

Geodätische Schriftenreihe
der Technischen Universität Braunschweig
Nr. 19

**AUTOMATISIERTE MODELLIERUNG
VON BAUWERKSGEOMETRIEN AUS
3D-LASERSCANNER-DATEN**

vom

FACHBEREICH BAUINGENIEURWESEN
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT CAROLO-WILHEMINA
ZU BRAUNSCHWEIG

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von Herrn

Dipl.-Ing. Fredie Kern

aus Salzgitter-Lebenstedt

Braunschweig 2003

ISBN 3-926146-14-1

1. Berichterstatter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Niemeier

2. Berichterstatter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas A. Wunderlich

eingereicht am:

12. September 2002

mündliche Prüfung am:

13. Dezember 2002

Zusammenfassung

Heute kann auf eine Vielzahl von Messmethoden und -techniken zugegriffen werden, um geometrische Parameter wie Lage, Größe, Orientierung und Form eines Bauwerkes zu erfassen. Im Zusammenhang mit der Bauaufnahme wird bevorzugt die Messmethodik Handaufmaß angewendet, sehr häufig werden aber auch Verfahren aus der Architekturphotogrammetrie genutzt und seltener kommen tachymetrische Verfahren zum Einsatz. Die Bauaufnahme ist als Umkehrung des Prozesses zu beschreiben, der vom architektonischen Entwurf über die Bauausführung zum fertiggestellten, ggf. im Laufe der Zeit veränderten, Bauwerk führt (Wangerin 1992). Die Bauaufnahme ist somit auf die Analyse und Interpretation der Befunde eines Bauforschenden angewiesen. Zu den wichtigsten Befundquelle gehört neben dem Original-Bauwerk selbst die Beschreibung der Bauwerksgeometrie in Form von Grundrissen, Schnitten und Ansichten, wie sie durch eine der Aufmaßtechniken herzustellen sind. Die maßstabsgetreuen Zeichnungen bilden zudem die Dokumentationsgrundlage für weitere Befunde, die mit anderen Untersuchungsmethoden wie z. B. Ultraschallmessungen oder der Thermographie gewonnen werden können.

Als weitere Alternative zu den konventionellen Messtechniken wurden Mitte der 1990er Jahre terrestrische 3D-Laserscanner entwickelt. Bei einem Laserscanner wird ein Laserstrahl auf die Oberfläche eines Messobjektes gerichtet. Über die Laufzeit oder die Phasenverschiebung des vom Messobjekt zurückgeworfenen Lichtsignals wird die Entfernung bestimmt. Der Laserstrahl wird sehr schnell z. B. über Spiegelsysteme schrittweise in der Horizontalen und Vertikalen abgelenkt. Das Objekt wird so durch Profile flächenhaft erfasst. Als Ergebnis erhält man für jeden Profilpunkt die kartesischen Koordinatenwerte x , y und z . Im Gegensatz zu den konventionellen Messverfahren wird mit einem 3D-Laserscanner das Messobjekt in einem regelmäßigen Raster abgetastet und seine Oberfläche durch eine Wolke von unklassifizierten Punkten beschrieben.

Diese neue Art der Diskretisierung und deren Bedeutung für die Ableitung der Bauwerksgeometrie ist der Ausgangspunkt für diese Arbeit. Die 3D-Laserscanner-Messtechnik erlaubt unter günstigen Bedingungen die Vermessung von Objekten mit einer Ausdehnung bis etwa 50m binnen weniger Minuten. Während einer einzigen Messung wird eine Punktwolke mit etwa einer Million 3D-Punkten erzeugt. Diese im Vergleich mit anderen geodätischen Messverfahren extrem hohe Messgeschwindigkeit stellt ein enormes Kostensenkungspotential dar. Bislang wird dieser Einspareffekt aber fast vollends durch die aufwendige, überwiegend manuell durchzuführende, dreidimensionale Auswertung aufgezehrt.

In dieser Arbeit wird die automatisierte Auswertung von Punktwolken verfolgt. Ergebnis der Auswertung ist ein Randflächenmodell des Bauwerkes. Diese Aufgabe ähnelt der Flächenrückführung im Bereich des Reverse-Engineering. Der wesentliche Unterschied zum Reverse-Engineering ist, dass sich die Oberflächengeometrie eines Gebäudes überwiegend aus planaren Flächen zusammensetzt, die sich mehr oder minder im rechten Winkel schneiden, während beim Reverse-Engineering die Modellierung mit ausrundenden Freiformflächen im Vordergrund steht. Vorinformationen über die Art der Objektoberfläche sind beim Reverse-Engineering eher unüblich; bei Bauwerken hingegen wird innerhalb einer gewissen Toleranz die Ebenheit und Vertikalität z. B. einer Wand vorausgesetzt. Das entwickelte Verfahren erlaubt eine weitgehende automatisierte Bestimmung der Bauwerksgeometrie, wenn diese Besonderheiten beachtet werden. Die neu eingeführte Methodik der getrennten Verarbeitung einzelner Punktwolken mit anschließender Vereinigung der Einzelmodelle ermöglicht den Entwurf relativ einfacher, universeller und geräteunabhängiger Algorithmen, die zudem auch für große Punktmengen geeignet sind. Für die Transformation von Punktwolken in ein gemeinsames Bezugssystem werden verschiedene Verfahren vorgeschlagen und untersucht.

Aufbauend auf der dreidimensionalen Auswertung werden Verfahren zur automatischen Extraktion von Grundrissen und Schnitten sowie zur Berechnung von Orthophotos angegeben, die für absehbare Zeit weiterhin als Endprodukte von anderen Fachdisziplinen gefordert werden. Wird ein 3D-Laserscanner mit einer Digitalkamera derart kombiniert, dass während des Scannens automatisch Farbphotos aufgenommen werden können, so erhält man korrespondierte Bild- und Geometriedaten für das Messobjekt. Diese Arbeit beschreibt ein Verfahren zur Kombination dieser beiden Informationsebenen. Um die Vorteile diese Technik zu verdeutlichen, ist ein Algorithmus entworfen worden, um Panoramen und Orthophotos höchster Qualität z. B. von einer Hausfassade aus den kombinierten Daten abzuleiten. Die Anwendbarkeit und Nützlichkeit der dargelegten Methoden und Verfahren wird mit drei Praxisbeispielen belegt.

Summary

Nowadays a lot of techniques for the documentation of geometrical characteristics of buildings, such as position, size, orientation and shape, are available. Hand-based measurement is often the preferred method for surveying historical buildings and objects. Photogrammetric methods have also been very popular for the last hundred years. However modern surveying methods like electronic tacheometry are rarely used.

Since the middle of the 1990's terrestrial 3D-laser-scanners have been developed as alternative measurement systems. The laser scanning method allows an automatic surveying of any object in a very short time. For this, a laser beam is directed to an object in several directions in such a manner that a matrix of distance measurements is produced resulting in an unstructured and non-interpretable model of the object. Determination of the distances by the laser can be done by measuring the time of flight of a reflected impulse, the phase difference, frequency shift of a signal or by a triangulation principle. The scanning process is realised using one or two mirrors resp. prisms which allow changes of the deflection angle in small increments. Scanning results in a cloud of irregularly spaced 3D points.

The cloud of points represents the complete surface of an object and is the starting point in this thesis for an automatic processing. Objects sized up to 50 m are measured within a few minutes in favourable circumstances and may contain as many as a million points. The very fast surveying process and high resolution could reduce the cost of documentation in comparison with other techniques. Up to now the effect of cost saving is however neutralized by a large-scale and predominantly manual evaluation and computation in three dimensions.

In this thesis the automatic evaluation of cloud of points is considered as the main task. The result of the evaluation is a boundary-representation model of a building. This problem is similar to the surface reconstruction known from reverse-engineering. The essential difference to reverse-engineering is that the surface of a building consists of planes and other simple shapes. Reverse-engineering refers to the reconstruction of geometric models from existing physical objects like human faces or design parts of a car. The Reverse-engineering aims to model free-form surfaces and does not use a-priori-information. In reconstructing the geometry of a building information about the kind of shape is used. For example one assumes that, by taking into account tolerances, walls are flat and intersect at right angles with each other. The developed procedure allows a far-reaching automatic determination of the geometry of a building when these special properties are considered. An important consideration for automatic evaluation is that every cloud of points is first modelled separately before the resulting models are merged together in a global reference frame. The procedure has the advantage that relatively simple, general and device independent algorithms are needed. Also the algorithms are applicable to a large set of points. Some methods for merging different clouds of points are presented and analysed.

A method for an automatic derivation of cross sections and for creating orthoimages based on the automatic modelling is developed. Groundplans resp. cross sections and orthoimages are two-dimensional surveying products, which continue to be preferred by architects, researchers in cultural heritage and civil engineers. Therefore, it is necessary to have procedures for creating these products with laser-scanners too. When a laser-scanner is combined with a digital photogrammetric camera, which take images simultaneously during the scanning process, one gets geometric data as well as color information of building in high resolution. The supplementing of laser-scanner geometric data with photogrammetric images for modeling is described. The usefulness of all presented methods are demonstrated and discussed with three examples in practice.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
2 Erfassung von Bauwerken	3
2.1 Bauaufnahme	5
2.2 Konventionelle Messmethoden der geometrischen Bauaufnahme	6
2.2.1 Handaufmaß	6
2.2.2 Polaraufnahme	7
2.2.3 Laserscanning	10
2.2.4 Photogrammetrie	11
2.2.5 Weitere Erfassungsmethoden	14
2.3 Zusammenfassung	15
3 Grundlagen der Lasertechnik	16
3.1 Was ist Licht?	16
3.2 Funktionsweise eines Lasers	18
3.3 Charakteristik des Laserlichtes	23
3.3.1 Spektrale Bandbreite	23
3.3.2 Zeitliche und räumliche Kohärenz	23
3.3.3 Strahldivergenz	24
3.3.4 Intensitätsverteilung	24
3.3.5 Polarisierung	25
3.3.6 Sicherheit	26
3.4 Lasertypen	28
3.4.1 Festkörperlaser	28
3.4.2 Gaslaser	28
3.4.3 Farbstofflaser	29
3.4.4 Halbleiter-Laser	29
3.5 Entfernungsmessung mit einem Lasersystem	30
3.5.1 Modulation	30
3.5.2 Radarprinzip	31
3.5.3 Radargleichung	32
3.5.4 Anordnung von Sende- und Empfangsoptik	33
3.5.5 Impulslaufzeitverfahren	34
3.5.6 Dauerlicht- oder Continuous-Wave-Verfahren	35
3.5.7 Triangulationsverfahren	38
3.6 Reflektorlose Entfernungsmessung	39
3.6.1 Reflexion	40
3.6.2 Einfluss der Zielgeometrie und des Einfallswinkels	40
3.6.3 Einfluss der Materialfarbe und der Materialart	44
3.6.4 Atmosphärische Einflüsse	47

3.7	Zusammenfassung	49
4	Laserscanner	50
4.1	Aufbau und Funktionsweise	50
4.2	Arten der Abtastung	50
4.2.1	Abtastung durch Servomotor	51
4.2.2	Abtastung durch Planspiegel	53
4.2.3	Abtastung mit Spiegelpolygon	55
4.2.4	Abtastung mittels Prismen	55
4.2.5	Kombination aus verschiedenen Abtasteinheiten	56
4.3	Arten des Gesichtsfeldes	56
4.4	Marktübersicht	57
4.5	Das Wesen scannender Messverfahren	60
4.6	Laserscanning in Vergleich mit anderen Messverfahren	60
5	3D-Modellierung	62
5.1	Geometrische Modellierung	63
5.2	Drahtgittermodell	65
5.3	Flächenmodell	66
5.3.1	Quadriken	67
5.3.2	Flächenpolynome	67
5.3.3	Freiformflächen	68
5.3.4	Extrusion	70
5.4	Volumenmodell	70
5.4.1	Zellzerlegung	71
5.4.2	Konstruktion mit Raumprimitiven (Constructive Solid Geometry - CSG)	72
5.4.3	Randflächenmodell	74
5.5	Bewertung und Auswahl	78
6	Grundalgorithmen der geometrischen Datenverarbeitung und Ausgleichsrechnung	79
6.1	Grundalgorithmen der geometrischen Datenverarbeitung	79
6.1.1	Halbebenentest	79
6.1.2	Schnitt eines Dreiecks mit einem Strahl	79
6.2	Konvexe Hülle und Triangulierung	80
6.2.1	Konvexe Hülle	81
6.2.2	Delaunay-Triangulierung	82
6.3	Grundalgorithmen der Ausgleichsrechnung	83
6.3.1	Ausgleichende Ebene	83
6.3.2	Ausgleichende Kugel	84
7	Automatische Modellierung von 3D-Laserscanner-Daten	85
7.1	Ziele der Entwicklung	86
7.2	Die Punktwolke als originärer Messdatensatz	87
7.3	Automatische Extraktion von Objektgeometrien	90
7.3.1	Vorverarbeitung/Triangulierung	91
7.3.2	Datenfilterung	94
7.3.3	Segmentierung	95
7.3.4	Weiterverarbeitung auf „echte Flächen“ beschränken	97
7.3.5	Segmentierung und Datenfilterung	98
7.3.6	Verschneidung der Grundgeometrien	100
7.3.7	Zusammenfassung	104
7.4	Automatische Berechnung von Grundrissen und Schnitten	106
7.4.1	Schnitt einer Punktwolke mit einer Schnittebene	106
7.4.2	Beispiel	108

7.4.3	Bewertung	108
7.5	Transformation von Punktwolken ins übergeordnete Bezugssystem	110
7.5.1	Standpunktverknüpfung mittels Referenzmarken	110
7.5.2	Standpunktverknüpfung mittels Objektraumreferenzen	114
7.5.3	Zusammenfassung	115
7.6	Datenfilterung	116
7.7	Nutzung von digitalen Photos	117
7.7.1	Algorithmus zur Kopplung von Scanner- und Bildinformationen	120
7.7.2	Umrechnung der Weltkoordinaten in kamerazentrierte Koordinaten	120
7.7.3	Kamera-Kalibrierung	122
7.7.4	Ableitung von Panoramen und Orthophotos	124
7.7.5	Zusammenfassung	128
8	Auswertebeispiele	129
8.1	3D-Modell „Braunschweiger Löwe“	129
8.2	Volumenbestimmung auf der Mülldeponie Deiderode	132
8.3	Flächenrückführung	134
8.3.1	Simulation	134
8.3.2	Praxisbeispiel	136
9	Fazit und Ausblick	141
	Literaturverzeichnis	143

Abbildungsverzeichnis

1.1	Pressemitteilungen	1
2.1	Beispiel für CAD-gestütztes Handaufmaß.....	7
2.2	Prinzip der Polaraufnahme.	8
2.3	Einschneideverfahren.	9
2.4	3D-Laserscanning.	11
2.5	Prinzip der Stereo-/Mehrbildphotogrammetrie.....	13
2.6	Prinzipskizze des Messbandsystems TRIGOMAT.	14
2.7	Ablaufschema für eine Bauaufnahme.	15
3.1	Youngsche Doppelspalt-Experiment.	17
3.2	Elektromagnetische Welle	17
3.3	Intensitätsspektrum von Laser, Spektrallampe und Glühlampe.	19
3.4	Prinzipskizze eines Laserozillators.	20
3.5	Schematische Darstellung der Absorption und Emission.....	21
3.6	Schematischer Aufbau eines Fabry-Perot-Resonators.	22
3.7	Messung der zeitlichen Kohärenz mit einem Michelson-Interferometer.	23
3.8	Gaußscher Strahl und Strahldivergenz	25
3.9	Einteilung der Laserklassen anhand der Wellenlänge und Leistung.	27
3.10	Schema eines Halbleiter-Lasers	29
3.11	Elektrooptischer Modulator mit Pockels-Zelle	31
3.12	Blockschaltbild eines elektrooptischen Entfernungsmessers.....	33
3.13	Axiale und biaxiale Anordnung von Sende- und Empfangsoptik.....	34
3.14	Streckenkorrektur aufgrund einer biaxalen Anordnung von Sende- und Empfangsoptik.....	35
3.15	Sende- und Empfangssignal beim Impulslaufzeitverfahren	36
3.16	Sende- und Empfangssignal beim Phasendifferenzverfahren	36
3.17	Sende- und Empfangssignal beim Phasenlaufzeitverfahren eines frequenzmodulierten Signals... ..	38
3.18	Aufbau eines Triangulations-Entfernungsmessers.	38
3.19	Spiegelnde Reflexion, diffuse Reflexion und diffuse Reflexion mit Spiegelung.	40
3.20	Ausprägungen der Reflexionsfläche im Zusammenhang mit der Strahldivergenz.	41
3.21	Einfluss des Einfallswinkels bei einer Wand	42
3.22	Veränderung der Wellenfront bei geneigter Zielfläche	42
3.23	Einfluss des Einfallswinkels bei einer Kante	43
3.24	Messabweichungen bei konvexer, konkaver Kante	43
3.25	Ausrundungseffekt bei der reflektorlosen Streckenmessung.	44
3.26	Beispiele für spektrale Reflektanz.	45
3.27	Einfluss des Materials	47
3.28	1. Geschwindigkeitskorrektur	48
4.1	Das Abtastsystem „Tachymeter“.....	51
4.2	Abtastmuster beim Tachymeter-Prinzip.	52
4.3	Reflexionsgesetz.....	53
4.4	Abtastsystem über zwei Planspiegel.	54
4.5	Abtastung mit einem kontinuierlich rotierenden Spiegelpolygon.	55

4.6	Arten von Gesichtsfeldern	56
4.7	Systemkriterien eines Laserscanners.	57
4.8	Das Zusammenspiel von Schrittweite und Spotgröße.	58
4.9	Laserscanning in Vergleich mit anderen Messverfahren	61
5.1	Modellierung eines Zylinders nach Lage, Form, Orientierung und Größe.	63
5.2	Mehrdeutigkeit des Drahtgittermodells	65
5.3	Non-Uniform-B-Spline-Fläche.	70
5.4	Konstruktion einer Extrusion aus Querschnitt und Trajektorie.	71
5.5	Zellerlegung mittels Oktaalbaum	72
5.6	CSG- und B-Rep.-Modellierung im Vergleich.	74
5.7	B-Rep.-Modellierung	75
5.8	Bezeichnungen der Ecken, Kanten und Maschen eines prismatischen Körpers.	76
5.9	Beispiel für ein Modell mit nichtmannigfaltiger Umgebung.	77
5.10	Anwendung der Euler-Poincaré-Formel.	78
6.1	Schnitt Strahl/Dreieck.	80
6.2	Ein Graph G und sein dualer Graph G^*	81
6.3	Konvexe Hülle einer Punktmenge.	82
6.4	Zwei Möglichkeiten für die Triangulierung eines Vierecks.	82
7.1	Die Auswerteschritte in einem allgemeinen Auswerteschema.	86
7.2	Distanzmatrix	88
7.3	Distanzbild	89
7.4	Strategie der automatischen Auswertung mit „früher“ Transformation	90
7.5	Strategie der automatischen Auswertung mit „später“ Transformation	91
7.6	Auswerteschritte der automatischen Extraktion von Objektgeometrien	92
7.7	Abgewandelte winged-edge-Struktur.	93
7.8	Die Punktwolke klassifiziert nach der Punktdichte.	94
7.9	Beispiel für Abweichungen von einer idealen Ebene	95
7.10	Quantisierungseffekt	95
7.11	Ergebnisse der Segmentierung am Beispiel einer gescannten Kugel	97
7.12	Ein Band-Segment täuscht eine Fläche vor.	97
7.13	Elimination von Bandsegmenten am Beispiel eines gescannten Quaders.	98
7.14	Auswirkung der Datenfilterung auf die Segmentierung.	99
7.15	Toleranzfunktion.	100
7.16	Prinzip der Verschneidung der Segmente.	101
7.17	Ungültige Dreifach-Schnitte	102
7.18	Ergebnis der Verschneidung für einen Würfel.	104
7.19	Beispiel für das Verfahren der automatischen Modellierung	105
7.20	Automatisch abgeleiteter Horizontalschnitt	109
7.21	Retroreflektierende Referenzmarke.	111
7.22	Passkugel als Referenzmarke.	112
7.23	Bestimmung des Kugelmittelpunktes einer Passkugel.	113
7.24	Standpunktverknüpfung über Objektraumreferenzen	115
7.25	Prinzip der kantenerhaltenden Datenfilterung.	117
7.26	Beispiel einer kantenerhaltenden Datenfilterung	118
7.27	Auflösungssteigerung durch Kombination mit Digitalphotos.	119
7.28	Digital-Kamera und Laserscanner benutzen verschiedene Bezugssysteme.	120
7.29	Zentralperspektive mit radialer Verzeichnung.	121
7.30	Auswirkung der Exzentrizität auf die äußere Orientierung.	123
7.31	Passpunkt-Tafel	124
7.32	Grundschema zur Berechnung synthetischer Bilder.	125
7.33	Zylindrisches Panorama.	126
7.34	ScanReader-Screenshot	127

8.1	Standpunktverknüpfung „Braunschweiger Löwe“	130
8.2	Modell „Braunschweiger Löwe“	131
8.3	Volumen einer Probe	133
8.4	Beispiel mit synthetischen Laserscannerdaten.	135
8.5	Innenraumvermessung „Villa Gaußstraße 22“	137
8.6	Ergebnis der Segmentierung.	139
8.7	Ergebnis der Flächenrückführung (Ecken und Kanten).	140

Tabellenverzeichnis

3.1	Definition der neuen Laserklassen.	27
3.2	Häufig verwendete Materialien für Halbleiterlaser	30
3.3	Reflektanz einiger diffus reflektierender Materialien.	46
4.1	Marktübersicht	59
4.2	Das 3D-Laserscanning und die Photogrammetrie ergänzen sich idealer Weise.	61
7.1	Stellgrößen für die automatische Extraktion.	106
7.2	Verfahren der Standpunktverknüpfung im Vergleich.	116
7.3	Standardparameter für eine iterative kantenerhaltende Datenfilterung.	118
8.1	Ergebnis der Standpunktverknüpfung –Kugelmittelpunkte–	130
8.2	Ergebnis der Standpunktverknüpfung –Transformationen–	130
8.3	Zeitaufwand für das Modell „Braunschweiger Löwe“	132
8.4	Zeitaufwand für die Volumenermittlung	134
8.5	Stellgrößen für die automatische Extraktion.	136
8.6	Innere Verknüpfung zwischen den Punktwolken über die Passebenen.	137
8.7	Geschätzte Passebenen.	138
8.8	Geschätzte Transformationen.	138
8.9	Stellgrößen für Flächenrückführung.	138
8.10	Zeitaufwand für die Flächenrückführung „Gaußstraße 22“	140

Kapitel 1

Einleitung

Ein Ausgangspunkt für die Beschäftigung mit terrestrischen 3D-Laserscannersystemen für den Nahbereich war die Produktinformation über das Callidus-System in der Fachzeitschrift Der Vermessungsingenieur Heft 6/1998: „Callidus^(R) revolutioniert das Bauwesen“ mit seinen interessanten Versprechungen.



Abbildung 1.1: Pressemitteilung Dr. Niebuhr GmbH, Halle (Saale), Dezember 1998 [Nie98], Produktvorstellung Cyrax Februar 2001 [CT01] –Collage–

Bis zu diesem Zeitpunkt waren derartige Geräte im Vermessungswesen eher unbekannt. Das revolutionäre und faszinierende an 3D-Laserscannersystemen ist der automatische Messvorgang, der unmittelbar auf eine dreidimensionale Beschreibung einer Objektgeometrie führt. Ein Laserscanner erlaubt somit die Vermessung auf Knopfdruck!

Bei genauerer Betrachtung der Dinge, abseits der Werbeversprechungen, zeichneten sich Problembereiche ab, für die es Lösungen zu finden galt und, wie sich zeigen wird, in erheblichen Umfang auch heute und in Zukunft zu finden gilt.

Die Problembereiche, die mit dieser Arbeit wissenschaftlich bearbeitet werden, sind in einem Zitat des Geschichtswissenschaftlers und Bauforschers *Ulrich Klein* in Kürze festgehalten:

„In der Mitte eines Raums aufgestellt, können solche Geräte (*Anm.: 3-D-Scanner*) alle Wandoberflächen in einem 180° Winkel erfassen. Hierbei entstehen mit bereits sehr hoher Genauigkeit extrem große Dateien von Punktwerten. Auch hier besteht wie bei ... Photogrammetrien das Problem, gewünschte von unerwünschten Informationen zu trennen und das Ergebnis in eine Vektorgrafik zu überführen. Ein weiteres Problem stellt die Addition verschiedener Aufnahmen in einem Raum oder der Anschluss von Räumen dar ... Beim jetzigen Stand (*Anm.: Juli 2001*) der Entwicklung ist ein solcher Scanner sicherlich für die hochpräzise Vermessung bei-

spielsweise einer Stuckdecke oder eines Portals mit Skulpturen nützlich, bis zu einem kompletten Gebäudeaufmaß mit Scannern ist aber noch ein weiter Weg zurückzulegen.“ [Kle01, S. 46ff]

Insbesondere im Rahmen von Bauaufnahmen werden folgende Anforderungen an ein operables Laserscannersystem gestellt:

- Große Datenmengen (Punktwolke) müssen verarbeitet werden können.
- Wesentliche, die Objektgeometrie eindeutig beschreibende Informationen sind von unnützen zu trennen.
- Nach Abschluss der Auswertung muss ein vektorielles Geometriemodell vorliegen.
- Der Laserscanner muss in ein übergeordnetes Bezugssystem einmessbar sein.
- Das Gebäudeaufmaß mit einem Laserscanner muss vollständig sein.

Ergänzt werden müssen diese Zielvorgaben um das Element der Automatisierung. Es macht wenig Sinn, Messungen aus einem automatischen Messvorgang überwiegend manuell auswerten zu wollen. Allein die dabei zu bewältigende Datenflut setzt hier Grenzen. Auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sollte die kostengünstige automatische Messung nicht durch eine personal- und damit leider auch kostenintensiven Auswertung wieder aufgezehrt werden. Daher leiten sich in der Summe folgende Untersuchungen und Entwicklungen ab, die die wesentlichen Ziele dieser Arbeit sind.

1. Automatische Extraktion von Objektgeometrien aus Laserscannerdaten (Kapitel 7.3)
2. Transformation von Punktwolken ins übergeordnete Bezugssystem (Kapitel 7.5)
3. Datenfilterung (Kapitel 7.6)

Hinzu kommen Entwicklungen, die zu einfachen, aber zweckmäßigen Produkten führen, die so kaum durch eine andere Messtechnik wirtschaftlich realisierbar wären.

4. Automatische Berechnung von Grundrissen und Schnitten (Kapitel 7.4)
5. Automatische Ableitung von Panoramen und Orthophotos (Kapitel 7.7)

Der derzeitige Stand der Meßtechnik zur geometrischen Erfassung von Bauwerksgeometrien ist im Kapitel 2 wiedergegeben. Die Grundlagen zum Verständnis der Auswertelgorithmen sind in den Kapiteln 3 bis 6 aufgearbeitet. Dabei wird zum einen auf die hardwareseitigen Besonderheiten der Lasermesstechnik (Kapitel 3 und 4) und zum anderen auf die softwareseitige Modellierung dreidimensionaler Geometrien (Kapitel 5) sowie Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung und Ausgleichsrechnung (Kapitel 6) eingegangen. Bei den instrumentellen Betrachtungen wird die reflektorlose Streckenmessung auf natürliche Oberflächen näher untersucht, werden verschiedene Abtastsysteme beschrieben und wird das Wesen des Laserscannens im Vergleich zu konventionellen Messtechniken herausgearbeitet. Vor- und Nachteile sowie Grenzen der in Kapitel 7 dargelegten Algorithmen und Auswerteverfahren werden im Kapitel 8 anhand praktischer Beispiele aufgezeigt.

Kapitel 2

Erfassung von Bauwerken

An dieser Stelle soll auf eine eingehende Diskussion des Begriffes Bauwerk verzichtet werden, wohlwissend dass hier sehr heterogene, notwendigerweise verschiedene Ansichten der Fachdisziplinen aus dem Bauwesen, der Architektur, der Kunstgeschichte, der Informatik usw. und dem Vermessungswesen bestehen.

Zu Bauwerken zählt man Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke, wie z. B. Tunnel, Verkehrswege, Windräder oder Stützmauern sowie Deponien oder Bergwerke. Für diese Arbeit genügt es, unter einem Bauwerk ein künstliches von Menschenhand erbautes Objekt zu verstehen, das fest mit dem Erdboden verbunden ist und dessen Länge, Breite und Höhen zwischen 1 bis 100 m beträgt. Bei den Betrachtungen und Untersuchungen dieser Arbeit stehen Gebäude im Vordergrund der Anschauung, wenn von Bauwerksgeometrien die Rede ist.

Die Notwendigkeit ein Bauwerk zu untersuchen, zu vermessen und/oder zu dokumentieren kann aus vielfältigen Bedürfnissen heraus resultieren. Jede Vermessung wird nicht zum Selbstzweck durchgeführt sondern ist Ziel einer beabsichtigten baulichen Aktivität, Begutachtung oder wissenschaftlichen Erforschung. Als Dokumentationsmedium werden überwiegend Karten und Pläne aber auch Datenbanken verwendet. Mit ihnen wird ein mathematisches, i.d.R. im Maßstab verkleinertes (Modellmaßstab), idealisiertes Modell der Objektwirklichkeit dargestellt bzw. gespeichert.

Bauliche Veränderungen

Sind Veränderungen an einem Bauwerk geplant, so ist die genaue Kenntnis des aktuellen Bestandes und des Bauwerkszustandes eine der wichtigsten Entscheidungsgrundlagen. Im Allgemeinen werden hierfür maßstäbliche Pläne hergestellt. Für Baumaßnahmen sind im Rahmen einer Baugenehmigung Übersichtspläne, Lagepläne, Bauzeichnungen und Baubeschreibungen einzureichen. Die Bauzeichnungen im Regelmaßstab 1 : 100 stellen das Bauwerk in Grundrissen, Schnitten und Ansichten dar. Aus ihnen müssen die konstruktiven Zusammenhänge erkennbar sein. Anhand der Bauzeichnungen und Baubeschreibungen wird entschieden, ob gesetzliche, z. B. baupolizeiliche, und technische Grundsätze, z. B. Normen, erfüllt werden.

Sicherung des Bestandes

Zur Beurteilung der Standsicherheit eines Bauwerkes und für die Dokumentation von baulichen Mängeln sind Bestandsaufnahmen erforderlich. Die Pläne enthalten Informationen über das statische System, baukonstruktive und bauphysikalische Einzelheiten. Hierzu ist nicht nur die Form und Größe eines Baukörpers zu bestimmen sondern sind auch die Gesetzmäßigkeiten der Konstruktion zu ermitteln sowie das Baumaterial im Inneren des Baukörpers bei Bedarf mit geeigneten Sensoren zu ergründen. Für diese Bauuntersuchungen stehen vielfältigste Methoden zur Verfügung. Sie werden in zerstörungsfreie und nicht zerstörungsfreie Methoden unterteilt. Zerstörungsfreie Methoden, die die Substanz nicht schädigen oder vernichten, werden bevorzugt eingesetzt ([Dzi90]).

Ziel von Bauuntersuchungen ist die Gewinnung von Erkenntnissen, aus denen ein wirtschaftliches Instandhaltungskonzept hergeleitet werden kann.

Verkauf, Wertermittlung

Für den Verkauf oder die Wertermittlung einer Immobilien werden ebenso Bestandspläne benötigt. Sie lassen sich, soweit sie nicht als Baupläne vorhanden sind, durch überschlägige Aufmaße herstellen und ermöglichen die Berechnung von Wohnflächen und umbautem Raum. Der bauliche Zustand wird meist

verbal wiedergegeben. Bestandspläne sind vielfach Grundlage für das Facility Management und sind dabei Bestandteil eines Gebäudeinformationssystems [Har97].

Bauforschung und Denkmalpflege

Die Bauaufnahme zum Zwecke der Bauforschung und Denkmalpflege zeichnet sich durch ein hohes Maß an Genauigkeit und Detailreichtum aus. Die Grundrisse, Ansichten und Schnitte werden z. B. hinsichtlich des Bauentwurfs, der Baukonstruktion oder Bauhistorie analysiert und interpretiert. Für die Denkmalpflege ist eine umfassende Bestandserfassung vonnöten, die auch eine Rekonstruktion zerstörter oder fehlender Teile des Bauwerkes erlaubt. Neben Form und Größe sind weitere Parameter, wie z. B. Material, Materialeigenschaften, Alter, Herkunft, Farbe, Art des Mauerverbands, Steinmetzzeichen etc. von Bedeutung. Art, Umfang und Genauigkeit der Bauaufnahme für Forschungs- und denkmalpflegerische Zwecke sind von Objekt zu Objekt verschieden und können recht kostenintensiv sein ([Eck99, S. 11-34]).

Die verschiedenen Bedürfnisse und Anwendungsfelder schlagen sich in verschiedenen Begriffen für die Erfassung von Bauwerken, insbesondere von Bauwerksgeometrien, nieder.

Topographische Vermessung

Für die Darstellung von Bauwerken in Landkarten oder topographischen Informationssystemen sind diese zu vermessen. Diese Vermessung beschränkt sich in der Regel auf die Erfassung des Grundrisses bzw. der Außenmaße. Die dritte Dimension, die Geländehöhe über dem Meeresspiegel, wird gesondert erfasst und als Höhenlinien oder als digitales Geländemodell (DGM) dargestellt. Nur bei 3D-Stadtmodellen werden auch Objekte auf der Erdoberfläche dreidimensional modelliert. Für topographische Vermessungen werden meist Modellmaßstäbe kleiner 1 : 1000 benutzt. Produkte der Landesvermessung sind erst ab einem Maßstab von 1 : 5000 erhältlich.

Gebäudevermessung

Die Gebäudevermessung ist, einer Legaldefinition gleichkommend, in vielen Vermessungs- und Katastergesetzen der Bundesländer beschrieben. Bei der Gebäudevermessung sind die Gebäudeumrisse zu den Flurstücksgrenzen einzumessen, damit sie im Liegenschaftskataster geführt werden können. Die Gebäudevermessung ist eine hoheitliche Aufgabe mit dem Ziel, dem Rechtsverkehr von Liegenschaften dienlich zu sein. Der Modellmaßstab bei der Gebäudevermessung liegt bei 1 : 1000 (innerstädtisch 1 : 500) bei der Darstellung in Liegenschaftskarten und bei 1 : 1 für die Dokumentation der Messergebnisse. In der Regel werden nur Details größer als 30 cm dokumentiert.

Bauvermessung

Unter Bauvermessungen werden alle Vermessungsdienstleistungen subsummiert, die vor, während oder nach einer Baumaßnahme zu erbringen sind. Hierzu zählen als Besonderheit Absteckungsarbeiten, bei denen ein Planungszustand in die Örtlichkeit übertragen wird. Einen großen Raum nehmen auch Ermittlungen von (Erd-)Massen zur Abrechnung von erbrachten Bauleistungen ein. Der dabei anzuhaltende Modellmaßstab schwankt zwischen 1 : 10 und 1 : 1.

Bauwerksüberwachung

Bestandteil einer Bauwerksüberwachung kann eine ingenieurgeodätische Messung und Analyse der Bauwerksgeometrie sein im Verbund mit anderen Untersuchungen und Analysen von Bausachverständigen. Zu dokumentieren sind Veränderungen (Setzungen und Verformungen) der Bauwerksgeometrie infolge des Einwirkens von äußeren und inneren Kräften oder Lasten, z. B. dem Wasserdruck an einer Staumauer, auf das Bauwerk. Wesenseigen bei der Bauwerksüberwachung ist die mehrfache Beobachtung des Zustandes zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Epochen). Aus dem Epochenvergleich lassen sich z. B. Rückschlüsse auf die derzeitige und zukünftige Verkehrs- und Standsicherheit gewinnen. Die Vermessungen sind daher mit höchster Genauigkeit, meist an der Grenze der Leistungsfähigkeit der Messinstrumente, vorzunehmen.

Bauaufnahme

Die Bauaufnahme ist ein feststehender Begriff und steht für die umfassende Dokumentation eines kulturhistorisch bedeutsamen Bauwerkes. Die Dokumentation der Bauwerksgeometrie nimmt nur einen Teil der zu erfassenden Gesamtinformationen ein. Die Geometrie wird bevorzugt in Grundrissen, Schnitten und Ansichten im Maßstab 1 : 10 bis 1 : 100 festgehalten. Die Zeichnungen bilden die Grundlage zur Dokumentation weiterer Merkmale des Bauwerkes. Hierzu zählen insbesondere Schadensbefunde.

2.1 Bauaufnahme

Zur Definition des Begriffes Bauaufnahme soll hier die am häufigsten zitierte Definition angeführt werden: „Bauaufnahme ist die Bestands- und Zustandserfassung eines dreidimensionalen Objekts und dessen Wiedergabe in zweidimensionalen maßstabsgerechten Plänen und – soweit zeichnerisch nicht darstellbar – durch die verbale Beschreibung. Damit lässt sich die Bauaufnahme als die Umkehrung des Prozesses beschreiben, der vom architektonischen Entwurf über die Bauausführung zum fertiggestellten, ggf. im Laufe der Zeit veränderten Bauwerk führt.“ [Wan92, S. 11]

Damit ist insbesondere Zweck und Ziel einer Bauaufnahme, zweidimensionale Zeichnungen und Pläne von einem dreidimensionalen Objekt anzufertigen. Heute, so würde man meinen, wäre eine Beschränkung auf die Herstellung von Zeichnungen überholt. In der Praxis besteht aber weiterhin eine geringe Akzeptanz bezüglich digitaler Dokumentationen, seien sie nun CAD-Zeichnungen, dreidimensionale Computermodelle oder Computersimulationen ([Kle01, S. 68] und [Hei00, S. 41]).

Die Bauaufnahme ist ein Prozess der Erkenntnisgewinnung, der sich nicht nur auf den technischen Vorgang des Erfassens mit einem Messmittel reduzieren lassen kann. Aus Äußerungen wie der folgenden von *Hansen* lässt sich diese Vorstellung ableiten. „Bei einem Gebäude, das man besser verstehen möchte, ist es das Beste mit einer Bauaufnahme anzufangen. – also einen Dialog mit dem Objekt einzugehen. Dieser Dialog des Aufnehmers besteht aus drei Elementen: Beobachten, Analysieren und Dokumentieren.“ [Han01, S. 32].

Klar wird hier auch, dass die Bauaufnahme eine Fülle von Aufgaben beinhaltet, die von einem Fachmann allein nicht bewältigt werden können [Ric96].

Der Prozessgedanke steht auch bei *Cramer* im Vordergrund: „Bauaufnahme ist vom Grundsatz her ein rückwärts gewandter Entwurfsprozess.“ [Cra84, S. 13]. Ebenso *Heiliger*: „Der Gebäudebestand wird deduktiv in seine Einzelteile zerlegt. Dabei werden die Daten Raum für Raum erfasst. Im Gesamtkontext aller Bestandsdaten lässt sich auf dieser Basis dann das Gebäudemodell, *der Entwurf des Architekten*, rekonstruieren.“ [Hei00, S. 11].

Der mit einer Bauaufnahme beauftragte Vermessungsingenieur sieht sich so einer ungewohnten Situation gegenübergestellt. Er ist ausgebildet worden, die Objekte seiner Umwelt mit geodätischen und photogrammetrischen Methoden in geometrische Einheiten zu zerlegen und bezüglich eines Raumbezuges mathematisch korrekt zu beschreiben¹. Für ihn stehen die geometrischen Merkmale im Vordergrund. Seine Messwerkzeuge erlauben ihm nur, die Oberflächengeometrie zu erfassen. Ein Verständnis über die inneren Bedeutungszusammenhänge der Objekte bleiben ihm verborgen. Das Objekt wird ausschließlich geometrisch modelliert; in Punkte, Linien und Flächen, deren Bedeutung für ihn von untergeordnetem Interesse ist. Er kann meist aufgrund fehlender Sachkenntnis Bedeutungszusammenhänge nicht erkennen und somit auch nicht erfassen, geschweige denn analysieren. Ein Dialog zwischen Aufnehmer und Objekt, wie *Hansen* ihn bei einer Bauaufnahme fordert, kann so in der Regel nicht stattfinden, wenn der Aufnehmer ein Vermessungsingenieur ist. Auch bei der Ableitung des rückwärts gerichteten Entwurfsprozesses muss der Vermessungsingenieur die Grenzen seines Fachwissens erweitern. Was bleibt ist der Rückzug auf die Erfassung geometrischer Parameter. Hierbei kann der Vermessungsingenieur aber seine Stärke bezüglich erforderlicher Genauigkeit und Zuverlässigkeit einbringen. Dem Bauforscher muss es überlassen bleiben, in Zusammenarbeit mit dem Vermessungsingenieur, Bedeutungen, Bewertungen und Analysen vorzunehmen.

Die Erfassung und Beschreibung geometrischer Parameter kann als Teilprozess innerhalb des Bauaufnahmeprozesses gesehen werden (Abbildung: 2.7). Diese vom Vermessungsingenieur durchzuführende **geometrische Bauaufnahme** liefert Vorversionen von Grundrissen, Schnitten und Ansichten, in denen die Oberflächengeometrie nach geodätischem Verständnis genau und zuverlässig dokumentiert ist. Die vermessungstechnischen Produkte besitzen eine hohe objektive geometrische Qualität, die sich aus der ingenieurtechnischen Arbeitsweise des Vermessungsingenieurs ergibt, und sind Arbeiten von Architekten und anderen Bauschaffenden diesbezüglich weit überlegen. Dokumentationen anderer Fachdisziplinen bauen auf den Vermessungsprodukten auf. Der Bauforscher ergänzt die Pläne im Detail um bauhistorisch relevante Merkmale, der Bauingenieur dokumentiert Bauschäden oder statische Merkmale, der Restaurator vermerkt in den Plänen seine Instandsetzungs- und Rekonstruktionsmaßnahmen.

¹„Die Vermessungskunde befasst sich mit der Vermessung und Berechnung größerer und kleinerer Teile der Erdoberfläche und ihrer Darstellung in Karten und Plänen.“ [GK95, S. 13]

2.2 Konventionelle Messmethoden der geometrischen Bauaufnahme

Die konventionellen Messmethoden der geometrischen Bauaufnahme lassen sich in zwei Klassen unterscheiden [Hak82, S. 45ff]:

- Originäre oder unmittelbare Erfassung
- Sekundäre oder mittelbare Erfassung

Bei den originären Erfassungsmethoden werden die Informationen direkt am Objekt gewonnen. Die sekundäre Erfassung bedient sich bereits erfasster und dokumentierter Informationen. Der Zugriff auf die Objektinformation geschieht dann indirekt z. B. durch Abgriff aus einem Grundriss. Sekundäre Methoden erlauben nur eine Informationsgewinnung mit eingeschränkter Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Aktualität, da Unzugänglichkeiten der Ersterfassung mit übernommen werden. Ein anschließender Vergleich mit der Örtlichkeit ist somit unumgänglich. Veränderungen oder Abweichungen müssen nachträglich durch eine originäre Erfassung dokumentiert und eingearbeitet werden. Bei der sekundären Erfassung werden vorhandene analoge Grundrisse, Schnitte und Ansichten in einem manuellen, halbautomatischen oder automatischen Digitalisiervorgang in eine Rastergraphik (Scannen) oder Vektorgraphik (Raster-Vektor-Transformation) überführt. Näheres zur sekundären Erfassung findet sich in [Run89], [Sch95] und [Hei00].

Eine Übersicht über die Erfassungsmethoden der geometrischen Bauaufnahme finden sich unter anderem in [Run89], [Sch95], [Kle01]. Hier erfolgt eine Beschränkung auf die Beschreibung der originären Erfassungsmethoden, denn in diese Klasse ist auch das 3D-Laserscanner-Verfahren als nicht konventionelle Methode einzuordnen.

2.2.1 Handaufmaß

Das händische Aufmaß bedient sich einfachster Messmittel wie Gliedermessstab, Bandmaß, Winkelprisma etc. Im Angesicht des Messobjektes werden Längenmessungen am Objekt abgegriffen und sogleich in einer porträtierenden Feldskizze niedergeschrieben bzw. zu einer Rohzeichnung verarbeitet. Das Handaufmaß ist aufgrund dieser unmittelbaren Nähe zum Objekt und den vermeintlich einfach zu handhabenden Messmitteln sehr beliebt. Der direkte Kontakt erlaubt, wie keine andere Methode, das Begreifen des Objektes im doppelten Sinne des Wortes. Neben der geometrischen Maßinformation können Seh-, Tast-, Geruchs- und Geschmackssinn genutzt werden, das Objekt zu analysieren. Die gewonnenen Informationen und Erkenntnisse werden als frei gestaltbare Skizze festgehalten, die auch künstlerischen Ansprüchen genügt.

Diesem nicht zu unterschätzendem Vorteil stehen aber sehr ungünstige Eigenschaften hinsichtlich der geometrischen Qualität entgegen. Nur kurze Entfernungen können mit vertretbarer Genauigkeit gemessen werden. Winkel müssen über Spannmaße abgeleitet oder kontrolliert werden, was einen erheblich Aufwand bedeutet. In der Summe aller Messungen weist das Handaufmaß eine ungünstige Fehlerfortpflanzung auf. Schon nach zwei oder drei durch einfaches Verketteten der Maße aufgemessenen Räumen ergeben sich unrealistische Wandstärken zwischen den Räumen. Vielfach wird der mangelnden Kontrollmöglichkeiten wegen oder als Zugeständnis an die Wirtschaftlichkeit angenommen, dass Wände, Decken und Böden rechtwinklig, fluchtend oder parallel zu einander stehen sowie in sich eben sind.

Der Nachteil, dass jeder Endpunkt des Messbandes erreichbar sein muss, ist durch das Aufkommen von Handlaserentfernungsmessern gemildert worden. Mit ihnen können Entfernungen bis 30m von einer Person gemessen werden. Die Messdaten können digital in einem angeschlossenen Feldrechner (Digitales Feldbuch) weiterverarbeitet werden. Der Aufnehmer skizziert dabei direkt am Bildschirm den Grundriss oder Schnitt. Bei der anschließenden ausgleichenden Berechnung der Geometrie auf Dreiecksbasis können neben den gemessenen Strecken auch zusätzliche Bedingungen wie Rechtwinkligkeiten, Fluchten oder Parallelitäten berücksichtigt werden (Abbildung 2.1). Fehlerhafte oder vergessene Maße können so vor Ort erkannt werden und lassen sich unmittelbar korrigieren ([Hel97]).

Trotz moderner Messtechnik erfordert das Handaufmaß oftmals eine teure Einrüstung des Objektes. Ein dreidimensionales Aufmaß über einfache Streckenmessungen ist nicht wirtschaftlich durchführbar, sobald die Objektgeometrie viele Variationen in der Höhe aufweist. Daher wird das Handaufmaß meist nur in der Ebene der Grundrisse und Schnitte zweidimensional getrennt in Lage und Höhe ausgeführt. Das Handaufmaß lohnt sich bei einfachen Strukturen und überall dort, wo nicht erst aufwendig ein Bezugssystem geschaffen werden muss, oder dort, wo die Zugänglichkeit für andere Methoden nicht gegeben ist. Dies kann bei kleinen verwinkelten Objekten der Fall sein. Es wird häufig aber auch als Ergänzung zu anderen Methoden eingesetzt.

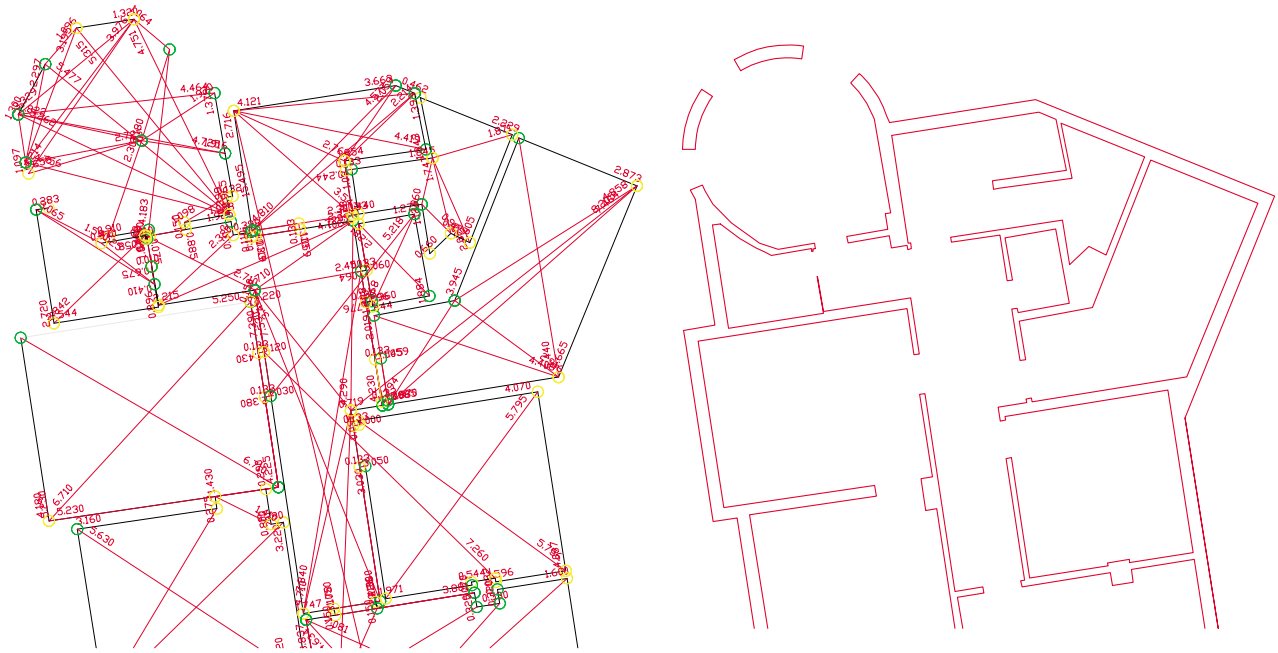


Abbildung 2.1: Beispiel für CAD-gestütztes Handaufmaß.

