 | Gebäude |
| 23 | Wege |

| Linienart | Bedeutung |
|-----------|--------------------|
| 24 | Treppen/Leiter |
| 25 | Geländer |
| 26 | Metallverkleidung |
| 27 | Vordach |
| 28 | Straße |
| 30 | Grünfläche |
| 31 | Böschungsoberkante |
| 32 | Böschungunterkante |
| 33 | Mauer |

Tabelle 5.1: Punkt- und Linienarten

gezielten Punkte im Feldbuch verzichtet werden, da sie durch den Code auch im Nachhinein eindeutig identifiziert werden können. Bei den Codes wurde zwischen Punkt- und Liniencodes unterschieden: Punktcodes sind maximal dreistellig, Liniencodes sind vier- oder achtstellig. Die Liniencodes sind vierstellig, wenn sie mit einer Linie verknüpft sind oder achtstellig, wenn an diesem Punkt zwei Linien hängen. Der Liniencode ist wie folgt aufgebaut: die erste Ziffer gibt an, ob es sich um einen Linienanfangspunkt (1), einen Linienzwischenpunkt (2) oder einen Linienendpunkt (3) handelt. Die zweite und dritte Ziffer geben die Linienart an. Es können theoretisch 100 (00 - 99) verschiedene Linienarten verwendet werden. Die vierte Ziffer des Codes beschreibt die Liniennummer (0 - 9). Dies ermöglicht die gleichzeitige Aufnahme von maximal zehn Linien einer Linienart. Die bei der Gebäudeaufmessung verwendeten Punkt- und Linienarten sind in Tabelle 5.1 beschrieben, wobei die Punktcodes den Punktarten entsprechen.

Abbildung 5.3 zeigt drei Beispiele für die Vergabe der Liniencodes bei der Aufnahme eines einfachen (a), eines doppelten Fensterrahmens (b) und eines Fensterrahmens mit Tür (c). Das Beispiel soll verdeutlichen, dass es mit Hilfe der achtstelligen Liniencodes einfach ist, eine geschlossene Fläche aufzunehmen, wobei jeder Punkt nur einmal aufgenommen werden muss. Bei der Vergabe der Codes beim Messen ist jedoch darauf zu achten, dass die Linie einer Art und Nummer erst beendet werden muss, bevor sie wieder neu angefangen wird, da sonst die Zugehörigkeit der Punkte zu den Linien im Nachhinein nicht rekonstruiert werden kann.

Bei den Punkten, die nicht mehr mit der reflektorlosen Distanzmessung erfasst werden konnten, wurde mit Hilfe eines Prismenstabes gemessen. Nach Möglichkeit wurde ein 22,5 cm langes Absteckprisma verwendet. Wenn dies nicht ausführbar war, wurde mit einem ausziehbaren Prismenstab gearbeitet. Dabei wurde mit der minimalsten Länge gemessen, um die Abweichungen von der Lotlinie so gering wie möglich zu halten. Wenn beispielsweise die Dosenlibelle um einen Pars (2 mm) auswandert, verursacht

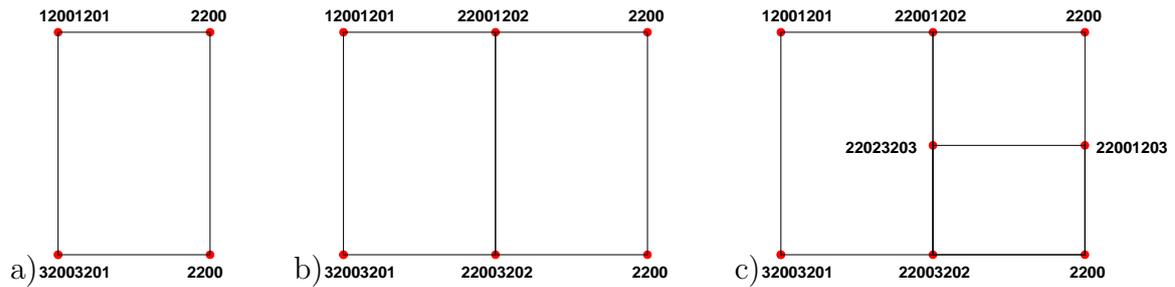


Abbildung 5.3: Beispiele für die Vergabe von Punktcodierungen

dies bei einer Länge von $1,35\text{ m}$ einen Winkelfehler von $0,2\text{ gon}$. Bei einer Länge von $22,5\text{ cm}$ entsteht dabei nur ein Winkelfehler von $0,03\text{ gon}$.

Auch der Einsatz einer „Ein-Mann-Station“ kam mehrmals zur Anwendung. Hierbei wurden wesentliche topografische Merkmale mitbestimmt, wie zum Beispiel Wegeführungen, Mauern, Treppen, usw.

Nach jeder Messung mussten die Messdatei (Messjob) sowie die LOG-Datei auf die Speicherkarte exportiert werden, bevor man sie auslesen und für weitere Berechnungen verwenden konnte.

5.4 Durchführung der Scannermessung⁴

Die ersten Messungen mit dem Laserscanner HDS6000 erfolgten im Mess- und Kalibrierlabor im Haus 2 der Hochschule Neubrandenburg. Auf den dort vorhandenen koordinatenmäßig bekannten Pfeilern fanden Testmessungen statt, um schon im Voraus die Software LEICA CYCLONE und die Gerätefunktionen des Laserscanners kennenzulernen.

Wie bei der tachymetrischen Aufnahme bildete das ausgeglichene Festpunktfeld (siehe Abschnitt 6.1.1) die Grundlage für die Scannermessungen. Im Grunde genommen hätte es ausgereicht, wenn die Verknüpfungen der einzelnen Scannerstandpunkte über mindestens drei identische, frei wählbare Passpunkte erfolgt wären. Dies war jedoch nicht möglich, da die gesamten Messungen mit dem Laserscanner nicht an einem Tag zu realisieren waren. Da es sich außerdem um ein Krankenhaus handelt, wo Tag für Tag reger Personen- und Kraftverkehr herrscht, kann es nicht garantiert werden, dass sich die Position von einer Vielzahl angebrachter Verknüpfungspunkte über einen längeren Zeitraum hinweg nicht verändert. Es war deshalb notwendig, dass sich die Scannermessungen auf das lokale Festpunktfeld beziehen und dass die Verknüpfungen der einzelnen Scannerstandpunkte durch die Festpunkte erfolgten. Die Positionierung des HDS6000 erfolgte grundsätzlich über eine freie Stationierung zu mindestens drei

⁴von Jan Walter

Festpunktanschlüssen. Das hatte unter anderem den Vorteil, dass sich die Stationierungsfehler im Standpunkt eliminierten.

Die Festpunkte wurden mit Holzstativen und einer "BLACK & WHITE"-Zieltafel signalisiert. Da die Zieltafeln der Firma LEICA GEOSYSTEMS AG ein M8-Innengewinde besitzen, waren spezielle Adapter notwendig, um die Zieltafeln auf dem Dreifuß zu befestigen. Die TRIBRACH-Adapter der Firma CST/BERGER besitzen ein M8 Außengewinde mit einem Drei-Klauen-System zur Aufnahme der Zieltafel in einem Dreifuß. Die Höhen der Festpunkte wurden analog zur tachymetrischen Messung mit dem Satz des Pythagoras ermittelt.

Zunächst erfolgte die Auswahl eines geeigneten Scannerstandpunktes, von dem ausreichend Festpunkte aufgemessen werden konnten. Es war darauf zu achten, dass eine geometrisch günstige Verteilung der Festpunkte vorlag und dass ein möglichst großer Bereich des relevanten Objektes aufgemessen werden konnte. Die Grobhorizontierung des Scanners erfolgte über die äußere Dosenlibelle am Scannergehäuse. Mittels des geräteinternen Zwei-Achs-Neigungssensors wurde die Feinhorizontierung vorgenommen. Wenn die aktuellen Höhen der entsprechenden Festpunkte noch nicht im Programm gespeichert waren, wurden diese nun eingegeben. Im Anschluss erfolgte ein Preview Scan. In diesem wurden die Zielmarken der Festpunkte ausgewählt und aufgemessen, um die Koordinaten des Scannerstandpunktes zu berechnen. Danach wurden die relevanten Bereiche des Zielobjektes in hoher Auflösung (Modus "Highest") gescannt, und es konnte zum nächsten Standpunkt gewechselt werden.

5.5 Durchführung der Gebäudeinnenaufmessung

Die Gebäudeinnenaufmessung beinhaltete die dreidimensionale Erfassung des Foyers sowie des angrenzenden Patientenflurs in der Ebene E 0. Das Besondere an dem Patientenflur sind seine Innenwände. Diese sind gekrümmt und umschließen das Treppenhaus sowie den Aufzug. Damit die Messungen der Innenräume nicht durch den Personenverkehr gestört wurden, konnten sie erst nach dem Ende der Öffnungszeiten der Arztpraxen durchgeführt werden.

In einem ersten Schritt fand eine Begehung durch die Innenräume statt, wobei die Standpunkte für den Laserscanner und die Positionen der "BLACK & WHITE"-Zielmarken festgelegt wurden. Insgesamt wurden 28 Zielmarken an den Wänden und Fensterscheiben befestigt. Die Verteilung wurde so gewählt, dass von jedem Scannerstandpunkt mindestens vier Zielmarken messbar waren.

Für die koordinatenmäßige Bestimmung dieser Zielmarken kam das Tachymeter zur Anwendung. Ausgehend von dem bauwerksnahen Festpunktfeld wurde ein geschlosse-



Abbildung 5.4: a) Verteilung der Zielmarken, b) Scannermessung HDS6000

ner Polygonzug (Ringpolygon) durch die betreffenden Räume gelegt. Im Eingangsbereich des Gebäudes wurde ein feststehendes Stativ (Basispunkt) über einem markierten Bodenpunkt aufgebaut, welches zugleich den Anfangs- und Endpunkt des Polygonzuges darstellte. Dieser Bodenpunkt fungierte auch als Kontrollpunkt, um die sichere Position des Stativs im Verlauf der Messungen zu gewährleisten. Aufgrund der gekrümmten Innenwand und der geringen Breite des Patientenflurs war die Sicht eingeschränkt (siehe Abbildung 5.4a), weshalb immer nur der vorhergehende und nachfolgende Anschlusspunkt im Verlauf des Polygonzuges angemessen werden konnte. Die Bestimmung der Richtungen und Strecken zwischen den einzelnen Standpunkten erfolgte daher mit hoher Genauigkeit in zwei Fernrohlagen. Parallel dazu wurden von jedem Standpunkt aus alle sichtbaren Zielmarken reflektorlos bestimmt.

Zeitgleich zur tachymetrischen Messung fand die dreidimensionale Aufmessung der Innenräume durch den HDS6000 statt (siehe Abbildung 5.4b). Da noch keine Koordinaten der Passpunkte vorlagen, wurden diese zunächst nur lokal aufgemessen und danach der Raum mit der Auflösungsstufe "Highest" gescannt. Die Koordinaten der Standpunkte wurden im Nachhinein über Passpunkttransformation im Innendienst berechnet.

Kapitel 6

Auswertung der Messdaten

6.1 Auswertung der Tachymetermessung¹

Die Auswertungen der Messdaten des Tachymeters TCRP1203 sowie die Netzausgleichung erfolgten mit CAPLAN. Die Aufbereitung der Messdaten wurde mit CREDIT durchgeführt, die im Wesentlichen aus der Korrektur fehlerhafter Informationen (zum Beispiel doppelte Stationierungszeilen) bestand.

Nach Abschluss jeder Messung wurden die Rohdaten (GSI-Messdatei und LOG-Datei) auf die interne COMPACTFLASH-Speicherkarte exportiert. Mit Hilfe eines Adapters, der am Notebook mit der PCMCIA-Schnittstelle verbunden wurde, konnten die Daten ausgelesen werden. Um einen möglichen Datenverlust zu vermeiden, sind von allen Rohdaten Sicherungskopien erstellt worden. Jede Messung wurde als ein eigenständiges Projekt in CAPLAN ausgewertet.

6.1.1 Auswertung der Festpunktfeldmessung²

In CAPLAN wurde ein neues Projekt gestartet und die aufbereitete Messdatei über den Dateityp “Leica GSI-16 (*.GSI)” in das Projekt geladen. Anschließend erschienen zwei Importfenster. Im ersten Importfenster (“Leica Import”) konnten Änderungen in der Codierung vorgenommen und neue Attribute erstellt werden. Diese Codierungen verweisen auf die in der Messdatei stehenden Codes. Beispielsweise kann eine falsche Codeeinstellung im Programm dazu führen, dass der vom Tachymeter vergebene Standpunktcode nicht eingelesen werden kann. In dem zweiten Importfenster (“Tachymeter - Messwerte importieren”) werden alle gemessenen Stationspunkte angezeigt, die für die weitere Berechnung ausgewählt werden konnten. Weiterhin konnten hier die Genauigkeitsparameter für eine Zielprüfung eingestellt werden.

¹von Andreas Aust

²von Andreas Aust

Im Anschluss daran erfolgte eine standpunktweise Auswertung der eingelesenen, polaren Messdaten. Festpunkte wurden in zwei Fernrohrlagen aufgemessen. CAPLAN reduziert zunächst die Horizontalrichtungen. Hierfür konnte keine Standardabweichung berechnet werden. Dies lag daran, dass das Tachymeter automatisch in die zweite Fernrohrlage wechselte und den Reflektor aufgemessen hat. Der Wert der zweiten Fernrohrlage wurde intern im Gerät dennoch als Wert der ersten Fernrohrlage gespeichert. CAPLAN konnte somit die zweite Fernrohrlage nicht als solche identifizieren. Aus den gemessenen Schrägdistanzen und Zenitwinkeln wurden die Horizontalentfernungen sowie die Höhenunterschiede zwischen den Punkten berechnet. Die aus den Mittelwertbildungen berechneten Standardabweichungen liegen größtenteils unter einem Millimeter. Genauere Angaben zu den einzelnen Standardabweichungen sind der CAPLAN LST-Datei auf der beigefügten CD zu entnehmen.