2.2.2 Polaraufnahme

Zum Innenaufmaß der Gebäude werden neben dem Handaufmaß heute überwiegend geodätische Geräte eingesetzt ([Hei00, S. 61]). Mit modernen Tachymetern werden gleichzeitig Horizontalrichtung, Vertikalwinkel und die Strecke über einen elektrooptischen Entfernungsmesser bestimmt. Früher waren die so bestimmten Punktkoordinaten erst häuslich am Computer zu einer Zeichnung weiter zu entwickeln; Lücken mussten in einem zweiten Arbeitsgang geschlossen werden. Heute kann das Tachymeter an ein digitales Feldbuch angeschlossen werden (Abbildung 2.2). Die Messwerte werden vom Tachymeter in den Rechner übertragen, berechnet und können gleich in einem CAD-Programm zu einer Zeichnung weiterverarbeitet werden ([Kor95], [Meß01], [NK01]). Tachymetrische Verfahren arbeiten per se dreidimensional, was ein entscheidender Vorteil gegenüber dem Handaufmaß ist.

Die Vorgehensweise bei der Polaraufnahme bzw. Tachymetrie gestaltet sich wie folgt:

1. Ein markanter, diskreter Objektpunkt wird koordinatenmäßig bestimmt; das Strukturelement PUNKT entsteht.
2. Aus mehreren Strukturelementen PUNKT werden andere linienhafte Strukturen gebildet: Strukturelemente LINIE und/oder FLÄCHEN.
3. Die Strukturelemente werden mit Attributen versehen, aus denen sich die Zuordnung zu einer Objektklasse ergibt (Objektbildung). Außerdem können dem Element über Attribute so genannte Sachdaten oder Bedeutungen angefügt werden, die das Objekt näher beschreiben. Attribute geben dem Strukturelement eine der Realität entsprechende Bedeutung z. B. wird so aus einer Linie eine Wand. Nur in Ausnahmefällen ist ein Strukturelement zugleich ein Objekt. So ist **eine** Wand im Grundriss im wesentlichen durch **zwei** parallel verlaufende LINIEN zu repräsentieren.
4. Die Strukturelemente werden unter Anwendung einer Zeichenvorschrift graphisch ausgestaltet. Bei Verwendung eines CAD kann dies z. B. dadurch geschehen, dass je nach Attribut des Strukturelementes dieses auf einem anderen Layer abgelegt wird. Über die Layersteuerung ergibt sich dann die graphische Darstellung z. B. Volllinie, 0,5 mm Strichstärke, Farbe: rot etc.

Damit wird die punktorientierte Charakteristik der tachymetrischen Messmethode deutlich: Aus einer Wolke diskreter Eckpunkte wird mit Hilfe von Attributen ein Plan gezeichnet. Vorteile der Polaraufnahme sind:

- Hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit.
- Dreidimensionale Messung.

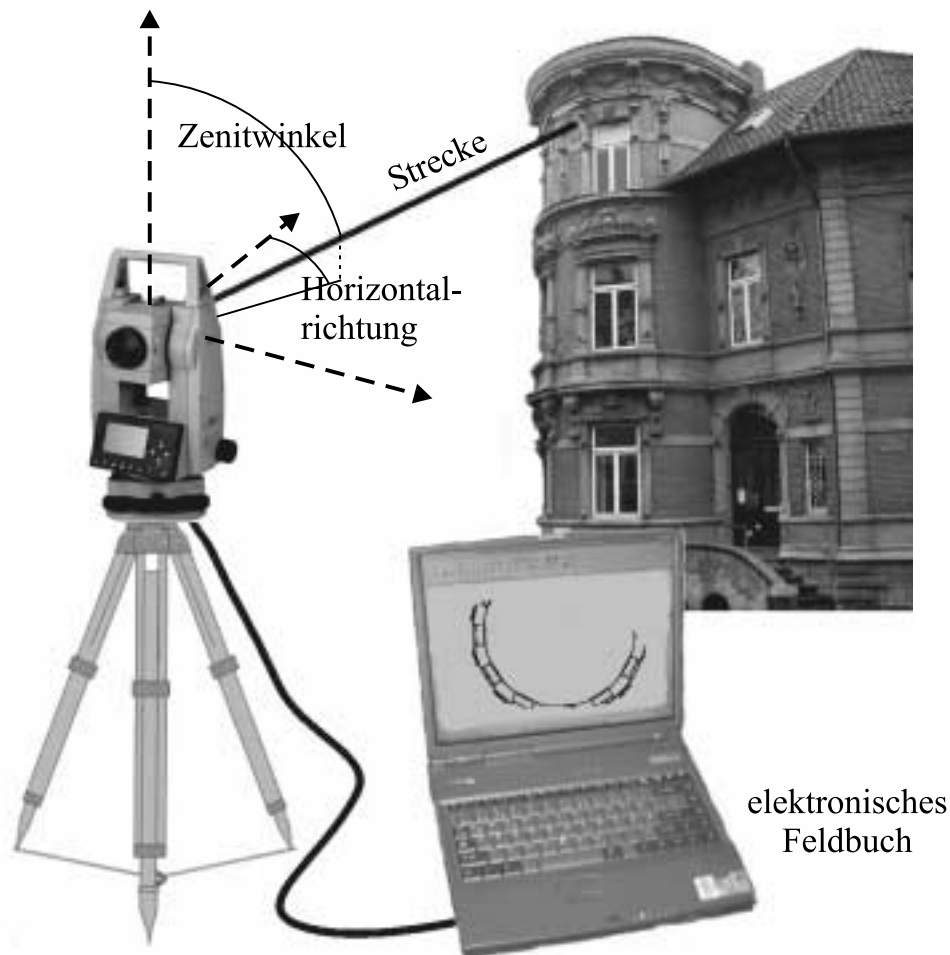


Abbildung 2.2: Prinzip der Polaraufnahme.

- Berührungslos bei reflektorloser Messung; Objekt muss nicht zugänglich sein aber sichtbar.
- Bedienung durch nur eine Person bei reflektorloser Messung möglich.
- Schnelle Messung und große Punktdichte.
- Beschränkung auf wesentliche Punkte.
- Fertigstellung der Zeichnung vor Ort (Beobachten, Analysieren und Dokumentieren).

Eingeschränkt wird die Anwendbarkeit der tachymetrischen Methode dadurch, dass eine freie Sicht auf die Objektpunkte vorhanden sein muss und dass während der Messungen ein stabiler Gerätestandpunkt notwendig ist. Voraussetzung für die Messungen ist weiterhin das Vorhandensein eines übergeordneten Bezugssystems, in das jeder Standpunkt stationiert und orientiert werden kann (Standpunktverknüpfung). Diese Tatsache ist eher ein Vorteil als ein Nachteil, da so eine homogene Genauigkeit über große Entfernungen gewährleistet werden kann.

Durch die Horizontierung der Tachymeter werden diese bezüglich der Schwerkraftsrichtung orientiert mit der Folge, dass die Z -Koordinate der Objektpunkte identisch ist mit der („Meeres-“) Höhe des Punktes. Diese vermeintliche Selbstverständlichkeit ist bei anderen Methoden mitunter nicht gegeben. Hierzu zählen insbesondere das Handaufmaß und photogrammetrische Verfahren. Beim Handaufmaß muss daher der Bezugshorizont z. B. durch ein Senklot oder eine Wasserwaage realisiert werden.

Das tachymetrische Verfahren kommt in Kombination mit anderen Messmethoden bei der Einrichtung eines Bezugssystems zum Einsatz. Dabei werden Festpunkte und Neupunkte entweder durch Polygonzüge oder in Form eines geodätischen Netzes durch tachymetrische Messungen, Winkel- und Streckenmessungen, miteinander verbunden. Nach einer Ausgleichung sämtlicher Beobachtungen liegt ein spannungsfreies Netz an Anschlusspunkten mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit vor.

Problematisch kann sich das tachymetrische Verfahren in engen Räumen zeigen. Für die meisten Geräte ist

eine Mindestentfernung von bis zu 1 m zum Reflektor oder Objekt einzuhalten. Im Nahbereich können etwaige Parallaxen zwischen Zielachse und Messstrahlachse des Entfernungsmessers zu extremen Abweichungen führen ([Run89]).

Polaraufnahme mit Reflektor

Ein wenig unattraktiv geworden ist das Polarverfahren mit einem Tachymeter, bei dem die Streckenmessung mit einem Reflektor (Spiegel, Prisma) ausgeführt werden muss. Die zu bestimmenden Messpunkte müssen hierbei mit dem Reflektor aufgehalten bzw. signalisiert werden. Hochpunkte sind nur unter Benutzung von Hilfsmitteln, wie Leitern, Gerüsten oder langen Reflektorstäben erreichbar. Der Reflektor kann in der Regel nicht mit seinem Zentrum über dem idealen Eckpunkt aufgehalten werden. Daher werden spezielle Exzenterhalter („Gebäudeprisma“) für das Prisma mit einer definierte Längs- oder Querexzentrizität benutzt. Eine besondere Variante sind Stäbe mit zwei oder drei Prismen, so genannte Kanalmessstäbe oder Extenderstäbe ([WLW92] und [Ric00]). Mit ihnen können verdeckte oder schwer zugängliche Punkte aufgehalten werden. Auf die Streckenmessung zu den Prismen darf auch verzichtet werden, wie in [Ric93] gezeigt wird. Damit kann die Genauigkeit gesteigert werden, da die relative Genauigkeit der Streckenmessungen im Nahbereich zur Winkelmessgenauigkeit teilweise unakzeptabel sein kann.

Polaraufnahme ohne Reflektor

Moderne Tachymeter können Strecken messen ohne das ein Reflektor aufgehalten werden muss. Man spricht dabei von reflektorloser Streckenmessung. Die Oberfläche muss hierzu nur ausreichend genug reflektionsfähig sein für die Messstrahlen des Tachymeters. Durch verwenden von sichtbarem Laserlicht für das Streckenmessgerät wird die Visurlinie für den Beobachter sichtbar. So erlauben diese Geräte, dass Messpunkte ohne Blick durch das Zielfernrohr allein durch den Laserstrahl angezielt werden können. Ein schnelles Abtasten der diskreten Eckpunkte wird so unterstützt. Reflektorlose Tachymeter werden verstärkt zur Vermessung von Innenräumen eingesetzt. Im Aussenbereich sind sie häufig nicht so effektiv einsetzbar, da der Laserstrahl durch das Sonnenlicht überstrahlt wird, was die Sichtbarkeit des Leuchtflecks auf dem Objekt stark einschränken kann. Nicht jede Oberfläche ist für die reflektorlose Messung geeignet. Schwierigkeiten treten bei sehr dunklen und spiegelnden Flächen auf. Weitere zu beachtenden Effekte werden im Kapitel 3 behandelt und untersucht.

Flächenschnitt und dreidimensionales Vorwärtseinschneiden

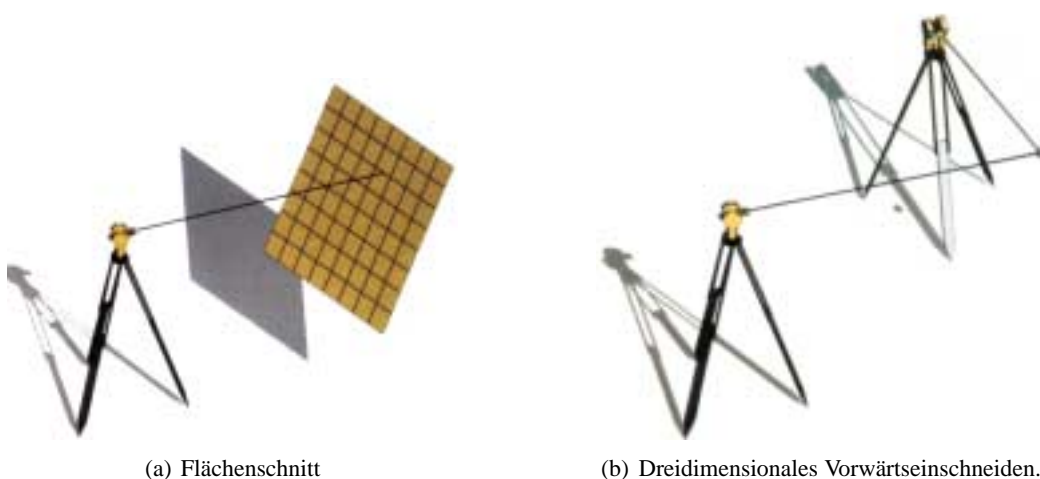


Abbildung 2.3: Einschneideverfahren (aus [Hei94a]).

Methoden des „Einschneidens“ ergänzen die Polaraufnahme dort, wo Streckenmessungen zu unzugänglichen oder zu Punkten mit ungenügender Reflexion vorzunehmen sind. Bei den Einschneideverfahren wird durch die Visurlinie des Tachymeters oder Theodolits eine Raumgerade zum Objektpunkt realisiert, die es gilt

mit einer Modelloberfläche zu schneiden ([Hei00], Abbildung 2.3(a)). Bei der Modellfläche kann es sich dabei z. B. um eine senkrechte durch zwei Messpunkte aufgespannte Ebene handeln, die eine Gebäudefassade darstellen soll. Auch ein Verschneiden mit komplexeren Oberflächen (z. B. Flächen 2. Ordnung) ist möglich ([Hei92]). Die jeweilige Modelloberfläche ist dabei durch eine geeignete Anzahl an Messpunkten zu diskretisieren und zu berechnen. Die diskreten Messpunkte ergeben sich jeweils aus dem Schnitt der Raumgeraden mit der Modelloberfläche. Vorteil dieser Messweise ist, dass keine Streckenmessung für die Detailpunkte erforderlich ist. Schwierigkeiten kann die Bestimmung einer objektrepräsentativen Modelloberfläche bereiten, die mit besonderer Sorgfalt auszusuchen und zu ermitteln ist, d. h. mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Etwaige Ungenauigkeiten können sich katastrophal auf alle nachfolgenden Schnittpunktbestimmungen auswirken.

Das Verfahren des dreidimensionalen Vorwärtseinschneidens beruht auf der zweimaligen Messung von Horizontalrichtung und Zenitwinkel mit einem Tachymeter oder Theodolit von zwei verschiedenen Standpunkten aus (Abbildung 2.3(b)). Dabei muss der Abstand zwischen den Instrumentenstandpunkten sehr genau bekannt sein. Es können Objektpunkte bestimmt werden, die gut von beiden Standpunkten aus identifizierbar sind. Die Objektpunktkoordinaten ergeben sich aus dem Verschneiden der Raumgeraden, die durch die Visurlinien beider Standpunkte definiert sind. Die Schnittpunktbestimmung weist eine Redundanz auf, die zur Beurteilung der Bestimmungsgüte ausgenutzt werden kann. Man setzt hierbei an, dass die Raumgeraden durch die unvermeidbaren Messabweichungen windschief zueinander sind. Anstelle eines gemeinsamen Schnittpunktes wird der eindeutig gegebene Abstandsvektor zwischen den zwei Raumgeraden bestimmt. Als Schnittpunkt wird dann jener Punkt angehalten, der auf halben Wege zwischen dem Abstandsvektor liegt. Die Länge des Abstandsvektors spiegelt die erreichte Messgenauigkeit wieder.

Die Standpunkte und die aufzunehmenden Objektpunkte müssen einen guten Schnittwinkel der Raumgeraden am Objekt garantieren. Bei einer Fassadenaufnahme sind daher die Standpunkte am besten auf einer Linie parallel zur Fassadengrundlinie in einem Abstand entsprechend der Fassadenhöhe aufzustellen. Die Basislänge sollte dabei in etwa ein Fünftel der Fassadenhöhe betragen ([Ker87]). Das Verfahren lässt sich in der Weise verfeinern, dass mit zwei Instrumenten simultan gearbeitet wird ([Kat89]). Ein Instrument (Master) ist dabei mit einem Zielpunktlaser ausgerüstet und markiert damit für das zweite Instrument (Slave) den Objektpunkt. Solch ein Industriemesssystem ([GN96]) vermeidet unterschiedliche Zielpunktauffassungen, verursacht durch die unterschiedliche Blickrichtung der Standpunkte auf den Objektpunkt (Parallaxe). Das Verfahren kann im Unterschied zu anderen auch auf Flächen angewandt werden, bei denen keine markanten Punkte zu sehen sind.

Das Verfahren des dreidimensionalen Vorwärtseinschneidens ist bei Benutzung eines Instrumentes durch die doppelte Objektvermessung sehr zeitaufwendig und in der Master-und-Slave-Variante ist der instrumentelle Einsatz sehr kostspielig. Es kann daher nur dann wirtschaftlich eingesetzt werden, wenn es gilt einzelne Punkte mit hoher Genauigkeit zu vermessen. Dies ist häufig bei der Aufnahme von Passpunkten für photogrammetrische Verfahren der Fall und kann dabei während der Polygonierung des übergeordneten Bezugssystems durchgeführt werden.

2.2.3 Laserscanning

Das 3D-Laserscanner-Verfahren oder kurz Laserscanning ist erst seit wenigen Jahren in der Praxis anzutreffen. Es basiert auf der reflektorlosen Entfernungsmessung, wobei der Zielstrahl durch Spiegel in horizontaler und vertikaler Richtung abgelenkt wird. Damit lässt sich die Objektoberfläche punktweise in einem feinen Raster abtasten (Abbildung 2.4). Die Koordinaten werden aus der Streckenmessung und den Ablenkungen des Zielstrahls berechnet.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist darin zu sehen, dass sehr schnell ein detailliertes Oberflächenmodell mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern erzeugt werden kann. Es eignet sich für die Vermessung sehr komplexer Objektgeometrien. Der Messvorgang läuft vollautomatisch ab, sodass nicht gezielt diskrete Objektpunkte angemessen werden, sondern in eher zufälliger Weise die Messpunkte ausgewählt werden. Die für die Modellierung wichtigen Eckpunkte werden so in der Regel nicht aufgemessen. Es ist daher eine umfangreiche und zeitintensive Auswertung der Punktwolke vorzunehmen, wenn es gilt Eckpunkte und Kanten des Objekts zu bestimmen. Derzeitige terrestrische Laserscannersysteme verfügen noch über eine geringe Reichweite von einigen Dekametern.

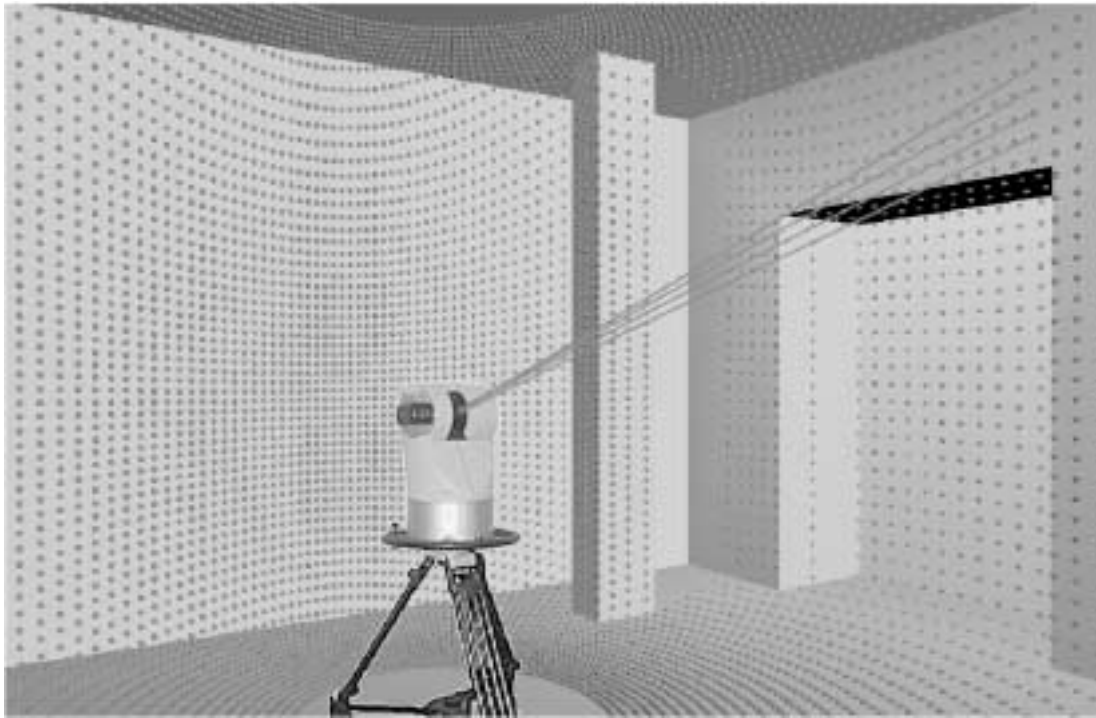


Abbildung 2.4: 3D-Laserscanning.

2.2.4 Photogrammetrie

Photogrammetrische Verfahren stützen sich auf photographisch erzeugte Abbildungen, Photos oder Videobilder, um die Lage, Größe und Form von Objekten zu bestimmen. Die Messungen werden nicht direkt am Objekt, sondern indirekt aus deren Abbildern im Photo vorgenommen. Die Erfassung von Objektgeometrien durch ein photogrammetrisches Verfahren beinhaltet zwei Stufen. In der ersten Stufe ist das Photo vor Ort in der Art einer originären Erfassung herzustellen; d.h. das Objekt ist zu photographieren. In der zweiten Stufe werden die interessierenden Objektmerkmale aus dem Photo im Sinne einer sekundären Erfassung bestimmt. Das Ableiten von Geometrieinformationen aus Photos setzt voraus, dass die Abbildungsvorschrift sehr genau bekannt ist. In der Regel werden daher Kameras benutzt, die annähernd eine ideale zentralperspektivische Abbildung gewährleisten. Sind die Abbildungseigenschaften einer Kamera über mehr oder minder lange Zeit konstant oder können diese auf einfache Weise, z. B. durch eine Resauplatte, aus den Photos rekonstruiert werden, so spricht man von Messkammern bzw. Teilmesskammern. Aber auch aus Photos, die mit einer Amateurkamera mit unbekanntem Abbildungseigenschaften aufgenommen sind, sind geometrische Informationen bestimmbar, wenn zugleich die Abbildungseigenschaft mit bestimmt wird. Hierzu werden Referenzobjekte/-marken genutzt, deren abgebildete Form und Größe mit ihrer Sollgröße mathematisch in Verbindung gebracht werden (Kalibrierung, [Luh00]).

Das Photographieren ist, bis auf die Auswahl des Bildausschnittes, ein physikalischer Vorgang, sodass Photos die darauf abgebildeten Objekte objektiv dokumentieren. Ein Photo stellt ein Informationsträger sehr hoher Dichte dar und kann zu beliebiger Zeit und mehrmals unter verschiedenen Aspekten ausgewertet werden. Der Informationsträger Photo hält das vom Objekt zum Zeitpunkt des Photographierens reflektierte Umgebungslicht fest. Es werden somit ausschließlich radiometrische Informationen in einem wohldefinierten Bezugssystem (Bildkoordinatensystem) gespeichert. Der photographische Meßvorgang ist dem menschlichen Sehen nachempfunden, sodass die abgebildete Farb- und Helligkeitsinformation unmittelbar durch den Betrachter interpretiert werden können. Diese Tatsache hat wohl auch dazu beigetragen, dass das photogrammetrische Verfahren bereits am Ende des 19. Jahrhundert hohe Anerkennung bei der Denkmalpflege fand. Noch heute profitieren Photogrammetrie-Fachleute von den Pionier-Arbeiten *Albrecht Meydenbauers* (1834-1921).

Die Photogrammetrie hat folgende spezielle Vorteile bei der geometrischen Erfassung:

- Das Photographieren benötigt nur einen Bruchteil von Sekunden, sodass auch von beweglichen Plattformen aus photographiert werden kann oder das Messobjekt sich bewegen darf.
- Die Photos selbst sind bereits Endprodukte und eignen sich zur Dokumentation.

- Zur Aufnahme schwierig zu erreichender Abschnitte können Hubgeräte, Fesselballons, (Modell-) Hub-schrauber etc. eingesetzt werden.
- Die zeitliche Trennung zwischen Aufnahme und Auswertung erlaubt die Vermessung von zerstörten oder bereits untergegangenen Gebäuden. Dieser Aspekte der Rekonstruktion von Gebäuden ist für die Denkmalpflege äußerst interessant.
- Moderne Digitalkameras und analytische Photogrammetrie-Auswerteprogramme erlauben eine preiswer-te Erfassung und Auswertung.
- Das berührungslose Vermessen ist auch möglich wenn das Messobjekt
 - schwer zugänglich,
 - sehr kompliziert strukturiert,
 - sehr heiß,
 - sehr kalt,
 - sehr weich,
 - sehr empfindlich,
 - sehr giftig oder radioaktiv ist.

Die größten Schwächen der photogrammetrischen Verfahren liegen darin begründet, dass

- für eine ausreichende Beleuchtung des Objektes zu sorgen ist, insbesondere im Gebäudeinneren,
- durch die Abbildung die Tiefeninformation der Objektgeometrie verloren geht und
- das Photo ein im Maßstab verkleinertes Zwischen-Modell auf dem Weg zum dreidimensionalen bzw. maßstabstreuen Modell darstellt.

Die erste Schwäche kann mittels zusätzlicher aktiver Beleuchtung durch Blitzgeräte überwunden werden. Die zweite führt dazu, dass zur Gewinnung von dreidimensionalen Informationen mindestens zwei Photos erforderlich sind, auf denen jeweils das auszumessende Objekte abgebildet ist und die von unterschiedlichen Aufnahmeorten stammen müssen. Sind solche zwei sich überdeckenden Photos vorhanden und sind deren Aufnahmestandorte koordinatenmäßig und deren Aufnahmerichtungen bekannt, so kann über ein modifiziertes dreidimensionales Vorwärtseinschneiden im Angesicht der Photos dreidimensional gemessen werden. Das Verfahren: Beobachten, Analysieren und Dokumentieren kann so virtuell nachempfunden werden.

Die photogrammetrische Aufnahme ist ein relativ einfaches, preiswertes und hochgenaues Verfahren, mit dem ein detailreiches und schnelles Modell hergestellt werden kann. Der Modellmaßstab ist für Aufgaben der Bauaufnahme deutlich kleiner als der Maßstab des zu erstellenden Zielmodells. Während der, zum Teil recht aufwendigen, Auswertung ist damit eine Vergrößerung der originären Messinformation nötig. Im Vergleich zu anderen (direkten) Erfassungsverfahren wird das Endprodukt aus einem stark verkleinerten Zwischenmodell abgeleitet. Hierdurch ergeben sich theoretisch Genauigkeitsverluste. Um diese zu minimieren, muss der Bildmaßstab der Photos vergrößert und die Qualität der Messkammer, was die Präzision der inneren Orientierung anbetrifft, erhöht werden.

Die Detailerkennbarkeit und Genauigkeit der photogrammetrischen Auswertung ist wesentlich von der photographischen Auflösung und dem Bildmaßstab abhängig. Zum Beispiel ist für die Auswertung im Maßstab 1 : 50 ein Bildmaßstab von ca. 1 : 200 erforderlich. Zwangsläufig erhöht sich damit die Anzahl erforderlicher Photos bei kleinerem Bildformat.

Die Photogrammetrie kann nicht zur Erfassung von Objekten eingesetzt werden, bei denen die Oberfläche ohne Struktur ist, die sich im Abbild abzeichnen kann, oder wenn das Objekt durchsichtig ist. So kann die Form eines Plastik-Eies nicht photogrammetrisch bestimmt werden. Andere Erfassungsmethoden wie z. B. das Laserscanning haben hier keine Probleme. Oftmals wird hervorgehoben, dass mittels Photogrammetrie flächenhaft vermessen werden kann. Dies gilt nur dann, wenn die Objektoberfläche an jeder Stelle abbildbare Strukturen z. B. Farbänderungen aufweist.²

²Ein weißes Kreuz auf weißem Grund ist auf einem Photo nicht sichtbar, weil nicht **farblich strukturiert**, wohl aber in einer Laserscanner-Punktwolke, wenn die Farbschichtdicke des Kreuzes gegenüber dem Grund erhaben ist. Im Gegenzug ist ein rotes Kreuz auf weißem Grund nicht in einer Punktwolke erkennbar, wenn das Objekt nicht **geometrisch strukturiert** ist und die Farbschichtdicke vernachlässigt wird.

Entzerrung

Der Bildmaßstab und die „verzerrende“ Zentralperspektive verhindern, dass direkt per Lineal Längen oder Winkelmaße aus Photos abgegriffen werden können. Abhilfe schaffen hier Umbildungen, bei denen die Zentralperspektive in eine orthogonale Parallelprojektion, kurz *Orthoprojektion*, überführt wird. Diese ist aber nur mit zusätzlicher Information über die wahre Objektgeometrie möglich ([Wei88, S. 82ff]). Eine Übersicht der verschiedenen Entzerrungsverfahren ist in [Nov92] zu finden.

Durch den Entzerrungsvorgang können ebene Wandflächen durch ein zweidimensionales Bild in einem einheitlichen Maßstab (Orthophoto) wiedergegeben werden, selbst wenn durch Bildneigung oder Verkippung der Kamera stürzende Linien auftreten. Einschränkungen gibt es bei Bauteilen, die vor oder hinter der Bezugsebene (z. B. Wandfläche) liegen. Die Entzerrung und Weiterverarbeitung digitaler Photos ist vorteilhaft bei der Montage mehrerer Entzerrungen zu Bildplänen oder Mosaiken. Es kann auch auf andere mathematische Flächen entzerrt werden z. B. Zylinderabwicklung oder Kuppelsegmentflächen ([HSS01]).

Durch die Orthoprojektion wird das räumliche Objekt „endgültig verebnet“. Wesentliche geometrische Eigenschaften bleiben erhalten und sind im Orthophoto unmittelbar abgreifbar ([Wie97]):

- Längen werden maßstäblich wiedergegeben.
- Raumwinkel werden bezüglich der Projektionsebene richtig dargestellt (Senkrechte und waagrechte Linien auf der Wand schneiden sich im Orthophoto rechtwinklig).
- Kreisbögen werden als solche abgebildet.

Stereophotogrammetrie

Zu den Verfahren der Stereophotogrammetrie lassen sich alle diejenigen photogrammetrischen Verfahren zusammenfassen, bei denen die dritte Dimension aus den Messphotos zurückgewonnen wird. Die Stereophotogrammetrie bzw. Mehrbildauswertung ist eine dreidimensionale Erfassungsmethode ([KL84], [Kra86], [Wei88] oder [Luh00]).

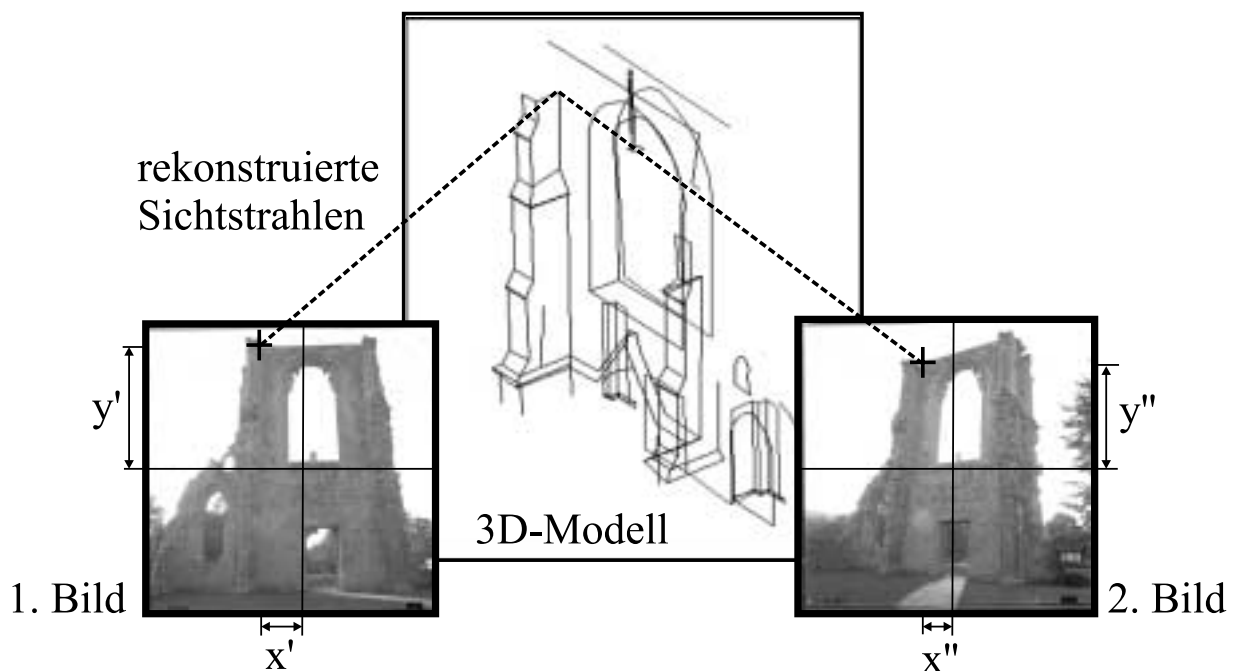


Abbildung 2.5: Prinzip der Stereo-/Mehrbildphotogrammetrie.

Für jeden mindestens in zwei Photos abgebildete Objektpunkt können Koordinaten im übergeordneten Bezugssystem berechnet werden (Abbildung 2.5). Vorab sind die Photos zu orientieren, d.h. es sind die jeweiligen Aufnahmestandpunkte und Aufnahmerichtungen der Photos zu ermitteln. Hierzu sind Passpunkte erforderlich, deren Koordinaten bekannt sein müssen. Die Orientierungen werden üblicherweise in einem Guss durch eine Bündelblockausgleichung, bei der zugleich auch Restsystematiken der Messkammer eliminiert werden können, bestimmt.

Jeweils ein Stereopaar orientierter Photos kann stereoskopisch betrachtet werden. Der Betrachter erhält so einen virtuellen Raumeindruck und kann über eine Messmarke beliebige Punkte anmessen. Damit ist auch eine schnelle linienhafte Auswertung möglich. Ansichten von Fassaden mit einer komplexen Ausgestaltung können so auch in ihren Bogenverläufen exakt ermittelt werden.

Der Einsatz der Stereophotogrammetrie lohnt bei Objekten mit hoher Informationsdichte, anspruchsvollen Formen und wenn hohe Genauigkeiten gefordert werden. Ergebnisse mit Millimeter-Genauigkeit sind in der Nahbereichsphotogrammetrie eher die Regel als die Ausnahme. Für natürliche, nicht signalisierte Punkte kann dies allein aufgrund der mit der Blickrichtung variierenden Zielauffassung aber nicht erreicht werden.

2.2.5 Weitere Erfassungsmethoden

Feldpanthograph

Nach dem Prinzip des Storchenschnabels wird innerhalb einer Bezugsebene, z. B. Bruchsteinmauer, die Objektgeometrie unmittelbar in eine maßstäbliche Skizze übertragen. Dazu wird das Objekt mit einem Zeigestift linienhaft abgefahren. Der Zeichenstift ist über ein Stabsystem oder über Seilzüge mit einem Zeichenstift verbunden. Jede Bewegung mit dem Zeigestift wird so auf den Zeichenstift mit reduziertem Maßstab übertragen. Dieses Verfahren eignet sich nur für kleine Bereiche. Der Einsatzbereich wird durch den Bewegungsradius des Zeigestiftes und die verfügbare Zeichenfläche begrenzt. Es lässt sich gut mit einem Handaufmaß kombinieren und wird für Detailzeichnungen im Maßstab 1 : 10 bis 1 : 1 eingesetzt.

Messbandsystem TRIGOMAT

In Erweiterung des Feldpanthographen zur dreidimensionalen Vermessung hat *Balck* das Seilzugsystem durch drei elektronische Messbänder ersetzt, die eine digitale Datenverarbeitung erlauben ([Bal95], [Bal96]). Jedes elektronische Messband wird mit einem Ende an einem Festpunkt fixiert. Die freien Messbandenden laufen an einem Zeigestift zusammen. Wird der Zeigestift über die Objektkontur bewegt, so verändern sich die Längen der Messbänder. Die Längenänderung werden durch Wegaufnehmer elektronisch erfasst und an einen Feldrechner übertragen (Abbildung 2.6). Jeder Ort des Zeigestiftes kann durch Berechnen eines räumlichen Bogenchnittes koordiniert werden. Der Messbereich ist deutlich größer als beim Feldpanthographen und umfasst etwa eine Radius von 15m. Das System wurde für Archäologen entwickelt, die damit ihre Ausgrabungen dokumentieren.

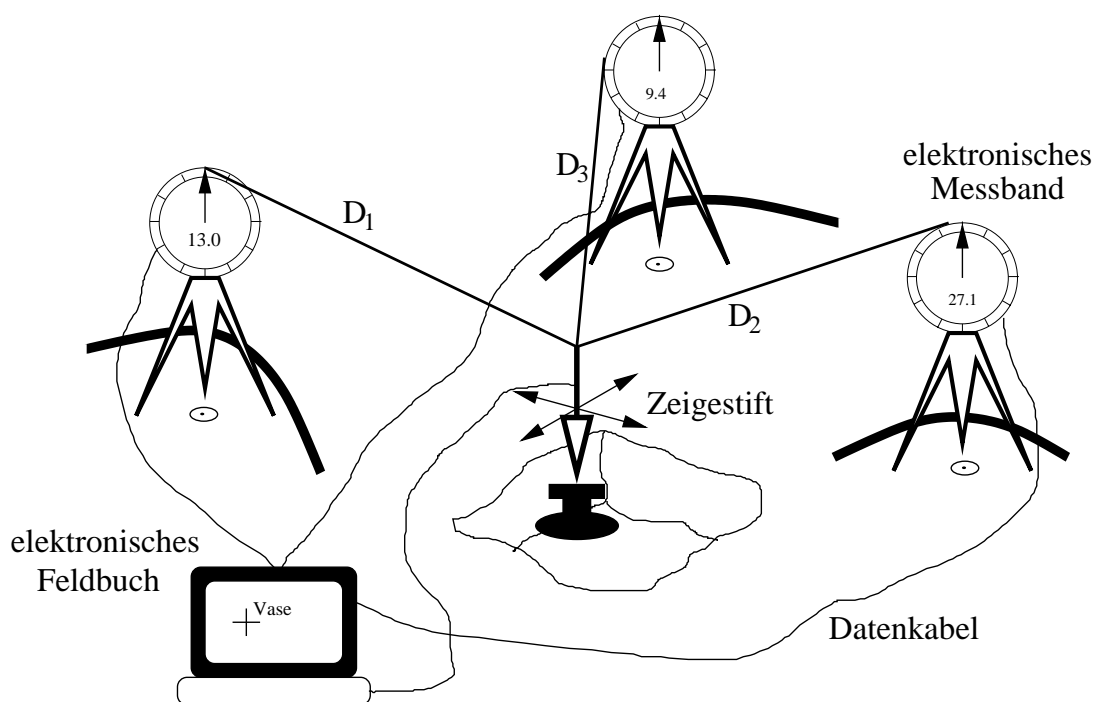


Abbildung 2.6: Prinzipskizze des Messbandsystems TRIGOMAT.

2.3 Zusammenfassung

Durch die obige Zusammenstellung soll nicht der Eindruck erweckt werden, dass für eine konkret durchzuführende geometrische Bauaufnahme genau eines der Verfahren auszuwählen ist und komplett damit bearbeitet werden muss. Der Schlüssel zum Erfolg, das zeigt die Praxis, ist vielmehr die geschickte Kombination verschiedener Erfassungsmethoden miteinander. Nur so kann die Stärke der einzelnen Methode überhaupt greifen, wenn zugleich die Schwachpunkte durch die Wahl einer weiteren Methode im speziellen überwunden werden kann. So wird das übergeordnete Bezugssystem in der Regel immer mit einem tachymetrischen Verfahren einzumessen sein. Für detailreiche Fassadenaufnahmen kann sich z. B. die Bestimmung von Orthophotos anbieten, die gegenüber der Stereophotogrammetrie deutlich kostengünstiger herzustellen sind. Die dabei notwendigen Passpunktinformationen lassen sich am besten mit einem reflektorlosen Tachymeter bestimmen. Innenaufmaße von schlicht geformten Räumen sind mitunter durch ein digitales Handaufmaß schnell und gut durchführbar. Dieses kann wiederum durch eine tachymetrische Messung in das Bezugssystem eingemessen werden, sodass auch über mehrere Etagen hinweg die Bezüge korrekt dargestellt werden können. Auch das Laserscanning wird nur eine ergänzende Position innerhalb aller Messmethoden einnehmen können und immer dann zum Zuge kommen, wenn es um die Bestimmung von komplexen Geometrien geht.

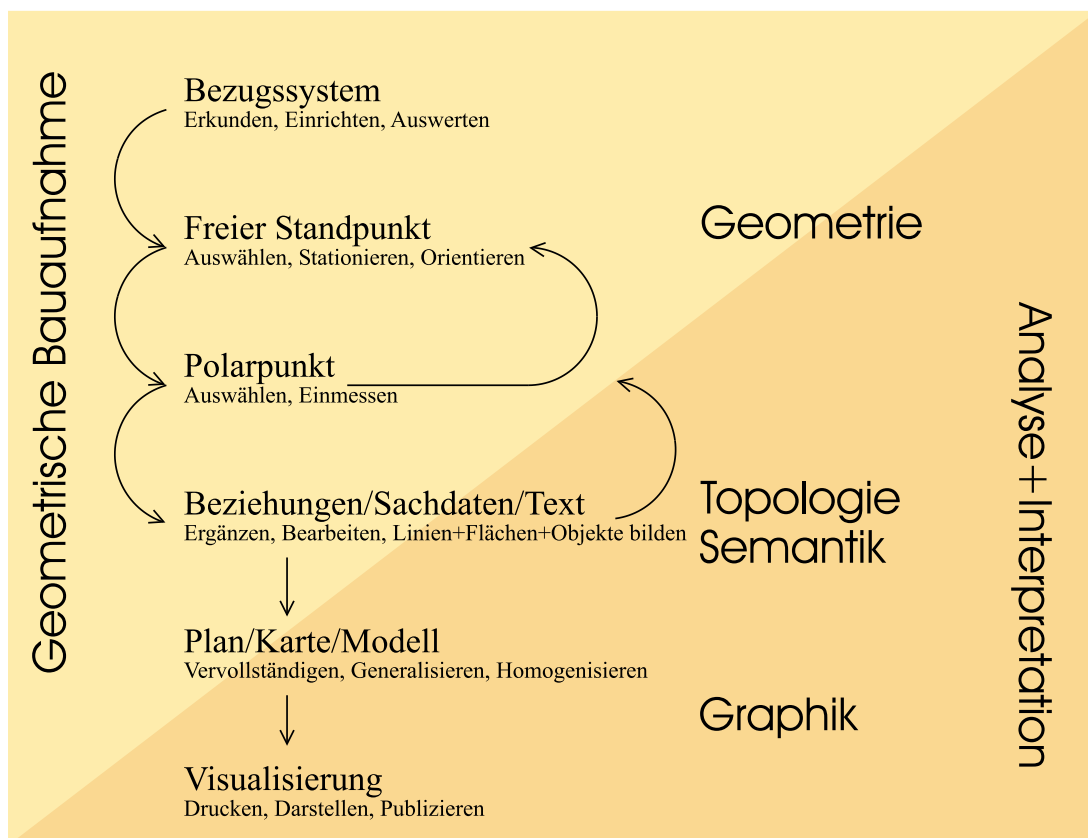


Abbildung 2.7: Ablaufschema für eine Bauaufnahme.

Am Anfang einer Bauaufnahme sollte immer die Einrichtung eines Bezugssystems für Lage und Höhe stehen (Abbildung 2.7). Der bei vielen Auftraggebern vermeintliche zu Beginn der Maßnahme übertrieben erscheinende Aufwand zahlt sich in der Regel immer aus, denn im Verlauf der Arbeiten ergeben sich neue Erkenntnisse und Fragestellungen, die in detailliertere oder genauere Vermessungen münden können. Schon im eigenen Interesse des Vermessungsingenieurs sollten Aspekte der Nachhaltigkeit berücksichtigt werden und durch Anlage eines Bezugssystems für Nachmessungen Sorge getragen werden. Die eigentliche Objektaufnahme wird getreu dem Motto „vom Großen ins Kleine“ je nach Bedarf sukzessive verfeinert. Die Resultate der Bauaufnahme werden unmittelbar analysiert und zur Planung der nächsten Schritte genutzt. Am Ende stehen Visualisierungs- und Dokumentationsergebnisse deren Ausprägung mitunter zu Beginn nicht vorhersehbar waren.

Kapitel 3

Grundlagen der Lasertechnik und der elektrooptischen Entfernungsmessung

Zum Verständnis und zur Bewertung der nachfolgenden Angaben über Möglichkeiten und Grenzen der laser-gestützten Entfernungsmessung als wesentlicher Bestandteil eines 3D-Laserscanners soll hier ein kurzer Exkurs in die Physik des Lichts gegeben werden. Grundlagen über elektromagnetische Wellen, der Ausbreitung des Lichts und zur modernen Optik (Laser) können den Lehrbüchern zur Optik entnommen werden ([BS93], [Haf94], [PPBS96] und [Hec01]). Ein Reihe von Werken widmen sich speziell der Lasertechnik: z. B. [Web98], [KS95], [Jes99], [WW99], [Don00], [Str01] und [EE02]. Einen Überblick über die Technik der elektrooptischen Entfernungsmessung geben [BDGV85], [Rüe96,], [JS99] und [WS00]. Die elektrooptische Entfernungsmessung kann als eine Sonderform der Radartechnik (optisches Radar) angesehen werden. Augenfällig wird dies, wenn ein Laserscanner betrachtet wird, der rasterförmig über ein breites Gesichtsfeld automatisch Entfernungsmessung zu natürlichen Objekten vornimmt und so zu einer Abbildung der Umgebung kommt. Grundlagen der Radartechnik finden sich in [Hud99], [KH00] und [Göb01].

Der Laser gehört zu den bedeutendsten Erfindungen der letzten Jahrzehnte und hat vielfältige technische Anwendungen gefunden. Auch für das tiefere Verständnis darüber, was Licht physikalisch ist, war die Erfindung des Lasers sehr hilfreich. Das Wort LASER ist ein Akronym für **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung) und gibt zu verstehen, dass das Laserlicht sich sehr wohl vom herkömmlichen Licht einer Glühlampe oder Kerze unterscheidet. Um zu verstehen, wie ein Laser funktioniert und worin sich Laserlicht von anderem Licht unterscheidet, ist es notwendig, sich mit der Natur des Lichts oder allgemeiner mit elektromagnetischen Wellen zu befassen.

3.1 Was ist Licht?

Die Antwort auf die Frage, was Licht ist, kann sehr unterschiedlich ausfallen. In den letzten drei Jahrhunderten hat sich die Vorstellung darüber was Licht ist dreimal geändert. Es begann mit Newtons Korpuskulartheorie, die durch die Huygensche Wellenvorstellung ersetzt wurde und schließlich in die quantenmechanische Theorie mündete.

Isaac Newton (1643-1727), Schöpfer der Punktmechanik, betrachtete das Licht als ein Strom kleiner Teilchen, die sich nach den Gesetzen der Mechanik verhalten. Viele Eigenschaften und Phänomene des Lichtes können damit bereits befriedigend erklärt werden. Dazu gehören die Entstehung von Schatten und die Brechung von Licht beim Übergang von Luft in Gas oder Wasser. Das Aufspalten des Sonnenlichts in Strahlen verschiedener Farbe beim Durchgang eines Prismas hingegen, ist mittels der Korpuskulartheorie nur mit einigen Verrenkungen erklärbar. An diesem Experiment zeigt sich eine andere Natur des Lichtes. *Christian Huygens* (1629-1695) begründete die Wellennatur des Lichtes. Mit der Wellentheorie lässt sich erklären, warum ein paralleles Lichtbündel, das durch einen Spalt geschickt wird, hinter diesem ein Beugungsbild entsteht, das den gesamten Raum ausfüllt. Dass das Licht eine Wellennatur hat, ähnlich der von Wasser- oder Schallwellen, konnte *Thomas Young* (1773-1829) durch sein Doppelspalt-Experiment eindrucksvoll nachweisen (Abbildung 3.1). Hierbei wird von ein und der selben Lichtquelle aus ein möglichst paralleles Lichtstrahlenbündel auf einen Doppelspalt gerichtet. Hinter dem Spalt kann ein Interferenzmuster beobachtet werden, bei dem sich die beiden Wellen gegenseitig verstärken oder abschwächen, je nachdem, ob ein Wellenberg auf einen Wellenberg

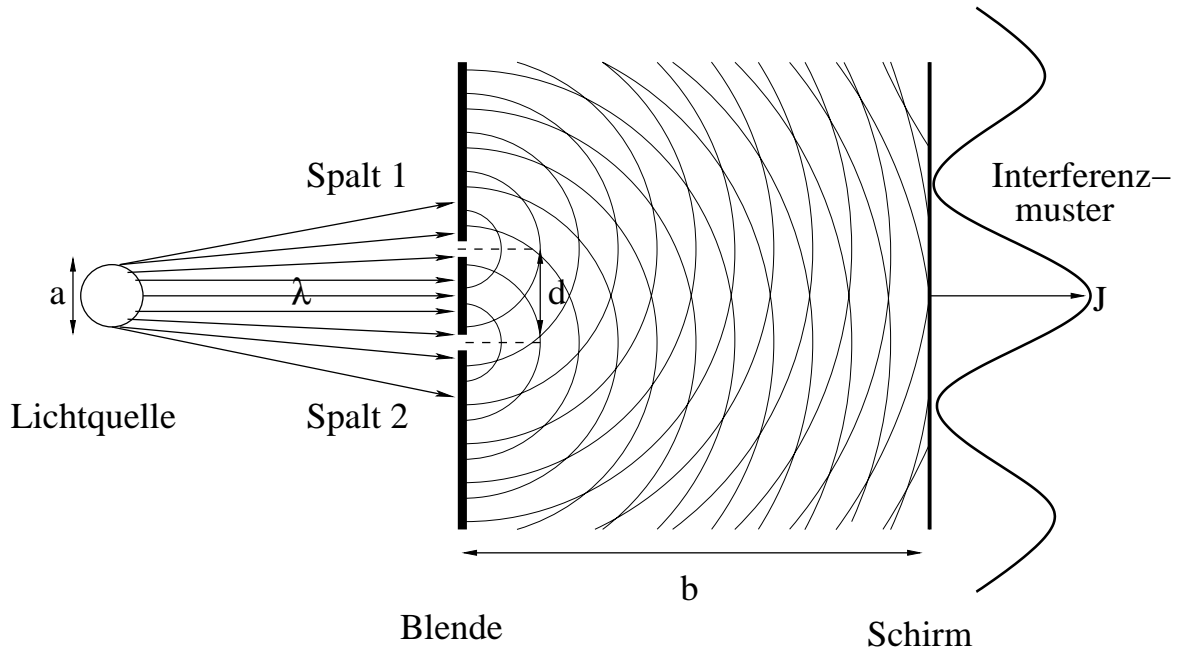


Abbildung 3.1: Youngsches Doppelspalt-Experiment.

oder Wellental der anderen Lichtwelle trifft. Wird ein Spalt geschlossen, so zeigt sich nur das jeweilige Beugungsbild.

Die Wellentheorie setzt voraus, ebenso wie die Korpuskulartheorie, dass Licht an Materie gebunden ist, die schwingt. Licht aber breitet sich auch im Vakuum aus. Was beim Licht schwingt fanden *James Clerk Maxwell* (1831-1879) und *Heinrich Hertz* (1857-1894) heraus. Maxwell gelang es, alle bekannten elektrischen und magnetischen Phänomene in einer Theorie zu vereinigen, die durch die nach ihm benannten Gleichungen mathematisch beschrieben ist. Die Maxwell'schen-Gleichungen enthalten auch die Lösung für andere elektromagnetische Wellen wie z. B. Radiowellen. Eine elektromagnetische Welle besteht aus einem elektrischen Feld E und einem magnetischen Feld H . Beide Felder oszillieren mit einer Frequenz ν . Der örtliche Abstand zweier Wellenmaxima ist die Wellenlänge λ (Abbildung 3.2).

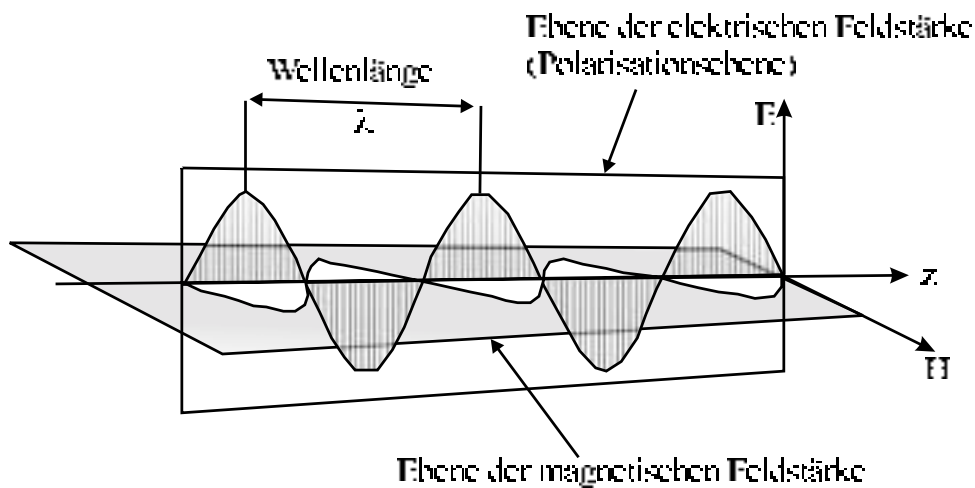


Abbildung 3.2: Die elektromagnetische Welle besteht aus einem oszillierenden elektrischen Feld und einem senkrecht dazu stehenden magnetischen Feld.

Die verschiedenen elektromagnetischen Wellen wie Radiowellen, Mikrowellen, Licht oder Röntgenstrahlung unterscheiden sich durch ihre Frequenz und breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit $c = \lambda/\nu \approx 3 \times 10^8$ m/s aus. Hertz konnte 1886 den experimentellen Nachweis erbringen, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist und somit die Maxwell'schen Gleichungen anwendbar sind. Die Frage nach einem Trägermedium („Äther“) wurde somit irrelevant. Für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ist kein materielles Medium nötig. Die oszillierenden Felder E und H treten in Wechselwirkung mit Elektronen, die zum Schwin-

gen angeregt werden. Das Phänomen, das heute als photoelektrischer Effekt bekannt ist, ist Ausdruck dieser Wechselwirkung. So kann Licht Elektronen aus einer Metalloberfläche herauslösen. Das elektrische Feld der Lichtwelle übt auf die im Metall befindlichen Elektronen eine Kraft aus, die, wenn sie hinreichend groß ist, die bindenden Kräfte überwinden kann. Elektronen werden so aus dem Atomverband herausgerissen. Interessant am photoelektrischen Effekt ist, dass, nicht wie zu erwarten wäre, mit zunehmender Lichtintensität die Elektronen die Metalloberfläche immer schneller verlassen, sondern die Elektronengeschwindigkeit völlig unabhängig von der Lichtintensität und dabei auch unabhängig von der elektrischen Kraft ist. Selbst bei geringsten Lichtstärken werden noch Elektronen heraus gelöst. Weiterhin zeigt sich, dass mit zunehmender Frequenz die Geschwindigkeit der Elektronen steigt. Wendet man die Gesetze der klassischen Mechanik auf dieses Phänomen an, so müsste ein umgekehrtes Verhalten beobachtet werden. Die Newtonsche Punktmechanik und die Wellentheorie können den photoelektrischen Effekt nicht erklären.

1905 gelang es *Albert Einstein* (1879-1955), den photoelektrischen Effekt wenigstens teilweise zu erklären, in dem er den Begriff der quantisierten Wechselwirkung Licht-Atome einführte. Danach kann ein Elektron die Energie aus einem Strahlungsfeld nur in Sprüngen aufnehmen. Beträgt die Frequenz des Lichts ν , so kann die Energie nur in ganzen Einheiten $h\nu$ ausgetauscht werden, wobei h eine Naturkonstante ist und Plancksches Wirkungsquantum ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js) genannt wird. Nach *Einstein* besteht Licht aus einem Strom an Partikel, den Photonen, an denen jeweils die Energie $h\nu$ anhaftet und die die Ruhemasse Null haben. Der photoelektrische Effekt kann so als „klassischer Stoß“ aufgefasst und teilweise erklärt werden. Die Energie eines Photons wird beim Aufprall auf ein Elektron übertragen. Ein Teil der Energie befreit das Elektron aus der Atombindung, der Rest wird dem Elektron als kinetische Energie $m_e v^2/2$ mitgegeben. Die Intensität des Lichts, die Amplitude der elektromagnetischen Welle, hat also keinen Einfluss auf die Energie des Elektrons, sondern nur auf die Anzahl der heraus gelösten Elektronen. Die Erhöhung der Frequenz des Lichtes bedeutet eine Steigerung der Photonenenergie und somit nach dem Stoß zu einer höherer Bewegungsenergie.

Das Modell der Photonen scheitert aber am Youngschen Doppelspalt-Versuch. Die Interferenzerscheinung tritt nur auf, wenn beide Spalten geöffnet sind (Abbildung 3.1). Wenn ein Photon durch einen Spalt geht, woher weiß es, dass es einen zweiten Spalt gibt und wie es sich in der Interferenzfigur korrekt einordnen muss. Eine Lösung brachte erst die Quantenelektrodynamik. In ihr haben *Niels Bohr* (1865-1962), *Erwin Schrödinger* (1887-1975) und *Werner Heisenberg* (1901-1975) die Mechanik und die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie auf eine neue Basis gestellt. Mit der Quantenelektrodynamik als Übertragung der Quantenmechanik auf elektromagnetische Wellen können alle Phänomene der elektromagnetischen Felder und ihre atomare Wechselwirkung beschrieben werden. Licht ist danach ein quantenmechanisches System, ein Strom von Photonen, weder Welle noch Teilchenstrom. Die Photonen verhalten sich teilweise wie klassische Teilchen sind aber keine. Häufig sind die Maxwell'schen Gleichungen eine sehr gute Näherung zur Beschreibung der Lichtphysik. Aber manche Effekte sind durch die Wellentheorie leichter und besser erklärbar. Diese doppelhaftige Natur des Lichtes nennt man Welle-Teilchen-Dualismus. Die Wellentheorie und die Korpuskulartheorie können als Grenzfälle der Quantenelektrodynamik aufgefasst werden, die einen enormen mathematischen Aufwand erfordert. Mittels der Quantenelektrodynamik allein lässt sich erklären, warum ein Körper bei hohen Temperaturen Licht emittiert und wie sich die Frequenzen des emittierten Lichtes in Abhängigkeit von der Temperatur (Plancksches Strahlungsgesetz) im Spektrum verteilen.

3.2 Funktionsweise eines Lasers

Licht wird üblicherweise durch die Frequenz ν oder über die Wellenlänge λ charakterisiert. Da keine Lichtquelle Licht einer festen exakten Frequenz ausstrahlt sondern immer ein Spektrum innerhalb eines mehr oder weniger breiten Frequenzbandes gibt man zur genauen Spezifikation das Intensitätsspektrum $I(\nu)$ an (Abbildung 3.3). Die Breite des Spektrums wird spektrale Bandbreite $\delta\nu$ genannt. Bei der Frequenz, bei der ein Maximum innerhalb des Intensitätsspektrums festzustellen ist, wird als Spektrallinie bezeichnet. Eine herkömmliche Glühlampe liefert breitbandiges Licht unterschiedlicher Frequenzen und wie man der Wärmeentwicklung entnehmen kann nicht nur aus dem Bereich des sichtbaren Lichtes. Einfarbige Leuchtmittel haben eine um 10 bis 100-fach geringere spektrale Bandbreite, daher erscheinen sie dem Menschen farbig. Gegenüber dem Licht eines Laser sind diese aber nicht wirklich einfarbig. Laserlicht besitzt eine um viele Größenordnungen geringere Bandbreite, sodass dieses der Idealvorstellung einer sinusförmigen Lichtwelle sehr nahe kommt.

Geht man davon aus, dass eine Lichtwelle eine ebene Wellenfront im Raum ausbildet, so lässt sie sich wie

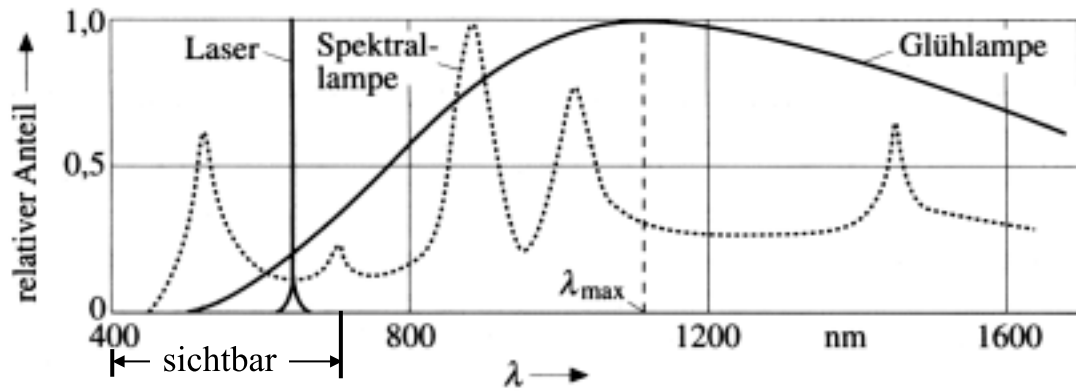


Abbildung 3.3: Intensitätsspektrum von Laser, Spektrallampe und Glühlampe.

folgt als harmonische Schwingung, die sich in z -Richtung ausbreitet, beschreiben:

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(x, y, z, t) &= [E_0 \cos(2\pi\nu t - kz), 0, 0] \\ \mathbf{H}(x, y, z, t) &= [0, H_0 \cos(2\pi\nu t - kz), 0]\end{aligned}$$

Die Felder \mathbf{E} und \mathbf{H} verändern sich periodisch in Abhängigkeit von der Zeit t und stehen, wie leicht zu erkennen ist, senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Abbildung 3.2). E_0 bzw. H_0 ist die Amplitude des schwingenden elektrischen bzw. magnetischen Feldes. Die Kreiswellenzahl k und die Wellenlänge λ hängen über die Beziehung:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

zusammen. Zwischen Frequenz ν und Wellenlänge λ bzw. Kreisfrequenz ω und Kreiswellenzahl k besteht der Zusammenhang:

$$c = \lambda\nu = \frac{\omega}{k}.$$

c ist die Phasengeschwindigkeit der Welle. Die Dauer einer kompletten Schwingung mit der Wellenlänge λ heißt Schwingungsdauer T .

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Ein Laser besteht im Prinzip aus zwei Komponenten: dem optischen Verstärker und dem optischen Resonator (Abbildung 3.4). Der optische Verstärker hat die Aufgabe die Amplitude einer einfallenden Lichtwelle zu verstärken. Der optische Resonator bildet eine Rückkopplungsschleife bei der ein Teil des verstärkten Lichts über ein Spiegelsystem an den Eingang des optischen Verstärkers zurückgeführt wird. Bei geeigneter Schleifenverstärkung kann die Selbsterregung einsetzen: der rückgekoppelte optische Verstärker wird zum Laseroszillator oder kurz Laser. Ist der Resonator auf die Wellenlänge des Lichtes abgestimmt entsteht innerhalb des Resonators eine stehende Welle, die teilweise am Ausgang des Laser austritt oder wie man sagt, ausgekoppelt wird.

Optischer Verstärker

Wie kann nun Licht mittels eines optischen Verstärkers verstärkt werden. Hierzu ist das Verständnis der Wechselwirkung, Absorption und Emission, zwischen Materie (Atome und Moleküle) und elektromagnetischer Welle (Licht) nötig.

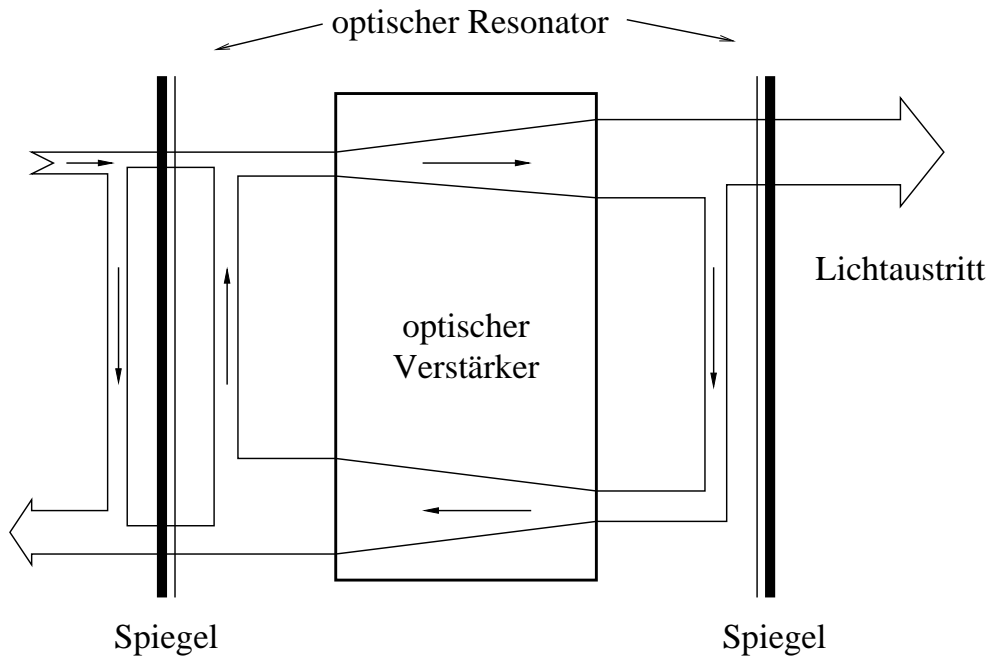


Abbildung 3.4: Prinzipskizze eines Laserozillators.

Absorption Die Elektronen eines Atoms besitzen diskrete Energiezustände. Der Unterschied zwischen zwei Energieniveaus $\Delta W_{12} = W_2 - W_1$ ist durch das Plancksche Wirkungsquantum spezifizierbar. Trifft ein Photon einer Lichtwelle auf ein Atom, so kann das Photon von dem Atom absorbiert werden. Dabei wird das Photon vernichtet und die Photonenenergie bringt das Atom in einen höheren Energiezustand (Abbildung 3.5). Dieser Vorgang ist umso wahrscheinlicher, je besser die Energie des Photons mit der Differenz zweier atomaren Energiezustände übereinstimmt. Die Absorption eines Photons ist am wahrscheinlichsten, wenn das Photon die Resonanzfrequenz ν_{21} des Atoms besitzt.

$$\nu_{21} = \frac{\Delta W_{12}}{h}.$$

Spontane und induzierte Emission Wird ein Atom durch Energiezufuhr, z. B. durch Erhitzen, in einen oberen Zustand W_2 gebracht, so geht das Atom nach einer gewissen Verweilzeit wieder in den unteren Zustand W_1 über (Abbildung 3.5). Hierbei wird ein Photon mit der Energie

$$\Delta W_{12} = \nu_{21}h$$

emittiert. Dieser Vorgang wird spontane Emission genannt, da er ohne äußere Einwirkung erfolgt und keine Vorhersage darüber gemacht werden kann, wann der Übergang erfolgt. Der Übergang ist rein zufällig, d.h. statistisch zu beschreiben. Im Gegenzug kann durch ein äußeres Strahlungsfeld z. B. Licht ein Übergang gezielt ausgelöst werden (photoelektrischer Effekt). Dieser Prozess wird induzierte Emission genannt, der die gleiche Frequenzabhängigkeit zeigt, wie die Absorption. Ein wesentlicher Unterschied zwischen spontaner und induzierte Emission besteht darin, dass bei der induzierten Emission ein Lichtquant in die Richtung des einfallenden Photons ausgesendet wird. Durch die induzierende Lichtwelle werden also die angeregten Atome polarisiert und zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Die verschiedenen Wellen überlagern sich so, dass die einfallende Welle phasenrichtig verstärkt wird.

Breitet sich eine elektromagnetische Welle durch ein abgeschlossenes mit Atomen gefülltes Gefäß aus, die sich teilweise im unteren und teilweise im oberen Energiezustand befinden, so wird die Welle teilweise durch Absorptionsvorgänge abgeschwächt, zum Teil aber durch induzierte Emission verstärkt. Damit das Gefäß als optischer Verstärker arbeiten kann, ist es erforderlich, dass mehr Strahlung durch induzierte Emission entsteht, als das Lichtquanten durch Absorption vernichtet werden. Erreicht werden kann dieser Zustand der Besetzungsinversion, wenn im Gefäß mehr Atome im oberen Energiezustand als im unteren vorhanden sind. Üblicherweise

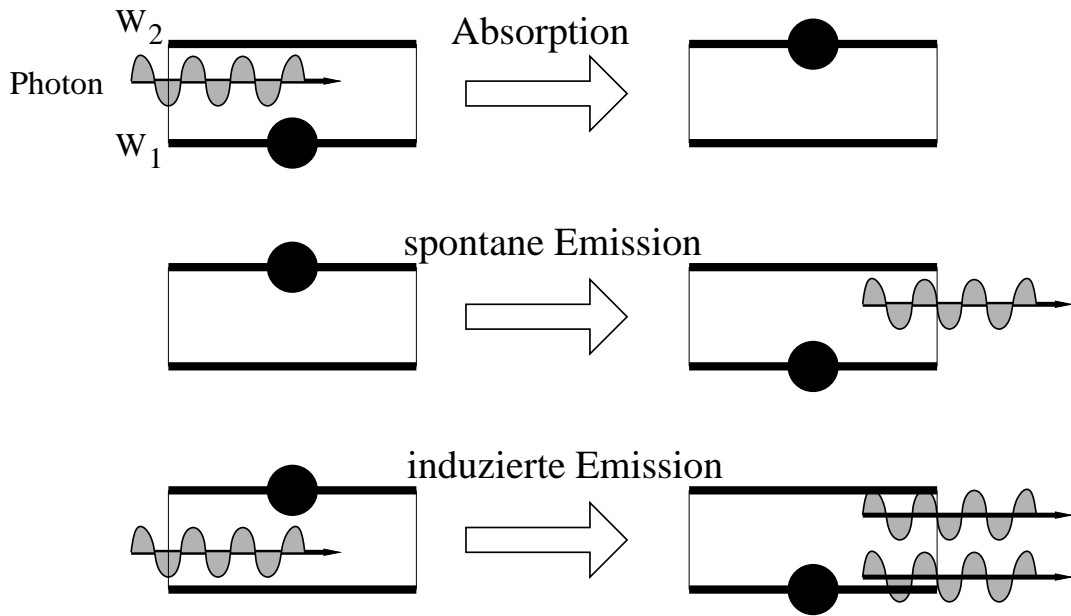


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Absorption und Emission nach [Don00, S. 43].

befinden sich die Atome im thermischen Gleichgewicht, bei dem mehr Atome im unteren als im oberen Energiezustand vorhanden sind und eine Lichtwelle absorbiert wird. Um Atome aus dem thermischen Gleichgewicht in die Besetzungsinversion zu bringen und um diese aufrecht zu erhalten, ist eine ständige Energiezufuhr, das so genannte Pumpen, notwendig. Bei einem Halbleiter-Laser z. B. erfolgt das Pumpen durch einen angelegten elektrischen Strom (Kap. 3.4.4). Das Material, welches in Besetzungsinversion gehalten werden muss, wird aktives Medium eines Laser genannt. Als aktives Medium werden je nach Lasertyp Gase, Kristalle oder Halbleiter eingesetzt.

Optischer Resonator

Der einfachste optische Resonator ist der Fabry-Perot-Resonator (Abbildung 3.6). Er besteht aus zwei ebenen Spiegeln, die im Abstand l parallel zueinander ausgerichtet sind. Beide Spiegel sind in der Regel halbdurchlässig, sodass ein einfallender Lichtstrahl in zwei Anteile aufgespalten wird. Ein Teil des Lichts wird am Spiegel reflektiert, der andere Teil geht durch den Spiegel hindurch. Der Reflexionsgrad g_R bzw. der Transmissionsgrad g_T quantifizieren den jeweiligen Bruchteil der reflektierten Intensität I_R bzw. transmittierten Intensität I_T des einfallenden Lichtstrahls I_0 :

$$I_R = g_R I_0$$

$$I_T = g_T I_0$$

Für die Amplituden des elektrischen Feldes gilt, da die Intensität einer Lichtquelle proportional zum Quadrat der Feldamplitude ($I \sim |E^2|$) ist:

$$E_R = \sqrt{g_R} E_0$$

$$E_T = \sqrt{g_T} E_0$$

Wird in einen Fabry-Perot-Resonator, dessen zwei Spiegel die Reflexionsgrade g_{R1} bzw. g_{R2} und die Transmissionsgrade g_{T1} und g_{T2} haben, die Lichtwelle

$$E_{ein} = E_0 e^{i(\omega t - kz)}$$

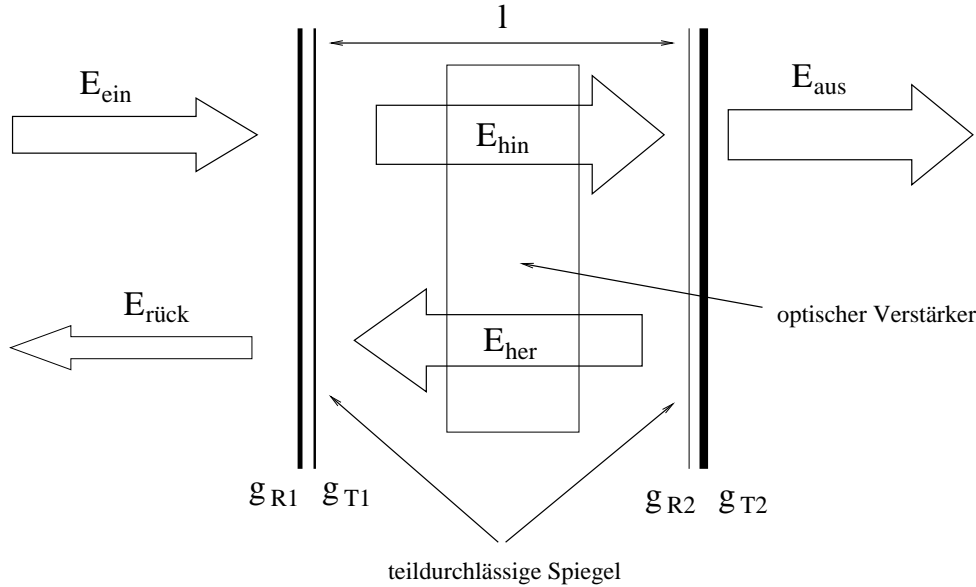


Abbildung 3.6: Schematischer Aufbau eines Fabry-Perot-Resonators.

eingespeist, so ergeben sich für die Teilwellen E_{hin} und E_{aus} folgende Beziehungen:

$$E_{aus} = \sqrt{g_{T2}} E_{hin} e^{-i\omega \frac{L}{c}} \quad (3.1)$$

$$E_{hin} = \sqrt{g_{T1}} E_{ein} + \sqrt{g_{R1}g_{R2}} E_{hin} e^{-2i\omega \frac{L}{c}} \quad (3.2)$$

Wird Gleichung 3.2 nach E_{hin} aufgelöst und in Gleichung 3.1 eingesetzt lässt sich bei Übergang auf die Intensitäten angeben im welchen Verhältnis die Intensität I_{aus} der durchgelassenen Welle zur Intensität der eingespeisten Welle I_{ein} steht [Don00, S. 59 u. 60].

$$\frac{I_{aus}}{I_{ein}} = \frac{g_{T1}g_{T1}}{(1 - \sqrt{g_{R1}g_{R2}})^2 + 4\sqrt{g_{R1}g_{R2}} \sin^2(\omega \frac{L}{c})}$$

Der Maximalwert von I_{aus} wird immer dann erreicht, wenn ω ein ganzzahliges Vielfaches der Eigenkreisfrequenz ω_q des Resonators ist.

$$\omega_q = q \frac{\pi c}{L} \quad \text{mit } q = 1, 2, \dots$$

Auf die Resonatorlänge L bezogen heißt dies, dass sie ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge sein muss, um die durchgelassene Intensität maximal werden zu lassen.

$$L = q \frac{\lambda_q}{2} \quad \text{mit } q = 1, 2, \dots$$

Das geometrische Mittel der beiden Reflexionsgrade $g_R = \sqrt{g_{R1}g_{R2}}$ bestimmt die Bandbreite des durchgelassenen Lichts. Mit steigendem g_R wird die Bandbreite geringer, d.h. das transmittierte Licht wird monochromatischer. Mit der Resonatorlänge kann bestimmt werden durch welche Eigenschwingung ω_q des Resonators, eine Laserstrahlung mit gleicher Frequenz angeregt werden soll. Zur Unterscheidung der verschiedenen Anregungsfrequenzen (Ober- und Unterfrequenzen) wird in der Laserphysik das Wort Mode benutzt. Man spricht von den verschiedenen Moden eines Lasers.

LASER

Durch eine exakte Abstimmung der beiden Laserkomponenten, optischen Verstärker und optischer Resonator, kann monochromes Licht hoher Leistungsdichte erzeugt werden. Dabei wird das Phänomens der induzierten Emission mit dem der Resonanz kombiniert. Das Akronym LASER ist Ausdruck dieser physikalischen Vorgänge: „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ (Lichtverstärkung mittels induzierter Strahlungsemission) gebildet worden.

3.3 Charakteristik des Laserlichtes

3.3.1 Spektrale Bandbreite

Das Laserlicht besitzt nur eine sehr schmale spektrale Bandbreite (Abb. 3.3) und ist somit monochrom. Die Frequenz des Laserlichtes hängt vom aktiven Medium des optischen Verstärkers und der Resonatorlänge des optischen Resonators ab. Der typische Wellenlängenbereich, in dem Laser verfügbar sind, reicht vom Ultraviolett bis in das Infrarote: ($300 \text{ nm} < \lambda < 10.000 \text{ nm}$).

3.3.2 Zeitliche und räumliche Kohärenz

Insbesondere durch die Kohärenzeigenschaften unterscheidet sich Laserlicht von gewöhnlichen Lichtquellen. Ein Laser produziert Strahlung mit extrem hoher Kohärenz. Mit der Kohärenz wird die Gleichartigkeit oder Gleichförmigkeit zweier Lichtwellen vergleichend beschrieben. Das Wort Kohärenz ist vom lateinischen Wort *cohaere* abgeleitet, was zusammenhängen bedeutet. Beleuchtet man mit zwei Glühlampen nacheinander eine Tischplatte, so erzeugen diese an einer beliebiger Stelle der Tischplatte die Intensitäten I_1 und I_2 . Beleuchten die Glühlampen gleichzeitig die Tischplatte, so addieren sich die Feldstärken.

$$I = I_1 + I_2$$

Führt man dasselbe Experiment mit zwei Laserstrahlen gleicher Frequenz durch, so ergibt sich keine gleichmäßig verteilte Feldstärke mehr sondern eine Interferenzfigur mit Wellenbergen großer und Wellentälern geringer Intensität. Die Intensitäten addieren sich nach folgender Gesetzmäßigkeit:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(2\pi \frac{s}{\lambda} + \Delta\varphi\right).$$

Der jetzt zu berücksichtigende dritte Term wird Interferenzterm genannt. Der Interferenzterm ist typisch für kohärentes Licht. Dabei ist s die variable Weglängendifferenz, die mit einem Michelson-Interferometer bestimmt werden kann.

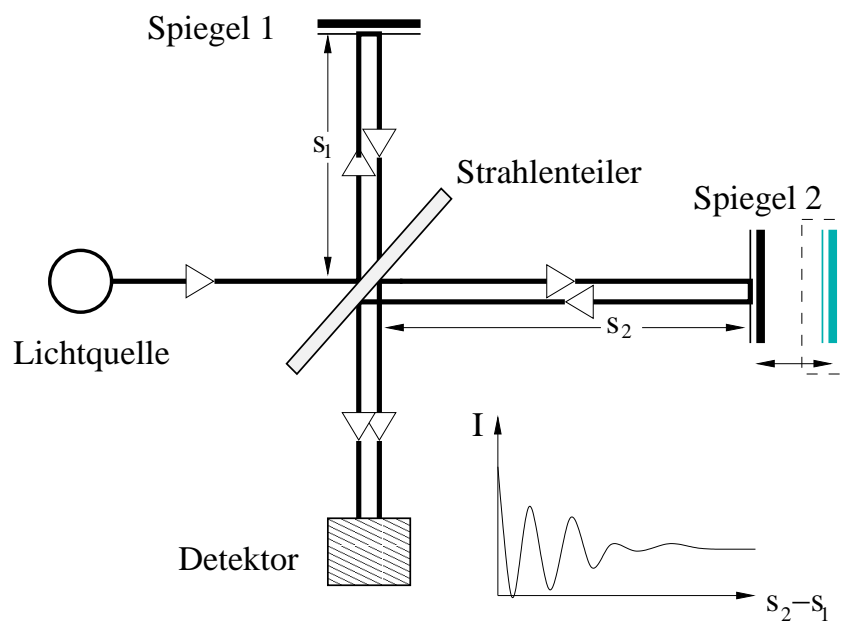


Abbildung 3.7: Messung der zeitlichen Kohärenz mit einem Michelson-Interferometer.

In einem Michelson-Interferometer wird ein Laserstrahl in zwei Strahlen gleicher Intensität aufgespalten und über Spiegel auf zwei unterschiedliche Lichtwege abgelenkt und am Ausgang wieder zusammengefasst, wo sich beide Teilwellen in einem Detektor überlagern (Abbildung 3.7). Die zwei Lichtwege haben unterschiedliche Längen s_1 und s_2 , sodass am Detektor zwei Strahlen unterschiedlichen Alters und Phasenlage derselben Lichtquelle ankommen. Wird einer der Lichtwege verändert, so variiert die zu beobachtende Intensität

gemäß des Interferenztermes. Mit zunehmender Vergrößerung der Lichtwegdifferenz $s = s_2 - s_1$ verblassen die Intensitätsschwankungen bis keine mehr zu erkennen sind; der Interferenzterm hat keinen Einfluss mehr. Ab diesem Punkt besitzen die Teilstrahlen keine zeitliche Kohärenz mehr. Aufgrund der Wegdifferenz ist die eine Welle gewissermaßen gealtert. Durch Wechselwirkung mit Atomen und Molekülen ist sie aus dem Tritt geraten und schwingt mit einer Vielzahl von Frequenzen und unterschiedlichen Phasen. Die zeitliche Kohärenz, ausgedrückt durch die maximale Weglängendifferenz (Kohärenzlänge) bei der im Michelson-Interferometer-Experiment noch Interferenz zu beobachten ist, steht im Zusammenhang mit der spektralen Bandbreite. Eine große Kohärenzlänge charakterisiert eine schmalbandige Strahlungsquelle.

Die räumliche Kohärenz ist ein Maß dafür, inwieweit sich zwei Wellenzüge, die von ein und der selben Lichtquelle in unterschiedliche Richtung ausgestrahlt wurden, sich an unterschiedlichen Orten zur gleichen Zeit unterscheiden. Die endliche Ausdehnung der Laseraustrittsfläche kann dazu führen, dass die Atome oder Moleküle unabhängig voneinander Lichtwellen aussenden und so keine feste Phasenbeziehung zwischen den Teilwellen besteht und damit ein Verlust an Kohärenz einhergeht. Es stellt sich also die Frage, welche Abmessungen darf eine Lichtquelle haben, damit noch Interferenzerscheinungen beobachtet werden können. Eine Antwort findet man durch das Youngsche Doppelspalt-Experiment (Abbildung 3.1). Dabei wird der Querschnitt a der Austrittsfläche einer Lichtquelle soweit vergrößert bis kein Interferenzmuster auf dem Schirm mehr zu erkennen ist. Laserlicht zeichnet sich aufgrund kleiner Querschnitte a durch hohe räumliche Kohärenz aus. Die räumliche Kohärenz gestattet, die Laserstrahlung auf engste Bereiche mit Querschnittsflächen der Größenordnung λ^2 zu fokussieren ([KS95, S. 14]).

3.3.3 Strahldivergenz

Laser senden Strahlenbündel hoher Parallelität aus und eignen sich daher gut für die Messtechnik. Der Öffnungswinkel Θ_0 eines Laserstrahles gibt an, wie parallel das Licht ist und wird in Grad oder Radiant angegeben. Die Ursache für die Strahldivergenz ist die Beugung des Lichts beim Austritt aus dem Laser. An den Rändern der Austrittsöffnung wird das Laserlicht den Gesetzen der Wellentheorie folgend nach außen abgelenkt. Die Wellenfront verbreitert sich, wird bogenförmig und weicht so von einer idealen parallelen Wellenfront ab. Der Beugungseffekt einer elektromagnetischen Welle ist abhängig von der Wellenlänge. Je kürzer die Wellenlänge desto geringer ist der Beugungseffekt. So lässt sich erklären, warum man eine Person hinter einem dicken Baumstamm hören aber nicht sehen kann. Die Strahldivergenz eines Lasers kann verbessert werden, indem das Licht mit Hilfe von Sammellinsen gebündelt wird. Nachteilig ist, dass dabei die Intensität um das zehnfache bis hundertfache verringert wird. Der Öffnungswinkel Θ_0 hängt von weiteren Eigenschaften der Laserstrahlung ab und kann mit Hilfe des Gaußschen Strahl (Gleichung 3.3) in seiner Größe theoretisch abgeschätzt werden.

3.3.4 Intensitätsverteilung

Die Intensität I eines Laserstrahl fällt im Allgemeinen exponentiell senkrecht zur Strahlausbreitungsrichtung, also radial, ab. Die Verteilung lässt sich näherungsweise durch ein gaußförmiges Profil in Abhängigkeit des radialen Abstandes r zur Ausbreitungsrichtung beschreiben.

$$I(r) = I_0 e^{-\left(\frac{r-r_0}{s}\right)^2}$$

Der radiale Abstand r_0 gibt den Ort der maximalen Intensität an und $2s$ ist die Intensitätsbreite (Kurventaille).

Durch Lösen der Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik kann eine zeitfreie Wellengleichung in skalarer Näherung, der so genannte Gaußstrahl, abgeleitet werden ([Don00, Kap. 7.2] und [EE02, Kap. 12]). Die elektrische Feldstärke $E(r, z, t)$ einer elektromagnetischen Welle wird dabei in Abhängigkeit von der Ausbreitungsrichtung z und dem Radialabstand r beschrieben. Die Intensitäts- bzw. Feldstärkeverteilung folgt dem oben aufgeführten gaußförmigen Profil.

$$E(r, z, t) = E_0 \frac{1}{\omega(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right) \exp(\omega t - kz\varphi_L - \varphi_T) \quad (3.3)$$

mit:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_r}\right)^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{z_r \lambda / \pi}$$

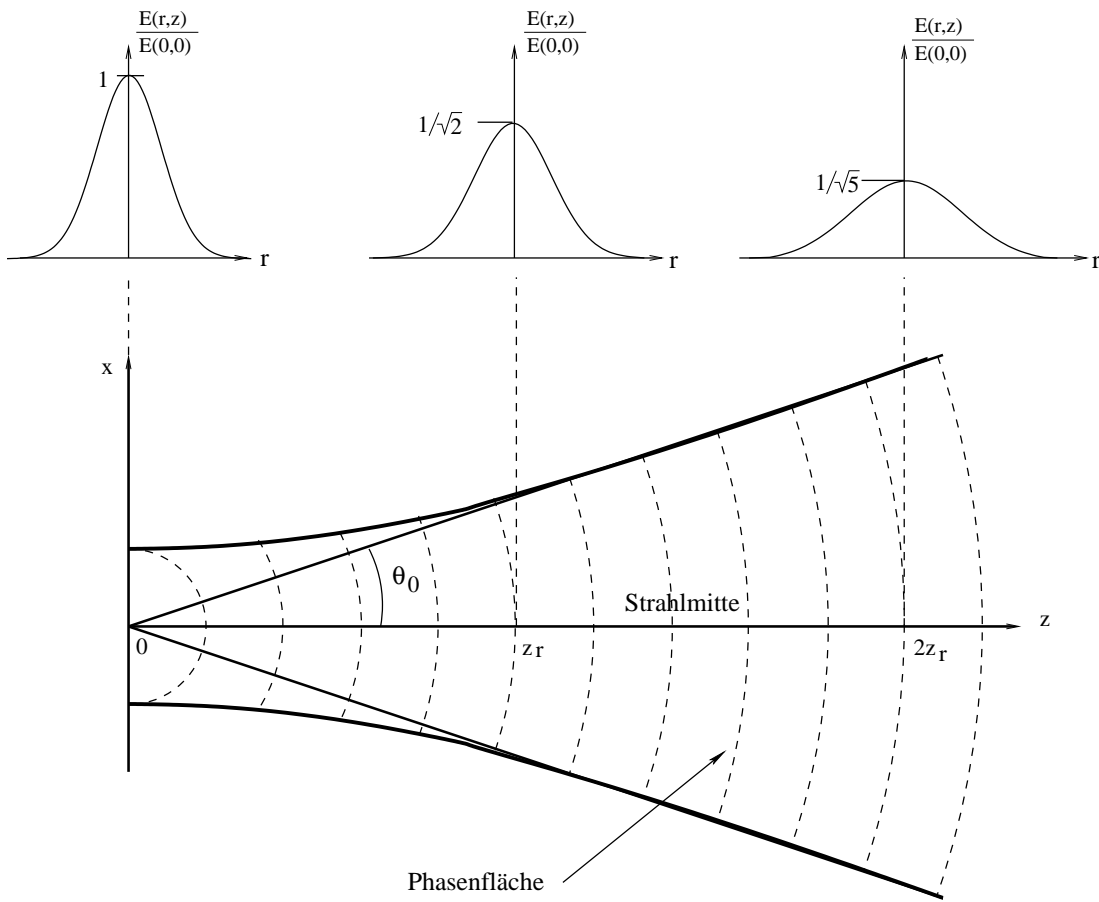


Abbildung 3.8: Feldverlauf des Gaußschen Strahls und Strahldivergenz Θ_0 .

$$\begin{aligned}
 \varphi_L &= \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_r}\right) \\
 \varphi_T &= \frac{kr^2}{2\rho(z)} \\
 \rho(z) &= z \left(1 + \left(\frac{z_r}{z}\right)^2\right)
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Die charakteristische Größe z_r des Gaußschen Strahls heißt Rayleigh-Länge und gibt an, in welcher Entfernung z der Strahlradius $\omega(z)$ um das $\sqrt{2}$ -fache des Wertes von $\omega_0 = \omega(0)$ angewachsen ist (Abbildung 3.8). In einer Entfernung weit unterhalb von z_r ist der Strahlradius nahezu unabhängig von z und konstant. In der Ferne, wenn $z \gg z_r$ ist, ändert sich der Strahlradius nahezu linear mit z . Dort hat der Laserstrahl einen konstanten Divergenzwinkel Θ_0 der proportional zur Wellenlänge ist:

$$\Theta_0 \approx \frac{\lambda}{\pi}$$

Im Fernfeld kann die Phasen(wellen)front in der Nähe der Strahlachse durch Kugelflächen approximiert werden, deren Mittelpunkt im Austrittspunkt des Laserstrahls liegt. Dies lässt die Gleichung 3.4 für den Krümmungsradius $\rho(z)$ der Phasenflächen erkennen. In der Strahlmitte steht die Phasenfläche senkrecht auf dieser. Der letzte Term der Gleichung 3.3 beschreibt die Phase des Laserstrahls durch einen longitudinale Phasenterm φ_L und einen transversalen Anteil φ_T .

3.3.5 Polarisation

Unter Polarisation eines Laserstrahls versteht man die Eigenschaft, in einer bestimmten Ebene zu schwingen. Man unterscheidet zwischen linear, zirkular und elliptisch polarisiertem Licht. Bei einer linearen Polarisation schwingt der elektrische Feldstärkevektor senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Abbildung 3.2). Die meisten

Laser emittieren linear polarisiertes Licht mit konstanter Amplitude in der Polarisationssebene. Eine zirkular polarisierte Laserwelle geht aus einer linear polarisierten dadurch hervor, dass sich die Polarisationssebene mit konstanter Geschwindigkeit dreht. Ändert sich zusätzlich die Amplitude periodisch so erhält man elliptisch polarisiertes Licht.

Zur experimentellen Bestimmung der Polarisationsrichtung einer linear polarisierten Welle dient im einfachsten Fall ein Polarisationsfilter. Ein solches Filter ist ein optisches Element, das nur für Licht einer bestimmten Polarisationsrichtung transparent ist. Stehen Polarisationsrichtung des Lichts und Durchlassrichtung des Filters senkrecht, so sinkt der Transmissionsgrad im Idealfall auf Null.

Neben polarisiertem Licht gibt es auch unpolarisiertes Licht. Bei unpolarisiertem Licht schwingt der elektrische Feldstärkevektor auch senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Er ändert jedoch ständig seine Schwingungsrichtung in statistischer Weise, sodass keine Vorzugsrichtung beobachtbar ist. Dies ist zum Teil auch bei Laserlicht der Fall. Durch den Einbau polarisierender Elemente in den Laserresonator lässt sich eine bestimmte Polarisationsrichtung erzwingen. Polarisationsselemente sind oft in einem Laser vorhanden, sodass die meisten Laser polarisiertes oder teilweise polarisiertes Licht aussenden.

3.3.6 Sicherheit

Das gebündelte Licht eines Laserstrahl kann beachtliche Energiedichten erreichen, sodass vom Laser eine unmittelbare Gesundheitsgefährdung für den Menschen ausgehen kann. Die Gefährdung ist abhängig von der Energiedichte, der Wellenlänge, der Expositionsdauer und der Beschaffenheit des exponierten Materials.

Die laserspezifische Gefährdung beruht auf der Absorption von direkter oder reflektierter Laserstrahlung durch das menschliche Gewebe. Die in der Lasermesstechnik üblichen Strahlleistungen und Pulsenergien sind jedoch so gering, dass nur eine Gefährdung der Augen zu befürchten ist. Im Gegensatz zu einem UV-Laser wird die Laserstrahlung eines HeNe-Lasers nicht durch die Hornhaut und Augenlinse abgeschwächt (absorbiert). Sie gelangt zu etwa 40% auf die Netzhaut. Eine große Gefahr für die Netzhaut liegt in der guten Fokussierbarkeit der Laserstrahlung. Die Intensität eines HeNe-Lasers wird durch die Augenlinse im ungünstigsten Fall um den Faktor 3.5×10^6 verstärkt und erzeugt auf der Netzhaut einen Brennfleck mit etwa $10 \mu\text{m}$ Durchmesser. Laserlicht aus dem Spektralbereich des sichtbaren Lichtes (400 nm bis 700 nm) transmittiert natürlicherweise die Hornhaut des menschlichen Auges optimal und ist daher sehr gefährlich. Zum Infraroten hin fällt die spektrale Lichtdurchlässigkeit des Auges stark ab. Für infrarotes Licht jenseits der Wellenlänge λ von 1400 nm ist das auf die Netzhaut fallende Licht vernachlässigbar schwach.

Nach den Lasersicherheitsbestimmungen (DIN EN 60825-1(IEC 825-1) VDE 0837,1994) sind folgende Laserklassen definiert, die Auskunft geben über die potentiellen Gefahren, die sich im Gebrauch entsprechend klassifizierter Laser ergeben. Bei Klasse-1-Lasern ist die zugängliche Laserstrahlung ungefährlich. Die Lasersysteme sind eigensicher, d.h. dass sie unter keinen Umständen schädliche Strahlung abgeben. Die zugängliche Laserstrahlung bei der Gruppe der Klasse-2-Laser liegt nur im sichtbaren Spektralbereich (400 nm bis 700 nm). Sie ist bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer von bis 0,25 s ungefährlich für das Auge (augensicher). Ein Lasersystem der Klasse 3A erzeugt Laserstrahlung, die für das Auge gefährlich wird, wenn der Strahlungsquerschnitt durch optische Instrumente (z. B. Linsen) verkleinert, d.h. fokussiert, wird. Ist dies nicht der Fall, ist die ausgesandte Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer bis 0,25 s (Lidschlussreflex) ungefährlich für das Auge. In den anderen Spektralbereichen ist sie auch bei Langzeitbestrahlung ungefährlich. Klasse-3B-Laser liefern Laserstrahlung, die nicht nur für das Auge sondern in besonderen Fällen auch für die Haut gefährlich sein kann. Die gefährlichste Strahlung geht von Klasse-4-Lasern aus. Auch diffus gestreute Strahlung eines Klasse-4-Lasers kann gefährlich sein für die Augen und die Haut. Die Laserbestrahlung der Klasse-4 kann Brand- oder Explosionsgefahr verursachen. Die Abbildung 3.9 fasst die Grenzwerte für die Laserleistung der einzelnen Klassen in Abhängigkeit von der Wellenlänge zusammen.

Die Definition der Laserklassen ändert sich ab Ende 2003 mit der neuen Norm DIN EN 60825-1/11:2001 (VDE 0837 Teil1). Mit der neuen Norm wird eine zum Teil veränderte Einteilung der Laserklassen vorgenommen. Die Klassen 1, 2 und 4 bleiben unverändert. Die Klassen 3A und 3B werden weiter mit der Einführung der neuen Klassen 1M, 2M und 3R ausdifferenziert. In der Tabelle 3.1 sind die neuen Klassen den alten gegenüber gestellt. Kriterien für die Aufteilung der alten Klassen 3A und 3B sind zum einen der Grenzwert der zugänglichen Strahlung (GZS) und zum anderen die maximal zulässige Bestrahlung (MZB), ab der mit einer Schädigung der Augen und der Haut gerechnet werden muss ([Kol02]). Über die Auswirkungen der neuen Laserklassen 3R und Möglichkeiten für die Konstruktion moderner Vermessungsgeräte berichtet [Aße02].

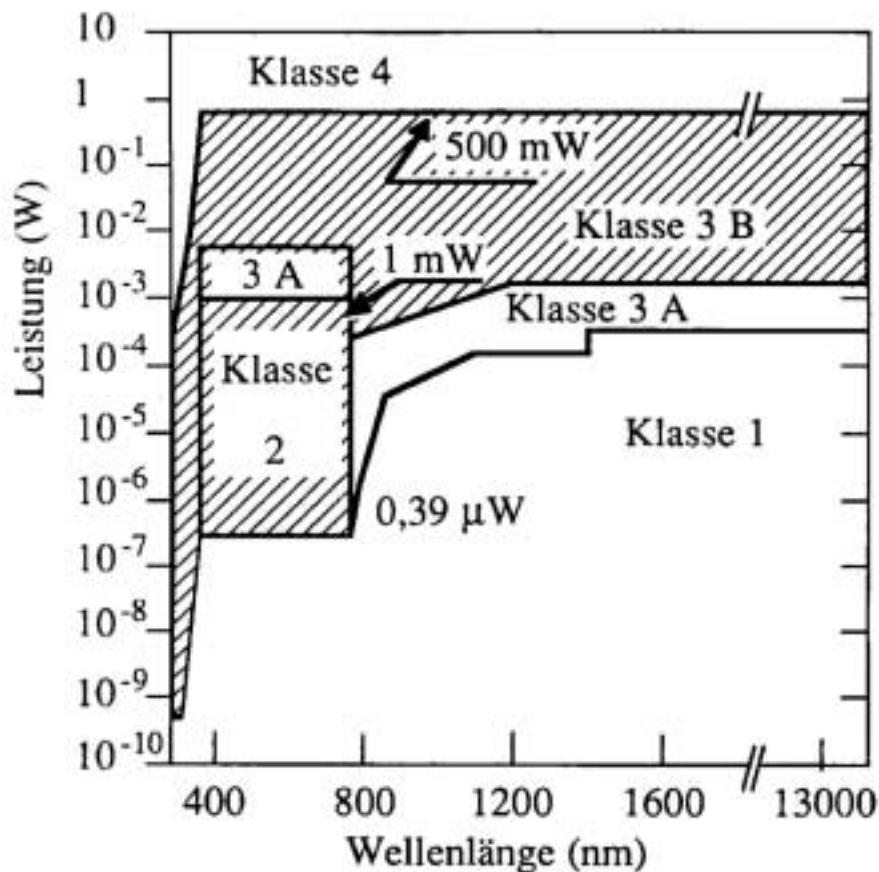


Abbildung 3.9: Einteilung der Laserklassen anhand der Wellenlänge und Leistung.

Tabelle 3.1: Definition der neuen Laserklassen.