Vor der Netzausgleichung musste zunächst das Netz aufgebaut werden. Es war deshalb notwendig, die Messdatei erneut in das Projekt zu laden, um die aufgemessenen Punkte im Detailfenster anzuzeigen (siehe Abbildung 6.1). Für die anschließende Mittelbildung der Koordinaten der mehrfach aufgemessenen Punkte wurden die Toleranzgrenzen in der Lage mit 10 mm und in der Höhe mit 20 mm angegeben. Die Abweichungen zum Mittelwert bewegen sich in Lage und Höhe zwischen 0 mm und 3 mm . Das Festpunktfeld wurde als Raumnetz aufgebaut. Somit war eine gleichzeitige Ausgleichung von Lage- und Höhenkoordinaten gewährleistet. Ohne die Verwendung von festen Anschlusspunkten war das Netz frei von Spannungen und konnte so als ein freies Netz ausgewertet werden. Ein wichtiges Kriterium waren die Angaben der a priori Werte. Diese Werte sind im Voraus geschätzte Standardabweichungen und entsprechen den Genauigkeiten des Messinstruments.

Für die Zusammenstellung der Netzdaten erhielten die Horizontalentfernungen a priori Werte von $2\text{ mm} + 2\text{ ppm}$ und die Horizontalrichtungen von $1\text{ mgon} + 0,5\text{ mm}$ (Zentrierungsfehler). Die Angabe des Zentrierungsfehlers konnte mit $0,5\text{ mm}$ angegeben werden, da die Zentrierung des Dreifußes ausschließlich mit dem optischen Lot GZR3 erfolgte und in Zwangszentrierung gemessen wurde. Die a priori Werte der Höhenunterschiede wurden aus dem Messwertespeicher entnommen. Die Standardabweichungen der mehrfach gemessenen Höhenunterschiede wurden bereits in der Vorauswertung ermittelt.

Für die Ermittlung der Unbekannten wendete CAPLAN die Methode der vermittelnden Ausgleichung an. Dabei werden die Netzbeobachtungen minimal verbessert (Methode der kleinsten Quadrate), um widerspruchsfreie Unbekannte (ausgeglichenen Koordinaten) zu erhalten. In einem ersten Schritt wurde eine Modellprüfung durchgeführt. Diese berechnet sich aus den ausgeglichenen Verbesserungen a posteriori dividiert

durch den a priori Wert. Der Wert der Modellprüfung ist eine wesentliche Größe zur Beurteilung der Ausgleichung und sollte sich in der Nähe von Eins befinden.

Der obere und untere Grenzwert der Modellprüfung wird dabei durch einen Konfidenzbereich mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% festgelegt und mit einem Chi-Quadrat-Test überprüft. Der Wert der Modellprüfung lag bei 0,81 und somit innerhalb des Grenzbereiches von 0,75 bis 1,25. Da der Wert kleiner als Eins ist, sind die Ergebnisse der Ausgleichung besser als die vorherige Schätzung. Die Standardabweichungen (a priori) hätten demzufolge mit einer höheren Genauigkeit angegeben werden können. Aus der Anzahl der beobachteten Größen subtrahiert der Anzahl der Unbekannten ergab sich für die Netzmessung ein Redundanzanteil von 30.

Nach der Ausgleichung besaßen die ausgeglichenen Koordinaten eine durchschnittliche Standardabweichung von 0,7 mm in der Lage und von 0,3 mm in der Höhe. Um mögliche Ausreißer im Datenmaterial zu lokalisieren, wurde am Ende der Netzausgleichung ein Baarda-Test (DATA-SNOOPING) durchgeführt. Nach Willem Baarda sind die normierten Verbesserungen normal verteilt. Eine festgelegte Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1% entspricht bei der normierten Verbesserung der 3,29-fachen Standardabweichung. Würde ein Wert der normierten Verbesserungen (NV) den Schwellwert von 3,29 überschreiten, kann in dieser Beobachtung ein grober Fehler mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9% vermutet werden. Die normierten Verbesserungen der ausgeglichenen Beobachtungen sind aus der LST-Datei zu entnehmen. Ein grober Fehler kann während dieser Netzmessung ausgeschlossen werden, da die größte normierte Verbesserung bei 1,92 liegt. Weiterhin wurde hier auch der Redundanzanteil (RA) mit aufgelistet. Dieser gibt Auskunft über die innere Zuverlässigkeit einer Beobachtung, daher den Grad der Kontrollierbarkeit. Der Redundanzanteil wird hier in Prozent angegeben und lässt sich in vier Gruppen einteilen:

| | | | | |
|-----|-----|------|---|-----------------|
| 0% | bis | 1% | ⇒ | keine Kontrolle |
| 1% | bis | 10% | ⇒ | schlecht |
| 10% | bis | 30% | ⇒ | ausreichend |
| 30% | bis | 100% | ⇒ | gut |

Der größte Teil der Beobachtungen war gut kontrolliert. Die Ausnahme bildete die Horizontalentfernung von Standpunkt 9006 nach Punkt 9011. In diesem Punkt lag der Grad der Kontrollierbarkeit bei nur 4%. Die durchschnittlich ermittelten Standardabweichungen betragen in der Horizontalentfernung 0,8 mm, in der Horizontalrichtung 1,72 mgon und in den Höhenunterschieden 0,6 mm.

Die einzelnen Schritte und Ergebnisse aus der Auswertung der Messdaten und der Ausgleichung des Raumnetzes wurden automatisch von CAPLAN in eine LST-Datei geschrieben. Dieses Protokoll befindet sich auf der beigefügten CD.

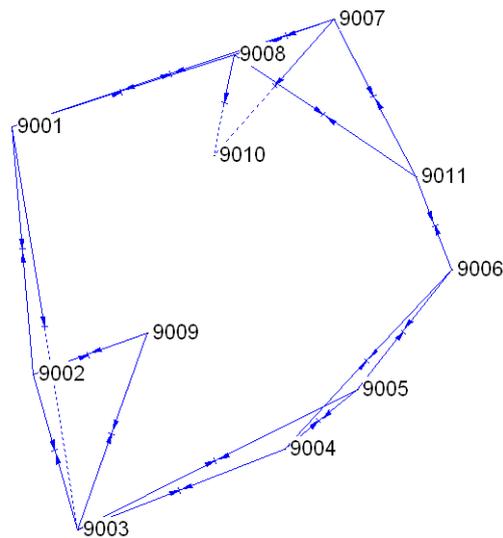


Abbildung 6.1: Netzkonstellation

Abschließend sei erwähnt, dass eine kontrollierte Messweise in zwei Fernrohrlagen und mit Zwangszentrierung der Gerätestandpunkte sowie mit der Verwendung von geprüften Messgeräten und der Beachtung von Messvorschriften zu sehr genauen Ergebnissen führen kann. Die ausgeglichenen Koordinaten bildeten eine gute Grundlage für die Durchführung der Tachymeter- und der Laserscannermessungen.

6.1.2 Auswertung der Gebäudeaufnahme³

Nach dem Anlegen eines Projektes in CAPLAN wurde vor dem Einlesen der aufbereiteten Messdaten eine neue Information (Code) festgelegt. Dieser Infocode nimmt Bezug auf das entsprechende Datenwort in der GSI-Datei. Die im Außendienst eingegebenen Punktcodes sind im Datenwort definiert, stehen in der GSI-Datei in der 8. Spalte und werden mit der Zeichenfolge "71....+" eingeleitet. Da diese Liniencodes vier bzw. acht Zeichen einnehmen können, musste die Anzahl der Nutzzeichen in der Information ebenfalls auf acht Stellen festgelegt werden.

Nach dem Einlesen der aufbereiteten Messdaten über den Dateityp "Leica GSI-16 (*.GSI)" führte das Programm, wie in Abschnitt 6.1.1 beschrieben, eine standpunktweise Auswertung der polaren Messwerte durch. Die berechneten Koordinaten der Objektpunkte und die vergebenen Punkt- und Liniencodes wurden in einer K-Datei gespeichert.

Bei den ersten drei Messjobs (18.08.08 – 20.08.08) mussten die berechneten Objektkoordinaten im Nachhinein auf das ausgeglichene Festpunktfeld transformiert werden. Dieser Schritt war erforderlich, da die Messung des Festpunktfeldes erst nach den

³von Andreas Aust

ersten drei Messtagen durchgeführt wurde. Für die Transformation wurde das Zusatzprogramm KOTRAN (Koordinatentransformation) verwendet. In Form einer konformen Helmert 2D + H Transformation wurden die K-Dateien der Messungen auf die K-Datei des Festpunktfeldes transformiert. Die aus der Helmerttransformation resultierenden Restklaffen liegen in Lage und Höhen zwischen null und zwei Millimeter und wurden auf die transformierten Koordinaten verteilt.

Die übrigen Messjobs mussten nicht weiter transformiert werden. Hier wurden bereits die Stationierungen der Standpunkte und die Aufmessungen der Objektpunkte mit den ausgeglichenen Koordinaten des Festpunktfeldes durchgeführt. Die polaren Messdaten konnten so direkt mit CAPLAN ausgewertet werden.

Um die Koordinaten der Passpunkte zu bestimmen, welche für die nachträglichen Stationierungen des Laserscanners bei der Innenaufnahme des Gebäudes notwendig waren, wurde ein Polygonzug durch das Gebäude gelegt. Die Passpunkte in Form von "BLACK & WHITE"-Zielmarken wurden ausschließlich reflektorlos bestimmt. Um die Genauigkeiten zu steigern, wurden die Passpunkte mindestens zweimal aufgemessen und nach Möglichkeit von einem weiteren Standpunkt erneut bestimmt. Nach dem Einlesen der Messwerte in CAPLAN ergab die Reduktion der Strecken und Höhenunterschiede eine Standardabweichung von unter einem Millimeter. Die Reduktionen der Richtungen konnte wiederum von CAPLAN nicht berechnet werden, da das Tachymeter den Messwert der zweiten Fernrohrlage als einen der ersten Fernrohrlage speichert. Anschließend wurden die Messdaten in Form eines Raumnetzes ausgeglichen. Für den Aufbau der Netzpunkte wurden die Tachymeterstandpunkte verwendet. Für die Zusammenstellung der Netzdaten erhielten die Horizontalentfernungen a priori Werte von $2\text{ mm} + 2\text{ ppm}$ und die Horizontalrichtungen von $1\text{ mgon} + 0,9\text{ mm}$ (Zentrierungsfehler). Die Zentriergenauigkeit wurde von CAPLAN automatisch berechnet. Die a priori Werte der Höhenunterschiede wurden aus dem Messwertespeicher entnommen. Die nachfolgende Modellprüfung ergab einen Wert von 1,03 und lag somit innerhalb des berechneten Grenzbereiches (Sicherheitswahrscheinlichkeit 95%) von 0,35 bis 1,67. Nach der Ausgleichung besaßen die Koordinaten eine durchschnittliche Standardabweichung von $0,9\text{ mm}$ in der Lage und von $0,1\text{ mm}$ in der Höhe. Ein grober Fehler kann während dieser Netzmessung ausgeschlossen werden, da die größte normierte Verbesserung bei 2,01 liegt (Baarda-Test 3,29). In einem zweiten CAPLAN-Projekt wurden dann die ausgeglichenen Standpunktkoordinaten und die 7-Datei aus dem ersten Projekt eingelesen. Nach dem Schließen eines CAPLAN-Projektes wird eine 7-Datei erstellt, in der die reduzierten Messwerte stehen. Die Koordinaten der Passpunkte wurden über Polarpunktberechnung ermittelt. Die Standardabweichungen lagen in Lage und Höhe zwischen null und zwei Millimeter.

Alle Angaben zu den berechneten Standardabweichungen der Reduktionen der Messwerte befinden sich in den CAPLAN LST-Dateien, Angaben zu den Transformationen in den KOTRAN LST-Dateien und Angaben über die Stationierungsgenauigkeiten in den LOG-Dateien. Die jeweiligen Protokolle befinden sich auf der beigelegten CD.

6.1.3 Erstellung des 3D-Modells⁴

Die Erstellung des 3D-Modells aus den Tachymeterdaten wurde mit dem Konstruktionsprogramm AUTOCAD durchgeführt. Nach der Auswertung mit CAPLAN wurden die K-Dateien in den DXF-TRANSDUCOR geladen. In dem erschienenen Konverterfenster war es möglich, falsch eingegebene Codes zu ändern. Anschließend erstellte das Programm aus den Messdaten eine DXF-Datei.

Um das 3D-Modell zu erzeugen, mussten zunächst die DXF-Dateien aller Einzelmessungen in einem AUTOCAD-Projekt zusammengefügt werden. Da alle Messungen auf der Grundlage der ausgeglichenen Koordinaten durchgeführt wurden, konnten die DXF-Dateien problemlos über einen Basispunkt ineinander kopiert werden. Die Gesamtheit der Dateien ergab eine fertige Grundkonstruktion des Gebäudes und der aufgenommenen Topografie. Die Grundkonstruktion bestand aus verschiedenen Linien, die bereits in einer entsprechenden Layerstrukturierung (zum Beispiel Gebäude, Fenster, Metallverkleidung) eingeordnet waren.