Klasse neu	Grundkonzept	Wellenlänge	GZS sichtbare Anteil	Kommentar
1	augensicher	alle	< 1 mW	alte Klasse 1
1M	augensicher ohne Verwendung optischer Instrumente; unsicher bei Verwendung optischer Instrumente	302,5-4000 nm	< 1 mW	Früher: nicht sichtbarer Teil der Klasse 3A und Geräte, die nicht in 3A, sondern wegen der Leistungsgrenze (fünffach Klasse 2) in Klasse 3B waren
2	augensicher durch Abwendungsreaktion plus Lidschlussreflex	400-700 nm	1 mW	alte Klasse 2
2M	Lidschlussreflex; je nachdem, ob es sich um einen divergenten oder aufgeweiteten Strahl handelt, kann er mit optischen Instrumenten unsicher sein	400-700 nm	1 mW	Früher: sichtbarer Teil der Klasse 3A und Geräte, die nicht in 3A waren, sondern wegen der Leistungsgrenze 5 mW in Klasse 3B waren
3R	überschreitet die MZB-Werte, die Strahlung ist max. fünfmal höher als die GZS von Klasse 1 (bzw. Klasse 2); das Risiko ist etwas geringer als in der Klasse 3B	400-700 nm 302,5-400 nm und 700-106 nm	5 mW	alte Klasse 3B im Sichtbaren erweitert in den Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 1 mm
3B	alte Klasse 3B ohne 3R	alle	500 mW	alte Klasse 3B ohne 3R
4	alte Klasse 4	alle	> 500 mW	alte Klasse 4

3.4 Lasertypen

Es gibt verschiedene Typen von Lasersystemen, die sich insbesondere darin unterscheiden welches aktive Medium benutzt wird ([KS95], [Web98], [WW99], [Jes99], [Don00] und [EE02]). Die Entwicklung weiterer Lasersysteme ist längst nicht abgeschlossen. Derzeit wird mit Nachdruck daran gearbeitet, einen praxistauglichen Halbleiter-Laser zu konstruieren, der blaues Licht emittiert. Wichtiges Kriterium für die Anwendbarkeit und damit für die Praxistauglichkeit eines Lasersystems ist, ob es bei normaler Temperatur (-30 bis 40°) und geringen Sicherheitsrisiken bzw. -vorkehrungen (Laser-Klasse 1, 2 oder 3A) betrieben werden kann. Weiterhin unterscheidet man zwischen den zwei Betriebsarten, dem kontinuierlichen (Dauerlichtbetrieb oder cw-Betrieb für continuous wave) und dem gepulsten Betrieb. Im **Dauerlichtbetrieb** oder stationärem Betrieb liefert der Laser einen stetigen Laserstrahl unbegrenzter Dauer mit geringer Ausgangsleistung. Der **Pulsbetrieb** erzeugt kurze Lichtimpulse mit sehr hoher Energiedichte.

3.4.1 Festkörperlaser

Rubin-Laser Das aktive Material ist ein synthetischer Rubin-Kristallstab. Dieser besteht aus Aluminiumoxid, der mit Chrom dotiert ist. Typisch für Rubin-Laser ist der Pulsbetrieb und eine Wellenlänge von $694,3$ nm.

Nd:YAG-Laser Der Nd:YAG-Laser¹ ähnelt dem Rubin-Laser. Dotiert wird das aktive Granat-Material mit Nd^{3+} -Ionen. Der Nd:YAG-Laser, oder kurz Neodym-Laser, emittiert infrarotes Licht mit einer Wellenlänge von 1060 nm. Wird der Laserresonator auf die zweite Harmonische (Mode 2) abgestimmt, so wird grünes Licht ($\lambda/2 = 530$ nm) erzeugt (frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser). Im typischen Dauerstrichbetrieb werden Leistungen von $5 - 100$ W abgegeben. Im Pulsbetrieb können Pulse von Nano- bis Pikosekunden Dauer erreicht werden, die eine Ausgangsleistung bis 1000 W haben können.

3.4.2 Gaslaser

HeNe-Laser Der wichtigste und bekannteste Edelgas-Laser ist der Helium-Neon-Laser. Der HeNe-Laser hat zahllose Anwendungsgebiete insbesondere in der Präzisionsmesstechnik, Velocimetrie und Holographie, weil er eine geringe spektrale Bandbreite von $10^{-7} \lambda$ hat. Die charakteristische Wellenlänge eines HeNe-Laser liegt bei $632,8$ nm. Mit einem Wirkungsgrad von $0,02 - 0,05\%$ arbeiten HeNe-Laser meist im Dauerstrichbetrieb mit Ausgangsleistungen von $1 - 200$ mW.

CO₂-Laser Das aktive Material des CO₂-Laser ist Kohlendioxid. Aufgrund seines hohen Wirkungsgrades von bis zu 30% können mit technisch geringem Aufwand hohe Ausgangsleistungen erreicht werden, sodass er bevorzugt in der Materialbearbeitung (Schweißtechnik etc.) eingesetzt wird. Hier wird auch die gute Fokussierbarkeit des Laserlichts ausgenutzt, um auf kleinen Querschnittsflächen hohe Leistungsdichten zu erzeugen. Mit dem CO₂-Laser ist sowohl Puls- als auch Dauerstrichbetrieb möglich. Die typische Wellenlänge beträgt 10600 nm.

Argon- und Krypton-Laser Um Spektrallinien im sichtbaren und ultravioletten Bereich zu erhalten, werden ionisierte Gase verwendet. Mit einem Argon-Laser wird Licht mit einer Wellenlänge von 334 bis $528,7$ nm mit Linien bei $454,4$ nm (grün), 488 nm (blau), $514,5$ nm (blau) und 1090 nm (infrarot) erzeugt. Krypton-Laser strahlen Licht der Wellenlänge 800 nm aus. Werden die Gase Argon und Krypton gemischt erhält man einen Mehrfarblaser (weiß). Einsatz finden die Argon- und Krypton-Laser mit einem Wirkungsgrad von $0,5\%$ und einer Ausgangsleistung von 5 W in der Showbranche und in der Holografie.

Excimer Laser Aus der Reaktion eines Edelgases (Argon, Krypton oder Xenon) mit einem Halogen (Chlor, Fluor, Jod oder Brom) entsteht ein Excimer (**excited dimer** = angeregtes Dimer²). Wird ein Excimer als aktives Material verwendet arbeitet das Lasersystem in einem Spektralbereich von 193 bis 351 nm. Haupteinsatzgebiet der Excimer-Laser ist die Fertigung von integrierten Schaltungen und Transistoren.

¹Nd:YAG ist das chemische Zeichen für Neodym in Yttrium-Aluminium-Granat

²Ein Dimer ist ein aus zwei identischen Atomen bestehendes Molekül.

3.4.3 Farbstofflaser

Bei den Farbstofflasern bilden organische Moleküle (Fluoresin (Na), Rhodamin, Kumarin), die in einer Flüssigkeit (Wasser, Ethanol, Aceton, Glycerin, Methanol) gelöst sind, das aktive Material des Lasersystems ($\lambda = 217 - 1100 \text{ nm}$ bzw. 60 nm bei Rhodamin). Farbstofflaser weisen eine schlechte spektrale Bandbreite $\delta\nu = 1,2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ auf. Von Vorteil ist, das mit einem Farbstofflaser Pulse im Femtosekundenbereich mit bis zu 10^{15} W Ausgangsleistung möglich sind. Eingesetzt werden sie in der Absorptionsspektographie, der Umweltmesstechnik, zur Entfernungs- und Satellitenabstandsmessung und in der Atom- und Molekularphysik.

3.4.4 Halbleiter-Laser

Halbleiter-Laser sind ähnlich wie Halbleiterdioden aufgebaut und kehren gewissermaßen den photoelektrischen Effekt um. Halbleiter bestehen aus zwei aneinander grenzenden Schichten. Die eine Schicht enthält Elektronen im Überschuss, sie ist n-dotiert, und die andere Schicht hat einen Elektronenmangel, sie ist p-dotiert (Abbildung 3.10). Wird ein elektrisches Feld (Injektionsstrom) an eine Halbleiterdiode in Durchlassrichtung eingelegt, so können einzelne Elektronen aus dem Überschuss der n-dotierten Schicht entweichen und den Elektronenmangel der p-Schicht ausgleichen. Beim Durchgang durch die aktive n-p-Grenzschicht wird dabei ein Photon emittiert. Die entstehende Rekombinationstrahlung kann sowohl spontan als auch induziert erfolgen, welche bei geeigneter optischer Rückkopplung zu Laserstrahlung in Selbsterregung des Laseroszillators führt. Der Rekombinationsprozess wird beim Halbleiter-Laser zur Lichtverstärkung genutzt. Der aus zwei oder mehr Schichten bestehende Halbleiter bildet den optischen Verstärker und seine polierten Endflächen gleichzeitig den optischen Resonator. Die aktive Zone ist nur wenige μm breit, sodass der Halbleiterlaser aufgrund des Beugungseffektes am Rand eine stark divergente, nicht rotationssymmetrische (elliptische) Abstrahlcharakteristik besitzt (Abbildung 3.10). Die typischen Beugungswinkel liegen bei $40 - 80^\circ$ in x-Richtung bzw. $5 - 40^\circ$ in y-Richtung. Durch entsprechend nachgeschaltete Optiken kann das Laserlicht annähernd in einen Gaußstrahl transformiert werden.

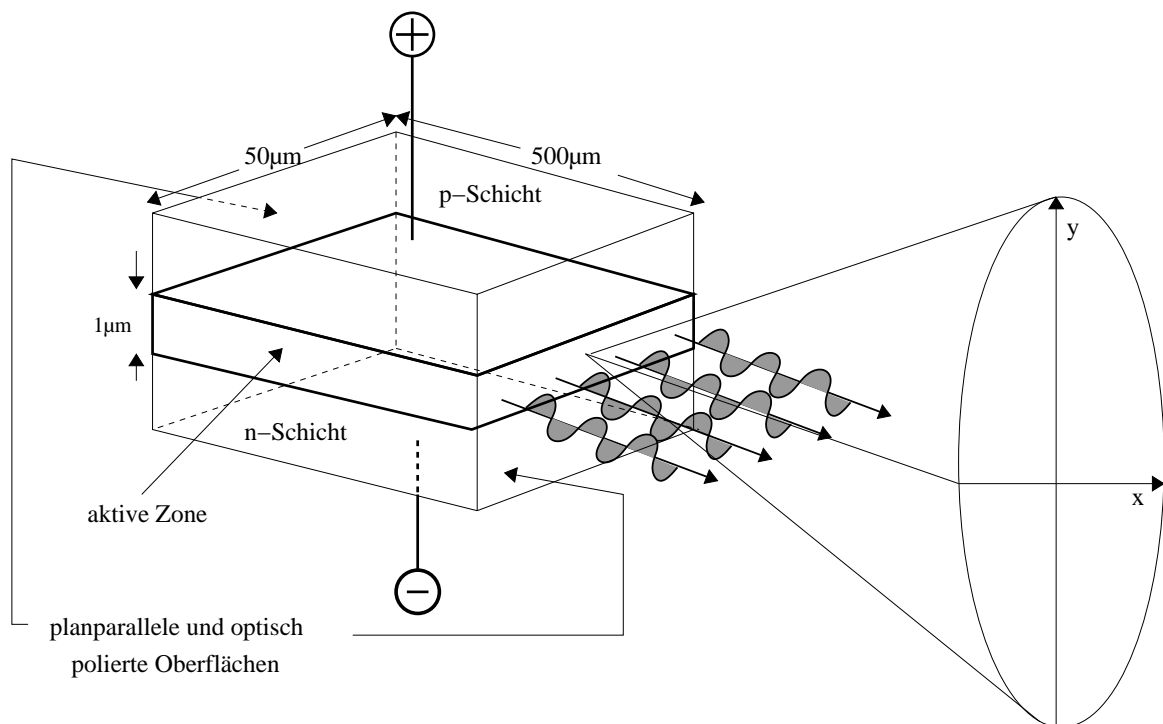


Abbildung 3.10: Schema eines Halbleiter-Lasers nach [EE02].

Als Materialien für einen Halbleiter-Laser werden überwiegend Mischkristalle eingesetzt. Das heute am meisten verwendete Grundmaterial ist Galliumarsenid (GaAs). Der GaAs-Laser emittiert infrarotes Licht bei einer Wellenlänge von etwa 840 nm . Andere Halbleiterlaser (z. B. InGaAsP/InGaP) liefern unter Zimmertemperatur Licht aus dem Bereich $650 - 700 \text{ nm}$. Die räumliche Kohärenz der Diodenlaser hängt empfindlich von

der Größe der strahlenden Fläche ab. Die spektrale Bandbreite bei Raumtemperatur liegt bei 0,1 – 5 nm. Die bedeutendsten Eigenschaften der Halbleiterlaser im Vergleich mit anderen Lasern sind [EE02, S. 169]:

- Kleine Abmessungen, sodass sie leicht in andere Instrumente und Geräte eingebaut werden können.
- Anregung erfolgt mit kleinen elektrischen Strömen und Spannungen (15 mA, 2 V) über den Injektionsstrom.
- Direkte Beeinflussbarkeit der Modulation über den Injektionsstrom.
- Hoher Wirkungsgrad von bis zu 50%.
- Integrierbarkeit mit anderen elektronischen Komponenten und Schaltungen.
- Herstellung durch herkömmliche Halbleitertechnologie, die Massenproduktion zu geringen Kosten ermöglicht.

Schon seit den 1970er Jahren werden Halbleiter-Laser als Sender in elektrooptischen Distanzmessern verwendet.

Tabelle 3.2: Einige häufig verwendete Materialien für Halbleiterlaser und ihre typischen Wellenlängen [Str01, S. 129].

Material	Kurzzeichen	Wellenlänge [nm]	
Gallium-Nitrid	GaN	417	
Aluminium-Gallium-Indium-Phosphid	AlGaInP	650	
Gallium-Arsenid	GaAs	870	
Aluminium-Gallium-Arsenid	(Al,Ga)As	870-620	abhängig vom Al/Ga-Mischverhältnis
Indium-Gallium-Arsenid	InGaAs	1000	
Indium-Gallium-Arsen-Phosphid	InGaAsP	1500	

3.5 Entfernungsmessung mit einem Lasersystem

Der Laser emittiert elektromagnetische Strahlung im optischen Frequenzbereich. Das Laserlicht hat wie oben beschrieben sowohl eine hohe zeitliche als auch räumliche Kohärenz, sodass es hervorragend dazu eingesetzt werden kann, Informationen über weite Strecken zu übertragen. Wie das Prinzip des Michelson-Interferometers zeigt, ist es mit Lasersystemen möglich, präzise Längen- und Zeitunterschiede durch Beobachtung der (Träger-)Frequenz zu bestimmen.

3.5.1 Modulation

In der Regel stellt das Laserlicht nicht selbst die zu übertragende Information dar sondern ein auf den Träger aufmoduliertes Signal. Hierfür werden verschiedene Modulationsverfahren verwendet (Kap. 3.5.5 und 3.5.6):

- Amplitudemodulation,
- Phasenmodulation und
- Frequenzmodulation.

Das Licht eines Halbleiterlasers kann direkt über den Injektionsstrom oder indirekt über einen elektrooptischen Modulator moduliert werden ([JS91] und [Rü96]). Ein elektrooptischer Modulator, z.B. eine Pockelszelle, wird in den äußeren Strahlengang des Lasers eingebracht und verändert die Lichtstärke nach Maßgabe der gewünschten Signalfrequenz. Die Pockels-Zelle nutzt den Pockels-Effekt aus, bei dem sich unter Einfluß eines elektrischen Feldes die Doppelbrechung von Kristallen ändert. Es treten für eine Strahlrichtung im Kristall zwei senkrechte Polarisationsrichtungen auf, für die sich die Lichtgeschwindigkeit und der Brechungsindex unterscheiden. Der Unterschied im Brechungsindex ist proportional zur anliegenden Feldstärke. Je nach Feldstärke ändern sich so die Amplituden in den beiden Polarisationsrichtungen ([EE02, S. 283ff]). Nachdem polarisiertes Licht den Kristall durchlaufen hat schwingt es in zwei Polarisationssebenen mit unterschiedlichen Amplituden.

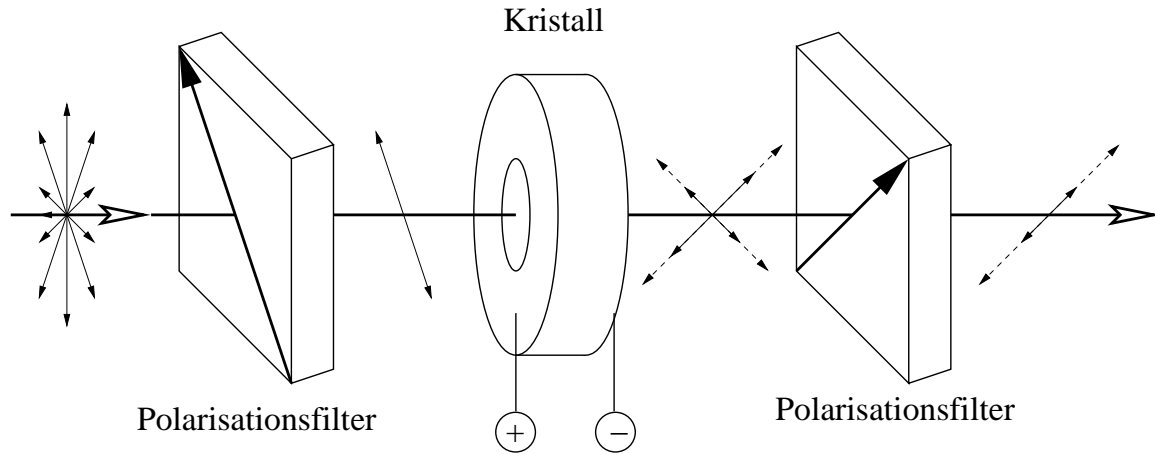


Abbildung 3.11: Elektrooptischer Modulator mit Pockels-Zelle nach [EE02, S. 285].

Mit einem nachgeschaltetem Polarisationsfilter wird nur Licht einer Polarisationsebene durchgelassen (Abbildung 3.11). Die Variation des elektrischen Feldes erlaubt so die austretende Helligkeit des Laserlichts linear zu verändern.

3.5.2 Radarprinzip

Es wird nun auf den Einsatz des Lasers bei der Bestimmung von Entfernungen l im geodätischen Anwendungsfeld ($1 \leq l \leq 1000\text{m}$) eingegangen. Die elektrooptische Entfernungsmessung ähnelt sehr dem Radarprinzip, das elektromagnetische Wellen aus dem Mikrowellenbereich zur Entfernungsbestimmung benutzt. Durch die Analogie mit dem Radar sind einige Effekte beim Laserscanning, auf die später eingegangen werden, leichter qualitativ abzuschätzen. Da es sich beim Laser und Radar jeweils um elektromagnetische Wellen handelt, ist eine Gleichbehandlung in gewissen Grenzen und Bereichen möglich [Weh91, S. 44ff].

Das Wort Radar stand ursprünglich für ein neuartiges Ortungssystem (**R**adio **A**ircraft **D**etection and **R**anging). Heute steht es nur noch als Akronym für **R**adio **D**etection and **R**anging. Das Radar ist ein Verfahren, das reflektierte zurückgesendete elektromagnetische Wellen benutzt, um Informationen über entfernte Objekte zu erhalten. Das Prinzip, das jedem Radarsystem zugrunde liegt, basiert auf folgendem fünfphasigen Ablauf [Göb01, S. 15]:

Phase I Das Radarsignal wird erzeugt und über die Sendeantenne des Radargerätes mit möglichst hoher Richtwirkung (gebündelt) abgestrahlt.

Phase II Das Signal breitet sich gemäß den Gesetzen der Wellenausbreitung elektromagnetischer Wellen aus.

Phase III An jedem Ziel wird ein Teil der Signalleistung absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die verbleibende Leistung wird vom Zielobjekt gestreut. Es kann hierbei ein Phasensprung i.A. unbekannter Größe auftreten.

Phase IV Ein relativ geringer Anteil der vom Ziel gestreuten Leistung breitet sich wiederum nach den Gesetzen der Wellenausbreitung in Richtung des Radargerätes aus.

Phase V Im Empfangsteil des Radargerätes wird das vom Ziel zurückgeworfene Signal empfangen und im Vergleich mit dem abgestrahlten Sendesignal ausgewertet.

Dieses Grundverfahren beschreibt das monostatische Primärradar. Monostatisch heißt, dass Sende- und Empfangsteil sich am gleichen Ort (im selben Gerät) befinden; teilweise sind sie sogar identisch. Beim Primärradar verhält sich das Zielobjekt nicht kooperativ; es existiert keine Gegenstelle (Transponder) am Zielobjekt. Das monostatische Primärradar ist also vergleichbar mit der reflektorlosen Zweiwege-Entfernungsmessung, wie es in den Lehrbüchern der elektrooptischen Entfernungsmessung beschrieben wird ([BDGV85], [Rüe96] und [JS99]). Wird bei der elektrooptischen Entfernungsmessung ein Reflektor am Zielpunkt aufgehalten, so würde dieses Verfahren in der Sprache der Radartechnik monostatisches Sekundärradar heißen, da das am Zielobjekt eintreffende Signal aktiv, also kooperativ, in Richtung des Radarsenders zurückgeworfen wird.

3.5.3 Radargleichung

Das mathematische Modell der Radartechnik ist die Radargleichung ([Hud99, S.13-16] und [Göb01, S.41-46]). Unter Annahme idealisierter Verhältnisse kann der Zusammenhang zwischen Sendeleistung und Empfangsleistung durch die Radargleichung hergestellt werden. Vernachlässigt man zunächst Dämpfung-, Beugungs- und Brechungseffekte der Atmosphäre, so gilt für die Leistungsdichte $S(r)$, im Abstand r vom Radargerät, dass die Leistung P_s isotrop (gleichmäßig in alle Richtungen wie ein Kugelstrahler) abstrahlt:

$$S(r) = \frac{P_s}{4\pi r^2}.$$

Durch die Sendeantenne wird Sendeleistung in eine Hauptstrahlrichtung gebündelt abgestrahlt, sodass durch diesen Antennengewinn der Sendeantenne G_s die Leistungsdichte $S(r)$ entsprechend erhöht wird.

$$S(r) = \frac{P_s}{4\pi r^2} G_s$$

Die am Zielobjekt eintreffende Leistung P_z ergibt sich aus der Leistungsdichte $S(r)$ und der elektrisch wirksamen Querschnittsfläche des Zielobjekts A_z ([Hud99, S. 14]).

$$P_z = S(r) A_z = \frac{P_s}{4\pi r^2} G_s A_z$$

Wird diese Leistung P_z wieder isotrop reflektiert, so ergibt sich als Echoleistung $S_r(2r)$ am Radargerät:

$$S_r(2r) = \frac{P_z}{4\pi r^2} = \frac{P_s}{4\pi r^2} G_s A_z \frac{1}{4\pi r^2}.$$

Das Radarziel weist aber Verluste auf bzw. reflektiert das Signal winkelabhängig (anisotrop), sodass die Echoleistungsdichte um den Faktor G_z vermindert werden muss.

$$\begin{aligned} S_r(2r) &= \frac{P_s}{4\pi r^2} G_s \frac{1}{4\pi r^2} A_z G_z \\ &= \frac{P_s G_s}{(4\pi r^2)^2} \sigma \end{aligned}$$

Das Produkt $\sigma = A_z G_z$ wird Radarquerschnitt oder Radarrückstreuquerschnitt genannt, hat die Einheit m^2 und hängt ab von

- der Zielgeometrie,
- der Oberflächenstruktur des Radarziels,
- der Frequenz der elektromagnetischen Welle und
- dem Einfallswinkel- und Ausfallswinkel der elektromagnetischen Welle.

Die Empfangsantenne habe die elektrisch wirksame Fläche A_e und führt so zur Empfangsleistung P_e :

$$P_e = S_r(2r) A_e.$$

Die Antennenwirkfläche A_e hängt über die Wellenlänge λ der Radarstrahlung mit dem Antennengewinn G_e wie folgt zusammen:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_e.$$

Damit ergibt sich die Radargleichung für ein monostatisches Primärradar zu:

$$P_e = P_s \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} G_s G_e \sigma. \quad (3.5)$$

Die Radargleichung 3.5 veranschaulicht, dass die Empfangsleistung proportional

- zur Sendeleistung P_s ,

- zum Produkt aus den Antennengewinnen G_s und G_e ,
- zum Radarquerschnitt σ ,
- zum Quadrat der Wellenlänge λ und
- umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Zielentfernung ist.

Diese Beziehungen sind im wesentlichen auch für das Laserradar gültig. Die Funktion der Sende- und Empfangsantenne werden beim Laserradar durch optische Systeme (Linsen) wahrgenommen bzw. durch die Photodiode, die das rückgestrahlte Licht empfängt. Aufgrund der hohen gebündelten Leistungsdichte eines Laserstrahls sind die Antennengewinne G_s und G_e um mehrere Zehnerpotenzen höher anzusetzen als beim Mikrowellenradar. Beachtlich ist die deutliche Leistungsdämpfung in der vierte Potenz aufgrund der zu überbrückenden Entfernung. Hierbei sind, wie eingangs vorausgesetzt, noch keinerlei atmosphärischen Effekte berücksichtigt.

Wird der „Antennengewinn“ eines Laserradars aber mit $G_s \approx 4\pi r^2$ angesetzt, was dem Umstand entspricht, dass das Laserlicht nicht isotrop sondern genau in eine Richtung abgestrahlt wird, so erhält Gleichung 3.5 die Form:

$$P_e = P_s \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 r^2} G_e \sigma.$$

Beim Laserradar ist also die Empfangsleistung nur noch umgekehrt proportional zum Quadrat der Zielentfernung ([Weh91, S. 11]). Es kann also mit geringeren Sendeleistungen gearbeitet werden. Dies hat große Bedeutung für die Praxis. Man denke nur an die damit einhergehende Dimensionierung der Stromversorgung für ein mobiles Gerätes.

Die Reichweite eines Radarsystem ist insbesondere durch das Signal-Rausch-Verhältnis begrenzt. Sinkt die Empfangsleistung unter das Niveau des systembedingten Rauschens oder unterhalb der Hintergrundstrahlung z. B. hervorgerufen durch das Umgebungslicht, so ist das Empfangssignal nicht mehr auswertbar. Anhand der Radargleichung kann abgelesen werden, dass das Scheitern einer Auswertung neben einer zu großen Entfernung r auch durch einen ungünstigen Radarquerschnitt σ verursacht werden kann. Die Reflexionseigenschaften des Zielobjektes sind also von großer Bedeutung.

3.5.4 Anordnung von Sende- und Empfangsoptik

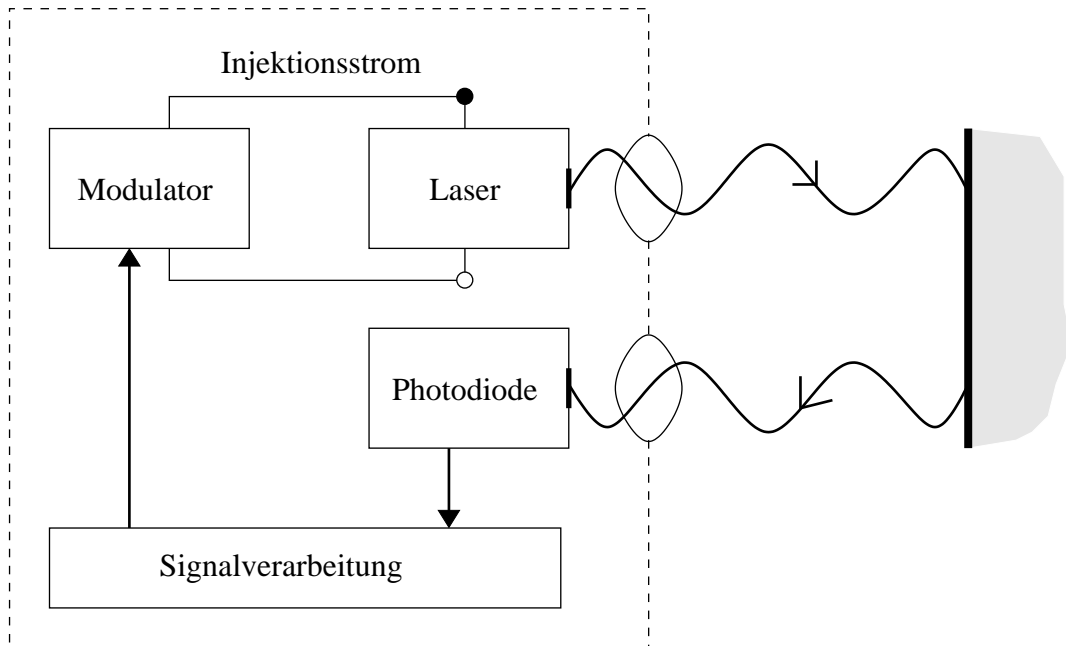


Abbildung 3.12: Blockschaftbild eines elektrooptischen Entfernungsmessers.

Ein vereinfachtes Blockschaftbild in Abbildung 3.12 zeigt die für einen Laser-Entfernungsmesser benötigten Bauteile. Der Laser emittiert Laserlicht, das als Träger für eine Modulationswelle genutzt wird. Eine Photodiode bildet die Empfangseinheit für das vom Messobjekt zurückgestrahlte Licht. Das an der Photodiode

anliegende Signal wird in einer Signalverarbeitungseinheit zusammen mit dem Ausgangssignal des Lasers zu einer Streckenlänge verrechnet.

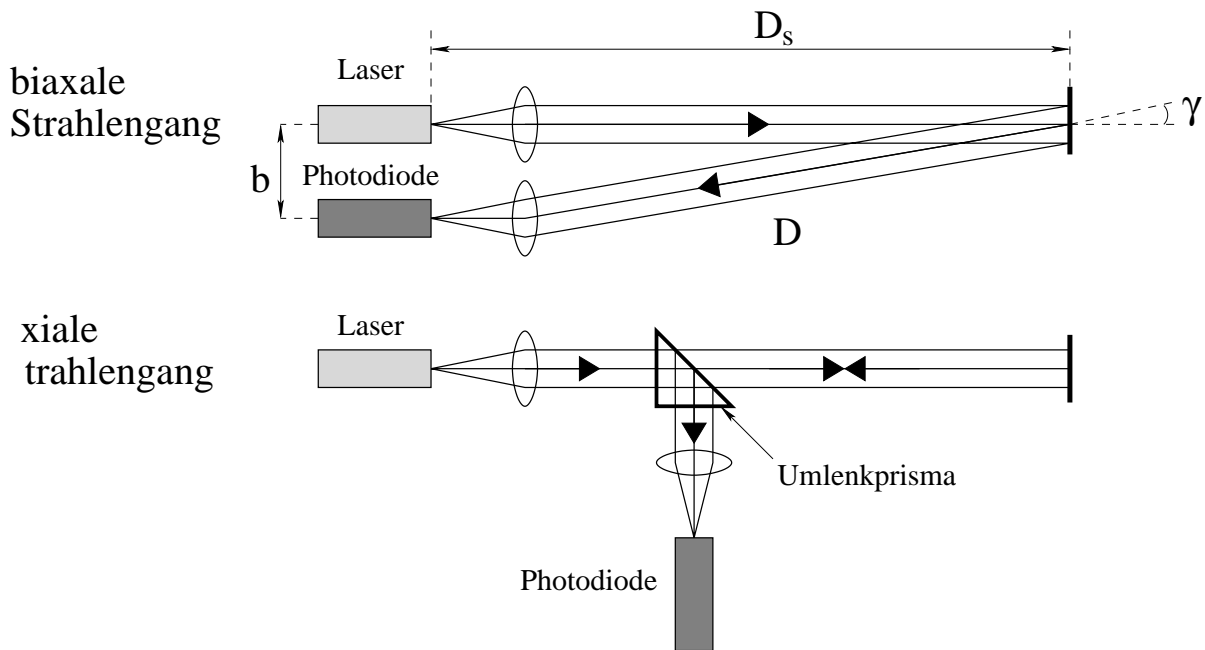


Abbildung 3.13: Axiale und biaxiale Anordnung von Sende- und Empfangsoptik.

Bei der Anordnung von Laser und Photodiode sind zwei prinzipielle Bauarten zu unterscheiden (Abbildung 3.13) [Sch96b, S. 424]. Bei der biaxialen Anordnung verlaufen die optischen Achsen Laser- und Photodiode in einem Abstand b parallel zueinander. Dadurch haben die Strahlengänge des emittierten und des am Ziel reflektierten Lichtes unterschiedliche Längen. Der Längenunterschied beider Lichtwege ist abhängig von der Messentfernung D_s und verfälscht das Messergebnis systematisch. Die gemessene Rohstrecke D ist um die Korrektur ΔD in Abhängigkeit vom Messabstand D_s zu verbessern.

$$\Delta D = \frac{1}{2}(\sqrt{b^2 + D_s^2} - D_s) \quad (3.6)$$

In Abbildung 3.14 ist die Gleichung 3.6 graphisch dargestellt. Es zeigt sich, dass im extremen Nahbereich unterhalb von 1 m eine Korrektur in der Größenordnung der Messgenauigkeit von wenigen Millimetern erforderlich ist. Ist die Parallaxe zwischen Sende- und Empfangsoptik unterhalb von 1 cm, so ist keine Verfälschung des Messergebnisses zu erwarten. Ein Messbereich unter 1 m ist für Messungen in schmalen oder kleinen Innenräumen durchaus erforderlich.

Das Problem der Parallaxe kann vermieden werden, wenn die optischen Achsen von Laser- und Photodiode zentrisch aufeinander liegen. Dieses kann durch Auskoppeln des reflektierten Lichtes mittels eines Umlenkprismas im Strahlengang des Lasers erreicht werden. Nachteilig an dieser Bauform ist, dass am Umlenkprisma erhebliche Leistungsverluste hingenommen werden müssen.

Da der Träger Laserlicht eine sehr kurze Wellenlänge von etwa 400 nm bis 1100 nm besitzt, kann er stark kollimiert (gebündelt) werden. Über den anliegenden Injektionsstrom kann die Amplitude des Laserlichts frei moduliert werden und so dem Träger verschiedenartigste Signale aufgeprägt werden. Die Laufzeiten dieser Signale bilden die Grundlage der Entfernungsmessung zum Zielobjekt. Zwei grundlegend verschiedene Verfahren werden in der Entfernungsmesstechnik angewandt: Zum einen das Impulslaufzeitverfahren und zum anderen das Dauerlicht- oder Continuous-Wave-Verfahren.

3.5.5 Impulslaufzeitverfahren

Beim Impulslaufzeitverfahren werden energiereiche (10 bis 100 W) Laserimpulse mit einer Pulsfolgefrequenz von $f_p = 1/T_p$ erzeugt. Dieses kann dadurch erreicht werden, dass der Lichtstrahl nur wenige Bruchteile einer Sekunde durch eine Blende freigegeben wird oder durch eine kurzzeitige Erhöhung der Amplitude. Auch

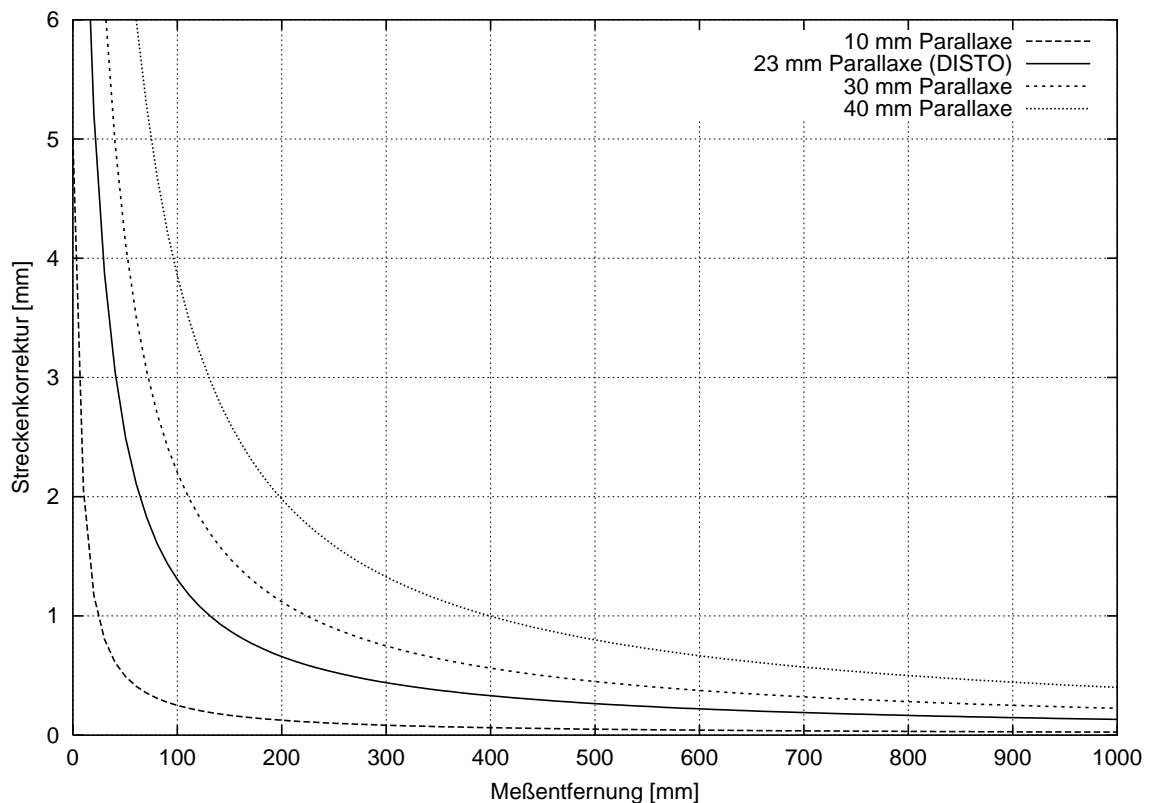


Abbildung 3.14: Streckenkorrektur aufgrund einer biaxalen Anordnung von Sende- und Empfangsoptik.

können Lichtimpulse durch Modenkopplung erzeugt werden, bei der gewissermaßen aufgestaute Energie plötzlich freigegeben wird.

Der Impuls wird vom Ziel reflektiert und nach der Laufzeit

$$\Delta t = \frac{2r}{c}$$

empfangen (Abbildung 3.15). Über die Lichtgeschwindigkeit c kann anhand der Laufzeit die Entfernung berechnet werden. Der Zeitpunkt des Aussendens des Impulses und der Empfangszeitpunkt müssen über einen Zeitmesser (Oszillator) präzise bestimmt werden, um die Impulslaufzeit berechnen zu können.

Ein Vorteil des Impulsverfahrens ist, dass mit ihm zwei Ziele unterschiedlicher Entfernung gleichzeitig ermittelt werden können. Ein Impuls kann immer nur mit einer endlicher Impulsdauer Δt_p erzeugt werden. Werden die Laufzeiten der ansteigenden Flanke des Impulses (first pulse) und der absteigenden Flanke des Impulses (last pulse) bestimmt, können die Entfernungen zu einem Ziel im Vordergrund (first pulse) und zu einem Ziel im Hintergrund (last pulse) ermittelt werden. Dies wird beim flugzeuggetragenen Laserscanning genutzt, um Baumhöhen zu bestimmen ([KF00]).

3.5.6 Dauerlicht- oder Continuous-Wave-Verfahren

Bei Dauerlichtbetrieb wird kontinuierlich elektromagnetische Energie abgestrahlt. Auch bei dieser Technik kommt das Signal um Δt verzögert an der Photodiode an. Es werden aber andere physikalische Merkmale als die Laufzeit ausgewertet. Die Dauerlichtverfahren erlauben eine höhere Messgeschwindigkeit als ein Impulslaufzeitverfahren, da bei ihnen für jeden Impuls eine bestimmte Latenzzeit nötig ist, um Folgeimpulse voneinander unterscheiden zu können.

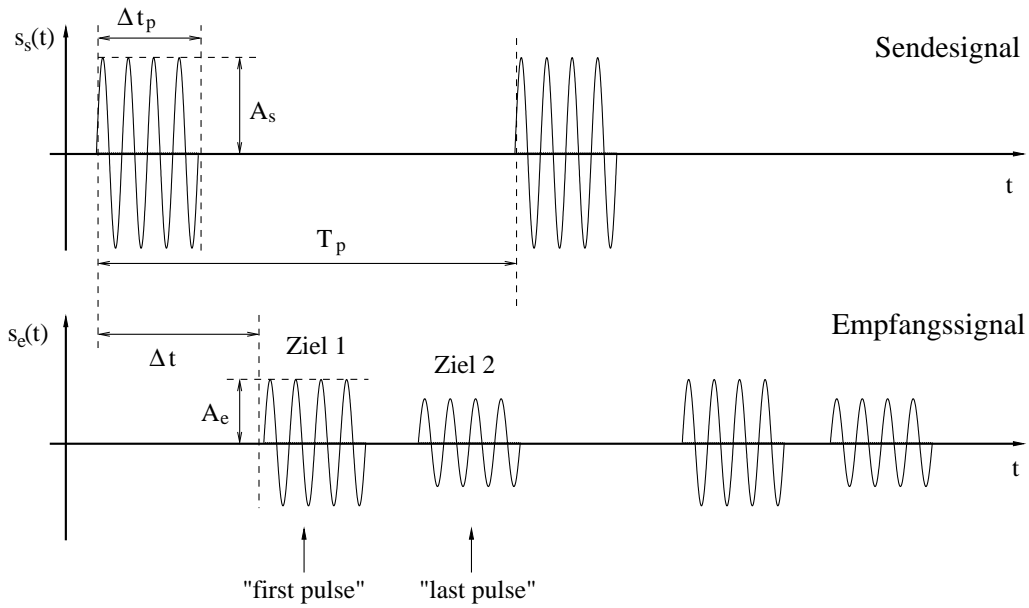


Abbildung 3.15: Prinzipieller Verlauf des Sende- und Empfangssignals beim Impulslaufzeitverfahren.

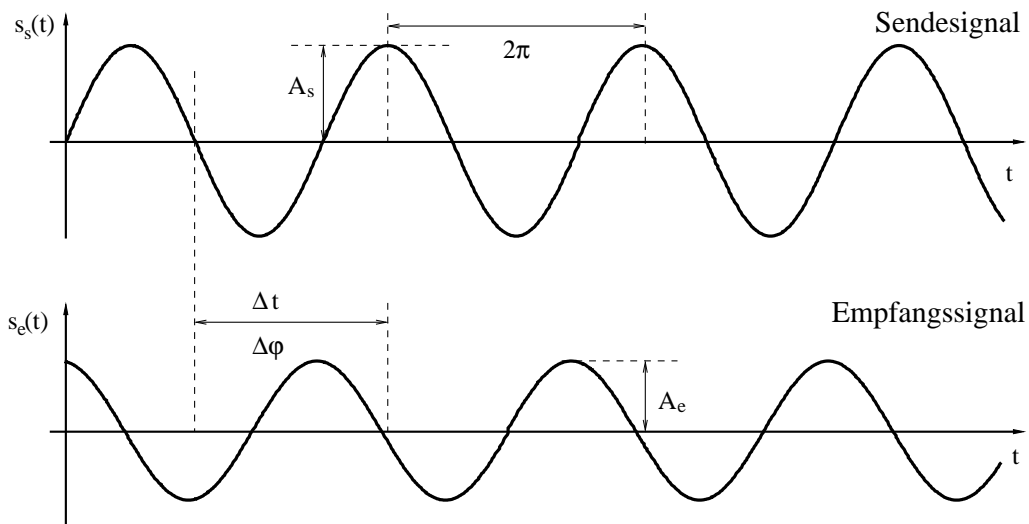


Abbildung 3.16: Prinzipieller Verlauf des Sende- und Empfangssignals beim Phasendifferenzverfahren.

Phasendifferenzverfahren

Anstatt der Pulsmodulation tritt beim Phasendifferenzverfahren eine sinusförmige Amplitudenmodulation $s(t)$ mit der (Mess-)Frequenz ν_m auf.

$$s_s(t) = A_s \sin(2\pi\nu_m t).$$

In der Radartechnik spricht man auch vom side-tone ranging, da dem Träger ein Ton aufmodelliert wird. Das empfangene Signal $s_e(t)$ kommt um $\Delta t = \frac{2r}{c}$ verzögert an und weist somit eine Phasendifferenz $\Delta\varphi$ zwischen Sende- und Empfangssignal auf.

$$s_e(t) = A_e \sin(2\pi\nu_m t + \Delta\varphi).$$

Die Laufzeit wird aus der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ bestimmt (Abbildung 3.16):

$$r = \frac{\Delta\varphi}{4\pi\nu_m} c = \frac{\lambda_m}{4\pi} \Delta\varphi. \quad (3.7)$$

Gleichung 3.7 zeigt, dass die Genauigkeit der Streckenmessung proportional zur Wellenlänge λ_m der Modulationswelle ist. Eine kleinere Wellenlänge führt dazu, dass die Unsicherheit in der Bestimmung der Phasendifferenz $\sigma_{\Delta\varphi}$ sich geringer auf die Unsicherheit in der Strecke σ_r auswirkt.

$$\sigma_r = \frac{\lambda_m}{4\pi} \sigma_{\Delta\varphi}$$

Hierin liegt der Genauigkeitsvorteil gegenüber dem Impulslaufzeitverfahren. Zur Abschätzung der Genauigkeit des Impulslaufzeitverfahrens nehme man an, dass eine Zeitauflösung von $\Delta t = 100$ ps – dies ist sehr optimistisch – erreicht werden kann, dann wäre eine Entfernungsauflösung Δr von

$$\Delta r = c \frac{\Delta t}{2} = 3 * 10^8 * 10^{-10} \text{ m} / 2 = 1,50 \text{ cm}$$

erreichbar. Für eine Phasenmessung mit einem Signal mit $\lambda_m = 3$ m und einer Phasenauflösung von $\Delta\varphi = 1^\circ$ ergibt sich indes:

$$\Delta r = \frac{\lambda_m}{4\pi} \Delta\varphi = \frac{3\text{m}}{4\pi} * 1^\circ * \frac{\pi}{180} = 0,42 \text{ cm}.$$

Nachteilig am Phasendifferenzverfahren ist, dass nur Strecken unterhalb der Maximal-Strecke r_{max} bestimmt werden können, da die Phasenmessung nur in einem Bereich von 0 bis 2π eindeutig ist.

$$r_{max} = \frac{\lambda_m}{2}$$

Eine Phasendifferenz von $\Delta\varphi$ wird für alle Entfernungen gemessen, deren Länge r_k sich aus einem ganzzahligen Vielfachen der halben Messwellenlänge λ_m und einer Reststrecke r , die sich nach Gleichung 3.7 berechnet, registriert.

$$r_k = k r_{max} + \frac{\lambda_m}{4\pi} \Delta\varphi \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Die elektrooptische Entfernungsmesser benutzen daher nacheinander oder zeitgleich mehrere aufeinander abgestimmte Messfrequenzen, um dieses Mehrdeutigkeitsproblem zu lösen.

Eine interessante Variante des Phasenvergleichsverfahrens ist beim Handdistanzlaser DISTO der Leica AG, Heerbrugg (CH), realisiert. Das Laserlicht wird mit einer Feinmessfrequenz von 50 MHz amplitudenmoduliert. Um die Mehrdeutigkeit der Entfernungbestimmung aufzulösen wird zusätzlich noch eine Phasenmodulation mit einer Grobfrequenz von 1,024 MHz vorgenommen ([Sch96b, S. 425] und [WS00, S. 358]). Damit sind bei günstigen Bedingungen Entfernungsmessungen von über 30 m auf natürliche Oberflächen möglich.

Frequenzdifferenzverfahren

Eine Erweiterung des Eindeutigkeitsbereiches des Phasendifferenzverfahrens gelingt durch Aufprägen eines frequenzmoduliertes Signals. Bei diesem Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)-Verfahren bleibt die Amplitude des Sendesignals konstant. Das Prinzip lässt sich wie folgt kurz darstellen. Wird z. B. die Frequenz des Sendesignals sägezahnförmig verändert, d.h. sie steigt linear bis zu einem Maximalwert $\nu_{m,max}$ und fällt dann linear auf eine Minimalfrequenz $\nu_{m,0}$ zurück, so wird am Empfangsteil eine Signalwelle registriert, die um einen konstanten Frequenzhub $\Delta\nu$ gegenüber der Sendefrequenz verschoben ist (Abbildung 3.17). Der Frequenzhub $\Delta\nu$ ist proportional zur Zielentfernung.

Dieses Verfahren erlaubt die gleichzeitige Vermessung mehrerer Ziele, erfordert aber erheblichen Signalverarbeitungsaufwand (Fouriertransformation) sowie einen Frequenzzähler. Das Laserradar-Gerät LR200 der Firma Leica benutzt dieses Messprinzip ([Whi99] und [Sch02, S. 90]).

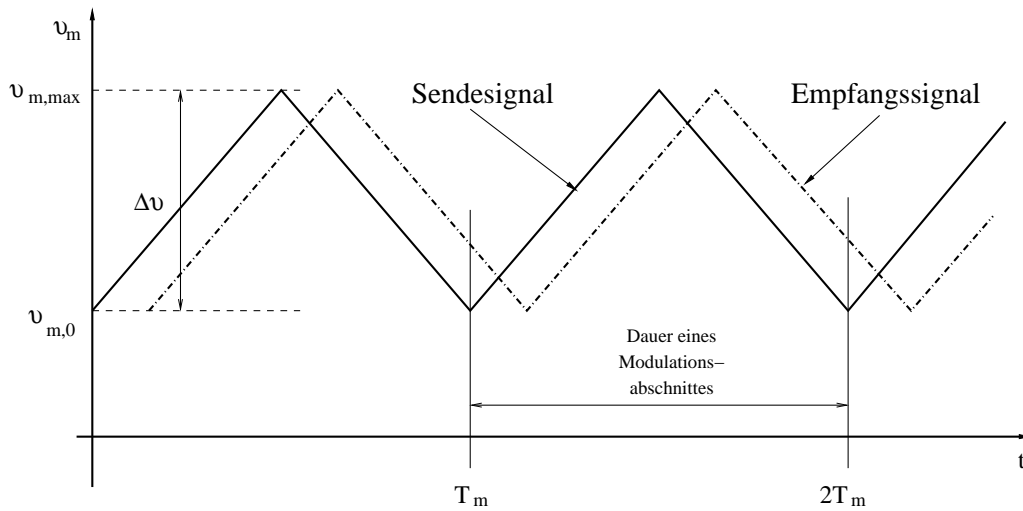


Abbildung 3.17: Prinzipieller Verlauf des Sendesignals und Empfangssignals beim Phasenlaufzeitverfahren eines frequenzmodulierten Signals (FMCW).

3.5.7 Triangulationsverfahren

Ein Verfahren zur lasergestützten Entfernungsmessung, das nicht der Radartechnik entlehnt ist, nennt sich Triangulationsverfahren. Es ist ein eher geometrisch motiviertes Verfahren. Ein Triangulationslaser besteht aus einer Basis, an dessen Enden zum einen ein Laser und zum anderen eine positionsempfindliche Photodiode/zeile angebracht ist (Abbildung 3.18). Die Länge der Basis muss sehr genau bekannt sein. Das Laserlicht wird auf das Messobjekt gerichtet. Über eine Optik gelangt das reflektierte Licht auf die Photodiode. In Abhängigkeit von der Zielobjektentfernung ergibt sich eine Ablage des abgebildeten Leuchtpunktes auf der Photodiode. Über diese Ablage x und der Basislänge b ist die Entfernung r gegeben.

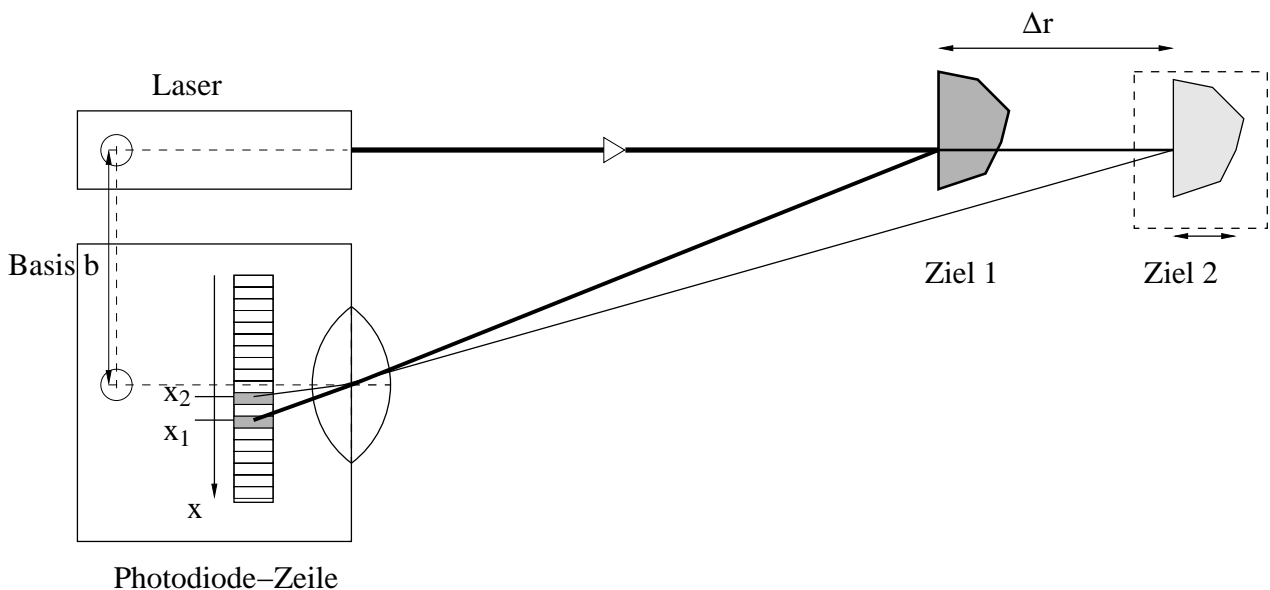


Abbildung 3.18: Aufbau eines Triangulations-Entfernungsmessers.

Im Vermessungswesen ähnelt dieses Verfahren dem des Vorwärtseinschneidens wie es bei Industriemesssystemen angewandt wird. Ein Theodolit markiert dabei mit einem Laserpointer den Objektpunkt und mit dem zweiten Theodolit wird dieser Leuchtpunkt angemessen.

Das Triangulationsverfahren nutzt ausschließlich die große Leuchtdichte und Bündelung des Laserlichtes aus. Die Reichweite eines Triangulationslasers ist zusätzlich neben der atmosphärischen Dämpfung durch die Basislänge begrenzt. Ab einer bestimmten Entfernung lassen sich größere Entfernungen nicht mehr voneinander trennen, da die maximale Auflösung der Photodiodenzeile überschritten wird. Das ist auch der Grund dafür, dass beim Triangulationsverfahren die Auflösung der Streckenmessung mit zunehmender Entfernung exponentiell schlechter wird, wohingegen bei anderen Verfahren ein lineares Verhalten unterstellt werden kann. Die Genauigkeit der Entfernungsmessung ist bei dem Triangulationsverfahren von der Bestimmungsgenauigkeit des parallaktischen Winkels abhängig, der eine Funktion der Basislänge und der Messentfernung ist und mit zunehmender Messentfernung immer genauer zu bestimmen ist, wenn eine gleichmäßige Messgenauigkeit für die Strecke angestrebt wird.

Das Triangulationsverfahren kann zum Lichtebenenschnittverfahren erweitert werden, wenn durch den Laser nicht nur ein einzelner Punkt des Objektes sondern ein Profilschnitt beleuchtet wird. Dazu wird das Laserlicht zu einer Lichtebene aufgeweitet. Statt einer Photodiode wird dann dieses projizierte und vom Objekt zurückgeworfene Licht mit einer digitalen Kamera (CCD-Array) aufgenommen ([Wei88,]). Die Extraktion des Profils im Abbild erfordert eine aufwendige Bildverarbeitung. Dieser zeitaufwendige Verarbeitungsprozess und das relativ langsame Auslesen des CCD-Arrays erlauben im Vergleich mit den anderen Verfahren nur geringe Messgeschwindigkeiten.

3.6 Reflektorlose Entfernungsmessung

Im folgenden soll die Leistungsfähigkeit moderner Laserentfernungsmesser am Beispiel des Handlaserometers DISTO dargestellt werden. Abgesteckt werden dabei die Grenzen bei denen ein reflektorloser Entfernungsmesser zuverlässig eingesetzt werden kann und welche genauigkeitsbeeinflussenden Effekte zu berücksichtigen sind.

Das Laserometer DISTO ist ein im Vergleich mit anderen geodätischen Messinstrumenten preiswertes Streckenmessgerät, das in unterschiedlichen Ausstattungsvarianten angeboten wird. Andere Hersteller wie z. B. die Jenoptik Laser, Optik, Systeme GmbH bieten vergleichbare Instrumente an. Das Messprinzip des DISTO arbeitet nach dem Phasendifferenzverfahren. Der DISTO verwendet sichtbares rotes Licht eines Diodenlasers mit der Wellenlänge $\lambda = 675 \text{ nm}$. Die Modulationsfrequenz beträgt 50 MHz, was einem Feinmaßstab von 3 m (halbe Wellenlänge) entspricht. Durch eine zweite Messfrequenz, die einen Grobmaßstab von ca. 1500 m realisiert, sind die Distanzen im Messbereich bis 100 m eindeutig bestimmbar [Sch96b, S. 425]. Der Hersteller gibt eine Messgenauigkeit von 3 mm für das untersuchte Gerät an. Das Spitzenmodell soll eine Genauigkeit von 1,5 mm erreichen.

Die Laserometer kommen ohne spezielle Reflektoren aus, sodass auf natürliche Oberflächen gemessen werden kann. Die starke Bündelung des Laserlicht hat zur Folge, dass auch an natürlichen/künstlichen nicht spiegelnden oder lichtdurchlässigen Oberflächen genügend Licht reflektiert wird. Es ist streng betrachtet daher nicht richtig bei einem Laserometer von reflektorloser Entfernungsmessung zu sprechen. Auch hier ist eine reflektierende Fläche nötig, um das Signal an den Empfänger zurück zu strahlen. Nur muss diese nicht die Eigenschaften eines Retro-Reflektors haben, der das Licht fast verlustfrei (Radarquerschnitt $\sigma \approx 1.0$) in die gleiche Richtung zurückwirft (Ausfallswinkel = Einfallswinkel + 180°). Da eine besondere Signalisierung nicht vonnöten ist, wäre das Attribut „signalisierungsfrei“ oder berührungslos eine treffendere Beschreibung des Sachverhalts. Im Weiteren soll jedoch der mittlerweile etablierte Begriff „reflektorlos“ benutzt werden, um diese Art der Messung ohne Prisma, Reflexmarken, Spiegel etc. von der einer Messung mit einem kooperierenden Reflektor zu unterscheiden. Im Rahmen der Radartechnik fällt das reflektorlose Messen somit in die Kategorie Primärradar (Abschnitt 3.5).

Die Radargleichung 3.5 gibt diejenige Empfangsleistung P_e an, die vom Empfänger ausgewertet werden kann. Sie entspricht nur noch einem geringem Bruchteil der Sendeleistung P_s . Eine Streckenmessung kann nur dann erfolgreich durchgeführt werden, wenn die Empfangsleistung P_a groß genug ist, um das Empfangssignal vom Systemrauschen trennen zu können. Mit anderen Worten, das Signal-/Rauschverhältnis darf einen Minimalwert nicht unterschreiten. Die Empfangsleistung P_e hängt, wie Gleichung 3.5 zeigt, unter anderem vom Radarquerschnitt σ und damit von den Reflexionseigenschaften des Zielobjektes ab. Bei der reflektorlosen

Streckenmessung ist dem Radarquerschnitt besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da dieser bei natürlichen Reflexionsobjekten einer großen Variationsbreite unterworfen ist und daher mit systembedingten systematischen Messabweichungen zu rechnen ist. Die konventionelle Distanzmessung arbeitet mit standardisierten Retro-Reflektoren, deren spiegelnde Eigenschaft durch Konstruktion vorgegeben werden kann. Etwaige Fertigungstoleranzen lassen sich im Labor durch Kalibrierung feststellen und berücksichtigen. Die Reflexion eines Lichtstrahls an einer beliebigen natürlichen oder künstlichen Oberfläche lässt sich weder physikalisch noch mathematisch hypothesenfrei modellieren.

3.6.1 Reflexion

Im einfachsten Reflexionsmodell unterscheidet man zwischen diffuser Reflexion, regulärer Reflexion, wie sie bei einem Spiegel auftritt, und diffuser Reflexion mit Spiegelung (Abbildung 3.19). Die Art der Reflexion hängt von der Oberflächenrauigkeit ab. Sind die Hügel und Täler auf einer Oberfläche klein gegenüber der Wellenlänge λ des auftreffenden Lichtes, so entstehen gestreute Elementarwellen, die im wesentlichen in gleicher Phase schwingen. Die Oberfläche ist dann spiegelnd. Ist jedoch die Oberfläche im Vergleich zu λ rau, dann werden die Einzelstrahlen des Lichtbündels in alle möglichen Richtungen zurückgeworfen. Eine diffuse Reflexion ist die Folge. Zwischen den beiden Extremen der spiegelnden und diffusen Reflexion ist das Verhalten der meisten natürlicher Oberflächen zu beobachten ([Hec01, S. 153-158]). Für die reguläre Reflexion gilt das Reflexionsgesetz bei dem der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist. Bei den meisten Oberflächen, die dem Nutzer im Rahmen einer Bauaufnahme begegnen, ist diffuse Reflexion anzunehmen. Teilweise wird auch auf Flächen zu messen sein, die diffus mit Spiegelung in eine Hauptrichtung reflektieren. Ausnahme bilden Glas- und Metallflächen, die überwiegend regulär d.h. spiegelnd reflektieren. Dazu können auch im Einzelfall andere glatte oder polierte Oberflächen wie Kunststoff- oder Lackoberflächen von Möbeln, Tür- und Fensterrahmen gehören.

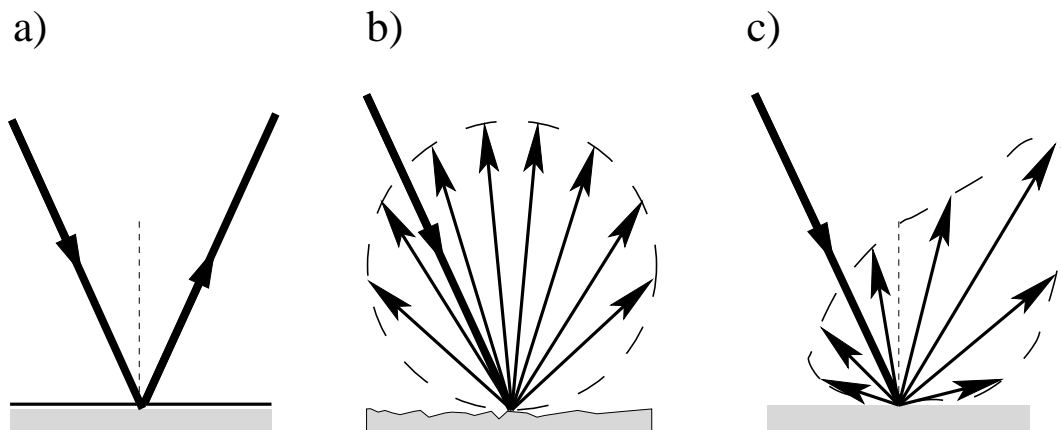


Abbildung 3.19: a) Spiegelnde Reflexion, b) diffuse Reflexion und c) diffuse Reflexion mit Spiegelung.

Die Art der Reflexion an sich hat nur insoweit eine Auswirkung auf die Streckenmessung als sie fehlschlägt, falls nicht genügend Energie zurückgeworfen wird. Ein Einfluss auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messergebnisse ist nicht zu erwarten. Anders ist dies, wenn zusätzlich die Strahldivergenz berücksichtigt wird.

Von den vier Einflussfaktoren aus Abschnitt 3.5.3 sind die Faktoren Zielgeometrie, Einfallswinkel und Material näher untersucht worden.

3.6.2 Einfluss der Zielgeometrie und des Einfallswinkels

Die Energieverteilung des Laserstrahl entspricht nach Kapitel 3.3.4 einem Gaußschen Strahl. Der Lichtstrahl trifft damit flächenhaft auf das Reflexionsobjekt. Es ist ein Leuchtkreis bzw. eine Leuchtellipse sichtbar, deren Größe mit zunehmender Entfernung vom Objekt größer wird. Beim DISTO beträgt die Divergenz ca. $\theta_0 \approx 40 \text{ mgon}$, was zu einem Leuchtfleck von fast 2 cm Durchmesser auf 30 m Entfernung führt. Zusätzlich ist zu bedenken, dass der Halbleiterlaserstrahl typischerweise einen elliptischen Querschnitt hat. Einfluss auf die Messergebnisse hat auch die biaxiale Anordnung von Sende- und Empfangsoptik des DISTO mit einer Parallaxe von $b = 23 \text{ mm}$.

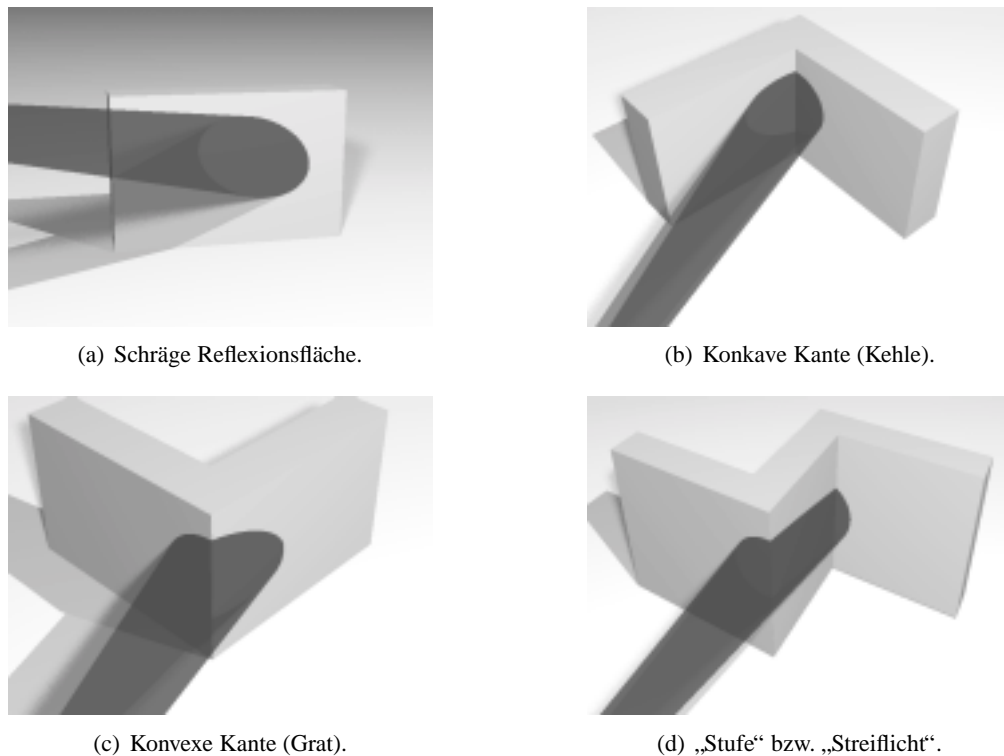


Abbildung 3.20: Ausprägungen der Reflexionsfläche im Zusammenhang mit der Strahldivergenz.

Bei der Vermessung von Bauwerksgeometrien können die typischen Ausprägungen von Reflexionsflächen in vier Klassen eingeteilt werden. Zum einen die einfache ebene Reflexionsfläche (Abbildung 3.20(a)), wie sie eine Wand- oder Bodenfläche darstellt und die unter verschiedenen Einfallswinkel des Laserstrahls angemessen wird. Die zweite Situation stellt die innere Raumecke oder -kante (Kehle) (Abbildung 3.20(b)) dar und die dritte eine in Richtung Lasermessgerät hervorstehende Raumecke oder Kante (Abbildung 3.20(c)) z. B. wie dies bei einem Wandvorsprung anzutreffen ist. Interessant ist auch eine tiefengestaffelte Objektgeometrie, bei der der Laserstrahl in mehrere Teile zerfällt bzw. eine Reflexionsfläche unter spitzen Winkel „gestreift“ wird (Abbildung 3.20(d)).

Für die in Abbildung 3.20(a) gezeigte Situation wurde eine matt weiße gestrichene Zieltafel unter verschiedenen Einfallswinkel bei gleich bleibender Zielentfernung angemessen. Die Zieltafel wurde hierzu auf einen Kreuzschlitten montiert und um die Vertikale in 10° Schritten gedreht. Um die beiden Situationen vertikale und horizontale Reflexionsfläche zu simulieren wurde eine Messreihe mit dem DISTO so gemessen, dass die Verbindungslinie zwischen Sende- und Empfangsoptik senkrecht zur Rotationsachse der Zieltafeldrehung ist (horizontale Verschwenkung) und eine Messreihe, bei der die Optiken parallel zur Rotationsachse standen (vertikale Verschwenkung).

In der Abbildung 3.21 ist deutlich eine Abhängigkeit vom Einfallswinkel zu erkennen. Der Effekt wird im wesentlichen durch die biaxiale Bauform des DISTO hervorgerufen, wie die deckungsgleichen Resultate für die horizontale und vertikale Verschwenkung zeigen und durch die fehlende Spiegelsymmetrie in der Grafik bezüglich der Ordinatenachse erkenntlich ist. Der Einfluss liegt jedoch innerhalb der Messgenauigkeit. Dies steht im Einklang mit den Aussagen von [Sch99], [Ing99], [JS99, S. 151ff] und [SW02]. Ergebnisse anderer Autoren [Run89] und [Buc96] zeigen bei Geräten, die das Impulslaufzeitverfahren verwenden, größere, nicht zu vernachlässigende Abweichungen. In [Run89] werden diese systematischen Messabweichungen bestimmt, sodass die Messwerte entsprechend korrigiert werden können.

Zur Erklärung dieser Abhängigkeit vom Einfallswinkel betrachte man die Abbildung 3.22. Die Wellenfronten des Laserstrahls entsprechen im Fernfeld denjenigen von Kugelwellen, wobei die Leistungsdichte von der Strahlmitte ausgehend entsprechend einer Gaußschen Glockenkurve exponentiell abfällt. Trifft nun solch ein Gaußscher Strahl auf eine schiefe Ebene, so wird er hinsichtlich seiner Ausrichtung und seiner Energie gemäß des Reflexionsgesetzes zum größten Teil reflektiert und nur ein geringer Energieanteil gelangt zum Messgerät zurück (bei Annahme einer diffusen Reflexion mit Spiegelung). Bei der Reflexion wird die Energiewellen-

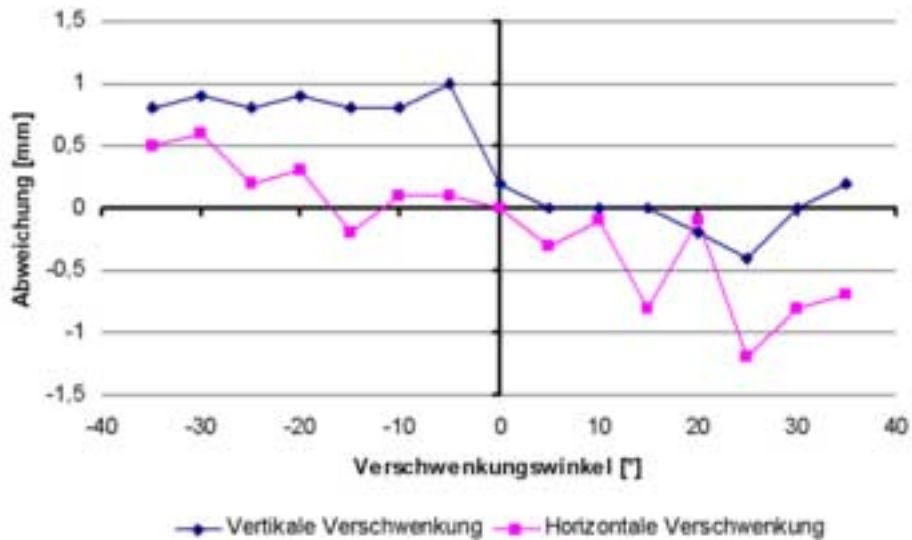


Abbildung 3.21: Messabweichungen zum Mittel in Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Laserstrahls bei einer Wand.

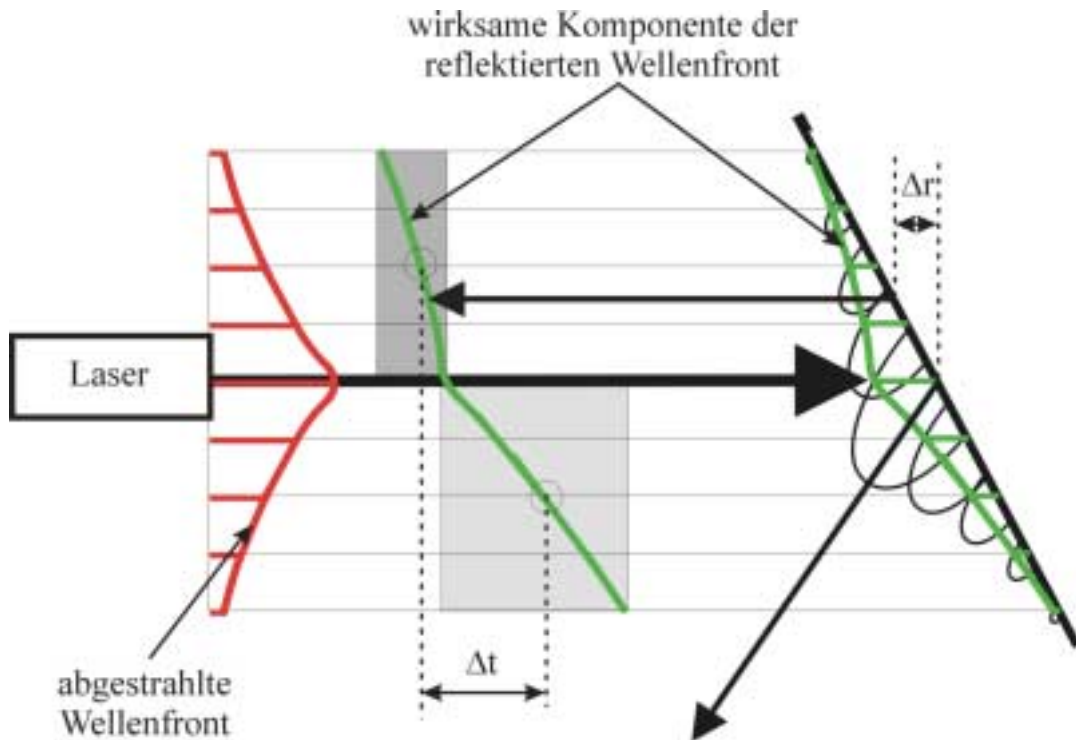


Abbildung 3.22: Veränderung der Wellenfront durch Reflexion an einer Zielfläche mit Einfallswinkel $\alpha \neq 0$ und dessen Auswirkung auf das Entfernungsergebnis.

front wie in Abbildung 3.22 dargestellt verformt. Für den Teil der Reflexionsfläche, der näher zum Lasergerät zeigt, rücken die wirksamen Intensitäten näher zusammen. Für den Teil der Reflexionsfläche, der weiter weg vom Lasergerät ist, ziehen sich die wirksamen Intensitäten auseinander. Am Photodetektor wirkt damit eine Intensitätsverteilung, die zu Gunsten der näheren Reflexionsteilfläche zeitlich verschoben ist. Eine systematisch verkürzte Laufzeitmessung und damit eine zu kurze Entfernungsmessung wird registriert. Dieser Effekt ist umso deutlicher umso größer der Einfallswinkel und um so größer die Strahldivergenz ist. Besitzt der Entfernungsmesser zudem eine biaxiale Anordnung der Sende- und Empfangsoptik so erhält man eine asymmetrische Messabweichung bezüglich des Verschwenkungswinkels.

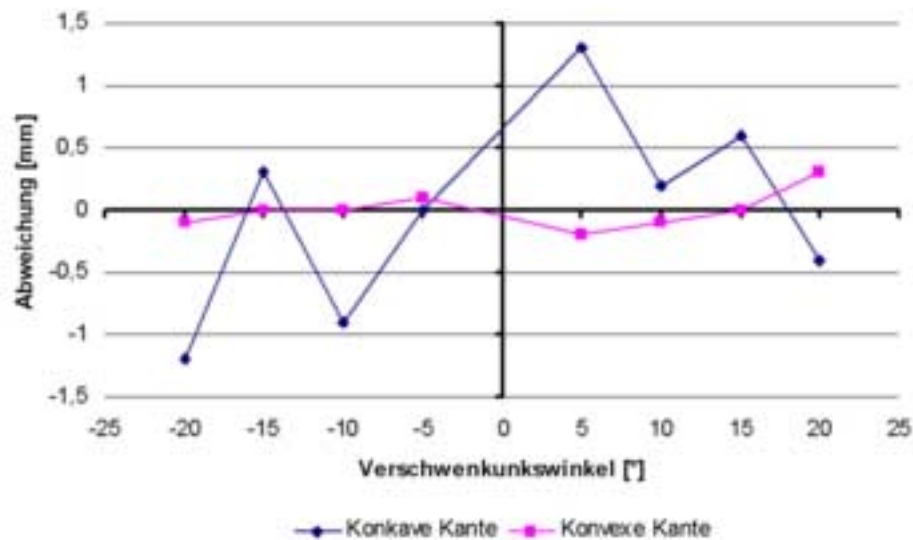


Abbildung 3.23: Messabweichungen zum Mittel in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Laserstrahls auf eine konvexe und konkave Kante.

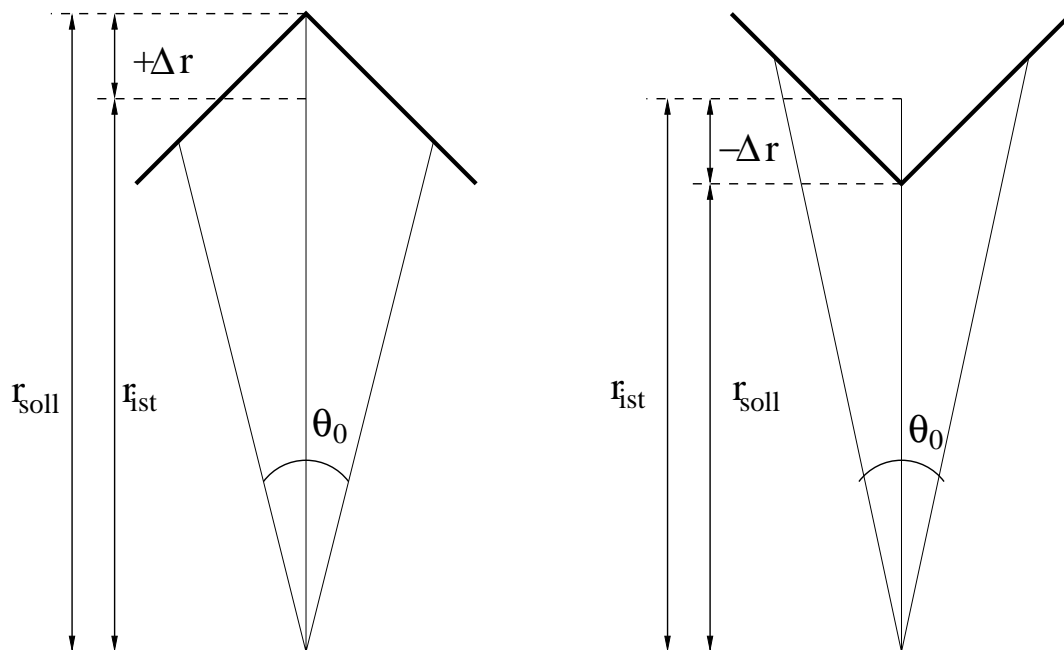


Abbildung 3.24: Prinzipielle Messabweichungen bei einer konvexen und konkaven Kante.

[Buc96] und [Run89] berichten von Untersuchungen mit einem Impulsentfernungsmesser auf Wandecken und kamen zu Systematiken, die deutlich über der Messgenauigkeit liegen. Für ähnliche Untersuchungen des DISTO wurde eine innere Raumecke (Kehle, konkave Kante) und eine äußere Ecke (Vorsprung, konvexe Kante) durch einen weiß gestrichener Metallwinkel simuliert, der um die Vertikale gedreht werden konnte. Zur Kompensation der Materialdicke des Metallwinkels wurde er auf einem Kreuzschlitten montiert. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in der Abbildung 3.23 dargestellt. Eine Systematik ist nicht signifikant nachweisbar. Zu mindestens bei der konvexen Kante scheint es so zu sein, dass der Effekt, der bei der ebenen Reflexionsfläche festzustellen ist (Abbildung 3.21), für die beiden Teilflächen des Winkels je zur Hälfte des Laserstrahls wirksam ist. In der Summe kompensieren sich beide Teileffekte. Für die konkave Kante ist dies nicht zutreffend; vielleicht deshalb, weil keine Mehrfachreflexion am konkaven Winkel stattfinden können. Die konvexe Kante verhält sich so gesehen wie ein Retroreflektor.

Pauschalierend kann gesagt werden, dass eine Streckenmessung auf eine konvexe Kante oder Ecke sys-

tematisch zu kurz gemessen wird und eine konkave Kante oder Ecke zu lang (Abbildung 3.24). Es hat sich gezeigt, dass mit zunehmender Entfernung die systematischen Messabweichungen größer werden, da durch die Strahldivergenz sich der Laserstrahl immer mehr aufweitet ([SW02]). Der Effekt der Zielgeometrie kann durchaus in der Größenordnung der allgemeinen Messunsicherheit der Streckenmessung liegen. Das Impulszeitverfahren ist anfälliger für derartige Effekte als das Phasenlaufzeitverfahren. Wird eine Profillinie z. B. entlang einer Wand reflektorlos gemessen, so ist damit zu rechnen, dass sich das gemessene Profil an den Wandkanten ausrundet (Abbildung 3.25). Im folgenden wird daher vom Ausrundungseffekt der reflektorlosen Streckenmessung gesprochen.

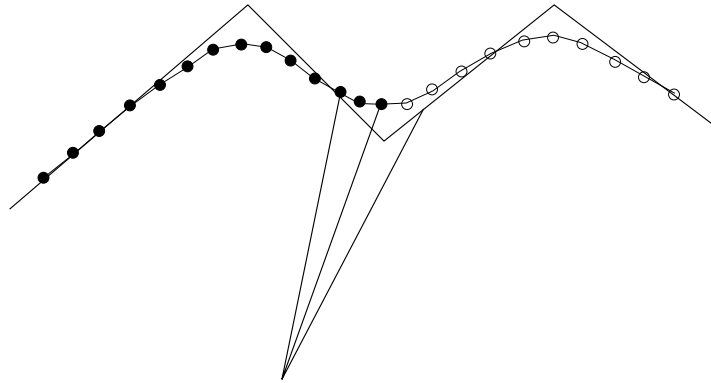


Abbildung 3.25: Ausrundungseffekt bei der reflektorlosen Streckenmessung.

Für Ziele, die eine Geometrie entsprechend der Abbildung 3.20(d) haben, erhält man meist grob falsche Messergebnisse. Die Reflexionsfläche im Vordergrund und im Hintergrund erzeugen ein Mischsignal, das in etwa der mittleren Entfernung zwischen Vordergrund und Hintergrund entspricht. Abhilfe schafft hier nur eine sorgfältige Anzielung. Zu vermeiden sind auch Situationen, bei denen der Messstrahl als Streiflicht auf ein Objekt fällt. In der Praxis der Bauaufnahme kann das Zerfallen des Laserlichtstrahls in Vordergrund und Hintergrundanteile unbemerkt bei der Messung z. B. durch Spinnweben hindurch auftreten. In [BHM00] wird dieser Streiflichteffekt für einen Laserscanner nach dem Triangulationsprinzip beobachtet und für sehr ärgerlich befunden, da die fehlerhaften Messungen manuell beseitigt werden müssen.

3.6.3 Einfluss der Materialfarbe und der Materialart

Der Einfluss der Oberflächenstruktur auf die reflektorlose Streckenmessung ist in soweit es die Rauigkeit betrifft bereits durch die Erörterung der verschiedenen Reflexionsarten abgehandelt. Was es noch zu untersuchen gilt, ist die Abhängigkeit von der Materialfarbe und des Materials an sich.

Die Farbe eines Materials hängt davon ab, welche Wellenlängen durch das Material absorbiert und welche reflektiert werden. Stimmt die Frequenz eines Lichtstrahls mit dem Energieniveau zwischen zwei diskreten Energiezuständen eines Atoms überein so wird ein Photon des auftreffenden Lichtes absorbiert. Andererseits bewirkt die spontane oder induzierte Emission, dass von einem Material Photonen bestimmter Frequenz ausgestrahlt werden (Kapitel 3.2). Die Materialfarbe, die streng genommen keine physikalische Größe sondern rein physiologisch zu betrachten ist, hat nur insoweit Einfluss auf die Streckenmessung, als dass sie die Empfangsleistung des zurückgestrahlten Lichtes beeinflusst.

Das Absorptionsspektrum eines Materials ist nicht gleichverteilt. Bestimmte Frequenzen werden stärker absorbiert andere weniger. Anteile des Spektrums, die nicht absorbiert werden, bestimmen mit welchem Farbeindruck das Material wahrgenommen wird. Wird mit einem monochromatischen Licht, z. B. mit einem roten Laser ($\lambda = 905 \text{ nm}$), ein Objekt angestrahlt, so kann nur Licht dieser Laserwellenlänge reflektiert werden. Ist das Objekt von roter Farbe, so wird sehr wenig rotes Licht absorbiert und die so genannte Reflektanz für das rote Laserlicht ist besonders hoch.

Die Reflektanz ist das Verhältnis zwischen der zurückgestreuten $P_r(\lambda)$ und der einstrahlenden spektralen

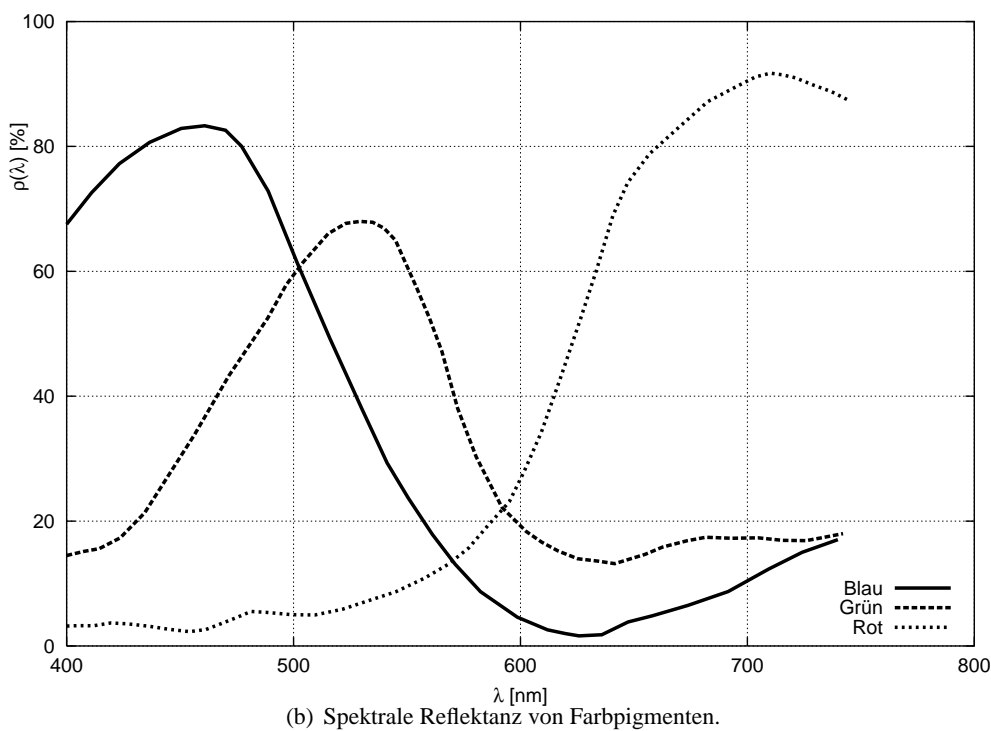
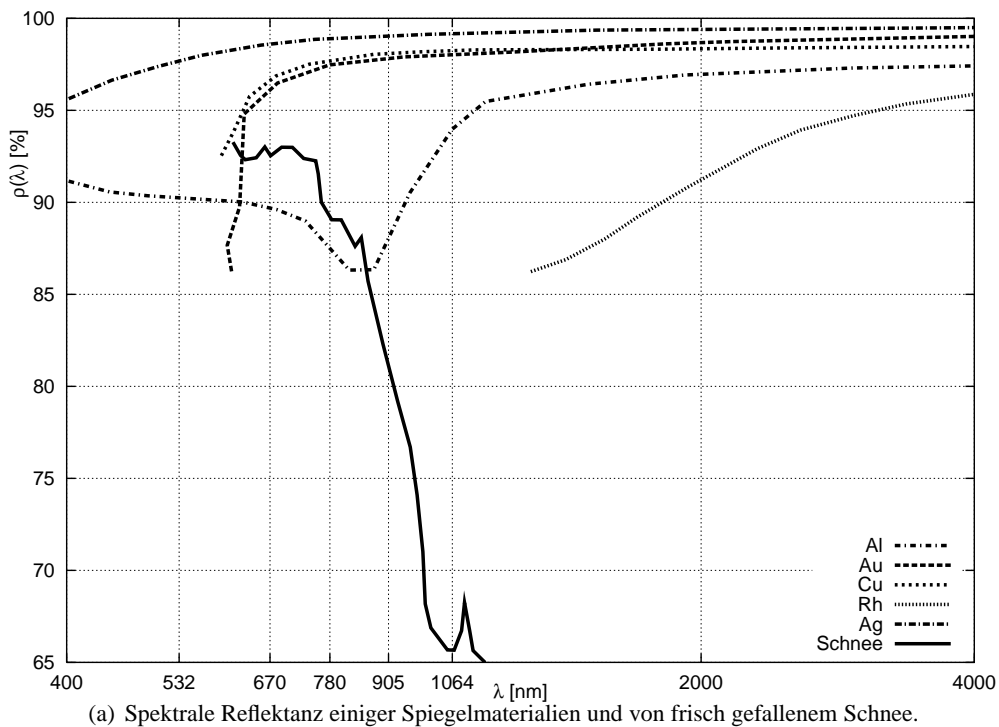


Abbildung 3.26: Beispiele für spektrale Reflektanz. ([Hec01, S. 207])

Lichtleistung $P_s(\lambda)$.

$$\rho(\lambda) = \frac{P_r(\lambda)}{P_s(\lambda)}$$

Die Reflektanz oder Remission beschreibt streng genommen das Reflexionsvermögen eines Materials unabhängig von den Umgebungsbedingungen. Ist die Lichtleistung $P_r(\lambda)$ durch einen schrägen Auftreffwinkel vermindert, aufgrund der Zielentfernung gedämpft oder durch andere äußere von den Laborbedingungen abweichenden Einflüsse verändert, so ist besser der Begriff Reflexionsgrad oder Reflektivität anstelle der Reflektanz zu benutzen.

Werte für die Reflektanz natürlicher Materialien und Oberflächen können nur empirisch bestimmt werden. In den Abbildungen 3.26 sind beispielhaft einige Spektren angegeben und in der Tabelle 3.6.3 einige Reflektanzen $\rho\%$ relativ zu einem schwarzen Referenzkörper. Für Metalle gilt, dass die Reflektanz mit zunehmender Wellenlänge gegen 100% strebt. Für die Praxis ist zu bedenken, dass die menschliche Wahrnehmung nur eingeschränkt die spektrale Reflektanz einer Oberfläche für den eingesetzten Laser-Entfernungsmesser korrekt beurteilen kann. So sind nicht zwangsläufig alle hell aussehenden, z. B. grünen, Flächen gute Reflektoren für z. B. rotes Laserlicht. Andererseits können dunkel erscheinende, z. B. braune, Materialien gute Reflektoren sein.

Tabelle 3.3: Reflektanz einiger diffus reflektierender Materialien.

hohe Reflektanz		niedrige Reflektanz	
Material	$\rho\%$	Material	$\rho\%$
Titanoxid	99%	Platinschwarz	0.1%
Bariumsulfat	97%	schwarzer Samt	0.4%
Magnesiumoxid	96%	Ruß	0.8%
Gips	80%	schwarzes Tuch	1.5%
weißes Schreibpapier	ca. 70%	schwarzes Papier	5.0%

Die Amplitude des an der Photodiode des Entfernungsmessers empfangenen Lichtes entspricht in Folge einer konstanten Sendesignalamplitude dem Reflektivitätswert des Objektes [MF00]. Die Reflektanz bestimmt damit direkt das für die Auswertung entscheidende Signal-Rausch-Verhältnis und kann so bei zu geringer Reflektanz das Fehlschlagen einer Messung verursachen. Der Einfluss der Reflektanz auf die Messgenauigkeit ist gering, wie z. B. in [MF00] für den Laserscanner LARA 25200 aufgezeigt. Bei der Signalverarbeitung in einem Entfernungsmesser wird das empfangene Signal verstärkt, um es vom Rauschen trennen zu können. Die Signalverstärkung muss um so höher sein umso geringer die Signalstärke (Amplitude der rückgestrahlten Modulationswelle) ist. Da die Signalstärke überwiegend von der Entfernung, dem Einfallswinkel und der Reflektanz des Zielobjektes abhängt, ist der Verstärkungsfaktor, vermindert um die Dämpfung aufgrund der Zielentfernung, proportional zur Zielreflektanz. Bei vielen Laserscannern wird diese Information als vierte Messgröße an den Nutzer weitergegeben. Fälschlicherweise wird diese oft als Reflektanz bezeichnet, obwohl in ihr noch Effekte des Einfallswinkels und der atmosphärischen Dämpfung enthalten sind. Für die vierte Messgröße wird ebenso unkorrekt auch der Begriff Remission verwandt. Ein treffendere Bezeichnung für diese vierte Messinformation wäre „Intensität“, wie *Wehr* es tut ([Weh97], [Weh00]), oder kürzer Signalstärke. Im folgenden wird von Reflektivität gesprochen, was ähnlich klingen soll wie Reflektanz und Intensität zusammengenommen, obwohl die Wortbedeutung identisch ist mit der der Reflektanz.

Der Einfluss der Farbe bzw. der Reflektanz auf die Messgenauigkeit ist praktisch unterhalb der Messgenauigkeit, das zeigt der Vergleich zwischen Objektgeometrie und Reflektanzmessung einer Laserscannervermessung. Das Abscannen eines Wandgemäldes liefert eine unverfälschte Wandgeometrie, obwohl die Reflektanz gemäß der Farben der Wandmalerei stark variiert.

Der Einfluss des Materials selbst auf die Streckenmessung kann wiederum auf den Einfluss der Objektrauhigkeit zurückgeführt werden. Messungen auf Materialien mit rauher Oberfläche liefern Streckenmessungen, die zuweilen als zu lang interpretiert werden. Nur stellt sich zugleich die Frage, inwieweit ist z. B. die Grenzoberfläche eines Wollteppichs definiert. Welches ist die wahre Entfernung zu einem diskreten Punkt auf dem Wollteppich? Die Antwort hängt wohl stark von der vorliegenden Aufgabenstellung ab. Ein Einfluss kann somit nicht objektiv bestimmt und angegeben werden kann.

In der Abbildung 3.27 sind die Messergebnisse eines Experimentes zusammengetragen, mit dem der Einfluss des Materials auf die Streckenmessung mit einem DISTO bei unterschiedlichen Zielentfernungen bestimmt wurde. Es zeigt sich, dass Materialien mit einer großen Rauigkeit zu deutlichen Messabweichungen führen. Beim Material Schaumstoff und Teppich dringt der Messstrahl in die Oberflächenstruktur ein und führt so zu einer längeren Messstrecke. Die anderen untersuchten Materialien haben eine Rauigkeit unterhalb der Messgenauigkeit von 3 mm, sodass keine signifikanten Messabweichungen festzustellen sind.

Ähnliche Untersuchungen werden in [Kog01] für zwei reflektorlose Distanzmesser für die Materialien Feinputz, Holz, Blech, Rauhputz und Styropor dargestellt. Auch dort zeigen sich die größten Auffälligkeiten beim rauhen Material, der Styroporoberfläche.

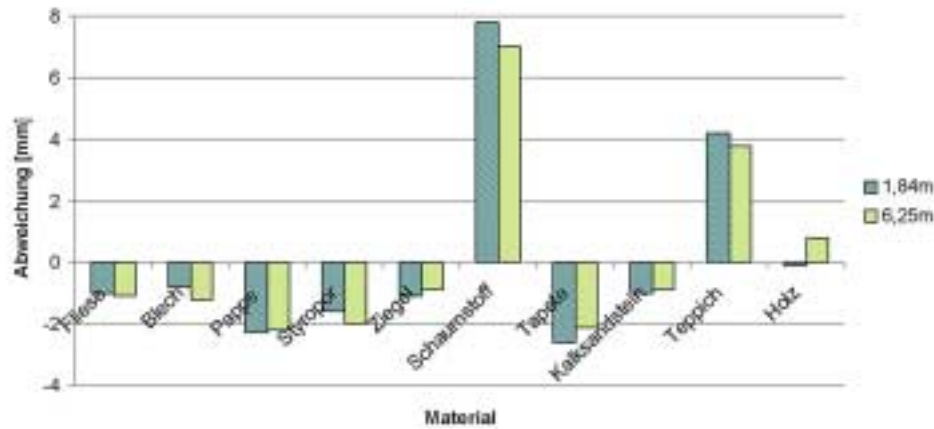


Abbildung 3.27: Einfluss des Materials auf die reflektorlose Streckenmessung.

3.6.4 Atmosphärische Einflüsse

Bislang ist davon ausgegangen worden, dass die lasergestützte Streckenmessung im dämpfungsfreien Vakuum stattfindet und so die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserlichts mit der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit c_0 übereinstimmt. Die reale Ausbreitungsgeschwindigkeit c weicht von dieser in Abhängigkeit von den aktuellen meteorologischen Parametern Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und der chemischen Zusammensetzung der Luft ab. Das Verhältnis

$$N = \frac{c_0}{c}$$

wird Refraktionskoeffizient genannt und variiert mit der benutzten Wellenlänge λ . Die Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c einer elektromagnetischen Welle heißt Dispersion. Da sich jedes Laserlicht trotz seiner sehr guten Monochromasie innerhalb eines schmalen Frequenzbandes aus Licht verschiedener Frequenzen zusammensetzt und die Trägerwelle moduliert ist, ist für die Signalausbreitung die so genannte Gruppengeschwindigkeit für ein breitbandiges Signal zu betrachten [JS99, S. 71]. Die Gruppengeschwindigkeit

$$c_g = c - \frac{dc}{d\lambda} \lambda$$

ist immer kleiner als die Phasengeschwindigkeit einer einzelnen Frequenz. Für die Gruppengeschwindigkeit ergibt sich der Gruppen-Refraktionskoeffizient zu:

$$N_g = \frac{c_0}{c_g}$$

Werte für N_g können nur über empirische Untersuchungen gefunden werden. Für die elektrooptische Distanzmessung wird die von Barrel und Sears (1939) abgeleitete Formel verwendet ([Rüe96, S. 52] und [JS99, S. 72]).

$$N_g = \left(287.604 + 3 \frac{1.6288}{\lambda^2} + 5 \frac{0.0136}{\lambda^4} \right) \times 10^{-6} \quad (3.8)$$

Die Formel ist gültig für sichtbares Licht ($560 \text{ nm} < \lambda < 900 \text{ nm}$) in trockener Luft bei einer Lufttemperatur von 0°C , einem Luftdruck von 1013.25 hPa und bei einem Kohlendioxid-Gehalt (CO_2) von 0.03% . In Gleichung 3.8 ist für λ die effektive Wellenlänge im Vakuum einzusetzen. Mit ihr kann N_g für die standardisierte Normalatmosphäre berechnet werden. Um den aktuellen Zustand der Atmosphäre zu berücksichtigen ist eine Reduktion auf die Normalatmosphäre vorzunehmen. Für Lichtwellen findet die Formel von Barrel und Sears (1939) in der von Kohlrausch (1955) vereinfachten Form Anwendung ([Rüe96, S. 55] und [JS99, S. 73]).

$$N_L = 1 + N_g \frac{273.15p}{(273.15 + t)1013.25} - \frac{11.27 \times 10^{-6}}{273.15 + t}$$

mit:

- N_L : Gruppen-Refraktionskoeffizient für eine Atmosphäre in einem Zustand, der durch t, p und e beschrieben wird.
 t : (trockene) Lufttemperatur in °C
 p : Luftdruck in hPa
 e : Partialem Wasserdampfdruck in hPa (Luftfeuchte)

Mittels des Gruppen-Refraktionskoeffizientes für Licht N_L müssen die rohen Streckenmesswerte r' um den Effekt der Atmosphärendichte korrigiert werden. Die Streckenkorrektur K_N wird 1. Geschwindigkeitskorrektur genannt.

$$K_N = r' \frac{N_{ref} - N_L}{N_L}$$

Der Referenz-Refraktionskoeffizient N_{ref} des Gerätes wird vom Hersteller vorgegeben oder kann wie folgt anhand der Modulationsfrequenz ν_m und der Maßstabslänge λ_m berechnet werden.

$$N_{ref} = \frac{c_0}{\nu_m \lambda_m}$$

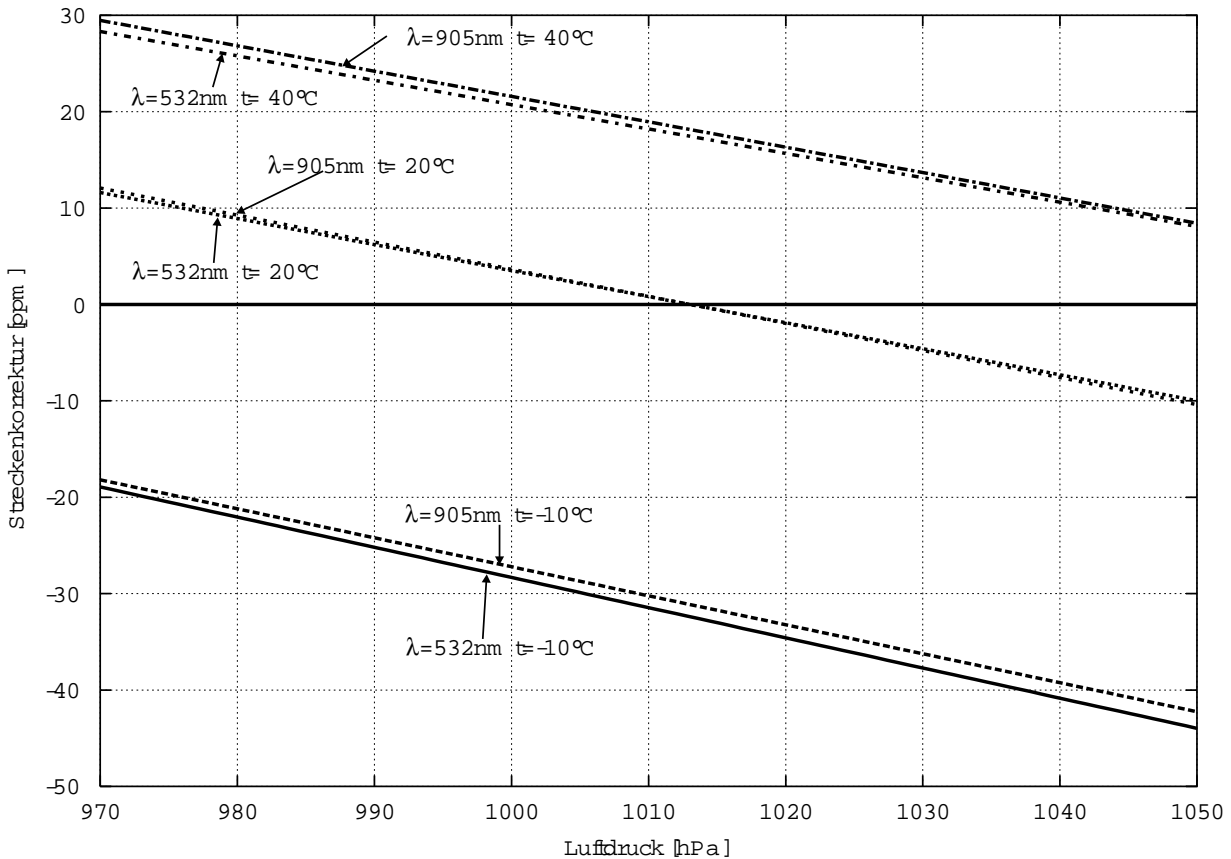


Abbildung 3.28: Einfluss der Temperatur t und des Luftdrucks p auf die Streckenmessung mit einem grünen ($\lambda= 532\text{nm}$) und roten ($\lambda= 905\text{nm}$) Laser.