Dadurch, dass im Außendienst einige Bereiche des Gebäudes von verschiedenen Standpunkten aus aufgemessen wurden, existierten teilweise zwei Linien für ein und dieselbe Gebäudekante. Die erste Aufgabe bestand nun darin, aus den überbestimmten Linien eine einheitliche Gesamtgeometrie zu ermitteln. Dies geschah, indem man den Mittelwert der beiden Linien gebildet hatte. Die Differenzen der reflektorlosen Aufnahme einer Linie von zwei Standpunkten lagen zwischen wenigen Millimetern und drei Zentimetern. Ebenso wurden einige Teile der Metallverkleidungen doppelt über reflektorlose und Infrarotmessung mit Prisma bestimmt. Aufgrund von Unregelmäßigkeiten in der Geometrie der Metallverkleidung entstanden Abweichungen zwischen einem und drei Zentimetern.

Da Teile des Gebäudekomplexes von Hindernissen (zum Beispiel Vegetation) verdeckt waren und so nicht aufgemessen werden konnten, mussten die Ecken und Kanten nachkonstruiert werden. Durch das Verlängern zweier Linien ergaben sich Schnittpunkte, die den Eckpunkt realisierten.

Das Modellieren der Oberflächen erfolgte hauptsächlich über die beiden Menütools "3D-Flächen" und "Kantendefiniertes Netz". Lediglich für die Gestaltung der runden Dachkonstruktion (Aufzugsschacht) wurde das Tool "Regelnetz" angewendet. Für die

⁴von Andreas Aust

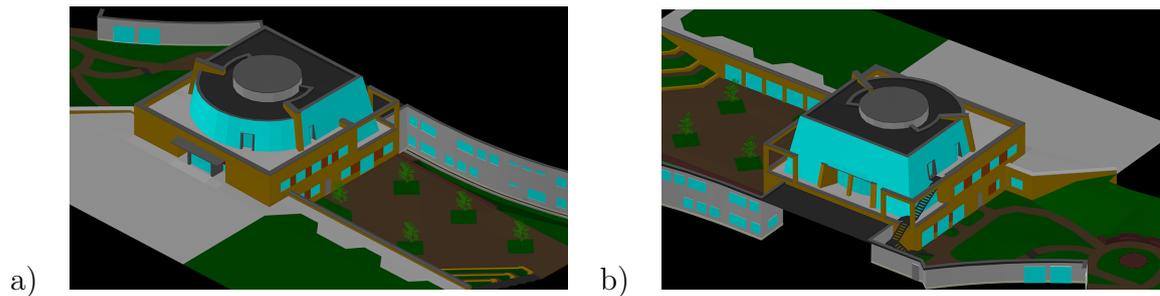


Abbildung 6.2: AUTOCAD-Modellansicht a) Nordwest, b) Südost

Modellierung über “3D-Flächen” mussten immer drei oder vier Punkte ausgewählt werden. Es war deshalb notwendig, größere Flächen in Drei- und Vierecke zu zerlegen. Bei Flächen, die sich aus vielen kleinen Linien zusammensetzten und so eine gekrümmte Form bildeten, wurde das „Kantendefinierte Netz“ angewendet, da der Aufwand, alles in einfache geometrische Formen zu zerlegen, zu groß gewesen wäre. Jedoch musste man hier beachten, dass das „Kantendefinierte Netz“ nur aus vier Linien aufgebaut werden konnte, die miteinander verbunden waren. Es war daher erforderlich, aus den einzelnen Teillinien vier 3D-Polylinien zu erzeugen.

Bei der Modellierung des 3D-Modells in AUTOCAD wurden ausschließlich das Funktionshaus sowie die im Osten und Westen angrenzenden Innenhöfe und einige Teilbereiche des Bettenhauses (siehe Abbildung 6.2) bearbeitet.

6.1.4 Probleme bei der Durchführung, Auswertung und Modellierung⁵

Ein wesentliches Problem bei der Durchführung der Messungen stellte die reflektorlose Erfassung der Kanten und räumlichen Ecken dar. Da der am Objekt auftreffende Messfleck keinen Punkt darstellt sondern eine gewisse Größe aufweist, war eine direkte Aufmessung der Außenkanten zu vermeiden. Um dennoch die Außenkanten darzustellen und trotzdem zu gewährleisten, dass kein falscher Punkt aufgrund der Größe des Messflecks aufgemessen wird, musste ein bestimmtes Vorgehen eingehalten werden. Mittels der Feintriebe wurde das Strichkreuz um einen bestimmten Betrag in das Objekt hineingedreht, damit der Messfleck auf eine größere Fläche auftrifft. Danach erfolgte die Distanzmessung in der verstellten Position. Anschließend wurde das Strichkreuz wieder auf den eigentlichen Objektpunkt zurückgedreht um die Horizontalrichtung und den Vertikalwinkel zu messen. Der Betrag der Verdrehung war abhängig von der Entfernung zwischen Stand- und Zielpunkt. Mit zunehmendem Abstand verändert sich auch die Punktgröße des Laserstrahls. Ein weiteres Problem stellte die direkte Entfernungsmessung

⁵von Andreas Aust

messung zu den räumlichen Innen- und Außenecken dar. Eine Ecke ist definiert als der Schnittpunkt dreier Flächen. Bei der Aufmessung der Innenecken fällt bereits ein Großteil des Messflecks auf die begrenzenden Seitenflächen. Die Ecke wird so nicht direkt angemessen, da der Laserstrahl schon vorher an den Seitenflächen als Mischsignal reflektiert wird, was eine Verkürzung der gemessenen Strecke zur Folge hat. Bei Außenecken sind die Verhältnisse genau umgekehrt. Hier werden die Strecken zu lang gemessen.

Auch der Einfluss der Sonneneinstrahlung führte hin und wieder zu Behinderungen der Messungen. Durch die Sonneneinstrahlung erhellte sich das Bild im Okular, sodass das Sichtfeld eingeschränkt war und Objektpunkte nur noch schwer angezielt werden konnten. Auch die Verwendung einer Blende brachte nicht immer den gewünschten Erfolg.

Die Auswertungen der polaren Messdaten und die Erzeugung der Punktdaten mit den vergebenen Linien- und Punktcodes in CAPLAN verliefen ohne weitere Probleme.

Bei der Bearbeitung des 3D-Modells in AUTOCAD wurde festgestellt, dass einige Menü-Tools, wie zum Beispiel die Erzeugung einer Schraffur über Solid im 3D-Modus, nicht mehr funktionierten. Für die Modellierung des Modells wurde ausschließlich die Funktion "Netze" verwendet. Eine Modellierung über geometrische Körper erwies sich als ziemlich ungenau, da die einzelnen Segmente der Linienkonstruktionen keine exakte geometrische Form bildeten. Die Ursachen könnten in der Aufnahme der Objektpunkte zu finden sein. Durch ungünstige Einfallswinkel und wegen der indirekten reflektorlosen Aufnahme von Ecken und Kanten könnten Abweichungen aus der geometrischen Soll-Form entstanden sein. Daher wurde für die Modellierung mit den in der Funktion "Netze" enthaltenen Tools "3D-Flächen" und "Kantendefiniertes Netz" gearbeitet. Der Nachteil bei der Modellierung über "3D-Flächen" war der zeitliche Aufwand. Für die Flächenerzeugung mussten vorher die betroffenen Flächen in Drei- bzw. Vierecke zerlegt werden. Die Variante "Kantendefiniertes Netz" hatte den Vorteil, dass größere gekrümmte Flächen einheitlich modelliert werden konnten ohne eine vorherige Zerlegung. Jedoch mussten die Flächen aus vier miteinander verbundenen Polylinien bestehen. Da dies nicht oft der Fall war, musste eine 3D-Polylinie über die einzelnen Teillinien gezeichnet werden. Außerdem nahm das "Kantendefinierte Netz" nicht immer den Verlauf der Messungslinie an. Bei zu vielen Teillinien reichte das Raster nicht mehr aus, um alle Linienpunkte zu erfassen. Um diesem Problem entgegen zu wirken, mussten entweder kleinere Flächen gewählt oder mehrere Teillinien zu einer Gesamtlinie verbunden werden.

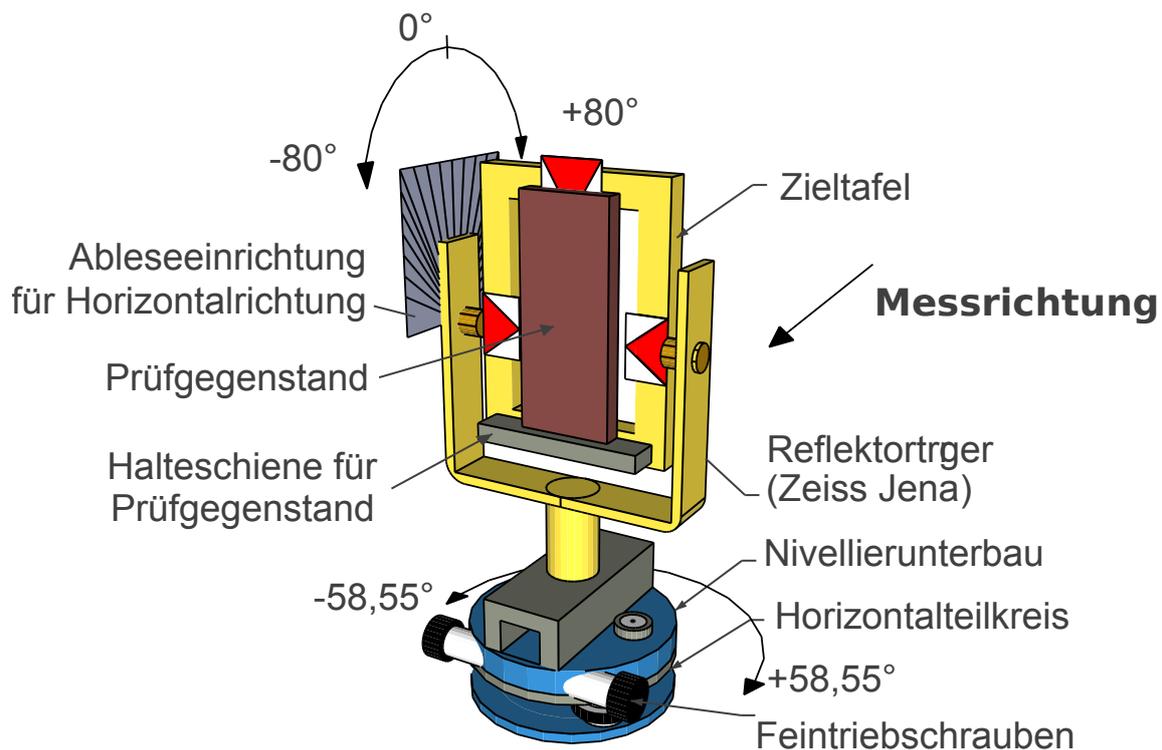


Abbildung 6.3: Messvorrichtung

6.1.5 Überprüfung der Reflexionseigenschaften verschiedener Materialien

Während der Bearbeitung des 3D-Modells in AUTOCAD ist aufgefallen, dass im südlichen Teil des Gebäudes einige Linien der Metallverkleidung an zwei Stellen stark verzogen waren. Durch die doppelte Bestimmung dieser Linien aufgrund der Messung von zwei Standpunkten wurden Differenzen von 10 cm bis 30 cm festgestellt. Die Ursachen hierfür könnte ein zu spitzer Einfallswinkel des Laserstrahls zum Objekt gewesen sein. Um die Einflüsse verschiedener Einfallswinkel auf unterschiedliche Oberflächenstrukturen besser beurteilen zu können, wurden im Nachhinein Testmessungen zu unterschiedlichen Oberflächen durchgeführt. Die dafür verwendeten Materialien sollten den an der BETHESDAKLINIK verbauten Materialien nachempfunden sein, auf die hauptsächlich gemessen wurde. Für die Testmessungen kamen vier verschiedene Prüfgegenstände aus Ziegelstein, Putz, Metall und PVC zur Anwendung. Neben den Reflexionseigenschaften der verschiedenen Materialien sollten auch die Grenzbereiche ermittelt werden, innerhalb derer eine realistische Punktbestimmung möglich ist.

Zu diesem Zweck wurde eine spezielle Messvorrichtung angefertigt (Abbildung 6.3), die in zwei Achsen drehbar gelagert ist. Diese Messvorrichtung bestand aus einem Ni-

vellierunterbau und einem umgebauten Reflektorträger von ZEISS JENA. Mittels des Unterbaus vom Nivelliergerät konnte die Messvorrichtung über die Dreifußschrauben und die vorhandene Dosenlibelle horizontalisiert und durch den zusätzlich eingebauten Diopter zum Tachymeter ausgerichtet werden. Da die vordere Fläche der Zieltafel mit ihrer Kippachse genau in der Stehachse des Reflektorträgers steht, mussten die Prüfgegenstände auch an dieser Fläche anliegen und befestigt werden. Die Messungen mussten so auf der Rückseite der Zieltafel erfolgen. Dafür wurde ein Rahmen aus der Zieltafel herausgesägt und die Halterungsstrebe auf der Rückseite bis zu den Schraubenverbindungen entfernt. An einer angeschraubten Halteschiene konnten die Prüfgegenstände aufliegen. Durch Markierungen am Rahmen der Zieltafel konnte das Fadenkreuz auf die Mitte der Zieltafel eingestellt werden.