Unter welchen Umständen die 1. Geschwindigkeit an die Messwerte anzubringen ist lässt sich anhand der Abbildung 3.28 ablesen. Dargestellt ist die Korrektur K_N in der Einheit ppm für zwei verschiedene Lasersysteme (Wellenlängen). Der Luftdruck variiert zwischen den Extremen eines sehr starken Tiefdruckgebietes und eines extremen Hochdruckgebietes. Es sind jeweils die Temperaturlinien für -10°C , 20°C und 40°C dargestellt. Eine Temperatur von 40°C herrscht in unseren Breiten in der freien Natur nur selten, sind aber im Bereich der Bauaufnahme nicht ungewöhnlich, wenn man bedenkt welche Temperaturen z. B. in einem Dachstuhl im

Sommer entstehen können. Auch für Vermessungen in Industriehallen oder Werkstätten können Maschinen oder Anlagen zu einer extremen Wärmeentwicklung beitragen. Die Korrekturen schwanken in einer Bandbreite von etwa 50 ppm, was für eine 100 m lange Strecke eine Streckenabweichung von 5mm ausmacht. Unter normalen Bedingungen dürfte mit Korrekturen von -10 ppm bis 10 ppm zu rechnen sein. Für die Vermessung mit einem Laserscanner mit einem typischen Arbeitsradius von 30 m ist so mit Messabweichungen von bis zu 0,3 mm zu rechnen. Solange unter Normalbedingungen gearbeitet wird, ist es also nicht erforderlich, die 1. Geschwindigkeitskorrektur bei Laserscannermessungen, die eine Streckenmessgenauigkeit von mehreren Millimetern haben, anzubringen. Das Beispiel mit dem Dachstuhl zeigt aber, dass eine Korrektur nicht generell unentbehrlich ist.

3.7 Zusammenfassung

Laserlicht ist monochromatisches Licht hoher Leistungsdichte und lässt sich gut fokussieren. Bestimmte Kombinationen aus Frequenz und Ausgangsleistung können eine Gesundheitsgefährdung für Menschen darstellen. Beim Einsatz des Lasers für einen Entfernungsmesser wird sein Licht als Trägerwelle genutzt und entsprechend moduliert. Für die Laufzeitmessung des aufmodulierten Signals kommen insbesondere Impulslauf- oder Phasenlaufzeitverfahren in Frage. Mit dem Phasenlaufzeitverfahren können höhere Genauigkeiten erreicht werden; haben aber den Nachteil der Mehrdeutigkeit. Die Genauigkeit einer reflektorlosen Entfernungsmessung wird im besonderen vom Reflexionsverhalten des Ziels (Radarquerschnitt) im Zusammenspiel mit der Strahldivergenz bestimmt. Die Reichweite wird durch die atmosphärischen Dämpfung begrenzt. Ungünstig auf die Reichweite kann sich aber auch der Radarquerschnitt auswirken.

Zur Qualitätsbeurteilung von reflektorlos gemessenen Strecken ist es sinnvoll, folgende drei Zustände zu betrachten.

I. Die reflektorlose Entfernungsmessung kann fehlschlagen, wenn

- das Licht in der Atmosphäre zu stark gedämpft wird, weil Nebel, Staub oder Abgase die Sicht behindern oder weil die Zielentfernung zu groß ist,
- das Ziel zu wenig Licht reflektiert (absorbierende Farbe oder spiegelnde Reflexion),
- das Ziel zu viel Licht reflektiert, sodass die Messelektronik außerhalb ihres Abstimmereiches arbeiten müsste. Diese Blendung tritt z. B. auf bei Messung auf einen Retroreflektor.

II. Die reflektorlose Entfernungsmessung wird verfälscht durch

- Mehrfachreflexionen verursacht durch spiegelnde Flächen,
- extreme inhomogene atmosphärische Zustände (Seitenrefraktion in einem Tunnel),
- spontan in die Messstrecke hineinragende Störobjekte (z. B. vorbeigehende Passanten, vorbeifahrende Baufahrzeuge oder Regentropfen).

III. Die reflektorlose Entfernungsmessung wird systematisch beeinflusst durch

- Temperatur,
- Luftdruck,
- Umgebungslicht,
- Einfallswinkel und Materialparameter insbesondere der Oberflächenrauigkeit des Zieles.

Bei einer händischen Ausrichtung des Entfernungsmessers und manueller Auslösung der Messung können die Randbedingungen meist so eingerichtet werden, dass keine Messungen unbemerkt nach den Zuständen I+II fehlschlagen bzw. verfälscht werden. Anders stellt sich die Situation dar, wenn in einem automatischen Prozess gemessen wird. Hier ist davon auszugehen, dass ein Messdatensatz fehlende (Zustand I) und grob falsche (Zustand II) Messungen enthält. Diese sind bei der Auswertung soweit möglich aufzudecken und dann zu ergänzen bzw. zu eliminieren. Die Einflussfaktoren aus Zustand III haben unmittelbar Auswirkung auf die erzielbare Messgenauigkeit. Ihnen ist mit den anerkannten Verfahren und Methoden, Korrektur und Reduktion der Messwerte, aus der elektrooptischen Entfernungsmessung zu begegnen. Eine große Unbekannte bleibt aber der Einfluss der Zielreflektanz unterschiedlicher Materialien auf die Messgenauigkeit.

Kapitel 4

Laserscanner

4.1 Aufbau und Funktionsweise

Bildgebende, scannende, Laserradar-Systeme bestehen aus einem Laser-Entfernungsmesser und einem mechanischen Abtastmechanismus (Scanner), der in möglichst kurzer Zeit den Laserstrahl in unterschiedliche Richtungen rasterförmig ablenkt. Der Laser-Entfernungsmesser benutzt dabei eines der in Kapitel 3.5 beschriebenen Verfahren zur reflektorlosen Messung. Für diese Art von Messsystemen sind verschiedene Bezeichnungen in Benutzung, je nachdem welches technische Merkmal besonders hervorgehoben werden soll.

- Laserradar
Entdeckung und Lokalisierung von Objekten mittels Laserlicht.
- LIDAR
LIDAR steht für **L**ight **D**etecting and **R**anging (Lichtfeststellung und Entfernungsbestimmung). Geprägt wurde der Begriff durch die Atmosphärenforschung, die mittels Laser die Aerosolkonzentration der Luft bestimmt.
- Laserscanner
Automatische flächenhafte reflektorlose Vermessung mittels Laserlicht.

Im Folgenden wird die Bezeichnung Laserscanner bevorzugt, da die reflektorlose (Laser) und abtastende (Scannen) Messweise im Vordergrund der nächsten Kapitel steht. Der Messvorgang eines Laserscanners soll hier Laserscanning, kurz Scannen, genannt werden. Das Ergebnis des Laserscannens wird mit Scan, in späteren Kapiteln mit Punktwolke, bezeichnet.

Spezielle bildgebende Laserradar-Systeme werden seit den 1970er Jahren für Abstandsmessungen zum Erkennen von Hindernissen für Land- und Luftfahrzeuge und insbesondere für das rechtzeitige Erkennen von Hochspannungsleitungen für Hubschrauber (Reichweite 1,2 km, Entfernungsauflösung 10 cm, 2000×2000 Bildpunkte) eingesetzt [Fec99]. Auch innerhalb eines Überwachungssystems sind sie anzutreffen und werden genutzt, um das unzulässige Betreten oder Benutzen eines Sicherheitsbereiches zu detektieren.

4.2 Arten der Abtastung

Der Übergang von der einzelnen Entfernungsmessung zur flächenhaften und bildgebenden Entfernungsmessung erfordert bei der Benutzung eines Laser-Entfernungsmessers eine effektive Abtast- oder Ablenkeinheit, auch Scanner genannt. Der Scanner muss insbesondere hinsichtlich der Arbeitsgeschwindigkeit optimiert werden. Eine Analogie mit einem motorisiertem Tachymeter soll dieses verdeutlichen. Angenommen, dass pro Entfernungsmessung mit einem Tachymeter eine Messzeit von 1 s erforderlich ist und das Ausrichten des Fernrohres in eine vorgegebene Richtungen (Positionierung über die Servomotoren) dauere ebenfalls eine Sekunde, so wäre für einen 1440×720 „Bildpunkte“ umfassender Scan eine Gesamtmesszeit von 2073600 s bzw. 24 Tagen erforderlich. Eine Messzeit, die weder bei einer Anwendung in der Fahrzeugnavigation Sinn macht noch im Vermessungswesen tolerierbar ist. Könnte die Scangeschwindigkeit um das 1000fache gesteigert werden, so ergäbe sich eine Gesamtmesszeit von 34,56 Minuten. Diese wäre zumindestens für Vermessungsaufgaben an ruhenden Objekte praktikabel. Die Geschwindigkeit der Entfernungsmessung kann bei Duldung von Genauigkeitsverlusten deutlich reduziert werden. Die Geschwindigkeit der Bewegungsabläufe einer Ablenkeinheit ist aber begrenzt, da hier Teile mechanisch zu bewegen und zu beschleunigen sind. Eine Abtasteinheit

mit hoher Dynamik ist also ein entscheidender Bestandteil eines Laserscanners. Eine zweite wichtige Aufgabe der Abtastung ist die Realisierung diskreter Abtastfolgen mit möglichst geringen Abtastinkrementen und großen Überdeckungen. Durch die Größe eines Abtastinkrements wird indirekt über verschiedene Abtastsysteme die räumliche Auflösung z. B. bezüglich des Azimutes und der Elevation festgelegt. Die Auflösung der lasergestützten Entfernungsmessung und die zweidimensionale Auflösung des Abtastsystem bilden zusammen die dreidimensionale Gesamtauflösung eines Laserscanners. Im Allgemeinen ist die räumliche Auflösung eines Laserscanners bezüglich eines kartesischen Koordinatensystems nicht homogen, da die Abtasteinheiten überwiegend Rotationsbewegungen ausführen.

4.2.1 Abtastung durch Servomotor

Die einfachste Art der Ablenkung bzw. Ausrichtung des Lasergerätes kann dadurch erfolgen, dass es auf einem dreh- und/oder schwenkbaren Unterbau montiert wird ([BS94]). Der Unterbau wird über Schrittmotoren in die einzelnen Abtastpositionen gedreht. Der Unterbau kann ähnlich einem Theodolit- bzw. Tachymeter konstruiert werden (Abbildung 4.1). Anstelle des Zielfernrohres wird das Lasergerät schwenkbar auf der Kippachse eingesetzt. Über einen Motorantrieb kann das Lasergerät innerhalb eines Vertikalprofils in bestimmte Zenitwinkelpositionen V_i gedreht werden. Die zweite Abtastdimension übernimmt die motorisierte Drehung um die Lotachse. Das jeweilige Vertikalprofil wird über die Horizontalkreisposition H_{z_i} eingestellt.

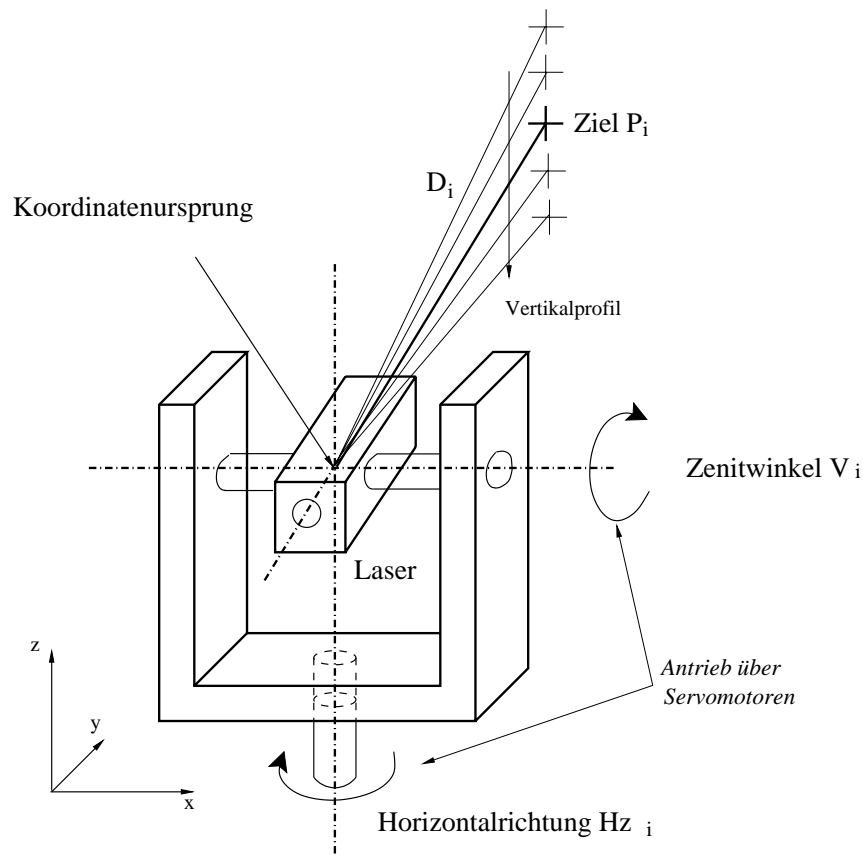


Abbildung 4.1: Das Abtastsystem „Tachymeter“.

Die dreidimensionalen kartesischen Koordinaten P_i eines Objektpunktes berechnen sich bei diesem Abtastsystem wie folgt aus der Horizontalrichtung H_{z_i} , dem Zenitwinkel V_i und der in dieser Raumrichtung gemessenen Zielentfernung D_i bezüglich des Koordinatensystems, dass durch die Drehachsen des Abtastsystems definiert ist:

$$P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = D_i \begin{bmatrix} \sin H_{z_i} \sin V_i \\ \cos H_{z_i} \sin V_i \\ \cos V_i \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Vorteil des Tachymeter-Prinzips ist, dass bewährte Bauteile aus dem geodätischen Instrumentenbau genutzt werden können. Die Teilkreise und die erforderlichen Servomotoren erlauben eine hohe Genauigkeit in der Ausrichtung ($H z_i$ und V_i) des Laser-Entfernungsmessers. Nachteilig ist die extrem langsame Arbeitsweise bedingt durch die trägen Servomotoren. Nichtsdestotrotz bieten moderne reflektorlos messende Servo-Tachymeter eine Scanfunktion an, mit der kleine Objektbereiche wirtschaftlich hochauflösend und genau erfasst werden können.

Untersuchungen über die Positioniergenauigkeit der mit Schrittmotoren bestückten kommerziellen Laserscannersysteme liegen bislang nicht vor. Typisch für einen Schrittmotor ist eine Positioniergenauigkeit von 2 bis 10% eines Vollschrilles [Ric01, S. 14]. Die natürliche Auflösung von handelsüblichen Hybrid-Schrittmotoren liegt bei 100 bis 2000 (Voll-)Schritten pro Umdrehung ohne das elektronische Zusatzmaßnahmen wie z. B. der Mikroschrittbetrieb eingesetzt werden. Von großer Bedeutung ist, dass sich Positionierungsunsicherheiten nicht von Schritt zu Schritt aufsummieren. Die relative Positionsgenauigkeit von Schritt zu Schritt ist gleichbleibend. Ursache für die Abweichung der Winkelstellung zu einer Sollposition finden sich in den Fertigungstoleranzen der Rotor- und Statorteilen, die zu asymmetrischen Magnetkreisen oder Luftspalten führen können sowie in der nicht zentrischen Montage der Rotorachse. Eine elektrische Ursache für einen Positionierungsfehler ist durch Stromtoleranzen der Phasenströme gegeben. Eine Variation der Phasenströme ist proportional mit dem Drehmoment, das den Rotor in eine stabile Rastposition bewegt und dort verharren lässt. Auch die äußeren am Motor angreifenden Kräfte bewirken eine Fehlstellung; der so genannte Lastwinkel. Die Genauigkeit der Positionierung eines Schrittmotors kann durch Kalibrierung insbesondere des systematischen Lastwinkels bestimmt und kontrolliert werden. Höchste Genauigkeiten können nur erreicht werden, wenn die Istposition des Rotors durch einen Inkrementalgeber auf der Motorachse permanent überwacht wird bzw. wenn die Winkelstellung über diesen gemessen wird, wie es beim Servotachymeter der Fall ist.

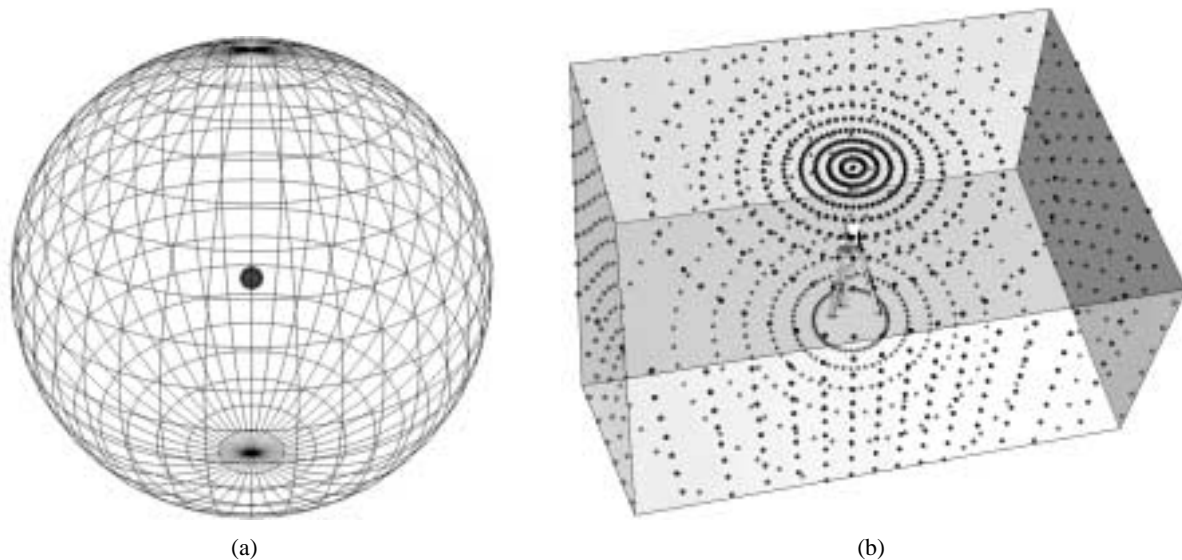


Abbildung 4.2: Abtastmuster beim Tachymeter-Prinzip.

Im Gesichtsfeld des Laserscanners kann die Umgebung mit dem Tachymeter-Prinzip in äquidistanten Schritten (Winkelauflösung) $\Delta H z_i$ und ΔV_i abgetastet werden. Wenn es sich tatsächlich um Tachymeterkomponenten handelt, so können sehr feine Winkelschritte eingestellt werden. Das sich ergebende Abtastmuster bezogen auf eine Einheitskugel zeigt die Abbildung 4.2(a). Deutlich wird, dass diese Abtastung zu einer inhomogenen räumlichen Auflösung führt. Die Auflösung nimmt in Richtung der Pole dramatisch zu. Bezüglich der Polachse ist das Abtastmuster radialsymmetrisch. Wird ein Innenraum, der typischerweise von quaderförmiger Gestalt ist und dessen Länge und Breite meist größer ist als die Höhe, mit dem Abtastmuster eines Tachymeters von der Mitte aus aufgemessen, so werden die Decke und der Fußboden überproportional höher aufgelöst als die viel bedeutenderen Wände und deren Schnittkanten (Abbildung 4.2(b)).

Moderne reflektorlose messenden Servotachymeter können als Laserscanner eingesetzt werden. Da bei einem Tachymeter jede beliebige Raumrichtung angefahren werden kann, kann die Abtastung völlig frei gestaltet werden. In [SJ00] wird eine Ebenheitsprüfung einer Fassade präsentiert, bei der die Fensterbereiche der Fassade ausgespart wurden. Dieses erspart einen erheblichen Zeitanteil an der Gesamtmesszeit von mehreren Stunden.

4.2.2 Abtastung durch Planspiegel

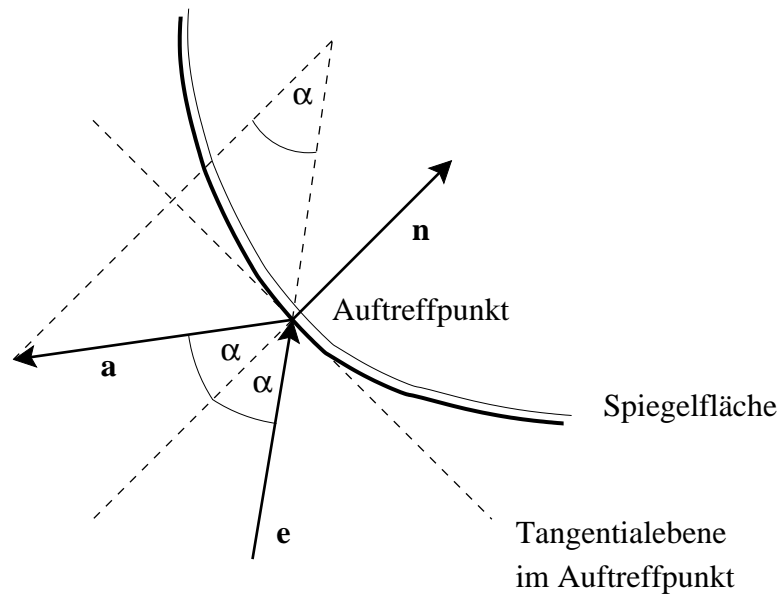


Abbildung 4.3: Reflexionsgesetz.

Ein Abtastsystem lässt sich auch durch Spiegel oder Prismen realisieren. Eine einfache und effektive Methode ist die Ablenkung durch einen Planspiegel der senkrecht in den Strahlengang des Lasers platziert wird und über einen Schrittmotor gedreht wird. Zur Beschreibung der Ablenkung eines Lichtstrahls an einem Planspiegel reicht es aus das einfache Reflexionsgesetz der Wellenoptik anzunehmen. Danach ist der Einfallswinkel bezüglich der Spiegelnormalen gleich dem Ausfallswinkel (Abbildung 4.3). Einfallender und reflektierter Lichtstrahl liegen immer in einer Ebene. Ist eine Spiegelfläche als Ebene mit dem Normalenvektor

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$$

und die Richtung des einfallenden Lichtstrahls durch den Richtungsvektor \mathbf{e} gegeben, so gilt für den Richtungsvektor \mathbf{a} des reflektierenden Lichtstrahls

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \mathbf{e} - 2(\mathbf{e} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} \\ \mathbf{a} &= \begin{bmatrix} 1 - 2n_x^2 & -2n_x n_y & -2n_x n_z \\ -2n_x n_y & 1 - 2n_y^2 & -2n_y n_z \\ -2n_x n_z & -2n_y n_z & 1 - 2n_z^2 \end{bmatrix} \mathbf{e}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Da die Vektoren \mathbf{a} , \mathbf{n} und \mathbf{e} in einer Ebene liegen, kann mit einem Spiegel ein Lichtstrahl nur in dieser Ebene ablenkt werden. Ein rotierender Planspiegel lenkt einen Lichtstrahl so ab, dass in alle Richtungen (ausgehend vom Auftreffpunkt) innerhalb der durch Einfallsrichtung und Rotationsachse gebildeten Ebene abgetastet werden kann. Mit einem einzigen rotierenden Planspiegel kann nur ein Profil- bzw. Linienscanner realisiert werden. Eine Auslenkung des Planspiegels um den Wert $\Delta\alpha$ bewirkt eine Ablenkung um den Winkel $2\Delta\alpha$. Also ist bereits mit einer 180° -Drehung eines einseitig verspiegelten Planspiegels der gesamte Richtungsbe- reich von 360° abgetastet. Der Planspiegel kann also in einer kontinuierlichen Drehbewegung gehalten werden und muss nicht nach einer 180° -Drehung auf die Startposition zurückgedreht werden. Die dabei notwendigen Beschleunigungsvorgänge verlangsamen den Abtastvorgang deutlich, wobei die Masse eines Planspiegels aufgrund der hohen Laserbündelung klein ist im Vergleich zu der Masse eines Tachymeterunterbaus oder der eines Laserentfernungsmessers beim Abtastsystem „Tachymeter“. Die Ablenkung mittels optischer Systeme führt zu hohen Abtastgeschwindigkeiten. Eine kontinuierliche Drehbewegung, ohne Zwischenstopps an diskreten Messstellen, erlaubt die höchsten Abtastgeschwindigkeiten. Die Abtastung erfolgt dann durch das Abstimmen der Frequenzen der Planspiegeldrehfrequenz mit der Abgriffrequenz für die Entfernungsmessung. Der zu einer Entfernungsmessung gehörende Ablenkwinkel wird dann eine Funktion der Zeit.

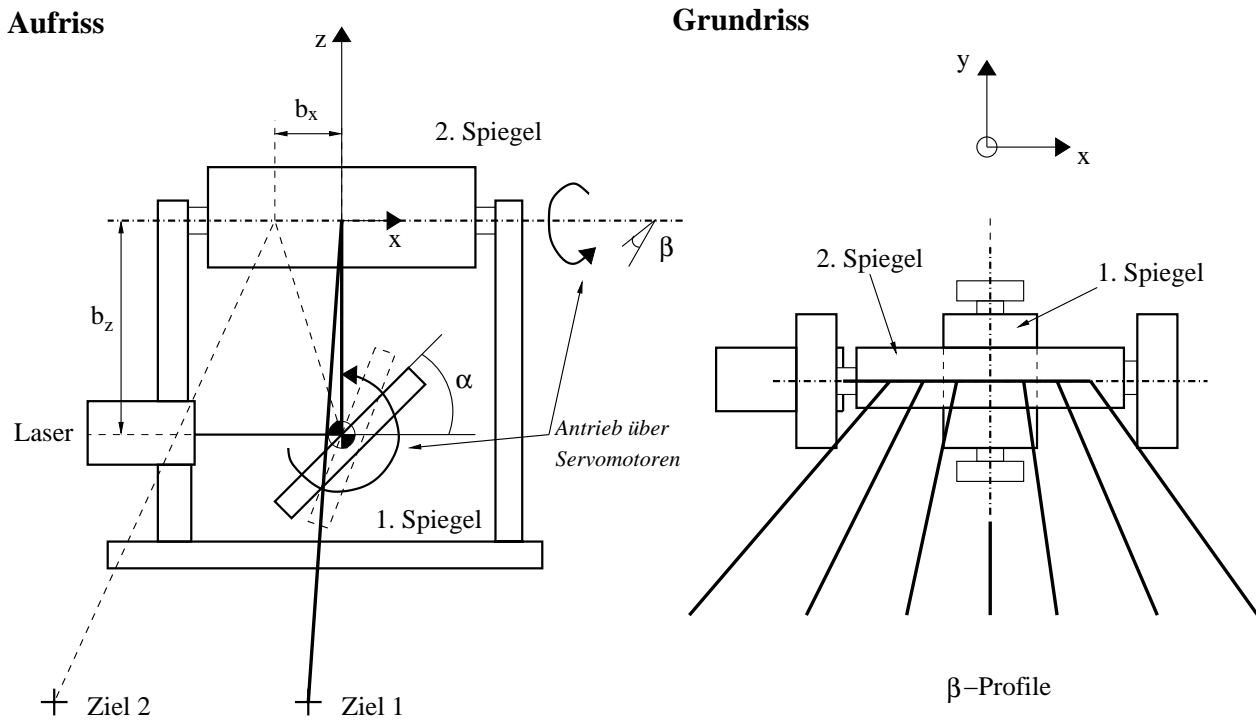


Abbildung 4.4: Abtastsystem über zwei Planspiegel.

Die Latenzzeit, die entsteht während die Rückseite des Planspiegels zum einfallenden Laserlicht zeigt, kann genutzt werden, um den Beginn und das Ende eines Profils zu erkennen oder die Drehbewegung einer zweiten Achse durchzuführen. Wird der Planspiegel auf beiden Seiten verspiegelt entfällt diese Latenzzeit. Die gemessenen Entfernungen sind aber um den Effekt zu korrigieren, der sich aus der Dicke des Spiegels ergibt. Durch die endliche Dicke des Spiegels kann die Rotationsachse nicht mehr durch die zwei Lichtauftrittspunkte der beiden Spiegelseiten verlaufen.

Für eine dreidimensionale Abtastung sind zwei Planspiegel einzusetzen. Sinnvoll ist es die Rotationsachsen beider Spiegel im rechten Winkel anzuordnen, um einen möglichst großen Abtastbereich zu erhalten. In Abbildung 4.4 ist ein auf zwei übereinander liegende Planspiegel beruhendes Abtastsystem skizziert. Der erste Spiegel kann um den Winkel α senkrecht zum Laserlicht bezüglich der y -Achse gedreht werden. Das reflektierte Licht kann so die x - z -Ebene nicht verlassen und wird auf dem zweiten Spiegel abgelenkt. Je nach Ablenkwinkel α wandert der Auftreffpunkt b_x auf diesem zweiten Spiegel entlang der x -Achse. Der zweite Spiegel rotiert um die x -Achse mit dem Winkel β . Durch den wandernden Auftreffpunkt fällt das vom ersten Spiegel reflektierte Licht nicht immer senkrecht zur Rotationsachse auf den zweiten Spiegel ein. Der Laserstrahl wird so aus der x - z -Ebene heraus abgelenkt. Eine Abtastung in beliebige Raumrichtungen ist möglich. Für gegebene Ablenkwinkel α und β wird der in Richtung x -Achse verlaufende Laserstrahl

$$\mathbf{e} = [1, 0, 0]$$

nach zweimaligem Anwenden des Reflexionsgesetzes (Gleichung 4.2) an den Spiegeln $\mathbf{n}_1 = (-\cos \alpha, 0, \sin \alpha)$ und $\mathbf{n}_2 = (0, -\cos \beta, \sin \beta)$ in die Richtung

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \cos(2\alpha) \\ \sin(2\alpha) \sin(2\beta) \\ \sin(2\alpha) \cos(2\beta) \end{bmatrix}$$

abgelenkt. Wie zu erwarten war, genügt für die Ablenkwinkel der Wertebereich $[0, \pi]$ für beide Spiegeldrehungen.

Nachteilig an diesem Abtastsystem ist der konstruktiv erforderliche Abstand (Exzentrizität) b der beiden Rotationsachsen. Der Effekt dieser Exzentrizität auf die Entfernungsmessung ist zu berücksichtigen. Für das System LEICA Cyrax 2500 beträgt der Abstand zwischen beiden Spiegeln etwa 10cm, was dazu führt, dass die Korrekturen bis zu 6,4mm betragen können ([Wun01, S. 20]). Das Koordinatensystem des Abtastsystems hat durch die Exzentrizität keinen mechanisch bestimmten Nullpunkt. Der zweite Spiegel muss je nach Größe der Exzentrizität besonders groß dimensioniert werden und muss über seine gesamte Spiegelfläche planar sein. Mit der Größe des zweiten Spiegels ist auch eine Erhöhung seiner Masse verbunden, was wiederum Auswirkungen auf die Dynamikeigenschaften hat. Es ist daher anzustreben die Primärablenkung mit dem ersten flinken Spiegel vorzunehmen und die sekundäre Ablenkung über den zweiten Spiegel.

4.2.3 Abtastung mit Spiegelpolygon

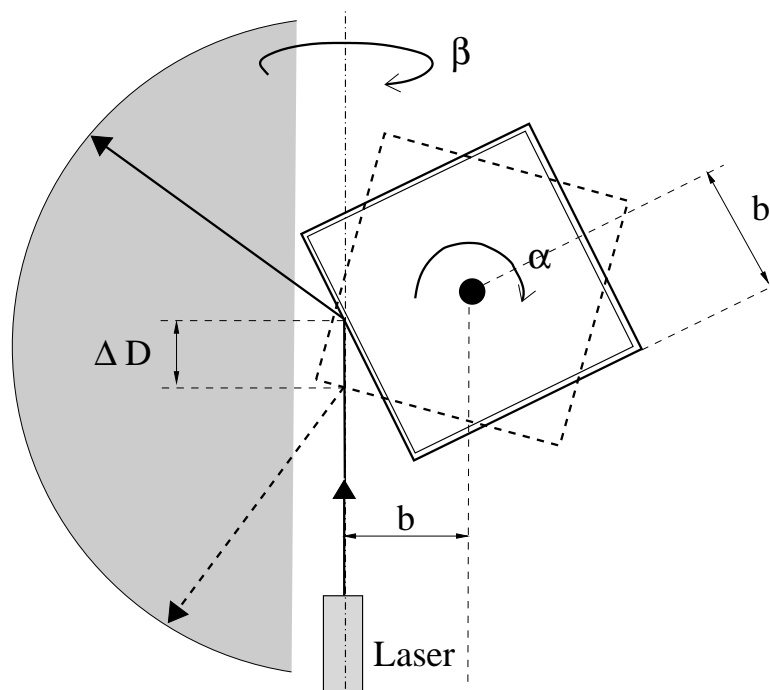


Abbildung 4.5: Abtastung mit einem kontinuierlich rotierenden Spiegelpolygon.

Hohe Abtastgeschwindigkeiten werden mit Spiegelpolygonen erreicht. Die kontinuierliche Drehbewegung erfordert nur geringe Motorleistungen. Die Abtastung erfolgt durch die gleichförmige Drehbewegung. Der Rücksprung entlang der Zeile (β -Profil, Abbildung 4.5) wird beim Übergang zur nächsten Spiegelfacette ausgeführt. Die Spiegelflächen sind in der Kantennähe geschwärzt, um eine eindeutige Trennung der Abtastzeilen zu erreichen. Da die Drehachse nicht in der spiegelnden Facette liegen kann (Abstand b), tritt während der Abtastung eine Veränderung der inneren Länge des Lichtweges ein. Die Streckendifferenz ΔD ist abhängig vom Drehwinkel α und ist an die Rohmessung anzubringen. Durch ein Spiegelpolygon mit vier Facetten kann theoretisch ein Gesichtsfeld von 0 bis 180° abgetastet werden.

Meist wird die zweite Komponente für die Ausrichtung des Laserstrahls im Raum durch eine servogetriebene mechanische Rotation vorgenommen. Senkrecht zur Rotationsachse des Spiegelpolygons wird das α -Abtastsystem dann ähnlich dem „Fernrohrträger“ beim Tachymetersystem (Kapitel 4.2.1) gedreht.

4.2.4 Abtastung mittels Prismen

Ähnlich der Ablenkung des Laserstrahls durch einen Planspiegel kann die Ablenkung durch rotierende Prismen erfolgen. Das Laserlicht wird beim Durchlaufen eines Prismas gebrochen und so um einen konstanten Winkelbetrag abgelenkt. In [Weh98] sind einige typische Bauarten beschrieben.

4.2.5 Kombination aus verschiedenen Abtasteinheiten

Häufig werden 3D-Scanner aus einer Kombination verschiedener Abtasteinheiten konstruiert ([Cal01], [Rie02] und [HMFS02]). Für die primäre Rotation wird ein möglichst schnelles Abtastprinzip über Spiegel, Spiegel-polygon oder Prisma gewählt. Die langsame sekundäre Rotation wird durch ein Servomotor realisiert. Damit werden Exzentrizitäten, wie sie bei der Verwendung zweier optischer Ablenkeinheiten zwangsläufig auftauchen (Kapitel 4.2.2) vermieden. Eine servogesteuerte Rotation kann zudem über volle 360° ausgeführt werden. Dies kommt dem Bestreben zu Gute, möglichst große Gesichtsfelder realisieren zu wollen.

4.3 Arten des Gesichtsfeldes

Es haben sich zwei grundsätzliche Bauformen von Laserscannersystemen durchgesetzt, die sich durch ihr Gesichtsfeld unterscheiden (Abbildung 4.6). Bei dem so genannten **camera-view**-Gesichtsfeld erfolgt die Abtastung in einem begrenzten Bereich ähnlich, wie dies bei einer Photokamera anzutreffen ist. Ein Scanner dieser Bauform wird auch wie eine Photokamera auf das Messobjekt manuell ausgerichtet. Die äußere Orientierung eines camera-view-Laserscanners ist damit völlig unabhängig von der Lotrichtung. Geeignete Passpunktinformationen sind daher für die Einpassung in ein Bezugssystem erforderlich.

Ein **panorama-view**-Laserscanner hat ein Gesichtsfeld, das sich über die gesamte Umgebung in einem 360° -Umkreis erstreckt. In jeder Inkrementalposition wird ein Vertikal-Profil möglichst über den gesamten Bereich vom Nadir zum Zenit abgescannt. Die vertikale Rotationsachse eines panorama-view-Scanners lässt sich mittels entsprechender Horizontierungseinrichtungen ins Lot setzen. Ein panorama-view-Laserscanner lässt sich sehr komfortabel zur Vermessung von Innenräumen oder Höhlen einsetzen. Vielfach reicht dabei ein Scan aus, um das Objekt vollständig zu erfassen. Ein camera-view-Laserscanner benötigt hingegen mehrere Scans mit unterschiedlicher Ausrichtung (äußerer Orientierung). Vorteile hat ein camera-view-Laserscanner bei der Vermessung von Fassaden oder Skulpturen, da der Messbereich auf den wesentlichen Objektbereich begrenzt werden kann, was einen deutlichen Zeitgewinn zur Folge haben kann. Da für camera-view-Laserscanner keine 360° -Drehung erforderlich ist, können Ablenkeinheiten verwendet werden, die eine höhere Abtastung im gleichen Zeitraum erlauben.

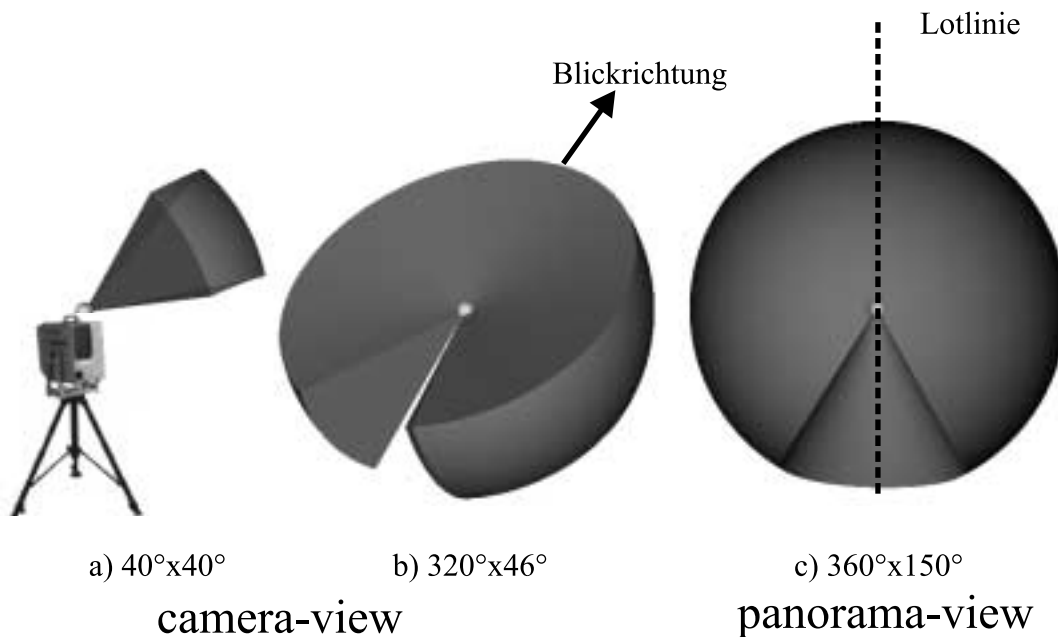


Abbildung 4.6: Arten von Gesichtsfeldern in maßstabsgetreuer Darstellung.

4.4 Marktübersicht

Der Markt bietet eine Vielzahl von Laserscannersystemen an. Die Vielfalt an Systemen und die Tatsache, dass sie teilweise für ganz spezielle Aufgaben entwickelt worden, erschwert einen objektiven Vergleich. Die folgenden Betrachtungen sollen sich auf Systeme beschränken, die sich für den Einsatz zur Erfassung von Bauwerksgeometrien im weitesten Sinne eignen. Entscheidende Kriterien für die Eignung als Messgerät zur Vermessung von Gebäuden (Fassaden und Innenräumen), Skulpturen ($> 1\text{m}$), Ingenieurbauwerken (Brücken, Tunnel, etc.) oder archäologischen Ausgrabungsfeldern ist die maximal mögliche Messentfernung (Reichweite), die Abtastung bzw. Auflösung, die Messgenauigkeit und die Messgeschwindigkeit. Da es sich bei den genannten Messobjekten um statische Objekte handelt, empfiehlt sich im Allgemeinen eine Abwägung zu Ungunsten einer hohen Messgeschwindigkeit und zu Gunsten einer besseren Genauigkeit.

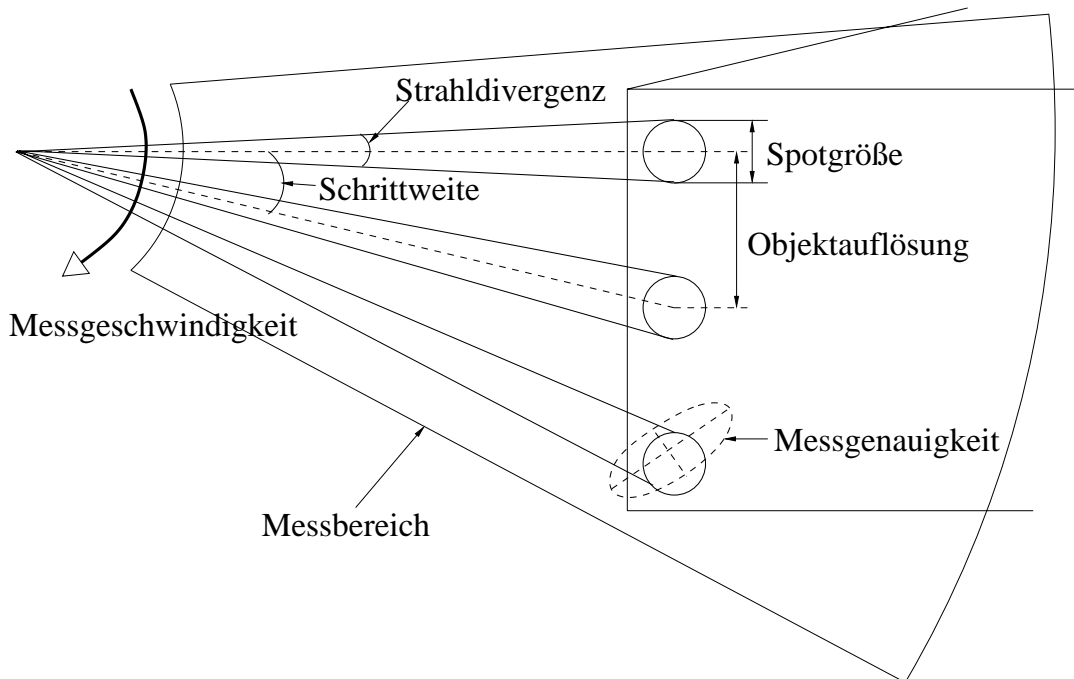


Abbildung 4.7: Systemkriterien eines Laserscanners.

Reichweite Die geräteabhängige Reichweite hängt von der Leistungsdichte des Laserlichtes (Laserleistung und Strahldivergenz) und der Güte der Empfangsoptik ab. Wird als Streckenmessverfahren das Phasendifferenzverfahren angewandt, ist die Reichweite zusätzlich durch den Eindeutigkeitsbereich der Modulationswelle begrenzt. Neben den geräteimmanenten Kriterien ist die Reichweite in der Praxis vielmehr durch die Reflektanz der Zielobjekte und dem Auftreffwinkel bestimmt. Hier ist von einem guten Laserscanner ein großer Dynamikbereich für die Reflektivität z. B. von $\rho\% = 5\%$ bis $\rho\% = 99\%$ zu fordern.

Abtastrate/Auflösung Für die sphärisch abtastenden Laserscanner können verschiedene Schrittweiten (stepping rate) für die beiden Ablenkwinkel H_z und V gewählt werden. Diese sind ein ganzzahliger Bruchteil eines Vollkreises z. B. 1° oder $\frac{1}{4}^\circ$. Bevorzugt werden möglichst kleine Abtastraten, um das Messobjekt möglichst fein räumlich auflösen (diskretisieren) zu können. Dem entgegen steht, dass die Messzeit quadratisch mit der Erhöhung der Abtastrate ansteigt. Für eine detailreiche Vermessung sind eine hohe Auflösung der Winkel und der Streckenmessung erforderlich. Die Auflösung der Streckenmessungen hat sich an der Messgenauigkeit zu orientieren. Sie sollte mindestens so fein sein wie die Messgenauigkeit, damit die Genauigkeit nicht durch Rundungsfehler verloren geht. Die Auflösung wird meist so gewählt, dass für den gesamten Entfernungsbereich eine möglichst kleine Speichergröße erforderlich ist. Das Callidus-System z. B. benutzt eine 15 Bit-Maske zur Speicherung. Mit 15 Bit je Streckenwert können Strecken von 0 bis 32 m mit einer mm-Auflösung gespeichert werden.

Strahldivergenz Die Strahldivergenz sollte mit der räumlichen Auflösung (Abtastrate) abgestimmt sein. Es macht wenig Sinn, eine Abtastrate zu wählen, die kleiner ist als die Spotgröße. Die Spotgröße ergibt sich aus der Strahldivergenz und nimmt im wesentlichen linear mit der Entfernung zu. Meist wird mit einem Laserscanner sphärisch abgetastet, sodass die Winkelabtastung mindestens so groß gewählt werden sollte wie die Strahldivergenz. Wird eine Winkelabtastung darunter gewählt, so sind benachbarte Messungen stark miteinander korreliert (Abbildung 4.8), d.h. dass diese Messungen den gleichen Informationsgehalt haben; auf die ein oder andere Messung kann zur Optimierung der Messzeit also getrost verzichtet werden.

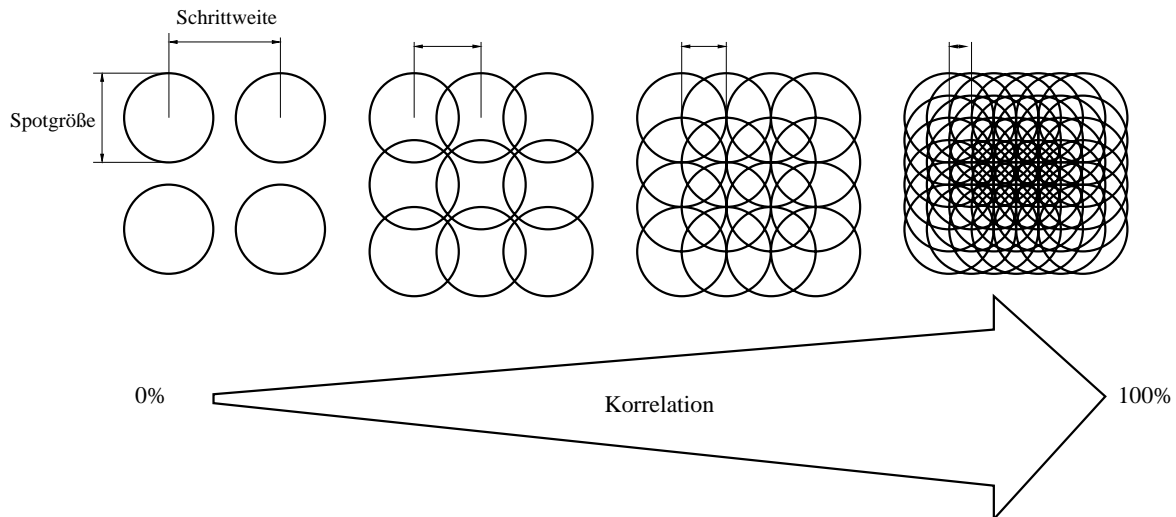


Abbildung 4.8: Das Zusammenspiel von Schrittweite und Spotgröße.