Die Testmessungen wurden anschließend im Freien auf dem Gehweg vor Haus 2 der Hochschule durchgeführt. Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt Temperaturen von 1°C herrschten, musste das Tachymeter vor Beginn der Messung ca. 20 Minuten austemperieren. Da der Himmel bedeckt war, konnten Einflüsse von direkter Sonneneinstrahlung ausgeschlossen werden. Für die Ermittlung der Grenzbereiche wurde bei dieser Messung die Stellung der Zieltafel mit Prüfgegenstand nacheinander in vertikaler und horizontaler Lage variiert. Über den am Nivellierunterbau befindlichen Horizontalkreis konnten die Winkeländerungen in horizontaler Lage eingestellt werden. Ausgehend von der Nullposition zum Gerätestandpunkt wurde die Zieltafel rechtsläufig bis $+58,8^{\circ}$ und linksläufig bis $-58,8^{\circ}$ verstellt. Aufgrund der baulichen Konstruktion waren keine größeren Winkelpositionen möglich. In der Vertikalebene wurden die positiven und negativen Neigungen der Zieltafel an einer seitlich befestigten Ableseeinrichtung eingestellt. Zu allen vier Materialien erfolgten fünf Messungen in der jeweils eingestellten Position. Um eine entfernungsabhängige Aussage treffen zu können, wurden die Messungen im Abstand von 25 m und 50 m durchgeführt.

Die Auswertung der Messdaten erfolgte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel. Zunächst wurden die mehrfach gemessenen Strecken gemittelt und daraus die empirischen Standardabweichungen einer Einzelmessung und des Mittels berechnet. Für die Horizontal- und Vertikalmessungen ergaben die Standardabweichungen der Einzelmessungen Werte von unter einem Millimeter. Die Ausnahmen bildeten die Materialien Ziegelstein und PVC bei einer Entfernung von 25 m und einer horizontalen Winkelstellung von $\pm 58,5^{\circ}$. Hier betragen die Standardabweichungen $1,9\text{ mm}$ bzw. $1,2\text{ mm}$.

Mit dieser Versuchsanordnung sollte herausgefunden werden, wie sich durch die Veränderung der Einfallsrichtung des Laserstrahls die Streckenlängen zwischen Stand- und Zielpunkt verhalten. Aus den Messdaten der Horizontalmessungen ist ein Trend

in dem Streckenverhalten zu verzeichnen. Die Streckenlängen verändern sich je nach Drehung der Zieltafel. Bei einer Rechtsdrehung wurden die Strecken kürzer, bei einer Linksdrehung hingegen länger gemessen. Dieser Effekt ist auch deutlich aus den Differenzen zur Ausgangsposition (Stellung bei 0°) zu erkennen. In den Abständen von 25 m und 50 m und einer Horizontalposition von $58,5^\circ$ lagen die maximalen Abweichungen bei $2,4\text{ cm}$ (25 m) und $5,1\text{ cm}$ (50 m). In der gegenüberliegenden Position von $-58,5^\circ$ lagen die maximalen Abweichungen bei -6 mm (25 m) und $-1,1\text{ cm}$ (50 m). Die hohen Abweichungen in der Rechtsdrehung könnten mehrere Ursachen besitzen. Es könnte an der baulichen Konstruktion des Reflektorträgers gelegen haben, da die Haltestrebe ca. 2 cm bis 3 cm hervorsteht. Für den Fall, dass der Laserstrahl nicht mit dem Zielkreuz im Okular übereinstimmt, wäre es wahrscheinlich, dass ein Teil des Laserstrahls auf die Fläche der Haltestrebe getroffen ist und so die Streckenmessung verfälscht hat. Dies wurde in Abschnitt 6.1.6 näher untersucht.

Daher sind die Messergebnisse in der maximalen Winkelstellung zu vernachlässigen. Bei einer Position von 54° ergaben sich Differenzen von 4 mm bei 25 m und bis $2,5\text{ cm}$ bei 50 m Entfernung. Bei -54° betragen die Differenzen 5 mm bei 25 m und $1,1\text{ cm}$ bei 50 m Entfernung.

Die Unterschiede in den jeweiligen Drehungen wurden zudem im Vergleich der Streckenlängen gegenüberliegender Winkel verdeutlicht. Bei der Gegenüberstellung der eigentlich symmetrischen Streckenlängen ergaben sich Differenzen, deren Werte sich mit zunehmender Verdrehung vergrößerten. Dabei entstanden im Betrag Abweichungen von $0,2\text{ mm}$ ($\pm 9^\circ$) bei Ziegelstein und bis zu $3,5\text{ cm}$ ($\pm 54^\circ$) bei Metall. Für die Ermittlung der Grenzbereiche wurden aus den Ergebnissen der Auswertung die Winkelpositionen betrachtet, bei denen die Abweichung der Streckenlänge zur Nullstellung einen Wert von 3 mm nicht überschreitet. Mit einer Abweichung von 3 mm zur Nullstellung würde es der Messgenauigkeit der reflektorlosen Entfernungsmessung des TCRP1203 von $3\text{ mm} + 2\text{ ppm}$ entsprechen. Aufgrund der baulichen Konstruktion der Messvorrichtung liegen die Grenzbereiche bei einer Entfernungen von 25 m zwischen -45° und $+45^\circ$. Bei einer Entfernung von 50 m liegen die Grenzbereiche zwischen -36° und $+36^\circ$.

Aus den Messdaten der Vertikalmessungen ist ebenfalls ein Trend im Streckenverhalten zu verzeichnen. Je nach Neigung der Zieltafel veränderten sich die Längen der Strecken. Beim Neigen in positiver Richtung (siehe Abbildung 6.3) wurden die Strecken kürzer, beim Neigen in negativer Richtung länger gemessen. Aus den Berechnungen der Messwerte wird dieses Verhalten noch deutlicher. In den Abständen von 25 m und 50 m und einer Vertikalposition von -80° lagen die maximalen Abweichungen zur Ausgangslage (0° -Stellung) bei $-5,8\text{ cm}$ (25 m) und $-5,2\text{ cm}$ (50 m). In der Vertikalposition von 80° lagen die maximalen Abweichungen bei $-2,8\text{ cm}$ (25 m) und $+3,9\text{ cm}$

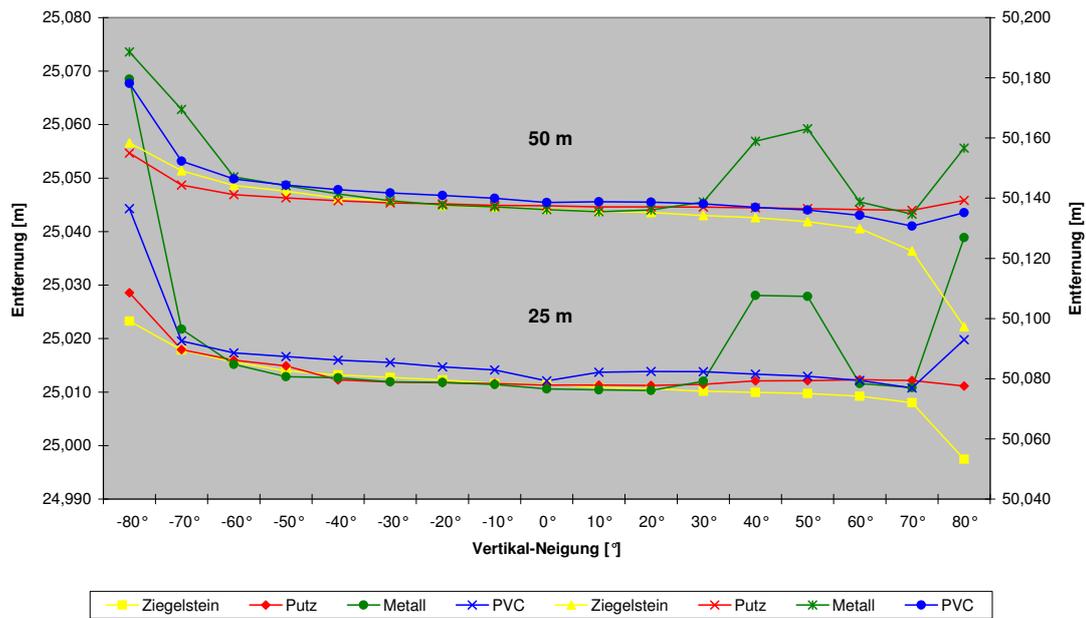


Abbildung 6.4: Zusammenhang zwischen Einfallswinkel und Streckenlänge

(50 m). Ein Grund für die hohen Abweichungen in der -80° -Stellung könnte an einer vertikalen Abweichung des Laserstrahls zur Fernrohrziellinie gelegen haben. Bei einer eventuellen Exzentrizität hätte ein Teil des Laserstrahls auf den Rahmen der Zieltafel treffen können und so die Entfernungsmessung verfälscht. Weiterhin wäre auch eine falsche Anzielung des Mittelpunktes vom jeweiligen Prüfgegenstand möglich gewesen. Daher sind auch hier die Messergebnisse aus den Vertikalpositionen -80° und $+80^\circ$ zu vernachlässigen. In der -70° -Stellung hingegen ergaben sich Differenzen von $-1,1\text{ cm}$ bei 25 m und bis zu $3,3\text{ cm}$ bei 50 m. Bei 70° betrugen die Differenzen 3 mm bei 25 m und $1,4\text{ cm}$ bei 50 m. Die daraus resultierenden Streckendifferenzen gegenüberliegender Winkel ergaben Werte von $0,3\text{ mm}$ ($\pm 9^\circ$) bei Putz und bis zu $3,5\text{ cm}$ ($\pm 54^\circ$) bei Metall. Somit liegen die Grenzbereiche bei einer Entfernung von 25 m zwischen -50° und $+50^\circ$ und zwischen -40° und $+40^\circ$ bei 50 m. Bei der Betrachtung des Diagramms (siehe Abbildung 6.4) fällt besonders auf, dass die Graphen beim Material Metall deutliche Ausreißer in den Neigungen von 40° und 50° aufweisen. Die ermittelten Abweichungen zur Ausgangslage haben Werte von $1,7\text{ cm}$ bei 25 m und $2,7\text{ cm}$ bei 50 m. Da die Abweichungen nur in positiver Richtung vorlagen, sind die Gründe dafür schwer feststellbar. Vermutlich war der Metallprüfgegenstand mit einer Korrosionsschicht versehen oder die Struktur wurde anderweitig verändert. Dies war optisch nicht festzustellen. Dennoch wurde die Brechung des Lasers auf der Oberfläche in den bestimmten Winkelstellungen beeinflusst.

Die Untersuchungsmessungen auf die verschiedenen Materialien haben gezeigt, dass durch das manuelle Verändern des Einfallswinkels vom Laserstrahl zur Objektoberfläche die Streckenlängen untereinander variieren. Die hohen Abweichungen in der Größenordnung von mehreren Dezimetern, die bei der Gebäudeaufnahme entstanden sind, konnten mit dieser Versuchsanordnung jedoch nicht eindeutig nachgewiesen werden. Mit der verhältnismäßig kleinen Messoberfläche des Reflektorträgers und der eingeschränkten Winkelstellung in der horizontalen Lage ergaben die ermittelten Streckendifferenzen Werte im Zentimeterbereich. Aus den Ergebnissen der Auswertung lässt sich schließen, dass die anfangs erwähnten Abweichungen aufgrund der Entfernung von 70 m, der größeren Auftrittsfläche und des spitzen Einfallswinkels (ca. $10^\circ - 15^\circ$) auf die Aluminiumfläche (Metallverkleidung) dazu geführt haben könnten, dass sich der Laserpunkt stark verzerrt hat. Weiterhin geht aus den Ergebnissen der Untersuchungsmessungen hervor, dass beim Material Metall die höchsten Streckenänderungen im Vergleich zu den anderen Materialien zur Nullstellung auftreten. Damit bestätigt dieses Ergebnis die hohen Abweichungen an der Metallverkleidung, die bei der Gebäudeaufnahme entstanden sind. Der Grund hierfür ist die glatte Oberfläche des Metalls, die bei "großen" Winkeln wenig vom ausgesandten Messsignal zum Gerät reflektiert im Gegensatz zu Putz und Ziegelstein. Ihre Oberflächenbeschaffenheit trägt zu einer mehr diffusen Reflexion bei, wodurch ein stärkeres Signal im Tachymeter empfangen wird.

Die Messung hat gezeigt, dass die Genauigkeit einer reflektorlosen Einzelpunkt-messung mit dem Tachymeter stark von der Oberflächenbeschaffung der Materialien, dem Einfallswinkel und der entsprechenden Entfernung abhängig ist. Die angegebenen Grenzbereiche für die beiden Entfernungen sind Richtwerte, die aus der Gesamtheit aller Materialien abgeleitet wurden. Für jedes einzelne Material variieren die Werte der Grenzbereiche.

Da sich die Abweichungen zur jeweiligen Ausgangsposition zwischen gegenüberliegenden Winkeleinstellungen nicht symmetrisch verhielten, bestand die Vermutung, dass der Laserstrahl nicht mit dem Strichkreuz im Okular übereinstimmt. Um genauere Aussagen über diesen Fall angeben zu können, wurden dazu weitere Untersuchungsmessungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Berechnungen sowie der Diagramme befinden sich auf der beigefügten CD.

6.1.6 Überprüfung auf Abweichung des Laserstrahls

Mit der im Folgenden beschriebenen Versuchsanordnung sollte herausgefunden werden, ob eine Exzentrizität zwischen dem roten Messstrahl und der Fernrohrziellinie vorlag. Bei den Messergebnissen der Materialmessungen fiel auf, dass sich die Abweichungen

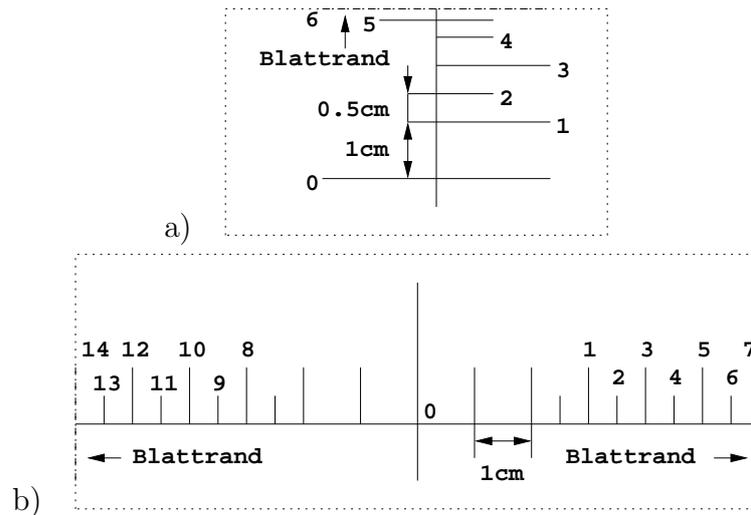


Abbildung 6.5: Zieltafeln zur a) vertikalen und b) horizontalen Prüfung

zur Ausgangsposition unsymmetrisch zur Drehung der Zieltafel verhielten. Es sollte speziell die Abweichung in horizontaler und vertikaler Lage überprüft werden. Damit Zielweiten bis zu 65 m unter ähnlichen Verhältnissen wie im Labor gemessen werden konnten, wurden die Untersuchungsmessungen im Flur der dritten Etage im Haus 2 der Hochschule durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurden zwei Zieltafeln auf Millimeterpapier entworfen (siehe Abbildung 6.5), die auf der planen Rückseite der "BLACK & WHITE"-Zieltafeln befestigt wurden. Auf der Zieltafel wurden Markierungen in einem festen Abstand von $2,5\text{ mm}$ (zwischen Markierung 4 und 5 bzw. 5 und 6) bzw. 5 mm vom Ausgangspunkt bis zum Blattrand aufgezeichnet, auf die das Strickkreuz einzustellen war. Bei der Messung auf die jeweilige Zieltafel war darauf zu achten, dass der Blattrand überstand, um so festzustellen, ab welcher Markierung der Laserstrahl an der Zieltafel vorbeisist. Um eine entfernungsabhängige Aussage treffen zu können, wurden die Messungen in vier Abständen durchgeführt. Mit einem Stahlmessband wurden die Abstände von 15 m bis 65 m abgetragen und am Fußboden markiert. Mit Hilfe einer „Stativspinne“ konnte ein Wegrutschen der Stativbeine auf der glatten Fußbodenfläche verhindert werden.

Zuerst erfolgte die Messung auf dem Ausgangspunkt 0. Hierbei wurden für jeden Abstand die Umringe des Laserpunktes augenscheinlich auf der Zieltafel nachgezeichnet. Dies sollte zeigen, inwieweit sich die Größe des Laserpunktes in Bezug auf die Entfernung verändert. Bei einer Vergrößerung der Messkeule entsteht eine Streuung des Laserstrahls, was dazu führt, dass das ausgesandte Signal nur teilweise oder gar nicht zurück reflektiert wird und so ein falscher Punkt angemessen werden kann. Anschließend wurden die restlichen Markierungen (1-14) mit dem Strickkreuz eingestellt und reflektorlos aufgemessen.

Die Auswertungen der Messdaten erfolgten mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel. Bereits aus dem grob nachgezeichneten Umringen des roten Lichtflecks war eine kleine Abweichung in vertikaler Lage zu erkennen. Diese Aussage wird auch aus den Auswertungen der Vertikalmessung deutlich. Schon bei einer Entfernung von 15 m konnten die Markierungen 5 und 6 nicht mehr erfasst werden. Ab 46 m war auch die Messung der Markierung 4 nicht mehr möglich. Daraus lässt sich schließen, dass der Laserstrahl selbst bei genauer Anzielung der Markierungen zu hoch eingestellt ist. Bis zu einer Entfernung von 30 m liegen die Abweichungen bei $2,5\text{ mm}$. Ab 46 m betragen die Abweichungen sogar 5 mm . Bei einer Entfernung von 100 m würde sich dabei eine vertikale Abweichung von rund 8 mm ergeben. Aufgrund dieser Tatsachen entfiel die Messung in vertikaler Richtung zum unteren Blattrand.

Die Auswertungen der Horizontalmessungen ergaben ebenfalls eine Abweichung des Laserstrahls. Bereits ab einer Entfernung von 15 m konnte der rechte Blattrand an der Markierung 7 nicht mehr aufgemessen werden. Die Markierung 14 am linken Blattrand konnte andererseits bis 30 m problemlos aufgemessen werden. Ab 46 m war vermutlich die Streuung des Laserstrahls zu groß, um den Blattrand noch genau anzuzielen. Bei den übrigen Markierungen gab es keinerlei Probleme.

Die Ergebnisse der Horizontalauswertung ergaben, dass der Laserstrahl zu weit nach rechts eingestellt ist. Mit 5 mm bei 65 m liegen die Abweichungen in der Horizontal-lage in der Größenordnung wie die Vertikalabweichungen. Die Auswertungen haben gezeigt, dass der Messstrahl nicht koaxial zur Fernrohrziellinie verläuft. In vertikaler und horizontaler Lage wurden Abweichungen von wenigen Millimetern festgestellt, die bei 100 m Entfernung etwa 8 mm ausmachen würden. Demnach wäre eine Kalibrierung des messenden Laserstrahls notwendig. Die ermittelten Abweichungen könnten so eine plausible Erklärung für die unsymmetrischen Abweichungen bei der Materialmessung ergeben. Aber auch weitere Störeinflüsse wie Stöße oder starke Temperaturunterschiede können die Richtung des Messstrahls gegenüber der Fernrohrziellinie verändern.

Die Größe des grob nachgezeichneten Laserpunktes beim Messen zur Zieltafel variierte mit zunehmender Entfernung. Bei 15 m betrug die Größe ca. $10\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ bei 65 m ca. $23\text{ mm} \times 27\text{ mm}$. Aus einer Broschüre der LEICA TPS1200 Serie wird die Laserpunktgröße bei 20 m mit ca. $7\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ und bei 100 m mit ca. $12\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ angegeben. Diese Unterschiede sind am ehesten mit der Streuung des Lichtes zu erklären.

6.2 Auswertung der Laserscannermessung⁶

Bei der Messung wurde grundsätzlich die Umgebung im Scanmodus “Highest” durchgeführt. Damit konnte man mit einem voll geladenen Akku von drei bis vier Standpunkten messen, wobei die Betriebszeit pro Standpunkt des Scanners, je nach Anzahl der Passpunkte und Größe des zu scannenden Bereiches, zwischen 20 und 30 Minuten lag. Zudem hätte das Scannen in der höchsten Auflösungsstufe circa viermal so lange gedauert. Damit wäre die Datenmenge um ein dreifaches größer, was die spätere Bearbeitung wesentlich verlangsamt aufgrund der erheblich größeren Informationsmenge.

Die Auswertung der Laserscannermessung wurde komplett mit dem Programm CYCLONE durchgeführt. Dazu wurden die Daten auf dem bei der Messung verwendeten Laptop auf einen Computer in Raum 224 in Haus 2 der Hochschule Neubrandenburg kopiert, auf dem ebenfalls das Programm LEICA CYCLONE lief.

6.2.1 Verknüpfung der Standpunkte⁷

Um die in der CYCLONE-Datenbank gespeicherten Messdaten der Laserscannermessung auszuwerten, wurden zunächst die Punktwolken der einzelnen Standpunkte miteinander verknüpft. Die Punktwolken jedes Standpunktes werden in CYCLONE in sogenannten ScanWorlds abgespeichert. Die Messungen innerhalb und außerhalb des Gebäudes wurden getrennt behandelt. Für die Messung außerhalb erfolgte die Verknüpfung der Standpunkte über die “BLACK & WHITE”-Zielmarken. Diese befanden sich während der Messung auf Stativen, die über den Festpunkten aufgebaut worden sind.

Beim Aufbau der Stative mit den Zielmarken wurden ihre Höhen bestimmt. Damit waren ihre Koordinaten schon vor der Scannermessung bekannt. Diese konnten daher in CYCLONE vor der Scannermessung eingegeben werden. Das hat den Vorteil, dass die aufgenommenen Punkte gleich Koordinaten des örtlichen Festpunktfeldes bekamen. Die Verknüpfung der einzelnen ScanWorlds wurde im CYCLONE-Registration Unterprogramm durchgeführt. Die dabei auftretenden Abweichungen der einzelnen Passpunkte zueinander lagen zwischen $0,0\text{ cm}$ und $2,0\text{ cm}$.

Bei der Messung innerhalb des Gebäudes wurden die zuvor angebrachten und durchnummerierten Passpunktmarken nur aufgemessen, ohne ihnen vor der Messung Koordinaten geben zu können. Dies geschah im Nachhinein. Zu diesem Zweck wurde in CYCLONE eine weitere ScanWorld erzeugt, die ausschließlich die Passpunktkoordinaten des örtlichen Festpunktfeldes mit ihrer Bezeichnung enthielt. Die Koordinaten der Passpunkte wurden in der Auswertung der Tachymetermessung berechnet. Nun konn-

⁶von Jan Walter

⁷von Jan Walter

ten die einzelnen ScanWorlds vom Inneren des Gebäudes mit der ScanWorld, die nur die Passpunktkoordinaten enthielt, verbunden werden. Dabei wurden die vorher von CYCLONE für die einzelnen Standpunkte vergebenen Systemkoordinaten in Benutzerkoordinaten transformiert, die dann denen des örtlichen Festpunktfeldes entsprachen. Bei der Verknüpfung der Standpunkte lagen die Abweichungen der einzelnen Passpunkte zueinander zwischen $0,0\text{ cm}$ und $4,5\text{ cm}$, wobei vier Passpunktverbindungen mit einer Abweichung von über $2,0\text{ cm}$ von der Transformation ausgeschlossen worden sind.

So entstanden zwei neue ScanWorlds mit den Punktwolken, die jeweils die Messungen innerhalb und außerhalb des Gebäudes enthielten.

6.2.2 Modellierung der Punktwolken⁸

Als nächstes folgte die Modellierung dieser Punktwolken, was im Unterprogramm ModelSpace vorgenommen wurde. Zu diesem Zweck wurde aus den Punktwolken schrittweise ein Abschnitt in einen neuen ModelSpace kopiert, der dann bearbeitet wurde. Die Bearbeitung fand größtenteils im orthogonalen Betrachtungsmodus statt, um Bereiche präziser selektieren zu können. Aus diesen Abschnitten wurden wiederum kleine Teile ausgeschnitten und freigestellt, sodass sie Fragmenten einfacher geometrischer Figuren oder Körper entsprachen. Durch die gezielte Auswahl dieser Fragmente und der Angabe der Art der geometrischen Figur bzw. des Körpers konnte CYCLONE diese berechnen und erstellen. Zu den Figuren, die CYCLONE für die Modellierung anbietet, zählen zum Beispiel Quader (Box), Zylinder (Cylinder), Ebenen (Patches), Kugeln (Sphere), aber auch modifizierte Quader, die einer T- oder H-Profilform entsprechen sowie Winkelstücke (Elbow) oder reduzierende Winkelstücke (Reducing Elbow), mit denen etwa zwei Zylinder mit unterschiedlichen Radien verbunden werden können. Damit hat man etwa die Möglichkeit, ganze Leitungssysteme zu modellieren. Die von CYCLONE berechnete Lage und Größe dieser Figuren ist abhängig von dem ausgeschnittenen Teilstück der Punktwolke. Ist das Teilstück des gewünschten Körpers nicht sauber ausgeschnitten oder enthält Punkte, die nicht zu der gewünschten Figur gehören, wird die Lage und Größe dieser Körper verfälscht. Diese können aber auch nach ihrer Erzeugung angepasst werden, um beispielsweise ein Rohr zu verlängern oder den Radius anzupassen. Bei einer zu geringen Anzahl an Punkten kann die Figur nicht berechnet werden. Die entstandenen Figuren wurden, sobald der Abschnitt fertig bearbeitet war, wieder in den ursprünglichen ModelSpace eingefügt.

So wurde aus den erzeugten Figuren nach und nach das Funktionsgebäude (siehe Abbildung 7.3) erstellt. Zunächst wurde das Äußere des Gebäudes modelliert. Der

⁸von Jan Walter



Abbildung 6.6: Funktionshaus Innenansicht

untere Teil besteht hauptsächlich aus Quadern und Ebenen. Zur Erstellung des Stahl-skelettes mit der Vollverglasung, der Feuerleiter und den Geländern wurden Zylinder benutzt. Bei der Richtungsänderung des Geländers wurden die Zylinder jeweils mit einem Winkelstück verbunden. Auf dem Dach wurde mit einem Flansch-Körper (Flange) modelliert.

Das Gebäudeinnere (siehe Abbildung 6.6) wurde im Anschluss daran modelliert. Es besteht bis auf das Treppengeländer rechts und links neben dem Personenaufzug ebenfalls nur aus Ebenen, erweiterten Ebenen und Quadern.

6.2.3 Probleme bei der Auswertung und Modellierung⁹

Bei der Verknüpfung der einzelnen Standpunkte miteinander traten bei der Messung im Inneren des Gebäudes Abweichungen bis zu 4,5 cm auf. Diese relativ hohen Abweichungen sind vermutlich durch leichte Vibrationen des Bauwerks entstanden, die durch den Betrieb des Personenaufzuges zustande kamen. Aus diesem Grund musste während der Messung bei zwei Standpunkten nahe dem Aufzug der interne Kompensator ausgeschaltet werden, wie aus dem Verknüpfungsprotokoll ersichtlich ist.

Die größte Herausforderung beim Modellieren war die Konstruktion der zylindrischen Innenwände des Patientenflurs.