Die Strahldivergenz hat Einfluss darauf inwieweit Ecken und Kanten durch die in Kapitel 3.6.2 erläuterten Effekte „ausgerundet“ werden. Je kleiner die Strahldivergenz ist desto präziser kann das Zielobjekt durch einen Punkt idealisiert werden. Diese Erhöhung der Auflösung kann zugleich als Genauigkeitssteigerung in der Streckenmessung interpretiert werden. Eine kleine Strahldivergenz führt daher zu besseren Ergebnissen.

Messgenauigkeit Bei der Genauigkeit muss zwischen der Richtungs- und der Streckengenauigkeit unterschieden werden. Die Richtungsgenauigkeit wird durch die Ablenkeinheiten bestimmt. Die Streckengenauigkeit ist abhängig vom benutzten Streckenmessverfahren. Das Phasendifferenzverfahren hat hier deutliche Vorteile gegenüber dem Impulslaufzeitverfahren. Besonders hohe Genauigkeiten von ca. 1mm sind derzeit nur mit dem Triangulationsverfahren möglich. Diese sind wiederum nur im Nahbereich erzielbar.

Messgeschwindigkeit Die Messgeschwindigkeit hängt von der Art der Abtastung und dem eingesetzten Streckenmessverfahren ab. Eine mechanische Ablenkung des Laserstrahls über Schrittmotoren benötigt weit mehr Zeit als eine Ablenkung durch einen kontinuierlich rotierenden Spiegel oder Prisma. Die Messrate bei dem Impulslaufzeitverfahren ist aufgrund der benötigten „Messpause“ zwischen den Impulsen begrenzt und geringer als bei einem im Dauerstrichverfahren arbeitenden Streckenmessgerät. Beim Phasendifferenzverfahren kann theoretisch zu jedem Zeitpunkt eine Entfernungsbestimmung durchgeführt werden. Selbst eine kontinuierliche Messung zu einem bewegten Ziel ist denkbar. Das Scannen von einem schnell fahrendem Zug aus ist bereits teilweise realisiert ([MH02]). Das dabei eingesetzte Phasendifferenzverfahren erlaubt dabei erstaunlich große Messraten. Die Messraten können so groß sein, dass für die Speicherung der Messergebnisse besonders schnelle Datentransfer- und Speichersysteme benutzt werden müssen.

Tabelle 4.1: Kennwerte von einigen marktgängigen Laserscannern für den Einsatz in der Bauaufnahme (Stand Mai 2002 –ohne Gewähr–)

	Universität Stuttgart [Weh97]	Imager 5003 ^a Zöller&Fröhlich [MF00][Zol02]	CYRAX ^(R) 2500 Cyra Technologies [Cyr00]	Callidus ^(R) V1.1 Callidus Precision Systems GmbH [Cal01]	LMS-Z210 Riegler [Rie02]	SOISIC ^(TM) Mensi [Men01][BHM00]
Laser						
Wellenlänge	670nm	780nm	532nm	905nm	900nm	640nm
Laserklasse ^b		1	2	1	1	3b
Messverfahren	Phasendiff.	Phasendiff.	Impulslaufzeit	Impulslaufzeit	Impulslaufzeit	Triangulation
Strahldivergenz θ_0		0.1mrad	≈ 0.12 mrad	≈ 0.1 mrad	≈ 3 mrad	≈ 0.04 mrad
Laserleistung		22mW	1mW			2.5mW
Abtastung						
α -Ablenkung ^c	Planspiegel	rot. 45°-Prisma	Planspiegel	Drehspiegel	Spiegelpolygon	Spiegel
β -Ablenkung ^d	Planspiegel	Servo	Planspiegel	Servo	Servo	Servo
min. α -Schrittw.	ca. 1/6 – 1/13°	ca. 1/50°	> 1/3500°	1/1 – 1/4°	ca. 1/3 – 1/14°	ca. > 1/70°
min. β -Schrittw.	ca. 1/6 – 1/13°	ca. 1/10°	> 1/3500°	1/1 – 1/16°	ca. 1/3 – 1/14°	ca. > 1/70°
Messbereich						
Gesichtsfeld	camera	panorama	camera	panorama	camera	camera
horizontal	0 – 30°	0 – 360°	0 – 40°	0 – 360°	0 – 80°	0 – 320°
vertikal	0 – 30°	0 – 270°	0 – 40°	0 – 150°	0 – 333°	0 – 46°
Entfernung	< 15m	< 25.2m	1 – 100m	32m	150m	2.5 – 25m
Auflösung						
Strecke	0.06mm	0.38mm		1mm	25mm	
Reflektivität		16Bit				
Messgeschwindigkeit						
Punkte/s		< 625 000	1 000	< 28 000	ca. 6 000	100
1 Scan ^e	40s 200 × 200	140s 8000 × 8000	16min 1000 × 1000	10min 1440 × 600	2min 444 × 1800	
Genauigkeit						
Winkel	0.01°	0.00034°	0.03°/0.017°	0.036°/0.018°		
Strecke	0.1mm	3mm +1mm/m	6mm	5mm	25mm	0.3mm +0.1mm/m

^aDer Imager 5003 und das System LARA 25200 sind bzgl. der Kenndaten des Lasers gleich.^bIEC/EN 60825-1 1994^cPrimäre (schnelle) Rotation.^dSekundäre (langsame) Rotation.^eScan über das gesamte Gesichtsfeld in für den jeweiligen Laserscanner typischer Auflösung.

4.5 Das Wesen scannender Messverfahren

Laserscanner erlauben die Geometrieerfassung fast beliebig geformter Objekte. Einschränkungen hinsichtlich der Einsatzgebiete sind gegeben. Konkave Objekte, die sich stark selbstverdecken bzw. die Hinterschneidungen aufweisen, können nicht durch einen einzelnen Scan erfasst werden. Auch andere konventionelle Verfahren, wie z. B. die Photogrammetrie, benötigen bei verdeckten Objektbereichen zusätzliche Messungen von anderen Standorten aus. Der Vorzug der scannenden Technik ist darin zu sehen, dass über den automatisch ablaufenden Scanvorgang eine vollständige Geometrieerfassung (Kontinuum) möglich ist. Die Objektgeometrie kann gewissermaßen auf Knopfdruck im Maßstab 1 : 1 bestimmt werden. Ähnlich wie ein Messbild unstrukturierte Farbinformationen enthält, enthält ein Scan eine unstrukturierte Menge an 3D-Messpunkten (Punktwolke). Beide Abbilder der Realwelt, das Farbmodell und das Geometriemodell, benötigen nach der Erfassung einen Interpretationsschritt, um das gewünschte aus idealisierten Formen bestehende Modell (z. B. Drahtgittermodell) zu erhalten. Beim Scannen muss bedacht werden, dass nicht die für die idealisierte Geometrie notwendigen diskreten Eckpunkte direkt erfasst werden. Nur in ganz wenigen Ausnahmen wird z. B. eine Raumecke beim Scannen zufällig getroffen. Die diskreten Punkte sind vielmehr indirekt aus dem Verschneiden der idealisierten Oberflächen, z. B. aus dem Schnitt dreier Ebenen, zu berechnen. Da eine Objektoberfläche im Allgemeinen durch eine Vielzahl von Scannerpunkte diskretisiert wird, ist die Ableitung der idealisierten Form anhand einer Approximationsrechnung meist kein Problem, sodass die Eckpunkte durch Verschneidung zuverlässig berechnet werden können.

Das Messen mit dem Scanner erfordert eine stark flächenorientierte Weise der Auswertung. Diese unterscheidet sich deutlich von der punkt- und linienorientierten Messung der konventionellen tachymetrischen und photogrammetrischen Auswertung. Ein isoliert betrachteter Scannermesspunkt reicht zur Diskretisierung eines Objektes oder -teiles nicht aus. Erst ein Punkthaufen von minimal drei oder mehr Scannerpunkten stellt eine brauchbare Diskretisierung des Objektes dar und zwar in seiner einfachsten Form als Oberflächenstück eines Dreieckes.

4.6 Laserscanning in Vergleich mit anderen Messverfahren

Das 3D-Laserscanning ist bei näherer Betrachtung der Architekturphotogrammetrie sehr verwandt. Beides sind Verfahren, die ein Objekt durch einen automatischen Prozess vollständig erfassen. Dabei wird es gewissermaßen flächenhaft durch eine Vielzahl von unklassifizierten, zufällig ausgewählten Messungen repräsentiert. Die Messwerterfassung und Auswertung können bei beiden Verfahren zeitlich voneinander getrennt werden und sind somit hervorragend für Dokumentationsaufgaben geeignet.

Die Tabelle 4.2 stellt die besonderen Stärken und Schwächen der photogrammetrischen Erfassung und des 3D-Laserscanning gegenüber ([LH01] und [Ker01a]). Es zeigt sich, dass die Schwächen des einen zugleich die Stärken des anderen Verfahrens sind. So liefert das 3D-Laserscanning unmittelbar dreidimensionale Geometriedaten im Maßstab 1 : 1, wohingegen dies bei der Photogrammetrie nur durch eine manuelle Stereoauswertung möglich ist. Die Objektfarbe als wesentliche visuelle Information für den menschlichen Betrachter wird bis auf die monochromatische Reflektanz beim Laserscanning nicht erfasst. Ein Photo hingegen entsteht ausschließlich durch das Einwirken von mehrfarbigem Licht also durch Farbe.

Vergegenwärtigt man sich die Vor- und Nachteile der beiden Messmethoden Photogrammetrie und Laserscanning, wie in Tabelle 4.2 zusammengetragen, so erkennt man, dass sich beide in ihren Stärken ergänzen und die jeweilige Schwäche des einen Verfahrens die Stärke des anderen ist. Das Laserscanning eignet sich hervorragend für die Geometrieerfassung. Es arbeitet schnell, unkompliziert und für Aufgaben aus der Architekturvermessung ausreichend genau. Die Photogrammetrie hingegen liefert die für die Auswertung der Geometriedaten und Interpretation sehr wichtigen Bildinformationen. Eine Ergänzung der Scanner-Geometrieinformationen um die Farbinformation der Messbilder in Form von Texturen erlaubt die Ableitung dreidimensionaler virtueller Modelle mit verhältnismäßig geringem Mess- und Bearbeitungsaufwand.

Tabelle 4.2: Das 3D-Laserscanning und die Photogrammetrie ergänzen sich idealer Weise.

Photogrammetrie	3D-Laserscanning
⊕ Photos sind einfach zu interpretieren; Ein Photo ist ein anerkanntes Dokumentationsmedium.	⊖ keine Details über Farbgebung, Textur, Material etc.
⊖ Für die Bestimmung der 3D-Geometrie sind mind. zwei Photos mit korrespondierenden Objektteilen erforderlich.	⊕ 3D-Geometrie im Maßstab 1 : 1
⊕ Erfassung in Echtzeit; bewegte Objekte sind erfassbar	⊕ Schnelle automatische Erfassung; i.A. ruhendes Objekt bzw. Standpunkt erforderlich
⊕ berührungslose passive Messung	⊕ berührungslose aktive Messung
⊕ gemessen wird das vom Objekt reflektierte Umgebungslicht; eine Lichtquelle ist zwingend erforderlich	⊕ Messergebnisse sind unabhängig vom Umgebungslicht, da durch den Laserstrahl das Objekt beleuchtet wird. Die ausgesandte Lichtmenge ist bekannt ⇒ Bestimmung der Reflektivität möglich
⊖/⊕ Zweiphasigkeit: 1. Aufnahme der Photos vor Ort; 2. häusliche Geometriebestimmung aus der Informationsverknüpfung mehrerer Photos	⊕ Zweiphasigkeit möglich aber nicht zwingend erforderlich
⊕ Bewährtes Verfahren hoher Genauigkeit und Auflösung	⊖ ausreichende Genauigkeit und Auflösung
	⊕ (Teil-)Automatische Auswertung möglich
	⊖ Schwere Interpretation/Analyse der Punktwolke
	⊖ hohe Anschaffungskosten

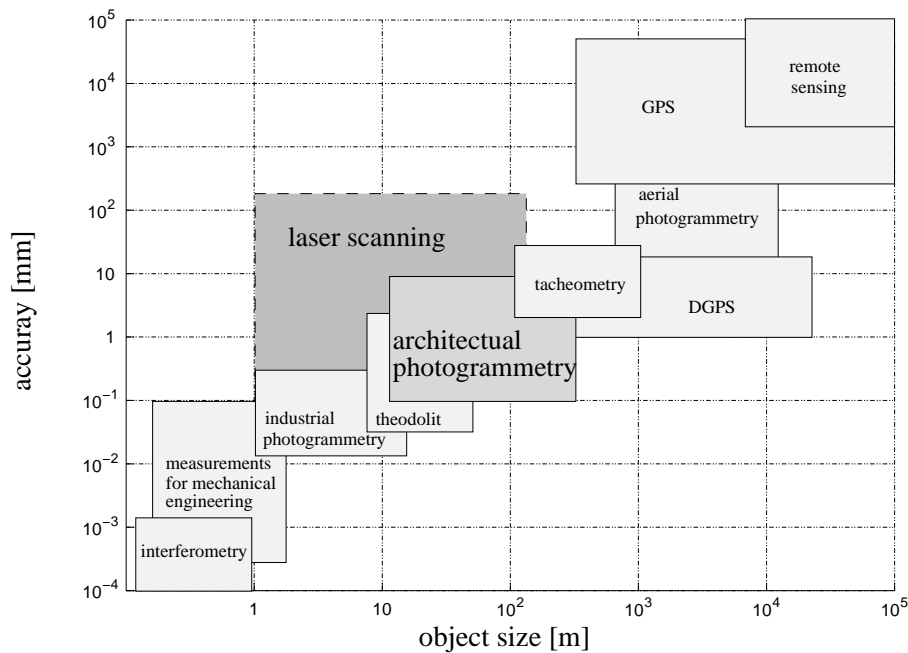


Abbildung 4.9: Das Laserscanning in Vergleich mit anderen Messverfahren zur Geometriebestimmung. [Luh00]

Die möglichen Einsatzbereiche eines Laserscanners sind in Abbildung 4.9 in Abhängigkeit von der Objektgröße und der Messgenauigkeit dargestellt. Ersichtlich ist, dass die angestammten Bereiche der Nahbereichsphotogrammetrie und auch zum Teil die tachymetrischen Vermessung durch das Laserscanning berührt werden. Bisher weisen Laserscannersysteme Schwächen im Bereich hoher Genauigkeit auf. Demgegenüber sind sie bezüglich Messgeschwindigkeit und der sofortigen Bereitstellung von dreidimensionalen Geometrien im Entfernungsbereich von 1 bis 100 m fast konkurrenzlos. Hier sind und werden in Zukunft auch die größten Anwendungspotentiale liegen.

Kapitel 5

3D-Modellierung

Die geometrische Beschreibung eines Objektes ist auf vielfältige Weise möglich. Die Computergraphik hat in ihrer fast 50jährigen Entwicklungsgeschichte die Grundlagen für die 3D-Modellierung erarbeitet. Ausgehend von einfachen Drahtgittermodellen bis hin zu Oberflächen- und Volumenmodelle, die spezielle für die photo-realistische Darstellung entwickelte Funktionen benutzen. Die meisten Anwendungen von 3D-Modellen lassen sich in zwei prinzipiell verschiedene Gruppen einteilen.

In der **ersten Gruppe** werden existierende Objekte, wie Gebrauchsgegenstände, Gesichter, Gebäude oder Geländeformen dargestellt. Ziel ist dabei eine naturgetreue Nachbildung, die nur durch Abbildung einer dichten Folge von dreidimensionalen Punkten erreicht werden kann. Die Erfassung und Verwaltung dieser Datenmengen ist nicht immer möglich oder gewünscht, sodass Modelle erzeugt werden, die aus einer handhabbaren Menge an repräsentativen Punkten und einer zweckmäßigen Interpolationsvorschrift bestehen ([Fel92, S. 206]). Bei dem klassischen Fall einer topographischen Geländeaufnahme werden als repräsentative Punkte alle Höhen- und Tiefenpunkte sowie Punkte entlang der sog. Bruchkanten (Böschungsober- und unterkante, Tallinie, Bergkamm etc.) aufgenommen und als einfache Interpolationsvorschrift eine Dreiecksvermaschung berechnet. Für das naturgetreue Nachbilden mit dem Computer hat sich im Maschinenbau der Fachbegriff „reverse engineering“ etabliert. Das reverse engineering kommt immer dann zum Einsatz, wenn ein Gegenstand eine komplexe, schwer beschreibbare oder unbekannte Formgebung hat oder haben muss, wie dies z. B. bei aerodynamisch oder ergonomisch optimierten Körpern der Fall ist, und diese nicht im Computer generiert werden kann, weil nur mathematisch exakte Formen im Computer implementiert werden können. So wird häufig die Form eines Prototypen mit Werkzeugen des herkömmlichen Modellbaus (Fräsen, Schleifen, Hobeln etc.) optimiert und dann mittels 3D-Sensoren digitalisiert. Es entsteht eine dreidimensionale Punktwolke, die im Computer weiterbearbeitet werden kann. Für den weiteren Konstruktionsprozess wird die Punktwolke einer datenreduzierenden Flächenrückführung unterzogen, sodass die Form bestmöglichst durch mathematische Flächenfunktionen beschrieben werden kann.

Die **zweite große Gruppe** bilden alle Anwendungen die das computergestützte Konstruieren, kurz CAD (computer-aided design) nutzen. Üblicherweise wird dabei eine Konstruktionszeichnungen bzw. ein Konstruktionsmodell für ein neu zu erstellendes Objekt angefertigt ([Fel92, S. 206]). Für eine effektive Konstruktionsarbeit ist es wichtig, zum einen einfache interaktive Bearbeitungsfunktionen vorzuhalten und zum anderen den Entwurf möglichst aller wünschenswerten Formen zu erlauben. Das computergestützte Konstruieren ist trotz aller einzuhaltenden technischen Rahmenbedingungen ein schöpferischer und zum Teil kreativer Prozess, der daher streng genommen nicht automatisierbar ist. Das naturgetreue Nachbilden hingegen setzt keine dieser, den Menschen auszeichnenden Fähigkeiten, voraus. Eine weitgehende Automatisierung der Flächenrückführung ist daher, wie das reverse engineering im Speziellen zeigt, möglich.

5.1 Geometrische Modellierung

Die geometrische Beschreibung eines Objektes (Objektgeometrie) kann in folgende grundlegende Domänen zerlegt werden:

- Lage,
- Form,
- Orientierung und
- Größe.

Diese Zerlegung ist für praktische Vermessungsaufgaben sinnvoll und wird meist unbewusst vorgenommen, da sie teilweise Voraussetzung für die ein oder andere Vermessungsmethode ist. So liegen z. B. die Lage und Größe eines Objektes bei der Anwendung eines tachymetrischen Verfahrens durch Vermessung der repräsentativen Punkte unmittelbar vor, da eine Stationierung und Orientierung in einem Bezugssystem zwingend bei dieser Methode notwendig ist. Ein zu vermessendes Objekt wird in der Regel durch repräsentative Punkte modelliert. Diese Repräsentanten sind die mathematischen Stellvertreter (Modell) für das Objekt in der Realität. Die Lage eines Objektes wird durch die Angabe eines oder mehrere Koordinatentripel, der repräsentativen Punkte, in einem Bezugssystem beschrieben. Das Objekt selbst hat eine Form, die unabhängig von seiner Lage ist und meist idealisierend auf ein oder mehrere geometrische Primitive zurückgeführt wird. Die geometrischen Primitive schließen gewissermaßen die Lücke zwischen den repräsentativen Punkten; das Objekt wird vollends modelliert. Besitzt die Objektform eine Richtungsrelevanz, wie sie z. B. durch eine Bauachse oder Symmetrieachse gegeben sein kann, so gehört auch die Beschreibung der Objektausrichtung im Bezugssystem zur Objektgeometrie. Kreis- und Kugelkörper sind Beispiele für Objekte, bei denen die Angabe einer Orientierung wenig hilfreich ist. In der Praxis wird die Objektorientierung indirekt anhand der Lagekoordinaten geeigneter repräsentativer Punkte festgelegt. Wenn ein Objekt eine Form hat, die sich mathematisch in ein oder mehreren Dimensionen ins Unendliche erstreckt (z. B. Ebene), ist es erforderlich, die Objektgeometrie der Realität entsprechend zu begrenzen. Angaben über die Objektgröße, wie Radius, Länge und/oder Breite sind hierbei vielfach besonders gut geeignet, da sie charakteristisch für eine Objektform sind und meist mit einfachen Mitteln direkt zu bestimmen sind. Die Objektgröße kann genutzt werden den Maßstab eines Objektes darzustellen und Maßstabsverhältnisse von Objekten mit ansonsten gleicher Geometrie bei der Modellierung auszunutzen.

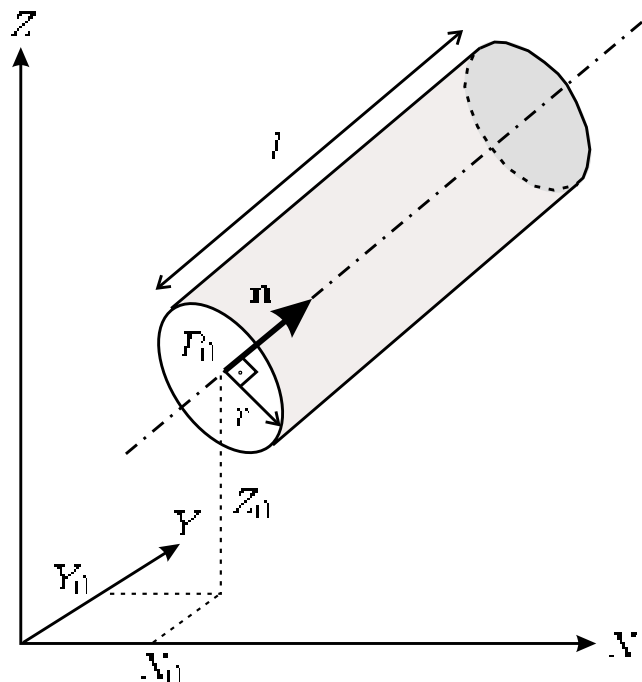


Abbildung 5.1: Modellierung eines Zylinders nach Lage, Form, Orientierung und Größe.

Die Zusammenhänge zwischen Lage, Form, Orientierung und Größe eines Objektes soll am Beispiel eines beliebigen im Raum befindlichen zylindrischen Körpers, eines Rohrstückes mit verschwindender Wanddicke,

verdeutlicht werden. Die **Lage** des in Abbildung 5.1 gegebenen Zylinderkörpers kann durch Aufmaß des repräsentativen Punktes $P_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ bestimmt werden. Ist dieser Punkt einer Messung nicht zugänglich, so kann er durch die Messungen dreier Oberflächenpunkte P_1, P_2 und P_3 abgeleitet werden. Die **Form** des Zylinderkörpers wird entweder vorgegeben, „Das Rohr ist zylindrisch.“, oder durch Messungen einer Vielzahl von Oberflächenpunkten und mittels Zylinderapproximation verifiziert. Die **Orientierung** kann durch einen weiteren Punkt P_a der Zylinderachse festgelegt werden. Denkbar ist aber auch die Achsrichtung durch ihren Azimut und ihrem Zenitwinkel zu beschreiben, was der Bestimmung der Normalen \mathbf{n} der Abschlußebene E_1 (Boden) bzw. E_2 (Deckel) gleichkommt. Die **Größe** des Rohrstückes ist definiert durch den Zylinderradius r und durch den Abstand l zwischen Boden und Deckel. Zur vollständigen und damit zweifelsfreien Beschreibung der Form ist weiterhin die Angabe nötig, ob das Rohrstück oben und/oder unten durch Boden und Deckel abgeschlossen ist. Eine denkbare Modellierung des in Abbildung 5.1 Rohrstückes könnte somit lauten:

Lage: P_0
 Form: Zylinder ohne Boden mit Deckel
 Orientierung: \mathbf{n}
 Größe: r, l

Mit der hier vorgeschlagenen Zerlegung der Objektgeometrie in die Domänen Lage, Form, Orientierung und Größe ist eine Umsetzung in verschiedenste 3D-Austauschformate leicht möglich, da diese häufig ebenso zwischen Lage und Orientierung auf der einen Seite und der Form und Größe auf der anderen Seite trennen. Als Beispiel für eine Umsetzung ist mit dem Pseudocode 5.1 das Rohrstück der Abbildung 5.1 in VRML ([ANM96], [CMG96] und [Has97]) modelliert.

Pseudocode 5.1 VRML-Modellierung eines Zylinders nach Lage, Form, Orientierung und Größe. _____

```
#VRML V2.0 utf8
Transform {
  translation 10.0 10.0 0.0      # Lage
  rotation    0.1  0.3 0.8 0.53 # Orientierung;
                                   # 0.53rad-Drehung um die Achse 0.1/0.3/0.8

  children [
    Shape {
      geometry Cylinder {      # Form
        radius 0.5             # Größe
        height 3.3             # Größe
        bottom FALSE          # Form
        top    TRUE            # Form
      }
    }
  ]
}
```

An diesem Beispiel wird der Vorteil deutlich, der sich ergibt, wenn die Lage und Orientierung getrennt werden von der Form und Größe des Objekts. Die vom Bezugssystem abhängigen Domänen Lage und Orientierung können beliebig verändert werden, ohne den Zylinderkörper an sich zu verändern. Dies entspricht der intuitiven Betrachtung der Dinge in der Wirklichkeit. Objekte werden nach ihrer Form identifiziert und klassifiziert: Die Wand ist eine Ebene oder ein quaderförmiger Körper mit Länge, Breite (Wandstärke) und Höhe; Die Säule ist im Schaft zylindrisch usw. Die Trennung erlaubt es auch, eine allgemeine Objektklasse (Einheitskörper) zu definieren von der konkrete Objekte mit differenzierten Formparametern abgeleitet und individuell platziert werden können. Das obige Rohrstück kann hinsichtlich seiner typisierten Form innerhalb einer chemischen Anlage mehrfach an verschiedenen Stellen vorkommen und von ein und demselben Ausgangsrohr abgesägt sein.

Es ist bei künstlichen Bauwerken regelmäßig davon auszugehen, dass Objekte ein und der selben Klasse eher mehrfach vorkommen, als dass jedes Bauteil individuell gestaltet ist. Man bringe sich nur Bauwerke des Klassizismus oder der Gotik in Erinnerung. Sie leben von der ständigen Wiederholung derselben Formen in unterschiedlichen Größen und Anordnungen.

Die obigen Überlegungen zur Untergliederung der Geometrie in Lage, Orientierung, Form und Größe führen zu einer Modellierungsart, die man parametrisches Modellieren nennen könnte.

In den Lehrbüchern zur Computergraphik ([RS90], [AM91], [TC91], [Fel92], [BGZ96], [FD96] und [EaSK97]) werden die Methoden zur dreidimensionalen Modellierung neben dieser in drei Klassen eingeteilt. Es wird unterschieden zwischen:

- Drahtgittermodell,
- Flächenmodell und
- Volumenmodell.

Wobei diese Einteilung eine Trennung vortäuscht, die es bei der Implementierung der Computerprogramme zur 3D-Modellierung nicht wirklich gibt. Es ist vielmehr eine aneinander aufbauende, hierarchische und sich ergänzende Modellbildung anzutreffen (Hybridmodell).

5.2 Drahtgittermodell

Das Drahtgittermodell beschränkt sich bei der Modellierung auf die repräsentativen Punkte und Kanten eines Objektes. Die Umrisse eines Objektes werden durch seine Eckpunkte und die verbindenden Verschneidungskanten definiert. Das Modell kennt keine Flächen oder Volumina und ist daher durchsichtig. Bei der Visualisierung des Modells durch eine beliebige Projektion kann daher nicht zweifelsfrei entschieden werden, welche der Kanten in Wirklichkeit sichtbar wären und welche durch die davor liegenden Objektteile verdeckt würden. Informationen über geschlossene oder offene Seitenflächen eines Körpers sind im Modell nicht enthalten, sodass nur die Informationen über die Begrenzungsseiten und -kanten vorliegen. Ein Drahtgittermodell kann, wie Abbildung 5.2 zeigt, zur mehrdeutigen Interpretation der Körpergestalt führen. Zweifelsfrei lässt sich aus dem Modell nur ein aus Draht gelöteter Käfig herstellen, wie der Name Drahtgittermodell es treffend beschreibt. Häufig beschränkt sich die Modellierung mittels Drahtgittermodell auf die Darstellung von ebenflächig begrenzten Polyedern. Operationen auf die Datenstruktur können durch Operation auf einen topologisch äquivalenten Graphen beschrieben werden.

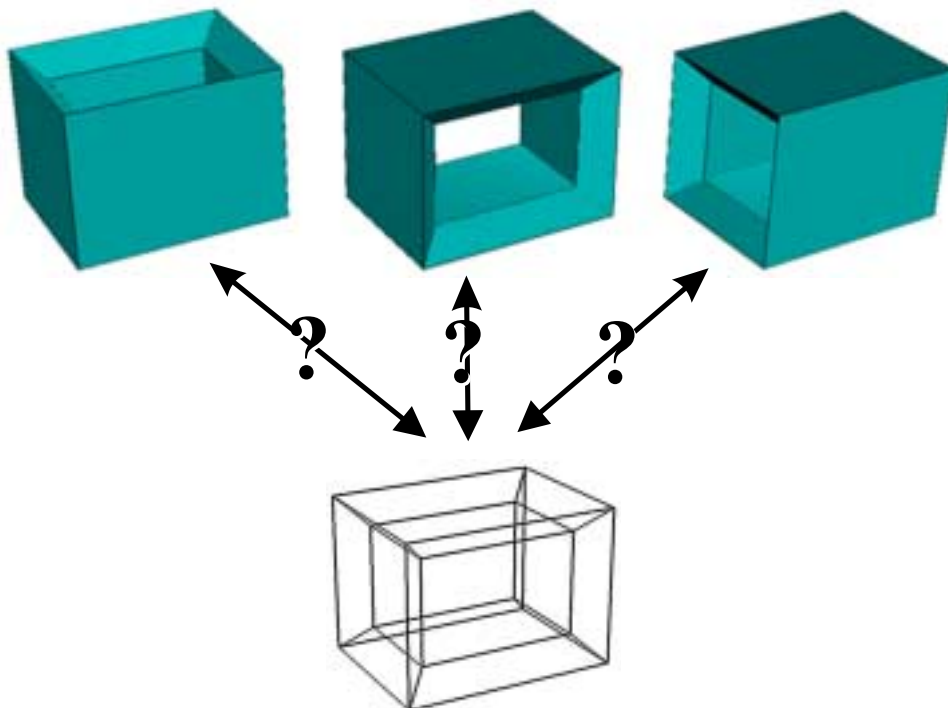


Abbildung 5.2: Mehrdeutigkeit des Drahtgittermodells eines Tesserakts (nach [EaSK97, S. 19]).

Das Drahtgittermodell hat heute nur noch dort eine Bedeutung, wo es darum geht, dreidimensionale Objekte möglichst schnell zu verarbeiten. So wird, mit abnehmender Tendenz, bei vielen CAD-Programmen und 3D-Modellierern während des dynamischen Zoomens oder bei der dynamischen Wahl einer neuen Betrachtungssituation temporär nur ein Drahtgittermodell angezeigt.

Die Datenstrukturen, die zur Speicherung und Verwaltung eines Drahtgittermodells benutzt werden ähneln denen des Randflächenmodells (Kapitel 5.4.3). Erforderlich ist nur eine Knoten- und Kantenliste.

5.3 Flächenmodell

Das Flächenmodell beseitigt die Mängel des Drahtgittermodells indem die Objekte durch ihre Begrenzungsflächen beschrieben werden. Zwischen den Begrenzungskanten eines Drahtgittermodells werden beim Flächenmodell die Außenflächen des Objekts aufgespannt. Im einfachsten Fall bilden jeweils drei zusammenhängende in sich zurücklaufende Kanten eine Dreiecksfläche. Durch den Umlaufsinn der dabei beteiligten Eckpunkte kann zudem definiert werden, welche Seite des Dreieckes diejenige ist, die von außerhalb des Objekts sichtbar sein soll. Die Existenz von Flächen und ihre Orientierung bezüglich der Sichtbarkeit ist Voraussetzung für die photorealistische Visualisierung von dreidimensionalen Geometrien.

Die Zerlegung der Objektoberfläche durch eine Vielzahl von Dreiecksflächen ist die einfachste und zugleich allgemeingültigste Methode zur dreidimensionalen Objektmodellierung. Viele „kubische“ Körper (*Polyeder*) lassen sich effektiv durch ebene Polygonflächen beschreiben. So ist ein Würfel schneller durch 6 Quadrate als durch 12 Dreiecke beschrieben. Details können jederzeit durch Verfeinerung der Polygonflächen erzielt werden, sodass selbst gekrümmte Oberflächen realistisch visualisiert werden können. Nachteilig an dieser universellen Modellierungsmethode ist die umgekehrt proportional ansteigende Anzahl an Begrenzungsflächen bei zunehmender Objektgröße [Fel92, S. 206].

Zwischen den Kanten und/oder Ecken können beim Flächenmodell beliebige (analytische) Flächen aufgespannt werden, die auch die Modellierung gekrümmter Oberflächen erlauben. Die mathematischen Funktionen können dabei in

- expliziter Darstellung,
- implizierter Darstellung oder
- parametrischer Darstellung

vorgegeben werden [AM91, S.29-33 und S.63-65]. Bei der expliziten Darstellung wird eine Koordinate als Funktion der anderen beiden ausgedrückt. Für eine im Ursprung platzierte Kugel mit Radius r z. B.:

$$z = f_{exp}(x, y) = \sqrt{r^2 - x^2 - y^2}. \quad (5.1)$$

Die explizite Darstellung ist in der Regel ungünstig, da wie das Beispiel der Kugelfunktion zeigt, zu einem Koordinatenpaar (x, y) zwei Funktionswerte $(z, -z)$ gehören. Ein Test auf die Zugehörigkeit eines beliebigen Punktes zur Kugeloberfläche (Inzidenztest) oder dessen Abstand dazu ist nur schwer möglich und erfordert die komplexwertige Berechnung der Wurzel. Für die Realisierung derartiger für die Computergraphik grundlegender Testaufgaben ist die Darstellung in implizierter Form besser geeignet ([AM91, S.65]). Für die Kugel lautet diese:

$$f_{imp}(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - r^2 = 0. \quad (5.2)$$

Das einfache Einsetzen ergibt für jeden Punkt, der nicht zur Menge der Oberflächenpunkte gehört, einen Funktionswert $f_{imp}(x, y, z) \neq 0$, der gleichbedeutend ist mit dem Abstand zur Kugeloberfläche. Das Vorzeichen zeigt zudem an, ob der Punkt innerhalb oder außerhalb der Kugel liegt. Bei der Parameterdarstellung wird ein zusätzlicher, in gewissen Grenzen frei wählbarer, Parameter t (oder mehrere wie u und v) als unabhängige Variable für die Funktionen $x(t)$, $y(t)$ und $z(t)$ verwendet. Eine parametrische Kugeldarstellung lautet z. B.:

$$\mathbf{f}_{par}(x(u, v), y(u, v), z(u, v)) = \begin{bmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \sin(u) \cos(v) \\ r \cos(u) \cos(v) \\ r \sin(v) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Der Parameter u darf, wenn sein Definitionsbereich $[0, 2\pi]$ lautet, als geographische Länge interpretiert werden. Die geographische Breite ist dann durch den Parameter v im Intervall $[0, \pi]$ realisiert. Der Vorteil einer parametrischen Darstellung wird nun deutlich. Die Parameter u und v sind gewissermaßen in der Fläche definierte Koordinaten. Eine Abbildung der Kugeloberfläche in die Ebene ist damit schnell gefunden. Die simple Kartenprojektion

$$\begin{aligned} x'(u) &= u \\ y'(v) &= v \end{aligned}$$

wird insbesondere dazu genutzt das Kugelmodell mit einer Textur belegen zu können, die als rechteckiges Digitalbild vorliegt. Die explizite Darstellung ist ein Spezialfall der Parameterdarstellung. Der Parameterbereich ist dabei durch ein Intervall der x/y -Ebene definiert. Voraussetzung für die Darstellung in expliziter Form ist, wie bereits oben an der Kugel aufgezeigt, dass die Fläche einfach über dieser Ebene liegt.

5.3.1 Quadriken

In jedem 3D-CAD sind zumindestens die Flächen der Kugel, des Zylinders und des Kegels vorhanden. Weitere Möglichkeiten ergeben sich, wenn die Gesamtheit der Flächen 2. Ordnung (Quadriken) implementiert ist. Die Quadriken folgen einem einfachen Bildungsgesetz, gegeben durch folgende implizite Funktion:

$$f(x, y, z) = \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{X}^T \mathbf{q} + q_0 = 0. \quad (5.4)$$

Die Menge aller Punkte $\mathbf{X} = [x \ y \ z]^T \in \mathbb{R}^3$, die die Gleichung 5.4 erfüllen, wird Quadrik genannt und beschreibt eine Fläche 2. Grades, wozu Gerade, Ebene, Kreis, Kugel, Ellipsoid, Hyperboloid, Kegel, Paraboloid und Zylinder, allgemein als Kegelschnitte bekannt, gehören. Welcher Kegelschnitt durch die Quadrik beschrieben wird, hängt von den zehn unabhängigen Parametern $p_1 \dots p_{10}$ in \mathbf{Q}, \mathbf{q} und q_0 ab.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} p_1 & \frac{p_4}{\sqrt{2}} & \frac{p_5}{\sqrt{2}} \\ \frac{p_4}{\sqrt{2}} & p_2 & \frac{p_6}{\sqrt{2}} \\ \frac{p_5}{\sqrt{2}} & \frac{p_6}{\sqrt{2}} & p_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} p_7 \\ p_8 \\ p_9 \end{bmatrix}, \quad q_0 = p_{10} \quad (5.5)$$

Die Beschreibung z. B. einer Kugelfläche als Quadrik kann durch Ausmultiplizieren der Gleichung 5.4

$$p_1 x^2 + p_2 y^2 + p_3 z^2 + \sqrt{2} p_4 xy + \sqrt{2} p_5 xz + \sqrt{2} p_6 yz + p_7 x + p_8 y + p_9 z + p_{10} = 0 \quad (5.6)$$

und Koeffizientenvergleich mit Gleichung 5.7 gefunden werden, die die Kugel durch die Mittelpunktskoordinaten x_m, y_m und z_m sowie den Kugelradius r parametrisiert.

$$(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2 - r^2 = 0 \Leftrightarrow x^2 + y^2 + z^2 - 2x_m x - 2y_m y - 2z_m z + (x_m^2 + y_m^2 + z_m^2 - r^2) = 0 \quad (5.7)$$

Die Parameter der Quadrik lauten für die Kugel somit:

$$\begin{aligned} p_1 = p_2 = p_3 &= 1 \\ p_4 = p_5 = p_6 &= 0 \\ p_7 &= -2x_m \\ p_8 &= -2y_m \\ p_9 &= -2z_m \\ p_{10} &= x_m^2 + y_m^2 + z_m^2 - r^2. \end{aligned}$$

Die Verwendung von Quadriken in der Computergraphik und beim CAD ist sehr beliebt, da sie folgende Vorteile gegenüber anderen Modellierungen haben [FD96, S. 528-529]:

- Die Flächennormalen sind leicht zu berechnen.
- Der Test, ob ein Punkt auf der Quadrik-Fläche liegt, ist durch Einsetzen in Gleichung 5.4 leicht möglich.
- Schnittberechnungen einer Quadrik mit einer anderen sind relativ problemlos.
- Die affine Abbildung einer Quadrik geschieht durch Transformation der Quadrikparameter.

Bei Bauwerken sind häufig nur die Kegelschnitte Ebene, Kugel und Zylinder anzutreffen. Bei komplexeren Formen werden Freiformflächen, wie sie im folgenden beschrieben werden, benutzt.

5.3.2 Flächenpolynome

Eine nur wenig anzutreffende Art der Flächenmodellierung benutzt Flächenpolynome zum Beispiel der Gestalt, wobei n den Grad des Polynoms angibt:

$$z = f(x, y) = \sum_{i=0}^n a_i x^i \sum_{j=0}^n b_j y^j = c_0 + c_1 x + c_2 y + c_3 x^2 + c_4 y^2 + c_5 xy \dots \quad (5.8)$$

Flächen dieser Art werden benutzt, um Geländehöhen oder andere Messwertverteilungen bezüglich des x/y -Horizontes auf einfache Weise darzustellen. Eine Flächenapproximation bezüglich einer Stützpunktmenge liefert in den meisten Fällen keine befriedigende Modellierung, da Polynome zum Ausschwingen zwischen den

Stützpunkten neigen. Zur Abhilfe wird der Wertebereich in einzelne kleinere Wertebereiche zerstückelt, innerhalb der ein gesondertes Flächenpolynom geringen Grades, üblich ist $n = 3$, angesetzt wird. Um einen glatten Übergang an den Intervallgrenzen zu gewährleisten, werden entsprechende Bedingungen, Stetigkeiten, für die Flächenübergänge an diesen Stellen eingeführt. Das Resultat ist eine abschnittsweise definierte Flächenfunktion, die aus kubischen Polynomen zusammengesetzt ist. Solche Funktionen werden Splines¹ genannt. Die häufig benutzte kubische Spline-Fläche mit $m_x \times m_y$ Stützstellen lässt sich wie folgt mathematisch beschreiben:

$$\begin{aligned} z_{[i,i+1]} &= c_{0[i,i+1]} + c_{1[i,i+1]}(x - x_i) + c_{2[i,i+1]}(y - y_i) + c_{3[i,i+1]}(x - x_i)^2 + \\ & c_{4[i,i+1]}(y - y_i)^2 + c_{5[i,i+1]}(x - x_i)(y - y_i) \\ & \text{für } x \in [x_i, x_{i+1}] \text{ und } y \in [y_i, y_{i+1}] \\ & m = m_x = m_y, i \in [1, m - 1] \end{aligned} \quad (5.9)$$

Wobei für jeden Übergang zweier angrenzender Polynome eine stetige Steigungs- und Krümmungsänderung gefordert wird. Dies bedeutet, dass die Steigungen (1. Ableitung) $z'_{[i,i+1]}$ und $z'_{[i+1,i+2]}$ sowie die Krümmungen (2. Ableitung) $z''_{[i,i+1]}$ und $z''_{[i+1,i+2]}$ an den Intervallgrenzen gleich sein müssen. Weiterhin sind Annahmen für die Randsteigungen

$$z'_{[0,1\dots m]}, z'_{[1\dots m, m]}, z'_{[1\dots m, 0]} \text{ und } z'_{[m, 1\dots m]}$$

sowie die Randkrümmungen

$$z''_{[0, 1\dots m]}, z''_{[1\dots m, m]}, z''_{[1\dots m, 0]} \text{ und } z''_{[m, 1\dots m]}$$

zu treffen. Die einfachste Variante verwendet die Annahme, dass die Randsteigungen und -krümmungen Null sind.

5.3.3 Freiformflächen

Insbesondere im Automobil- und Flugzeugbau finden Flächen Anwendung, die sich aus abschnittsweise definierten Splineflächenfunktionen ergeben. Als universell einsetzbar haben sich NURBS (Nonuniform Rational B-Spline)-Flächen erwiesen, die gewissermaßen eine Oberklasse aller oben genannten Flächenarten darstellen und so auch Quadriken repräsentieren können. Die folgenden Darstellungen sind in Anlehnung an die Kapitel 4 und 5 von Toriya [TC91] entstanden. Eine umfassende Beschreibung von NURBS gibt das Grundlagenwerk von Piegl und Tiller [Pie96]. Die Methode der Kurven- und Flächenapproximation mittels Splines geht auf Pierre Bézier zurück, der diese zwischen 1960 und 1970 für die Modellierung von Autokarosserien entwickelte.

Ein NURBS ist eine parametrische Kurvenfunktion $\mathbf{R}(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t)]^T$ wobei t im Einheitsintervall $t \in [0, 1]$ definiert ist. Grundlage eines NURBS ist ein B-Spline, das wie folgt definiert ist:

$$\mathbf{R}(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,k}(t) \mathbf{P}_i \quad 2 \leq k \leq n + 1.$$

Die Form der Kurve wird im wesentlichen durch die $n + 1$ Stützpunkte \mathbf{P}_i definiert. Sie kontrollieren gewissermaßen die Kurvenform und werden daher auch Kontrollpunkte genannt. Die $N_{i,k}(t)$ sind Polynome aus der B-Spline-Basis.²

$$\begin{aligned} N_{i,1}(t) &= \begin{cases} 1 & \text{falls } x_i \leq t < x_{i+1} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \\ N_{i,k}(t) &= \frac{(t - x_i) N_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - t) N_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \end{aligned} \quad (5.10)$$

¹Splines sind stückweise polynomielle Kurven. Ein Kubischer Spline bildet annähernd die glatte Biegelinie eines zwischen festen Stützpunkten angelegten dünnen Holzstabes nach. Der Name Spline (dt. Straklatte) kommt aus dem Bootsbau, wo diese zum Anreißen von Konstruktionslinien verwendet werden. [HL92, S. 74]

²Das B steht hier für Basis und nicht für Pierre Bézier, nach dem die Bézier-Kurve benannt ist, die sich auf die von dem Mathematiker Sergei N. Bernstein benannten Bernsteinpolynome stützt. Die B-Spline-Polynome schließen die Bernsteinpolynome mit ein, sodass die Beschreibung der allgemeinen NURBS hier ausreicht.

Für jeden Kontrollpunkt i sind die k -Ordnungen des B-Splines in Abhängigkeit eines Knotenvektors rekursiv zu berechnen. k ist auf das Intervall $[2, n + 1]$ begrenzt. Minimal sind daher zwei Stützpunkte erforderlich. Der Knotenvektor besteht aus den m Elementen x_i (Knoten), die monoton aufsteigend angelegt sein müssen.

$$x_i \leq x_{i+1}$$

Die Anzahl der Knoten ist abhängig von der Anzahl der Kontrollpunkte.

$$m + 1 = k + (n + 1)$$

Über den Knotenvektor wird gesteuert, in wie weit die einzelnen $N_{i,k}$ eines Kontrollpunktes \mathbf{P}_i Einfluss haben auf die aktuelle Kurvenposition $\mathbf{R}(t_a)$. Wie die Gleichung 5.10 zeigt wird anhand des Knotenvektors ein Gewicht bezüglich der „benachbarten“ B-Splines berechnet. Die B-Spline-Kurve hat sehr nützliche Eigenschaften [TC91, S. 63-64]:

Polynomiale Kurve Die B-Spline-Kurve ist eine polynomiale Kurve vom Grad $k - 1$ zwischen zwei Knoten ($x_i \leq t < x_{i+1}$)

C^{k-2} -**Stetigkeit** Alle Segmente einer B-Spline-Kurve sind mit C^{k-2} -Stetigkeit miteinander verbunden, solange die Werte des Knotenvektors mehrfach vorkommen.

Variation diminishing property Die Form einer B-Spline-Kurve passt sich dem Polygon der Kontrollpunkte an. Die Verschiebung eines Kontrollpunktes verändert die Form der B-Spline-Kurve nur lokal in der Nähe des Kontrollpunktes.

Nachteilig an einer B-Spline-Kurve ist, dass mit ihr kein Kegelschnitt (Kreis, Ellipse etc.) modelliert werden kann. Um diese Einschränkung zu beseitigen ist die rationale B-Spline-Kurve eingeführt worden. In ihrer allgemeinsten Form heißt sie Nonuniform Rational B-Spline (NURBS) und hat hinsichtlich des zu benutzenden Knotenvektors keine Einschränkungen (nonuniform). Eine rationale B-Spline-Kurve hat das Bildungsgesetz:

$$\mathbf{R}(t) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(t) w_i \mathbf{P}_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(t) w_i}$$

wobei hier gegenüber der Gleichung 5.10 zusätzlich die Gewichte w_i für jeden Kontrollpunkt auftauchen. Die rationale B-Spline-Kurve hat darüber hinaus die wertvolle Eigenschaft invariant gegen über einer Affintransformation zu sein, sodass z. B. die zentralperspektivische Abbildung einer rationalen B-Spline-Kurve wiederum einen rationalen B-Spline ergibt. Die Eigenschaften ändern sich nicht. Nur die Parameter P_i, x_i und w_i nehmen durch die Abbildung andere Werte an.

Eine NURBS-Fläche ergibt sich aus der Übertragung der Parameterkurvenfunktion in eine Parameterflächenfunktion, die von den zwei Flächenparameter u und v abhängt. Die Berechnungsformel für einen Punkt der NURBS-Fläche lautet:

$$\mathbf{S}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) M_{j,l}(v) w_{ij} \mathbf{P}_{ij}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) M_{j,l}(v) w_{ij}}$$

Die $N_{i,k}(u)$ und $M_{j,l}(v)$ sind B-Splines nach Gleichung 5.10. Die Kontrollpunkte \mathbf{P}_{ij} bilden ein Gitternetz mit $n + 1$ -Längen- und $m + 1$ -Breitenlinien. In u -Richtung wird die Flächenform durch die Funktionen $N_{i,k}(u)$ und dem Knotenvektor $[x_0 \ x_1 \ \dots \ x_p]$ und in v -Richtung durch die Funktionen $M_{j,l}(v)$ und dem dazugehörigen Knotenvektor $[y_0 \ y_1 \ \dots \ y_q]$ festgelegt. Für die Anzahl der Knoten gilt:

$$p = n + k + 1$$

$$q = m + l + 1$$

$$k \in [2, n + 1]$$

$$l \in [2, m + 1]$$

Die minimale NURBS-Fläche benötigt somit $2 \times 2 = 4$ Kontrollpunkte.