Dies war problematisch, da geometrische Körper in CYCLONE nicht miteinander verschnitten werden können. Wäre dies der Fall, hätten man die Wände einfach mit der Zylinderfunktion konstruiert und für Türen, Fenster sowie den Zugang zum Aufzug die entsprechenden Stellen aus der Oberfläche des Zylinders ausschneiden können. Es ist lediglich möglich, etwas aus dem Objekt Ebene auszuschneiden, wenn diese noch nicht extrudiert wurde. Die Möglichkeit der Vermaschung bestimmter Bereiche der

⁹ von Jan Walter

Punktwolke wurde auch in Betracht gezogen, lieferte aber keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

So wurde entschieden, den Bereich der runden Wände aus mehreren Teilobjekten zu konstruieren. CYCLONE bietet ein Hilfswerkzeug an, um komplexe geometrische Figuren zu erzeugen, die sogenannte Drawing-Funktion. Mit dieser können in der aktiven Referenzebene, im vorliegenden Fall war dies die xy -Ebene, zweidimensionale Zeichnungen aus Linien, Polylinien, Kreisen, Dreiecken, Bögen usw. erstellt werden. Diese vektorbasierten Drawing-Zeichnungen können dann in dreidimensionale Polylinien umgewandelt werden, die im Konstruktionsraum verschoben werden können. Weiterhin gibt es die Möglichkeit, eine Fläche durch mehrere Auswahlpunkte (Multiple Pick-Points) zu erstellen. Der Ansatz zur Konstruktion bestand darin, den gekrümmten Verlauf der Wände auf einem horizontalen Schnitt durch das Gebäude in ca. 1 m Höhe über der Fussbodenebene des Flurs mit der Drawing-Funktion nachzuzeichnen. Dabei wurde die Routine zur Erstellung eines Bogens durch drei Punkte genutzt, um die Verläufe zwischen den Türen bei der äußeren Wand bzw. zwischen Zugang zum Aufzug und dem Fenster im Inneren zu erstellen. Diese Zeichnung wurde dann in eine Polylinie umgewandelt. Da die erzeugte Polylinie aus sehr vielen Teilstücken besteht, wurde sie mit der Funktion "Decimate Polyline" so verändert, dass die Teilstrecken etwa 30 cm lang waren. Diese Polylinie wurde nur in vertikaler Richtung auf die Höhe der Fussbodenebene verschoben und auf die Höhe der Decke des Flurs kopiert. Von übereinander liegenden parallelen Teilstücken der Polylinien wurden gleichzeitig Anfangs- und Endpunkt ausgewählt und eine Fläche erzeugt. Auf diese Weise wurde der Verlauf der gekrümmten Wände im Flur mit den ca. 30 cm breiten Streifen angenähert. Die ausgesparten Stücke über den Türen bzw. über und unter dem Fenster bei der inneren Wand wurden danach mit einem horizontalen Schnitt durch das Gebäude in ca. $2,50\text{ m}$ Höhe über der Fussbodenebene des Flurs erstellt.

Weiterhin fiel bei der Bearbeitung der Punktwolke auf, dass die Ebenheitsmessabweichung von den Materialoberflächen abhängig ist. Stark reflektierende Oberflächen haben eine hohe Streuung zur Folge. Deshalb konnten beispielsweise Türgriffe oder Lampenschirme der Deckenbeleuchtung mit einer silbernen Metalloberfläche im Inneren nicht modelliert werden, da die Geometrie dieser Gegenstände aus der Punktwolke nicht reproduzierbar war. Auch die Erfassung von Glasoberflächen ist problematisch. In einigen Fällen befindet sich ein großer Teil der aufgenommenen Punktmenge vor oder hinter der eigentlichen Lage der Glasoberfläche. Es ist aber auch vorgekommen, dass das Fensterglas gar nicht erfasst wurde. Vermutlich durchdringt der Laserstrahl das Glas oder wird an der Oberfläche in eine andere Richtung wegreflektiert, je nach Einfallswinkel des Laserstrahls.

Bei der Bearbeitung war ebenso ersichtlich, dass dunkle Oberflächen im Vergleich zu hellen schlechter reflektieren oder im Extremfall den Laserstrahl sogar absorbieren. Zudem ist die Güte der Ebenheit der Punkte auf Oberflächen von der Entfernung des Scanners abhängig und verschlechtert sich mit zunehmender Distanz.

Insgesamt gestaltet sich die Auswertung langatmig, da das Ausschneiden und Freistellen der geometrischen Körper zeitaufwendig ist. Zudem dauerte das Zurückkopieren bzw. das Einfügen der erzeugten Geometrien in den Ursprungsausschnitt sehr lange. Dies lag nicht nur an der Größe der Datenmenge, sondern sicherlich auch an dem Computer, auf dem die Auswertung stattfand. Dieser besaß einen 1 *GByte* großen Arbeitsspeicher, die CYCLONE-Datenbank hatte eine Größe von 1,3 *GByte*.

Kapitel 7

Vergleich beider Aufnahmeverfahren

7.1 Koordinatenbestimmung einer Einzelmessung¹

Zum Genauigkeitsvergleich beider Messverfahren wurde im Ingenieurlabor (Raum 318) des Haus 2 der Hochschule Neubrandenburg eine Untersuchungsmessung zur Einzelpunktbestimmung durchgeführt. Im gesamten Raum wurden 14 in AUTOCAD konstruierte Zielmarken (100-113) verteilt (siehe Abbildung 7.1), um günstige und ungünstige Einfallswinkel zum Instrumentenstandpunkt wie bei der örtlichen Gebäudeaufnahme zu simulieren. Zur Betrachtung der Genauigkeiten einer reflektorlosen Einzelpunktbestimmung sollten die ermittelten Koordinaten dieser Zielmarken miteinander verglichen werden. Da die Messungen im Messlabor stattfanden, konnte davon ausgegangen werden, dass die raumklimatischen Bedingungen im Verlauf der Messung konstant blieben.

Um vergleichbare Voraussetzungen für beide Messungen zu schaffen, wurden der Laserscanner und das Tachymeter nacheinander auf demselben Messpfeiler (P6) aufgebaut. Die Bestimmung der Standpunktkoordinaten wurde über eine freie Stationierung zu vier identischen Anschlusspunkten berechnet. Die Bestimmung der räumlichen Position der Zielmarken erfolgte in einer Fernrohrlage und in Mehrfachmessung, um die Messgenauigkeiten zu steigern.

Um die Ergebnisse der beiden Messverfahren mit einem Sollwert vergleichen zu können, mussten die Koordinaten der Zielmarken mit einem weiteren genaueren Verfahren bestimmt werden. Mittels des Vorwärtsschnittes war es möglich, die Koordinaten der Zielmarken von zwei Standpunkten über die Richtungsmessung (TCRP mit 1 mgon) zu bestimmen. Das hatte den Vorteil, dass sich die Ungenauigkeiten in der Streckenmessung ($2\text{ mm} + 2\text{ ppm}$ bzw. $3\text{ mm} + 2\text{ ppm}$) nicht im vollem Umfang auf

¹von Andreas Aust

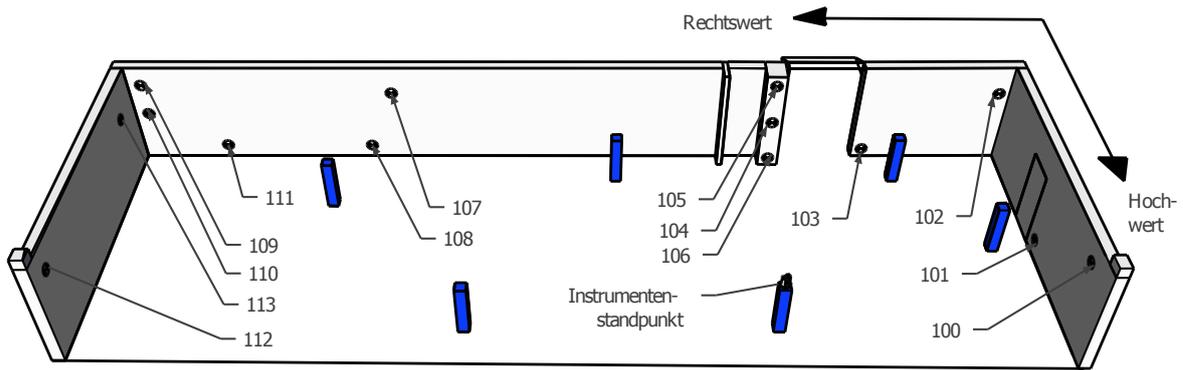


Abbildung 7.1: Zielmarkenverteilung im Raum 318

die Koordinatenbestimmung der Zielmarken auswirkten. Lediglich die Basisstrecke zwischen den beiden Standpunkten wurde dabei redundant über Infrarotmessung auf das Rundprisma GPR1 bestimmt.

Aufgrund der geringen Länge der Basisstrecke (zwischen $3,5\text{ m}$ und $12,5\text{ m}$) entstanden Nachteile in der Anzielgenauigkeit auf die Prismenmitte, welche die Horizontal- und Vertikalwinkel zum Zielpunkt verschlechtern würden. Um diesem Einfluss entgegen zu wirken, erfolgten jeweils drei Messungen in zwei Fernrohrlagen. Zudem wurde für die Bestimmung der Horizontalwinkel zwischen dem zweiten Stand- und dem Zielpunkt eine spezielle Zieleinrichtung verwendet. Diese Zieleinrichtung wurde in einen TRIBRACH-Adapter der Firma CST/BERGER eingesetzt und konnte so gegen den Reflektor ausgetauscht werden (siehe Abb. 7.2). Durch die gedrehte Spitze, welche die Lage der Stehachse repräsentierte, erhöhte sich die Anzielgenauigkeit in horizontaler Lage. Weiterhin musste darauf geachtet werden, dass die beiden Standpunkte mit der Zielmarke ein gleichschenkliges Dreieck ergaben. Die Positionsbestimmung der Standpunkte erfolgte entweder durch eine freie Stationierung oder nach Möglichkeit auf einem koordinatenmäßig bekannten Messpfeiler.

Die anschließende Auswertung der Messergebnisse wurde mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel durchgeführt. Die Messdaten vom Laserscanner wurden als TXT-Datei aus CYCLONE exportiert und mit CREDIT aufbereitet. Die TXT-Datei beinhaltete die Punktnummern und die kartesischen Koordinaten der Zielmarken. In Excel wurden die Koordinaten gemittelt und die empirische Standardabweichung berechnet. Die Berechnungen der Standardabweichungen einer Einzelmessung lagen zwischen 0 mm und 1 mm .

Die Auswertung der Messdaten des Tachymeters wurde zunächst mit CAPLAN durchgeführt. Hier erfolgte eine standpunktweise Auswertung der polaren Messdaten. Die Reduktionen der Strecken und Höhenunterschiede ergaben Standardabweichungen von $0,0\text{ mm}$ bis $0,3\text{ mm}$. Die Standardabweichungen der Richtungen konnten wiederum



Abbildung 7.2: Spezielle Zieleinrichtung

mit CAPLAN nicht berechnet werden (wie in 6.1.1 beschrieben). Die Mittelbildungen der Koordinaten ergaben ebenfalls Differenzen von höchstens einem Millimeter. Die in Excel berechneten Standardabweichungen der Horizontalrichtungen lagen zwischen $0,25 \text{ mgon}$ und $1,16 \text{ mgon}$ und die der Vertikalwinkel zwischen $0,1 \text{ mgon}$ und $2,0 \text{ mgon}$. Bei den Schrägstrecken besaßen die Standardabweichungen Werte von $0,1 \text{ mm}$ und $0,2 \text{ mm}$.

Die Berechnungen der Koordinaten durch den Vorwärtsschnitt wurden in drei Schritten mit Excel durchgeführt. Anhand der Messdaten einer Zielmarke wurde das Auswerteschema geschrieben, das für alle vierzehn Messmarken gültig war. Zunächst wurden die Messdaten in CREDIT formatiert und anschließend in Excel eingelesen. Für die Auswertung mussten jedoch die Stand- und Neupunkte manuell festgelegt und deren Kippachshöhen eingegeben werden. Im ersten Schritt wurden die Horizontalrichtungen, Vertikalwinkel und Schrägstrecken reduziert und daraus die Standardabweichungen berechnet. Danach erfolgte die Berechnung der Lagekoordinaten des Neupunktes als Vorwärtsschnitt über Dreieckswinkel. Im letzten Schritt wurde die z-Koordinate über die trigonometrische Höhenbestimmung ermittelt. Die Tabelle 7.1 zeigt die Unterschiede in der Koordinatenbestimmung der Zielmarken zwischen der Tachymeter- und Laserscannermessung und dem Absolutverfahren des Vorwärtsschnitts.

Die Unterschiede ab 3 mm wurden kursiv gedruckt. Abweichungen über 3 mm liegen nicht mehr im Genauigkeitsbereich der reflektorlosen Entfernungsmessung. Der Großteil der kursiv gedruckten Unterschiede beginnt ab der Zielmarke 109. Die Zielmarken 109 und 110 lagen mit rund $17,9 \text{ m}$ am weitesten von dem Instrumentenstandpunkt entfernt und hatten zudem den spitzesten Einfallswinkel. Aus den Vergleichen mit dem Vorwärtsschnitt wird ersichtlich, dass beim Tachymeter vor allem in der Höhe die größten Abweichungen von bis zu 4 mm zu verzeichnen sind. Die Unterschiede in den Lage-

| Differenz | Tachymetrisch - Vorwärtsschnitt | | | Laserscanning - Vorwärtsschnitt | | | Laserscanning - Tachymetrisch | | |
|---------------|---------------------------------|-----------------------|--------------|---------------------------------|-----------------------|--------------|-------------------------------|-----------------------|--------------|
| Punkt- nr. | Rechts- wert [mm] | Hoch- wert [mm] | Höhe [mm] | Rechts- wert [mm] | Hoch- wert [mm] | Höhe [mm] | Rechts- wert [mm] | Hoch- wert [mm] | Höhe [mm] |
| 100 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 101 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 |
| 102 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 103 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 1 |
| 104 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 3 | 0 |
| 105 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 0 |
| 106 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 107 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| 108 | 1 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 |
| 109 | 1 | 0 | 2 | 5 | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| 110 | 0 | 0 | 3 | 1 | 3 | 0 | 1 | 3 | 3 |
| 111 | 3 | 2 | 2 | 3 | 0 | 2 | 0 | 2 | 4 |
| 112 | 0 | 0 | 4 | 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 3 |
| 113 | 2 | 0 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |

Tabelle 7.1: Differenzbeträge der Koordinaten

koordinaten liegen durchschnittlich zwischen 0 mm und 2 mm mit einem Maximalwert von 3 mm am Punkt 111.

Beim Vergleich mit dem Laserscanner sind die größten Unterschiede in den Lagekoordinaten aufgetreten. An den Punkten 109 bis 111 betragen die maximalen Abweichungen 3 mm bis 5 mm . Die Unterschiede in den Höhenkoordinaten liegen durchschnittlich zwischen 0 mm und 2 mm mit einem Maximalwert von 3 mm am Punkt 102.

Auffällig sind besonders die Koordinatenunterschiede der beiden Messverfahren zum Vorwärtsschnitt an den Punkten 100 bis einschließlich 108. Bei diesen Punkten beträgt die kürzeste Entfernung zum Instrumentenstandpunkt $6,1\text{ m}$ (am Punkt 104) und die längste Entfernung $10,7\text{ m}$ (am Punkt 108). Mit Einfallswinkeln von teilweise 100 gon weisen die Koordinatenunterschiede beider Messverfahren mit 0 mm bis 2 mm nahezu die selben Werte auf.

Beim direkten Vergleich zwischen Laserscanner und Tachymeter ergeben sich besonders bei den Höhenkoordinaten ab Punkt 109 Unterschiede von 3 mm bis 4 mm . Die Ursachen hierfür könnten auf die nachgewiesene vertikale Abweichung zwischen dem roten Messstrahl und der Fernrohrziellinie zurückgeführt werden. Die Lagekoordinaten unterscheiden sich hauptsächlich im Hochwert mit Abweichungen von 3 mm bis 4 mm . Am Punkt 109 ergaben sich auch im Rechtswert Differenzen von 4 mm .

Die Untersuchungsmessung hat gezeigt, dass die reflektorlose Einzelpunktbestimmung mit dem jeweiligen Verfahren zu Ergebnissen im Bereich weniger Millimeter

| Spann- maß [m] | AUTOCAD [m] | CYCLONE [m] | Differenz zu AUTOCAD [m] | Differenz zu CYCLONE [m] | Abb. |
|----------------------|----------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|
| 7,786 | 7,785 | 7,793 | 0,001 | -0,007 | 7.3a, 1 |
| 7,753 | 7,738 | 7,744 | 0,015 | 0,009 | 7.3a, 2 |
| 15,453 | 15,429 | 15,437 | 0,024 | 0,016 | 7.3a, 3 |
| 0,750 | 0,744 | 0,762 | 0,006 | -0,012 | 7.3a, 4 |
| 22,360 | 22,363 | 22,353 | -0,003 | 0,007 | 7.3b, 5 |
| 14,763 | 14,743 | 14,747 | 0,020 | 0,016 | 7.3b, 6 |
| 0,751 | 0,741 | 0,742 | 0,010 | 0,009 | 7.3b, 7 |
| 1,275 | 1,280 | 1,284 | -0,005 | -0,009 | 7.3b, 8 |
| 7,271 | 7,262 | 7,280 | 0,009 | -0,009 | 7.3b, 9 |
| 0,490 | 0,490 | 0,490 | 0,000 | 0,000 | 7.3c, 10 |
| 0,488 | 0,486 | 0,485 | 0,002 | 0,003 | 7.3c, 11 |
| 0,745 | 0,737 | 0,743 | 0,008 | 0,002 | 7.3c, 12 |
| 0,472 | 0,479 | 0,471 | -0,007 | 0,001 | 7.3c, 13 |
| 0,749 | 0,778 | 0,743 | -0,029 | 0,006 | 7.3c, 14 |
| 0,493 | 0,484 | 0,491 | 0,009 | 0,002 | 7.3c, 15 |
| 0,490 | 0,496 | 0,492 | -0,006 | -0,002 | 7.3c, 16 |

Tabelle 7.2: Vergleich Spannmaße zu Modellmaßen

führen kann. Die ermittelten Abweichungen entsprachen den angegebenen Genauigkeitsbereichen der reflektorlosen Entfernungsmessung der Geräte (TCRP1203 mit $3\text{ mm} + 2\text{ ppm}$, HDS6000 mit 3 mm bis 5 mm). Mit den Koordinatenabweichungen zum Sollwert gab es bei direkter Aufnahme und größeren Einfallswinkeln kaum Unterschiede zwischen den beiden Messverfahren. Bei spitzeren Einfallswinkeln wie am Punkt 109 unterscheiden sich die Abweichungen deutlich voneinander. Während beim Tachymeter größere Differenzen in den Höhen vorliegen, sind beim Laserscanner vor allem die Lagekoordinaten ungenauer.

7.2 Vergleich von Spannmaßen zu Modellmaßen²

Um die Genauigkeit der Modellierung beurteilen zu können, wurden am Gebäude der BETHESDAKLINIK an verschiedenen, gut zugänglichen Stellen Spannmaße mit einem Stahlmessband aufgenommen. Diese wurden mit den beiden Modellen verglichen und in Tabelle 7.2 mit Angabe ihrer Differenzen zum realen Spannmaß gegenübergestellt.

Die Differenzen zum 3D-Modell aus AUTOCAD liegen im Betrag zur Soll-Länge zwischen $0,1\text{ cm}$ und $2,9\text{ cm}$. Durchschnittlich ergab der Betrag der Abweichungen einen Wert von $1,0\text{ cm}$. Die Abweichungen des 3D-Modells aus CYCLONE hingegen lie-

²von Jan Walter

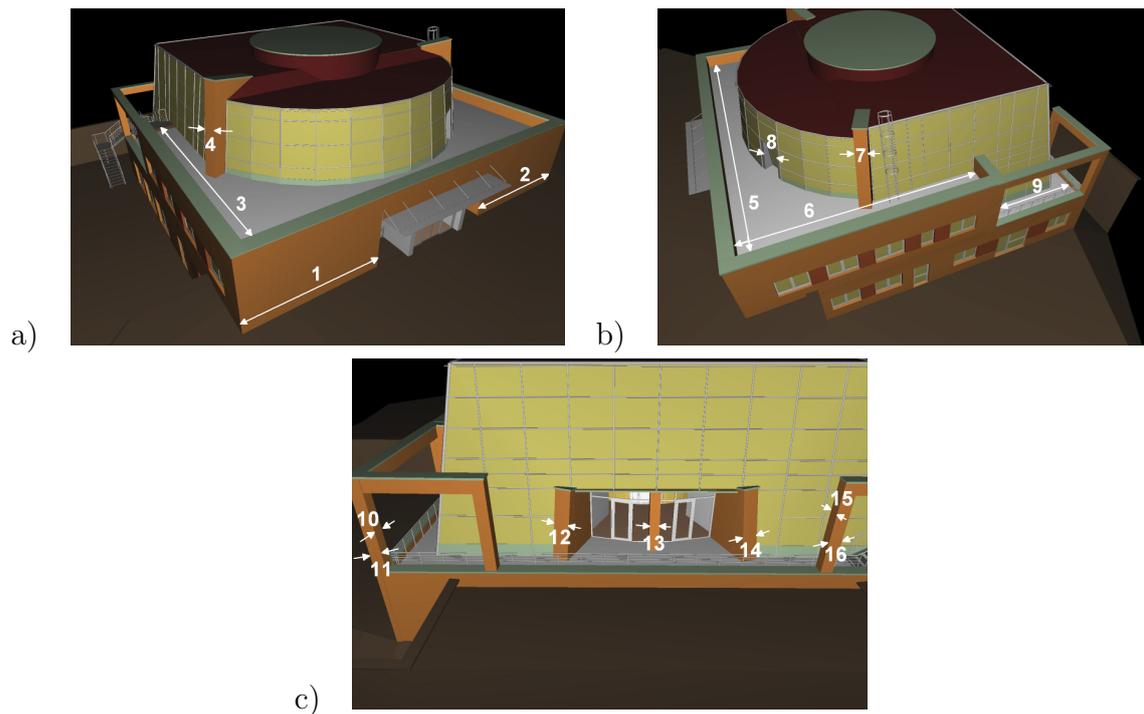


Abbildung 7.3: Lage der Spannmaße

gen in den Absolutwerten zwischen $0,1\text{ cm}$ und $1,6\text{ cm}$ und weisen einen durchschnittlichen Betrag von $0,6\text{ cm}$ auf.

Aus den Differenzen zur Soll-Länge wird ersichtlich, dass die Abweichungen im CYCLONE-Modell geringer sind als die im AUTOCAD-Modell. Die Gründe hierfür sind die hohen Überbestimmungen der erfassten Geometrien beim Laserscanner im Vergleich zur Messung mit dem Tachymeter, wo meist nur die zur Objekterstellung relevanten Punkte aufgenommen wurden. Zudem wirken sich einzelne Ausreißer in der Punktwolke nicht so gravierend auf das Ergebnis aus, wie Ausreißer bei der tachymetrischen Aufnahme. Dies hat fast immer eine Nachmessung zur Folge. Ein weiterer Grund für die Unterschiede zwischen den Genauigkeiten beider Aufnahmen liegt an der Schwierigkeit, Gebäudeecken und Kanten tachymetrisch exakt zu erfassen.

Diese stichprobenartige Untersuchungsmessung hat gezeigt, dass der im Vorfeld angegebene Genauigkeitsbereich von 2 cm bis 4 cm mit beiden Messverfahren erreicht wurde, wobei die Ergebnisse aus dem Scannermodell sogar darunter liegen.

7.3 Zusammenfassender Vergleich

Die beiden hier beschriebenen Verfahren eignen sich, um die Gesamtgeometrie eines Gebäudes zu erfassen. Es gibt jedoch viele Unterschiede sowie Vor- und Nachteile. Die mit dem Tachymeter durchgeführte Messung dauerte länger, aber es wurden erheblich

| Methoden der Aufnahme | Tachymeter | Laserscanner | Verhältnis |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------|
| Gerät | LEICA TCRP1203 | LEICA HDS6000 | - |
| Dauer Messung [h] | 33,5 | 14 | 2,4:1 |
| Aufgemessene Punkte | 2.270 | 50.370.835 | ca. 1:22.200 |
| Zeit für Einzelpunkt [Punkt/min] | 1,1 | 59.965,2 | ca. 1:60.000 |
| Datengröße | 1,06 MB | 12.563,26 MB ≡ 12,563 GB | ca. 1:11.900 |
| Datenformat | GSI (unkomprimiert) | ZFS (komprimiert) | - |

Tabelle 7.3: Vergleich allgemeine Daten der Messung

weniger Punkte erfasst, weshalb auch die Datenmenge deutlich kleiner ist, als die bei der Laserscannermessung (siehe Tabelle 7.3).

Mit beiden Methoden wurde das Funktionshaus der BETHESDAKLINIK von außen aufgenommen. Bei der Tachymetermessung sind zusätzlich die angrenzende Topografie und Teile angrenzender Gebäude erfasst worden, die auch modelliert wurden. Mit dem HDS6000 wurde außerdem das Foyer und der sich daran anschließende Patientenflur gescannt und im Modell abgebildet. Die Anzahl der dabei erzeugten Objekte und der zur Erstellung notwendige Zeitaufwand unterscheidet sich auffällig (siehe Tabelle 7.4). Die Angabe "Zeit / Objekt" berücksichtigt bei der Tachymetermessung jedoch nicht, dass ein großer Teil der Linien schon durch die bei der Messung verwendeten Codes entstanden ist. Dennoch ist der Unterschied deutlich und zeigt, dass die Bearbeitung einer Punktwolke wesentlich zeitaufwendiger ist.

Die Ursache ist einfach: die Konstruktion von Flächen zwischen vorhandenen Punkten und Linien in AUTOCAD ist weniger komplex als die Erzeugung von Körpern und Flächen in CYCLONE und deren Anpassung an die Umgebung. Dazu zählt in CYCLONE beispielsweise das Verlängern bzw. Extrudieren von Geometrien oder das Verschneiden von Flächen.

Da die einzige Gemeinsamkeit beider Modelle die Abbildung der Außenaufnahmen des Funktionshauses ist, wurden die jeweils erzeugten Geometrien nochmal separat in Tabelle 7.5 gegenübergestellt. Auch hier ist wiederum am Zeitunterschied zu erkennen, dass die Modellierung von Körpern in CYCLONE wesentlich aufwendiger ist.

Vergleicht man den gesamten Prozess von der Messung bis zur Visualisierung, fällt der zeitliche Unterschied nicht so gravierend aus (siehe Tabelle 7.6). Jedoch gilt zu bedenken, dass durch die verhältnismäßig geringe Anzahl an Objektpunkten und die Verwendung von Flächen und Netzen in AUTOCAD die Darstellung des Gebäudes einfacher wirkt als das Modell aus CYCLONE, welches sich aus geometrischen Körpern zusammensetzt.

| Aufnahme mit | Tachymeter | Laserscanner | | |
|---------------------------------|---|---|------------------|-----|
| Programm | AUTODESK AUTOCAD 2007 | LEICA CYCLONE 6.0.1 | | |
| erzeugte Objekte | 7630 | 1303 | | |
| Art und Anzahl | 3D-Volumenkörper | 1 | Patches | 66 |
| | Kreis | 1 | Extended patches | 160 |
| | 3D-Flächen | 2625 | Cylinders | 481 |
| | Linien | 4584 | Flange | 1 |
| | 3D-Polylinien | 333 | Elbows | 198 |
| | Polygonnetze | 86 | Boxes | 397 |
| Dauer gesamt [h] | 64 | 140 | | |
| entspricht Arbeits-tage (à 8 h) | 8 | 17,5 | | |
| Zeit / Objekt [min] | 0:30 | 6:27 | | |
| Verhältnis | ca. 1 : 13 | | | |
| Modelliert | Funktionshaus außen teilw. umgeb. Topographie teilw. Nachbargebäude | Funktionshaus außen Patientenflur Fkt.-haus Foyer Funktionshaus | | |

Tabelle 7.4: Vergleich des Modellierungsaufwandes

| Aufnahme mit | Tachymeter | Laserscanner | | |
|----------------|---------------|--------------|------------------|-----|
| Objekte gesamt | 3575 | 897 | | |
| Modelliert | 3D-Flächen | 1236 | Patches | 59 |
| | Linien | 2200 | Extended Patches | 6 |
| | 3D-Polylinien | 99 | Cylinders | 424 |
| | Polygonnetze | 40 | Elbows | 168 |
| | | | Boxes | 240 |
| Dauer [h] | 30,0 | 96,4 | | |
| Verhältnis | 1:3,2 | | | |

Tabelle 7.5: Vergleich Modellierung des Funktionshauses

| Aufnahme mit | Tachymeter | Laserscanner |
|--------------------------------|------------|--------------|
| Messung und Modellierung [h] | 97,5 | 154 |
| entspricht Arbeitstagen (à 8h) | 12,2 | 19,3 |
| Verhältnis | 1 zu 1,6 | |

Tabelle 7.6: Vergleich Zeitlicher Aufwand

Mit beiden Verfahren wird eine ähnliche Genauigkeit erreicht, wobei die Vorgehensweise mit dem Laserscanner bessere Werte liefert und durch die Verwendung einer höheren Auflösungsstufe beim Scannen noch gesteigert werden könnte. Das würde aber auch den Prozess der Auswertung verlängern, da größere Datenmengen verarbeitet werden müssten.

Weiter ist die erreichbare Genauigkeit abhängig von der Größe des zu scannenden Objektes, von der Oberflächenbeschaffenheit bzw. die daraus resultierenden Reflexionseigenschaften des Objektes, den Entfernungen der Aufnahmestandpunkte zum Objekt oder auch der Genauigkeit der Einzelpunktmessungen.

Die Genauigkeit der Modelle aus Daten einer Laserscannermessung hängt zudem von der Erfassung der Passpunkte, den Verknüpfungen der Standpunkte miteinander und der sich daraus ergebenden Qualität der Punktwolke ab. Ebenso spielt die Arbeitsweise des entsprechenden Algorithmus, der gewünschte Geometrien auf die Punktwolke modelliert, eine wichtige Rolle.

Dahingegen ist die Genauigkeit der Objekte im Modell aus der tachymetrischen Messung weniger kontrolliert. Bei der Aufmessung werden objektrelevante Punkte meist nur von einem Standpunkt erfasst. Daher hat eine fehlerhafte Punktbestimmung größere Auswirkungen als bei der Scannermessung.

Bei der Arbeit hat sich herausgestellt, dass beide Vorgehensweisen Möglichkeiten zur Verbesserungen besitzen. Der Auswerteablauf der Tachymeterdaten könnte beispielsweise durch bessere Algorithmen im DXF-TRANSDUCOR erweitert werden, sodass durch das verwendete Codesystem mehr Geometrien automatisch erzeugt werden können. Die Auswertung der Scannermessung würde durch das Arbeiten auf schnelleren Computern beschleunigt werden. Aber auch hier wäre die Weiterentwicklung der Algorithmen zur Objekterkennung aus den Daten einer Punktwolke nützlich und somit sinnvoll.

Kapitel 8

Schlussfolgerung

Das Ziel dieser Arbeit war ein Vergleich zweier Methoden zur Gebäudeaufnahme. Sie zeigte die Vorgehensweise von Beginn der Planung bis zur Visualisierung der ermittelten Daten. Je nach Forderung des Auftraggebers können mit der jeweiligen Messtechnik unterschiedlich detaillierte Modelle erstellt werden.

Die Messungen haben gezeigt, dass die erreichte Genauigkeit beider Verfahren von verschiedenen Faktoren abhängt und in etwa gleich ist. Beim Laserscanner könnte die Genauigkeit weiter erhöht werden, wenn in der höchsten Auflösungsstufe gearbeitet wird. Dies wurde jedoch nicht näher untersucht. Zudem gibt es Schwierigkeiten bei der direkten Erfassung von Ecken und Kanten, die jeweils anders gelöst werden. Weiter hat sich herausgestellt, dass der zeitliche Aufwand der Aufnahme mit dem Laserscanner geringer ist als der mit dem Tachymeter. Die Verwendung eines Tachymeters bei einer Gebäudeaufnahme eignet sich eher zur Erstellung von Modellen mit einer einfachen Grundgeometrie.

Wenn es auf eine schnelle Messung ankommt, weil das Zielobjekt beispielsweise nur kurz zugänglich ist oder wenn aus den Daten einer Gebäudeaufnahme ein detailreiches Abbild erzeugt werden soll, lohnt sich der Einsatz eines Scanners. Die Auswertung ist jedoch wesentlich zeitintensiver als bei der tachymetrischen Messung, besitzt aber ein hohes Potential zur Verbesserung und Automatisierung. Deshalb wird der Einsatz eines Laserscanners bei Gebäudeaufnahmen mit der ständigen Weiterentwicklung der Technik auch aus wirtschaftlicher Sicht zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Literaturverzeichnis

- [1] CREMER PROGRAMMENTWICKLUNG GMBH: *CAPLAN*, 19.06.2007. <http://www.sinning.de/download/de/software/caplan/caplan-prospekt.pdf>, [Stand: 11.01.2009].
- [2] DEUMLICH, F. und R. STEIGER: *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002.
- [3] DPA: *Neubrandenburger helfen Bundeswehr bei der Evakuierung im Ausland*. Ostsee-Zeitung, S. 5, 19.12.2008.
- [4] JOCKEL, R. und M. STOBER: *Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung*. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1999.
- [5] KAHMEN, H.: *Vermessungskunde*. Walter de Gruyter, Berlin, 1997.
- [6] LEICA GEOSYSTEMS: *Original Zubehör - Die Richtige Wahl*. Heerbrugg, Schweiz, 10.08.2007. www.leica-geosystems.com/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=7267, [Stand: 17.12.2008].
- [7] LEICA GEOSYSTEMS: *Zubehör-Newsletter - Nr. 5 Reflektor-Genauigkeiten*. Heerbrugg, Schweiz, 13.3.2006. www.leica-geosystems.com/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=6343, [Stand: 17.12.2008].
- [8] LEICA GEOSYSTEMS: *Original Zubehör Programm 2008/2009*. Heerbrugg, Schweiz, 19.08.2008. www.leica-geosystems.com/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=6339, [Stand: 17.12.2008].
- [9] LEICA GEOSYSTEMS: *Leica TPS1200 Serie - Leistungsstarke Totalstationen*. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz, 2005.
- [10] LEICA GEOSYSTEMS: *TPS 1200 - Gebrauchsanweisung*. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz, Version 2.0, Deutsche Aufl., 2005.

- [11] LEICA GEOSYSTEMS: *Cyclone 5.8, User manual*. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz, 2007.
- [12] LEICA GEOSYSTEMS: *HDS6000 Gebrauchsanleitung*. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz, 2007.
- [13] LEICA GEOSYSTEMS: *Leica TPS1200+ White Paper*. Heerbrugg, Schweiz, 2008. www.leica-geosystems.com/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=9536, [Stand: 02.03.2009].
- [14] MAYER, R.: *AutoCAD - Grundlagen*, November 2004. http://www.rrzn.uni-hannover.de/buch.html?&no_cache=1&titel=auc2008, [Stand: 26.01.2009].
- [15] MÖSER, M., G. MÜLLER, H. SCHLEMMER und H. WERNER: *Handbuch Ingenieurgeodäsie, Grundlagen*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.
- [16] PETRAHN, G.: *Grundlagen der Vermessungstechnik*. Cornelsen, Berlin, 1996.
- [17] ROSENMAYER, B.: *3D-Modelle: Mehr Durchblick*. TGA Fachplaner, S. 60–62, November 2004. <http://www.pgmm.de/bilder/news/TGA-3D-Modelle.pdf>, [Stand: 11.12.2008].
- [18] SCHMIDTPOTT, S.: *Bedeutung und Klassifizierung von 3D-Stadtmodellen*, 23.03.2006. <http://www.lehrer-online.de/521042.php>, [Stand: 17.12.2008].
- [19] SCHULZ ARCHITEKTEN: *Projektbeschreibung: Geriatriische Reha-Klinik Neubrandenburg*. Architekturbüro Schulz Architekten, Hamburg, 1999.
- [20] WERMKE, M., K. KUNKEL-RAZUM und W. SCHOLZE-STUBENRECHT: *DUDEN - Das Fremdwörterbuch*,. Langenscheidt, Berchtesgaden, 2006.
- [21] WITTE, B. und H. SCHMIDT: *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 6. Aufl., 2006.
- [22] ZOLLER+FRÖHLICH GMBH: *IMAGER 5006 Benutzerhandbuch*, 2006. <ftp://zfsupport:zofre2004@217.244.10.19/./Anleitung1.0.5.pdf>, [Stand: 25.01.2009].
- [23] ZOLLER+FRÖHLICH GMBH: *Laserscanning*, 2007. http://www.zf-laser.com/d_lasermesstechnik.html, [Stand: 25.01.2009].

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | DIETRICH-BONHÖFFER-KLINIKUM [Quelle: ING.-BÜRO LANKOW] . . . | 8 |
| 1.2 | Funktionshaus - Ansicht a) Nord, b) Ost, c) West, d) Süd | 9 |
| 2.1 | Messprinzip [4] | 15 |
| 2.2 | Phasenvergleich [4] | 15 |
| 2.3 | Prinzip der trigonometrischen Höhenmessung [21] | 17 |
| 2.4 | Zwangszentrierung mit zentralem Steckzapfen und seitlicher Klemme [5] | 18 |
| 2.5 | Zwangszentrierung mit drei Halteklauen und zentral gelagertem Dreh- verschluss [21] | 19 |
| 3.1 | TCRP1203 [9] | 22 |
| 3.2 | Prinzip der Strahlableitung für Laserscanner mit rotierendem Spiegel [21] | 23 |
| 3.3 | Sichtfeld HDS6000 [12] | 24 |
| 3.4 | Reflektorträger GZR3 | 25 |
| 3.5 | Tripelprisma [2] | 26 |
| 4.1 | DXF-TRANSDUCOR | 31 |
| 5.1 | Zielmarke | 36 |
| 5.2 | Örtliches Festpunktfeld [Quelle: ING.-BÜRO LANKOW] | 39 |
| 5.3 | Beispiele für die Vergabe von Punktcodierungen | 41 |
| 5.4 | a) Verteilung der Zielmarken, b) Scannermessung HDS6000 | 43 |
| 6.1 | Netzkonstellation | 47 |
| 6.2 | AUTOCAD-Modellansicht a) Nordwest, b) Südost | 50 |
| 6.3 | Messvorrichtung | 52 |
| 6.4 | Zusammenhang zwischen Einfallswinkel und Streckenlänge | 55 |
| 6.5 | Zieltafeln zur a) vertikalen und b) horizontalen Prüfung | 57 |
| 6.6 | Funktionshaus Innenansicht | 61 |
| 7.1 | Zielmarkenverteilung im Raum 318 | 65 |

| | | |
|-----|-------------------------------------|----|
| 7.2 | Spezielle Zieleinrichtung | 66 |
| 7.3 | Lage der Spannmaße | 69 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 5.1 | Punkt- und Linienarten | 40 |
| 7.1 | Differenzbeträge der Koordinaten | 67 |
| 7.2 | Vergleich Spannmaße zu Modellmaßen | 68 |
| 7.3 | Vergleich allgemeine Daten der Messung | 70 |
| 7.4 | Vergleich des Modellierungsaufwandes | 71 |
| 7.5 | Vergleich Modellierung des Funktionshauses | 71 |
| 7.6 | Vergleich Zeitlicher Aufwand | 71 |

Anhang

Inhalt der beigefügten CD

Diese Arbeit befindet sich im Wurzelverzeichnis der CD unter dem Namen:

`Bachelorarbeit-Aust-Walter-2009.pdf`

Die Inhalte der Verzeichnisse sind nachfolgend beschrieben.

| Verzeichnisname | Erläuterungen |
|----------------------|--|
| 3D-Modelle | enthält die erzeugten 3D-Modelle als DXF Datei |
| DXF-Transducor | Konvertierungsprogramm |
| Messdaten_Scanner | Verknüpfungsprotokolle der Scannermessung |
| Messdaten_Tachymeter | Messdaten der Gebäudeaufnahme und Berechnungen |
| Vergleichsmessungen | Messdaten der Vergleichsmessung und deren Auswertung |
| Videos | Videoanimation der beiden Modelle |