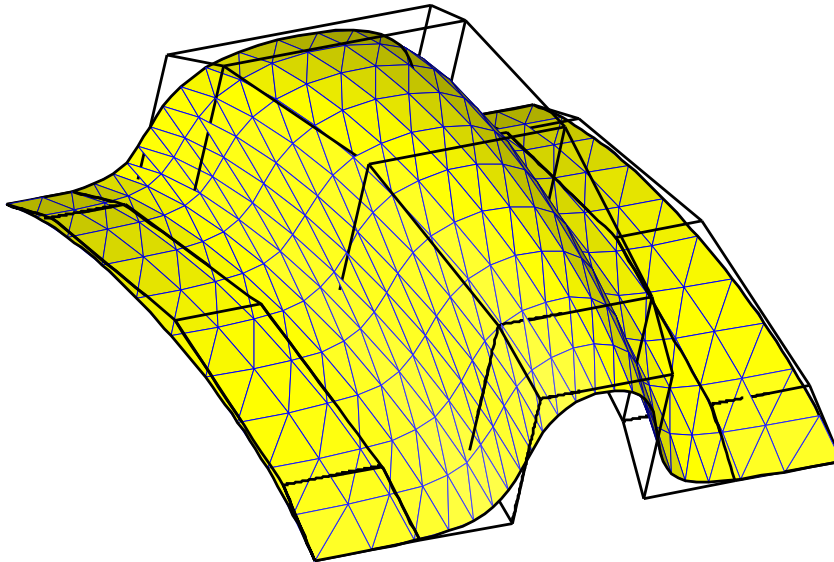


Abbildung 5.3: Ein Non-Uniform-B-Spline-Fläche mit dem Kontrollpunktnetz ([HY92, S. 7]).

Maas setzt NURBS-Flächen für die Modellierung von Salzkavernen ein ([Maa98]). Das Volumen bzw. den Füllstand einer Speicherkaverne wird durch abtastende Messung mit einem echometrischen Längenmesser durchgeführt. Die herkömmliche Modellierung der gemessenen Punktwolke über Profile führt zu einer Kavernehohlform mit unstetig aneinander treffenden Polyederflächen. Die NURBS-Modellierung hingegen erzeugt eine Oberflächen, die einer glattwandigen durch Solung entstandene Kaverne wesentlich näher kommt. Die Volumenbestimmung gewinnt dadurch an Genauigkeit.

5.3.4 Extrusion

Standard bei vielen 3D-CAD-Programmen ist auch die Erzeugung einer Fläche durch das Verfahren der Extrusion; auch Schiebfläche genannt ([Bra77, Kap. 5]). Hierbei wird in Analogie zum Umformungsverfahren in der Fertigungstechnik gedanklich eine verformbare Masse (z. B. Metall, Plastik oder Teig) durch eine Schablone gedrückt. Anhand der Schablone wird die Oberflächengestalt des Endproduktes festgelegt. Das Endprodukt hat entlang seiner Längsachse ein gleichbleibendes Profil. Die Erstreckung der Längsachse kann dabei beliebige Raumkurven (Extrusionspfad, Leitkurve oder Trajektorie) beschreiben. Bei der mathematischen Extrusion ist die Kurve der ebenen Schablone (Querschnitt) zu definieren und die Trajektorie entlang der sie bewegt wird (Abbildung 5.4). Anders als in der Fertigungstechnik kann der Querschnitt auch aus einer nicht geschlossenen Kurve bestehen. Durch Rotation und Skalierung des Querschnitts während der Extrusion sind weitere Flächenvariationen möglich. Mittels Extrusion lassen sich Translations-, Rotationskörper und prismatische Körper leicht erstellen.

Die Extrusion ist weniger ein Flächenmodell als ein Werkzeug zur Erstellung einer Fläche. Sie liefert eine Rechenvorschrift, die in vielen Programmen bei Bedarf ausgeführt wird, um ein hochaufgelöstes Flächenmodell aus Dreiecksflächen zu generieren. Es reicht aus, nur die Konstruktionsvorschrift bestehend aus Querschnitt, Extrusionspfad und Variation längs des Pfades dauerhaft zu speichern. Daher kann es auch als eine Möglichkeit des parametrischen Modellierens aufgefasst werden.

Durch das Extrusionsverfahren entstehen eindeutige Modelle. Die Umkehrung ist nicht eindeutig. Ausgehend vom Objekt sind mehrere, teilweise gleichwertige, Modellierungen möglich. So kann ein Würfel z. B. durch Extrusion einer beliebig wählbaren Seitenfläche erzeugt werden.

5.4 Volumenmodell

Eine hinreichende Bedingung für das Vorliegen eines Volumenmodelles liegt vor, wenn aus dem Modell die Volumina aller Körper berechnet werden können. In einem Volumenmodell sind alle Objekte vollständig und

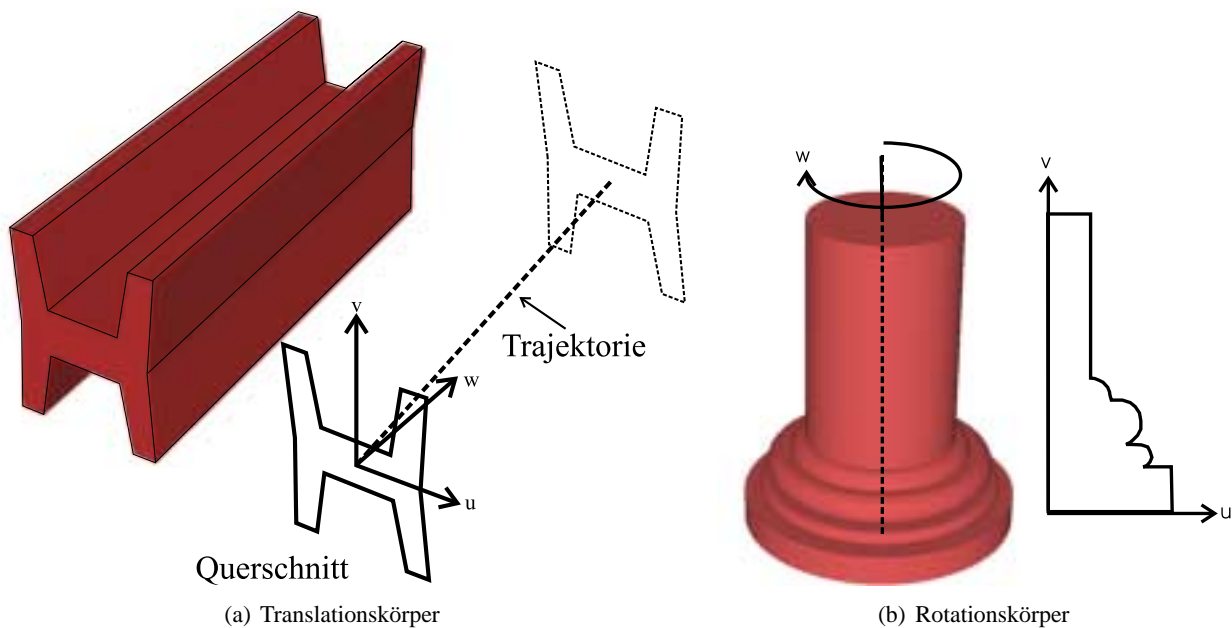


Abbildung 5.4: Konstruktion einer Extrusion aus Querschnitt und Trajektorie.

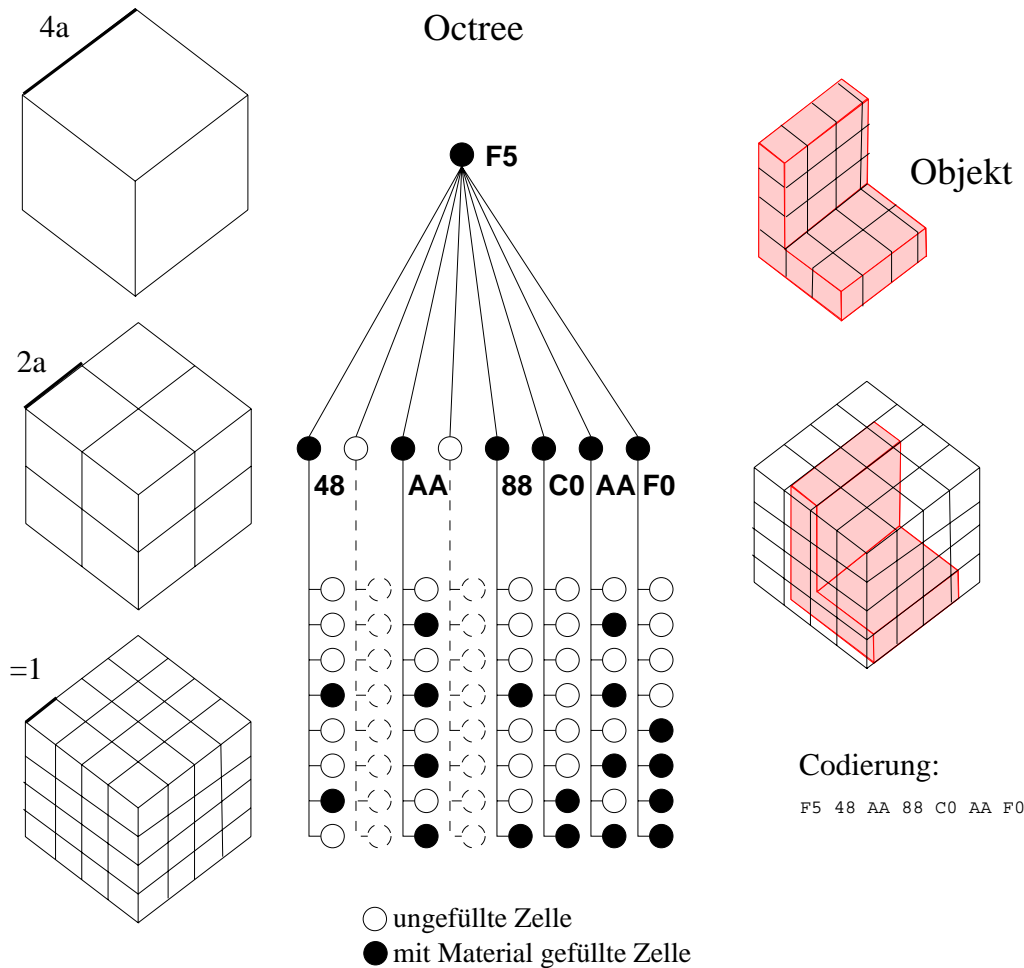
eindeutig. Vollständig bedeutet, dass es nicht möglich ist, Körper mit fehlenden Flächen oder Kanten zu definieren. Das im Volumenmodell erzeugte Objekt ist im technischen Sinne ein reales Abbild der Wirklichkeit. Anhand des Modells kann es eindeutig mittels Werkstoff (z. B. aus Pappe oder einem Metallblock) hergestellt werden. Offen bleibt nur, welche geometrischen Verhältnisse innerhalb eines Objektes herrschen. So ist ein Hühnerer durch seine Oberfläche als Volumenkörper modellierbar. Die Verteilung von Eiweiß und Eigelb ist aber nicht gegeben, da im Volumenmodell vorausgesetzt wird, dass ein Körper aus einheitlichem Material besteht.

5.4.1 Zellzerlegung

Eine einfache Art der Volumenmodellierung ist gegeben, wenn der dreidimensionale Raum in einzelne gleichartige Teilräume zerlegt wird. Ein Teilraum ist in der Regel eine Zelle in Form eines Würfels. Die Zellen eines Körpers berühren sich gegenseitig und bilden in ihrer Gesamtheit den Körper nach. In Abhängigkeit von der kleinstmöglichen Zellgröße wird der Körper mehr oder weniger scharf (exakt), aber immer eckig, dargestellt. Eine Zelle wird in Analogie zum Begriff des Pixels eines digitalen Bildes auch als Voxel bezeichnet. Jedes Voxel kann mit Attributen versehen werden, um z. B. die im Voxel anzutreffende Materialeigenschaft oder Temperatur zu repräsentieren. Nachteilig an der Zellzerlegung eines Körpers ist, dass diese ohne besondere Techniken extreme Speicherplatzanforderungen hat. Soll z. B. ein Würfel mit der Kantenlänge 1m mit 1mm aufgelöst werden, so sind $1000^3 = 1$ Milliarde Zellen bereitzustellen. Werden die Materialeigenschaften mit 1 Byte quantisiert, so ergibt sich ein Speicherumfang von 1 MByte für einen einfach geformten Körper.

Abhilfe schafft eine schrittweise Verkleinerung der Voxel-Größe beim Absteigen eines den Körper beschreibenden Oktalbaumes (*octree*). Der Oktalbaum ist eine Baumdatenstruktur bei der jeder Knoten einen Würfel repräsentiert, der in max. 8 gleiche Unterwürfel zerlegt werden kann. Der Knotenwürfel wird dann zerlegt, wenn innerhalb eines der 8 Unterwürfel der Körper andere Eigenschaften hat, als dies im Bereich der anderen Unterwürfel der Fall ist. Ausgehend von einem Wurzel-Knoten mit einer Würfelabmessung, die den gesamten Körper umschließt, wird sukzessive der Raum und damit der Körper mit jedem Schritt geachtet, solange bis die minimale Würfelgröße erreicht ist oder der Würfel eines Knoten nicht weiter untergliedert werden muss, da der Körper in diesem Bereich homogen ist. Es ist leicht zu erkennen, dass zur Beschreibung der Geometrie eines Körpers mit homogenem Innerem nur noch die Voxel gespeichert werden müssen, die benötigt werden, um die Körperoberfläche zu beschreiben.

Die Oktalbaum-Zerlegung passt sich den kompliziertesten Strukturen automatisch an und wird daher bei irregulären, organischen Körpern angewendet. Von Vorteil ist, dass selbst ein nicht ausmodelliertes Raumvolumen repräsentiert werden kann und so einer digitalen interaktiven Bearbeitung zugänglich wird. Beispiele

Abbildung 5.5: Zellzerlegung mittels Oktalbaum (*octree*).

hierfür finden sich in der Medizin. Computertomographie-Messungen z. B. liefern ein unstrukturiertes Abbild von menschlichen Körperteilen, die es dreidimensional darzustellen und zu analysieren gilt.

5.4.2 Konstruktion mit Raumprimitiven (Constructive Solid Geometry - CSG)

Bei dieser Form der Modellierung wird jeder zu modellierende Körper als Resultat einer oder mehrerer Mengenoperationen beschrieben, die auf eine Auswahl an Grundkörpern/-bausteinen angewendet werden. Als Grundkörper dienen geometrische Primitive, wie z. B.:

- Würfel
- Kugel
- Zylinder
- Kegel
- Torus
- ...

Viele CAD-Programme und 3D-Modellierer erlauben zusätzlich die Verwendung von Halb-Räumen wie z. B. Ebenen oder sogar von polygonalen oder NURBS-Flächen.

Jeweils aus zwei Grundkörpern oder Teilkörpern, die bereits aus Grundkörpern zusammen gesetzt sind, werden beim CSG über die Mengenoperationen Vereinigung (\cup), Durchschnitt (\cap) oder Differenz (\setminus) verrechnet. Die Wirkungsweise der Operationen soll anhand zweier „Quader“-Mengen A und B symbolhaft dargestellt werden. Dabei beachte man, dass die Mengenoperation Differenz nicht kommutativ ist; die Reihenfolge der Operanten ist zu beachten.

- **Vereinigung** (*union*) Bei der Vereinigung werden die Mengen A und B zusammengefasst; es geht kein Material verloren. Die Vereinigung ist vergleichbar mit dem logischen *oder* oder in der Fertigungstechnik

mit Schweißen, Löten, Kleben etc.

$$A \cup B = (x \mid x \in A \text{ oder } x \in B)$$



- **Durchschnitt** (*intersection*) Der Durchschnitt ist die Schnittmenge aus A und B ; Material, das sowohl zum Körper A als auch zum Körper B gehört, bleibt erhalten. Die Vereinigung ist vergleichbar mit dem logischen *und*.

$$A \cap B = (x \mid x \in A \text{ und } x \in B)$$



- **Differenz** (*difference*) Die zweite Operanden-Menge vermindert die erste Operanden Menge um die Teilmenge (Material), die in beiden Mengen enthalten ist; das Material des ersten Körpers wird entsprechend geringer. In der Fertigungstechnik verbergen sich Materialbearbeitung wie Fräsen, Hobeln, Sägen etc. dahinter

$$A \setminus B = (x \mid x \in A \text{ und } x \notin B)$$



$$B \setminus A = (x \mid x \in B \text{ und } x \notin A)$$



Die Mengenoperationen sind in ihrer Wirkung ähnlich den Grundrechenarten, sodass gewissermaßen mit dem Verfahren CSG eine Rechenformel aufgestellt werden muss, die als Resultat den gewünschten Körper liefert. Die Zahlen werden dabei durch die Grundkörper ersetzt. Jeder Grundkörper oder Teilkörper kann zusätzlich noch durch eine Transformation in der Lage, Orientierung und Größe verändert werden. Eine Grammatik für die Konstruktion eines CSG-Körpers könnte z. B. so gestaltet werden:

```

<Objekt> ::= <Primitiv> |
           <Transformation> <Objekt> |
           <Objekt> <Operation> <Objekt>
<Primitiv> ::= WÜRFEL | KUGEL | ZYLINDER | KEGEL | TORUS | ...
<Transformation> ::= TRANSLATION | ROTATION | SKALIERUNG
<Operation> ::= VEREINIGUNG | DURCHSCHNITT | DIFFERENZ
  
```

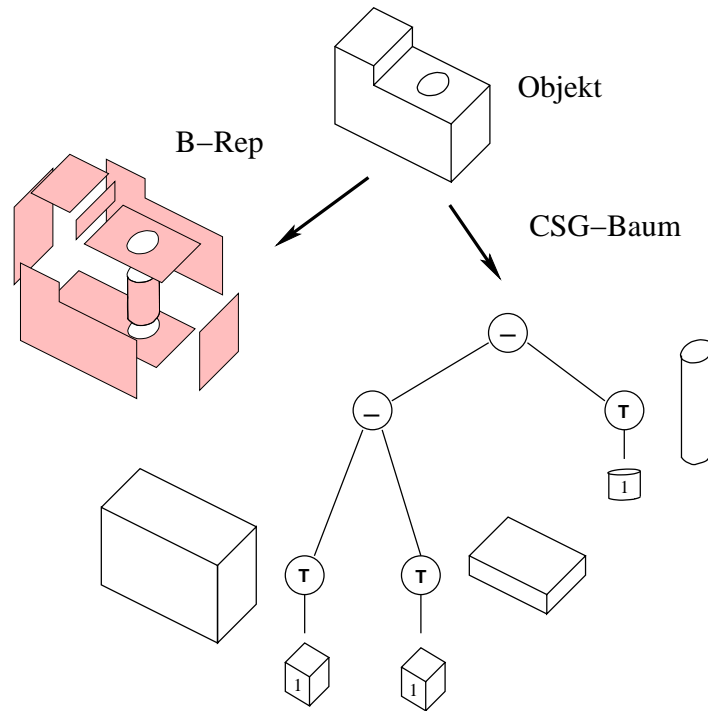


Abbildung 5.6: CSG- und B-Rep.-Modellierung im Vergleich.

Hierbei reicht es aus, Einheitsprimitive mit Formparametern der Länge 1 vorzuhalten, da die Länge, Breite und Höhe eines Körpers durch eine getrennte Skalierung der Transformationsoperation in den drei Dimensionen vorgenommen werden kann. Die Einheitsprimitive sind parallel zu den Koordinatenachsen und ihr Zentrum liegt im Koordinatenursprung.

Überlicherweise wird die Rechenformel in Form einer Baumstruktur dargestellt, die zugleich eine effiziente Speicherform ist. Meist wird in den Systemen nicht der Ergebniskörper vorgehalten, sondern nur die „Fertigungsgeschichte“ anhand des CSG-Baumes. Wie bei einer Zahlenrechnung sind für ein und dasselbe Ergebnis unendlich viele Rechenwege bzw. Modellierungsvarianten möglich. Für die graphische Darstellung eines CSG-Modells ist der CSG-Baum auszuwerten, um alle sichtbaren Ecken, Kanten und Flächen zu erhalten. Die Auswertung liefert ein Randflächenmodell, das mit jeder Veränderung am CSG-Baum neu zu berechnen ist. Einzelne Ecken, Kanten und Flächen sind nicht explizit vorhanden, sodass sie auch nicht getrennt vom Gesamtkörpermodell bearbeitet und verändert werden können. Im CSG-Modell existieren darüber hinaus Ecken, Kanten und Flächen, die nicht mehr sichtbar sind. So sind die Deckelflächen eines Zylinders, der von einem Würfel subtrahiert wird, um eine Bohrung zu Realisierung in der CSG-Datenstruktur enthalten, letztlich nach der Auswertung aber keinen Betrag zum Aussehen und der Formgebung des Resultats liefern.

Ein CSG-Körper kann nur als Ganzes mit technologischen oder thematischen Informationen versehen werden, da seine Teilkörper allein nicht existent sind. Das CSG-Verfahren ahmt Fertigungstechniken, wie z. B. Bohren, Spannen oder Schweißen, nach und kann daher intuitiv angewendet werden.

5.4.3 Randflächenmodell (Boundary-Representation)

Beschreiben die Flächen eines Flächenmodells sämtliche Randflächen eines Körpers, so spricht man von der Boundary Representation (Randdarstellung) kurz B.-Rep. Flächen werden dabei topologisch einem geschlossenen Körper zugeordnet. Der einfachste Körper ist dann das Tetraeder, gebildet aus drei Dreiecksflächen. Die Boundary-Representation arbeitet mit einer Datenstruktur, deren Elemente in zwei Kategorien eingeteilt werden: in geometrische und topologische Elemente. Topologische Elemente sind folgende, die mit den geometrischen Elementen Punkt, Kurve, Fläche zusammen die Randflächendarstellung bilden. (Abbildung 5.7):

Körper (solid) Modell eines Objektes der realen Welt, das es darzustellen gilt.

Oberfläche oder Hülle (shell) Ein Körper besitzt in einfachen Fällen (z. B. Kugel, Würfel) nur eine Oberfläche, welche Grenzschicht ist zwischen dem Körpermaterial und seiner Umgebung. Körper mit inneren

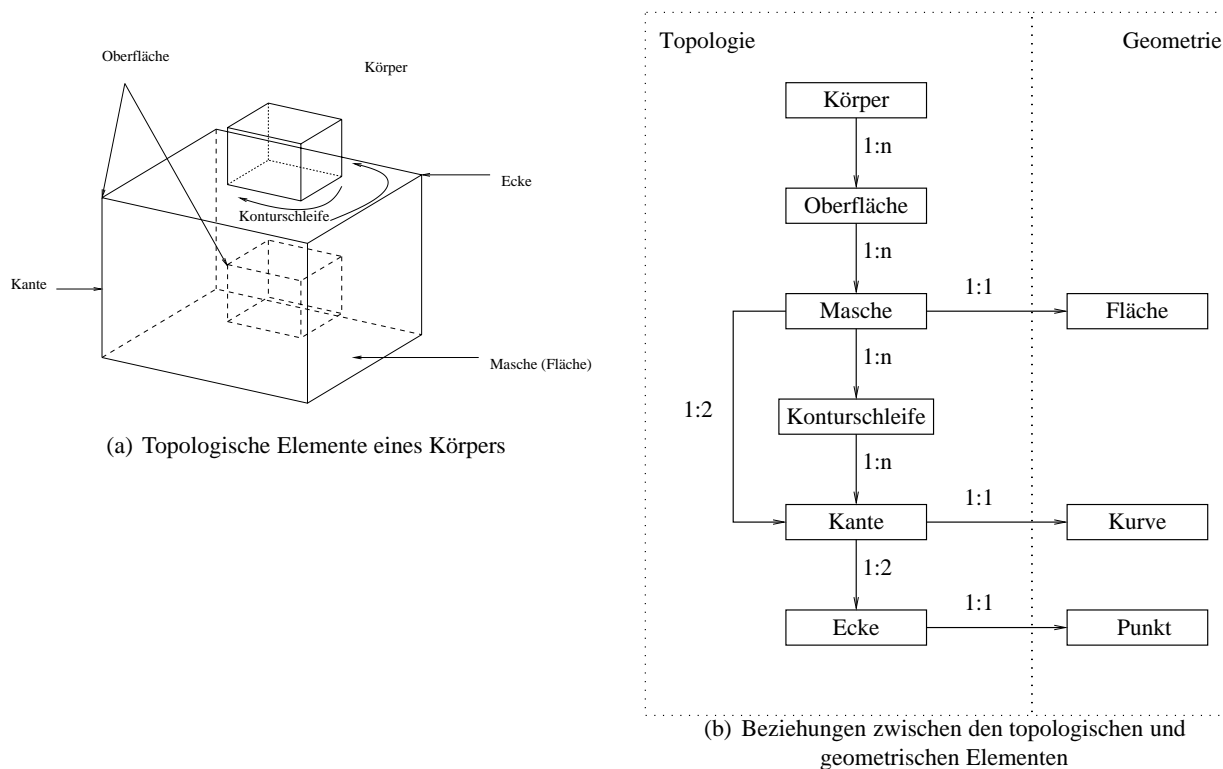


Abbildung 5.7: B-Rep.-Modellierung

Aushöhlungen, wie z. B. die Schale eines Eies besitzen mehrere voneinander getrennte Oberflächen. Bei der Eierschale sind dies zwei; die äußere und die innere Oberfläche der Schale.

Masche (face) Jede Oberfläche zerfällt in ein oder mehrere Begrenzungsflächen: Maschen mit unterschiedlicher Geometrie. Die geometrische Form wird durch die Modellierung einer entsprechenden geometrischen Fläche festgelegt.

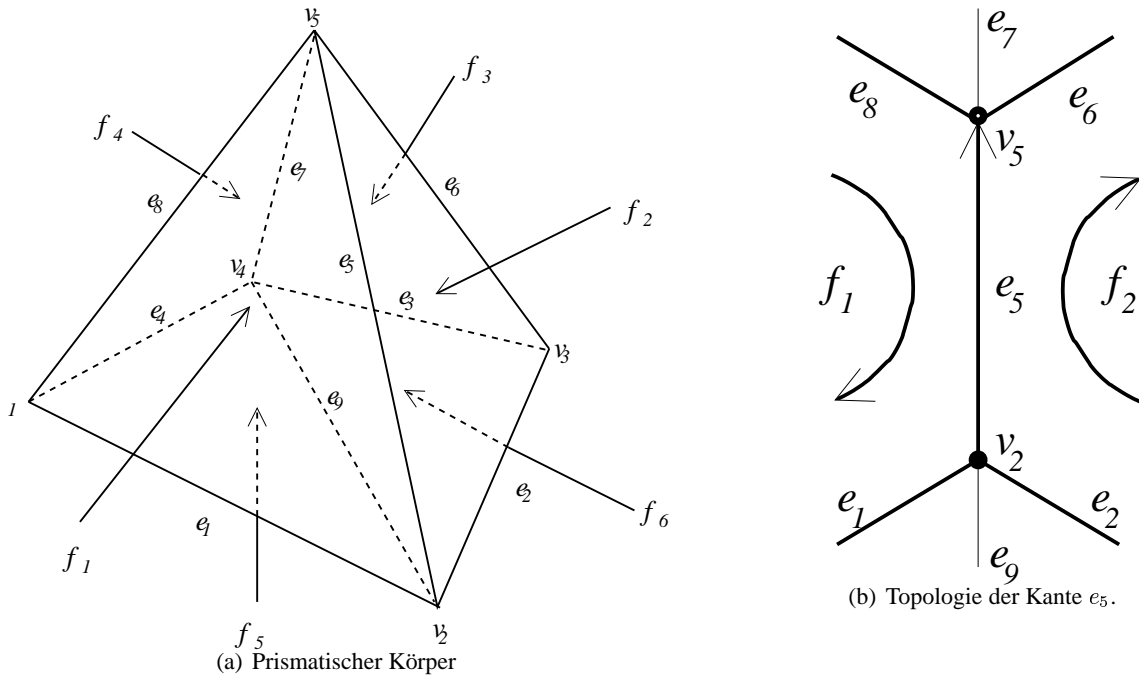
Konturschleifen (loop) Maschen werden durch Konturschleifen begrenzt. Die Notwendigkeit des topologischen Elementes Konturschleifen ist auf Anhieb nicht einsehbar. Es ist aber notwendig, um Flächen beschreiben zu können, die nicht durch einen einzigen Kurvenzug begrenzt werden können. Dies ist z. B. bei einem durchbohrten Würfeldeckel der Fall mit zwei voneinander getrennten Konturschleifen.

Kante (edge) Eine Konturschleife wird topologisch in einzelne Kanten zerlegt. Eine Kante steht in Relation zu genau zwei Ecken. Kanten können verschiedenartig geformt sein. Das geometrische Element Kurve beschreibt die Form der Kante genauer und resultiert aus dem geometrischen Schnitt der zwei angrenzenden Flächen.

Ecke oder Knoten (vertex) Die Ecke/der Knoten ist die/der topologische Repräsentant des geometrischen Punktelementes, welches schlussendlich die Lage und Orientierung des Körpers anhand der Koordinaten fixiert.

Die topologischen Elemente bilden eine hierarchische Ordnung (Abbildung 5.7(b)). Die Kardinalität der Relationen zwischen zwei übereinanderliegenden topologischen Elementen ist bis auf die Relation Ecke/Kante gleich $1 : n$. Für die effektive Speicherung einer Randflächendarstellung ist die Kardinalität $1 : 2$ mit fester „Länge“ der Relationen Ecke/Kante und Kante/Masche sehr interessant. Unter Ausnutzung dieser Besonderheit kommt man zur Datenstruktur *winged-edge* („geflügelte Kante“). Zentrales Speicherelement ist dabei die Kante, da sie genau zwei Ecken als ihre Endpunkte hat und genau zwei Nachbarflächen besitzt, die sie voneinander trennt. Zusätzlich werden die Relationen zu den nächsten und vorhergehenden Kanten jeder Nachbarfläche in der *winged-edge*-Struktur gespeichert. Diese redundante Datenstruktur mit fester Speichervlänge erlaubt ein leichtes Auffinden bestimmter topologischer oder geometrischer Größen bzw. ein einfaches Durchwandern

des Datenraumes. In der Abbildung 5.8 ist ein prismatischer Körper anhand einer vereinfachten winged-edge-Datenstruktur modelliert. Durch die Relationen von, nach bzw. links und rechts werden die Kanten bzw. die Maschen orientiert, sodass entschieden werden kann, welcher Bereich des Raumes innerhalb und welcher außerhalb des Körpers liegt.



Kante	Ecke		Masche	
	von	nach	links	rechts
e_1	v_1	v_2	f_1	f_5
e_2	v_2	v_3	f_2	f_6
e_3	v_3	v_4	f_3	f_6
e_4	v_4	v_1	f_4	f_5
e_5	v_2	v_5	f_1	f_2
e_6	v_3	v_5	f_2	f_3
e_7	v_4	v_5	f_3	f_4
e_8	v_1	v_5	f_4	f_1
e_9	v_2	v_4	f_6	f_5

(c) Winged-Edge-Relation

Abbildung 5.8: Bezeichnungen der Ecken, Kanten und Maschen eines prismatischen Körpers.

Voraussetzung für die Anwendung der Randflächen-Modellierung ist, dass die Körper eine mannigfaltige (*manifold*) Umgebung haben. Eine mannigfaltige Umgebung liegt vor, wenn jede Kante zwei Ecken hat und zwei Maschen sowie jede Ecke die Spitze einer Kegelfläche ist. Trifft dies nicht zu, spricht man von nichtmannigfaltigen (*non-manifold*) Modellen. Abbildung 5.9 zeigt einige Beispiele für Kanten mit nichtmannigfaltiger Umgebung. Kanten an denen zwei Körper sich nur berühren oder Kanten an denen ein Körper sich selbst schneidet sowie Kanten, die zu keiner Masche gehören, führen zu nichtmannigfaltigen Körpern. Abhilfe schaffen hier nur künstliche (doppelte) Kanten oder Maschen.

Die Vorteile der Randflächenmodellierung insbesondere gegenüber der CSG sind:

- Flächen, Kanten und Punkte sind explizit gegeben. Das hat den Vorteil, dass sie zum Beispiel direkt auf gemessene Objektpunkte gestützt werden können.
- Lokale Modifikationen der geometrischen und/oder der topologischen Elemente wirken nur lokal und sind leicht auszuführen (*Euler-Operatoren*).
- Die Integration von Freiformflächen (NURBS) ist einfacher möglich als beim CSG-Modell.
- Die Darstellung ist eindeutig, wenn die Teilflächendarstellung eindeutig ist.
- Zusammen mit NURBS-Flächen ergibt sich eine große Mächtigkeit und Anwendungsbreite.

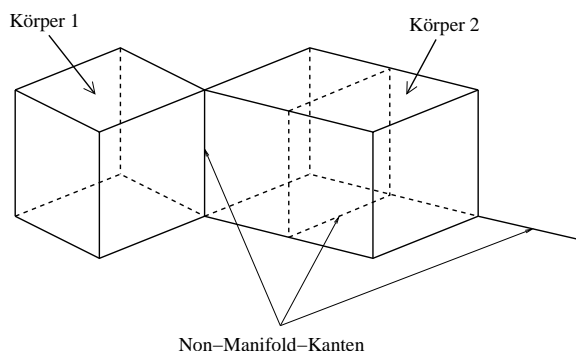


Abbildung 5.9: Beispiel für ein Modell mit nichtmannigfaltiger Umgebung

Nachteilig an diesem Verfahren ist:

- Umfangreiche und komplizierte, teilweise redundante Datenstrukturen sind notwendig.
- Nicht jede Sammlung von Flächen spannt einen Körper auf; es müssen gewisse Gültigkeitsbedingungen erfüllt sein.

Diese Gültigkeitsbedingungen sind nach [BGZ96, S. 67-69]:

I. Geschlossenheit Die Oberfläche eines Körpers muss geschlossen sein. Dies schließt Unterbrechungen in den Kanten oder Löcher in den Teilflächen aus, nicht jedoch Löcher durch den Körper wie beim Torus.

II. Orientierbarkeit Die Oberfläche eines Körpers muss orientierbar sein. Eine orientierbare Fläche besitzt zwei wohl unterscheidbare Seiten (Ober- und Unterseite). Das Möbiusband ist beispielsweise nicht orientierbar.

III. Nicht-Selbst-Schneidend Die Oberfläche eines Körpers darf sich nicht selbst schneiden. Ist die Oberfläche wieder mit Hilfe von Flächen, Kanten und Punkten beschrieben, so bedeutet das:

- Jede einzelne Teilfläche darf sich selbst nicht schneiden.
- Je zwei Teilflächen dürfen sich nicht in ihrem Inneren sondern nur am Rand schneiden. Damit kann auch eine Kante eine Fläche nie im Inneren schneiden. Zudem kann ein Eckpunkt nie im Inneren einer Fläche liegen.
- Eine Kante darf sich selbst nicht schneiden. Damit kann ein Eckpunkt nie im Inneren einer Kante liegen.
- Je zwei Kanten dürfen sich in ihrem Inneren nicht schneiden.

Eine Fläche, die geschlossen sowie orientierbar ist und sich selbst nicht schneidet, begrenzt einen Körper und teilt so den Raum in zwei disjunkte Gebiete, wovon eines endlich ist; eben das Innere des Körpers.

Mannigfaltige Körper können so durch die *Euler-Operatoren* modifiziert werden, sodass keine der Gültigkeitsbedingungen verletzt wird, d.h. es entsteht wieder ein mannigfaltiger Körper. Für die überschlägige Prüfung, ob ein Körper eine mannigfaltige Umgebung hat kann der erweiterte Eulersche Polyedersatz (Euler-Poincaré-Formel) herangezogen werden. Für Körper mit Löchern und Hohlräumen gilt:

$$n_v - n_e + n_f - n_r = 2(n_s - n_h) \quad (5.11)$$

wobei: n_v Anzahl der Ecken
 n_e Anzahl der Kanten
 n_f Anzahl der Maschen
 n_r Anzahl der inneren Zyklen
 n_s Anzahl der Zusammenhangskomponenten (*shells*)
 $\neq 1$: Körper zerfällt in mehrere Einzelkörper oder hat Hohlräume
 n_h Geschlecht des Körpers
d.h. Anzahl der „Henkel“ bzw. der durchgehenden Löcher

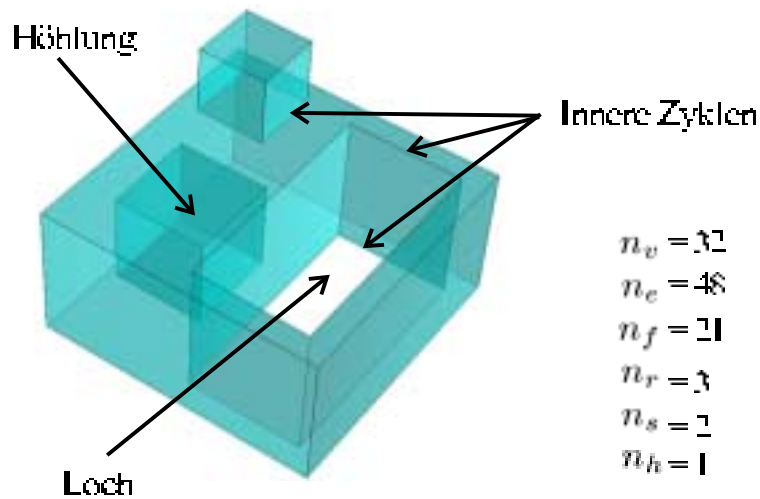


Abbildung 5.10: Anwendung der Euler-Poincaré-Formel.

5.5 Bewertung und Auswahl

Die Modellierung von Bauwerksgeometrien anhand eines Flächenmodells ist für die Beschreibung der Lage, Form, Orientierung und Größe für viele Zwecke ausreichend. Wird die Bauwerksgeometrie aus geodätischen oder photogrammetrischen Messungen gewonnen, so kann auch nicht mehr als die Objektoberfläche vermessen werden. Ein Volumenmodell hätte gegenüber einem Flächenmodell nur den Vorteil, dass zusätzlich die Information darüber, welche Objektbereiche mit Material gefüllt sind und welche nicht, mit modelliert ist. Die gleiche Unterscheidung zwischen innerhalb und außerhalb des Objektmaterials lässt sich auch durch ein Flächenmodell erreichen, bei dem die Flächen orientiert werden.

Generell lässt sich sagen, dass NURBS-Flächen die erste Wahl zur Modellierung von natürlichen (organischen) Oberflächenformen sind. Leider ist die NURBS-Interpolation oder -Approximation einer Punktwolke, wie die obigen Formeln es andeuten, mit erheblichem Aufwand verbunden insbesondere dann, wenn die Punktwolke sich aus unregelmäßig verteilten Punkten zusammensetzt.

Für die weiteren Ausführungen steht die Modellierung nach Art des Randflächenmodells im Vordergrund. Sie ist ausreichend flexibel zur Beschreibung von Bauwerksgeometrien, die sich häufig nur aus planaren Flächen (Polyedern) zusammensetzen. Weiterhin sind an Bauwerken meist nur noch Zylinder- und Kugelflächen zu finden, die sich leicht durch Polyeder approximieren lassen. Bei historischen Gebäuden lassen sich im ersten Moment komplex erscheinende Formen vielfach in einfachere Formen zerlegen. Säulen, Gurtbögen, profilierte Gesimse etc. sind computergraphisch betrachtet Extrusionen. Für solche Geometrielemente bzw. Bauornamentik werden bei einer geometrischen Bauaufnahme die zugrundeliegenden Profile und Pfade detailliert in Skizzen und Plänen festgehalten. Da auch vielfach davon ausgegangen werden kann, dass diese „Extrusions“-Bauteile durch profilgebende Schablonen erstellt sind, reicht es aus, die Dokumentation auf das Messen des Profils und des Pfades zu beschränken. Durch die Modellierung mittels Extrusion wird ein Randflächenmodell erzeugt, dessen krummlinige Flächen wiederum durch planare approximiert werden können.

Im Zusammenhang mit dem Laserscanning ist die Modellierung der Punktwolke als Randflächenmodell, welches sich ausschließlich aus Dreiecksflächen zusammensetzt (Triangulierung) eine adäquate Repräsentation für die abgetastete Objektoberfläche. Adäquat, weil diese Triangulierung relativ hypothesenfrei ist, was die Dreiecksbildung benachbarter Punkte angeht. Sie ist zudem verlustfrei, weil sie eine interpolierte Fläche darstellt. Im Kapitel 7.3 über die automatische Extraktion von Objektgeometrien aus Laserscannerdaten geht es darum, das Randflächenmodell der Triangulierung in ein Randflächenmodell aus Polyedern zu überführen. Die Polyeder repräsentieren dann Wände, Decken, Böden etc. einer Bauwerksgeometrie.

Kapitel 6

Grundalgorithmen der geometrischen Datenverarbeitung und Ausgleichsrechnung

6.1 Grundalgorithmen der geometrischen Datenverarbeitung

Ein Punkt \mathbf{p}_i mit dem Namen i hat die kartesischen Koordinaten x_i, y_i und z_i . Er wird als Punktvektor im \mathbb{R}^d betrachtet und als $d \times 1$ -Matrix (Spaltenvektor) dargestellt.

$$\mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^3 = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$$

6.1.1 Halbebenentest

Gegeben sind drei Punkte $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ und \mathbf{p}_0 in der Ebene (\mathbb{R}^2). Die Frage ist nun, liegt \mathbf{p}_0 auf der linken oder rechten Seite der Geraden von \mathbf{p}_1 nach \mathbf{p}_2 . Ebenso gut kann man fragen, ob das Polygon von \mathbf{p}_1 über \mathbf{p}_2 nach \mathbf{p}_0 nach rechts oder nach links abbiegt. Eine zuverlässige Lösung ohne Fallunterscheidung ist die Betrachtung der Dreiecksfläche A_Δ , die durch die drei Punkte gebildet wird.

$$\begin{aligned} A_\Delta &= \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_0 \\ y_1 & y_2 & y_0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \\ &= \frac{1}{2} ((x_0 - x_1)(y_0 + y_1) + (x_2 - x_0)(y_2 + y_0) + (x_1 - x_2)(y_1 + y_2)) \end{aligned}$$

Der Punkt \mathbf{p}_0 liegt links, wenn die Fläche negativ ist und rechts wenn sie positiv ist. Ergibt sie eine Fläche $A_\Delta = 0$ so liegt \mathbf{p}_0 auf der Geraden von \mathbf{p}_1 nach \mathbf{p}_2 .

Mit dem Halbebenentest kann auch die Reihenfolge der drei Punkte bestimmt werden. Bei einer negativen Fläche sind die Punkte gegen den Uhrzeigersinn, andernfalls im Uhrzeigersinn, angeordnet.

Für drei Punkte $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ und \mathbf{p}_3 im Raum (\mathbb{R}^3) ist der Umlaufsinn ebenfalls durch die Dreiecksfläche ablesbar.

$$A_\Delta = \frac{1}{2} \|(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times \mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1\|$$

6.1.2 Schnitt eines Dreiecks mit einem Strahl

Gegeben sind die drei Eckpunkte $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ und \mathbf{p}_3 eines Dreiecks im \mathbb{R}^3 und ein Strahl

$$\vec{s} : \mathbf{p}_0 + t\mathbf{n}_{0,s},$$

der im Punkt \mathbf{p}_0 startet und sich in Richtung \mathbf{n}_s ausbreitet. Gesucht ist nun der Schnittpunkt \mathbf{p}_s , wenn es ihn denn gegeben sollte, mit der Dreiecksfläche.

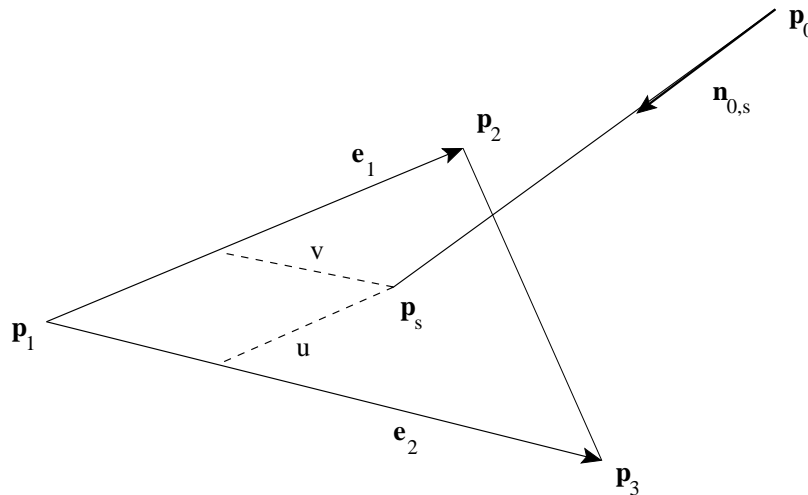


Abbildung 6.1: Schnitt Strahl/Dreieck.

Aus den Eckpunkten des Dreiecks werden zuerst die Basisvektoren \mathbf{e}_1 und \mathbf{e}_2 für ein dreiecksbezogenes Koordinatensystem berechnet.

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1$$

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1$$

Der Schnittpunkt wird bezüglich der Basisvektoren bestimmt, was auf die Koordinaten u und v im Dreieckssystem führt (Abbildung 6.1).

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \mathbf{n}_{0,s} \times \mathbf{e}_2 \\ \det &= \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{r} \\ \mathbf{b} &= \mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_1, \quad \mathbf{c} = \mathbf{b} \times \mathbf{e}_1 \\ u &= \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{r}}{\det}, \quad v = \frac{\mathbf{c} \cdot \mathbf{n}_{0,s}}{\det} \end{aligned}$$

Die Dreiecksfläche wird durch den Strahl genau dann im Inneren getroffen, wenn gilt:

$$u \in [0, 1] \quad \cap \quad v \in [0, 1],$$

unter der Voraussetzung, dass der Strahl nicht in der Dreiecksebene verläuft ($\det \neq 0$). Der gesuchte Schnittpunkt ergibt sich dann mit

$$t = \frac{\mathbf{c} \cdot \mathbf{e}_2}{\det}$$

zu

$$\mathbf{p}_s = \mathbf{p}_0 + t\mathbf{n}_{0,s}.$$

6.2 Konvexe Hülle und Triangulierung

Ein (abstrakter) *Graph* besteht aus einer Knotenmenge V und einem System E von Kanten, das aus Elementen von $V \times V$ besteht. Dabei bedeutet $(p, q) \in E$, dass p und q mit einer Kante e verbunden sind. Man kann einen Graphen $G = (V, E)$ im \mathbb{R}^2 oder auf einer anderen Fläche *geometrisch* realisieren, indem man seine Knoten auf paarweise verschiedene Punkte abbildet und seine Kanten auf einfache Pfade. Die Pfade verbinden die entsprechenden Punkte und besuchen unterwegs keine anderen Punkte. Das Ergebnis wird *geometrischer Graph* genannt.

In der Wahl der Punkte, auf die die Knoten abgebildet werden, und in der Festlegung der Pfade steckt viel Freiheit. Zwei Realisierungen eines Graphen auf derselben Fläche werden *äquivalent* genannt, wenn sie durch stetige Verformung der Kantenwege und Verschiebung der Knoten ineinander überführt werden können, ohne dass jemals ein Kantenpfad über einen Knoten „hinweggehoben“ werden muss. Von besonderem Interesse sind kreuzungsfreie geometrische Graphen, bei denen sich keine Kanten schneiden. Man nennt einen abstrakten Graphen *planar*, wenn er sich im \mathbb{R}^2 kreuzungsfrei geometrisch darstellen lässt. Innerhalb der geometrischen Realisierung eines planaren Graphen werden Flächen f gebildet, die von den Kanten umschlossen (begrenzt) werden. Für die Anzahl der Knoten n_v , Kanten n_e und Flächen n_f eines kreuzungsfreien geometrischen Graphen in der Ebene und der Anzahl seiner Zusammenhangskomponenten n_s gilt die Eulersche Formel.

$$n_v - n_e + n_f = n_s + 1.$$

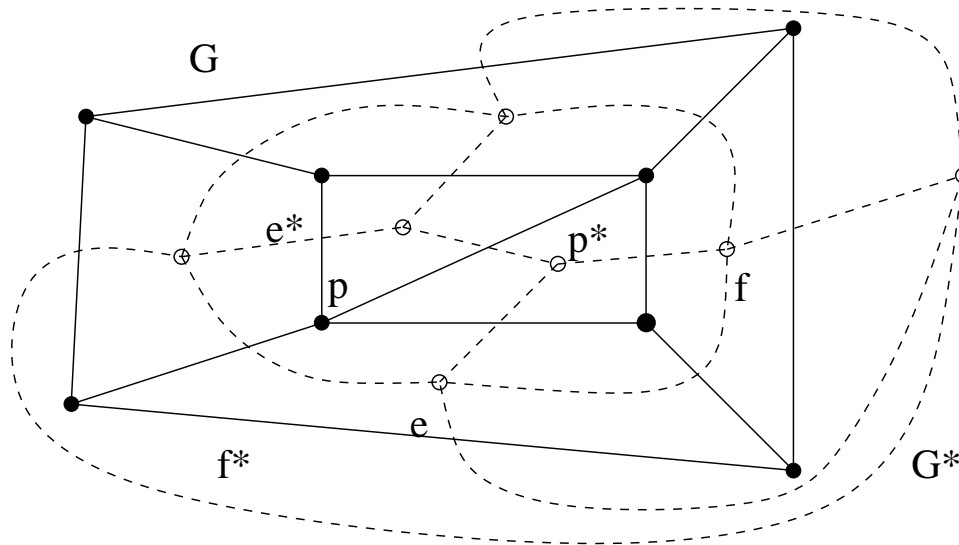


Abbildung 6.2: Ein Graph G und sein dualer Graph G^* .

Dies ist die Übertragung der Gleichung 5.11 für den zweidimensionalen Raum. Ein wichtiges Prinzip der Graphentheorie ist das Prinzip der *Dualität*. Für einen kreuzungsfreien, nichtleeren, zusammenhängenden ($n_s = 1$) Graphen G auf der Kugeloberfläche kann sein *dualer Graph* G^* wie folgt konstruiert werden (Abbildung 6.2).

- Im Inneren jeder Fläche f von G wird ein Punkt p_f^* gewählt. Diese Punkte bilden die Knoten von G^* .
- Für jede Kante e von G mit den angrenzenden Flächen f_{links} und f_{rechts} werden die Knoten $p_{f_{\text{links}}}^*$ und $p_{f_{\text{rechts}}}^*$ mit einer Kante e^* verbunden. Jede Kante e^* darf dabei nur die Kante e und sonst keine andere kreuzen.

Der Graph G^* kann nach der gleichen Konstruktionsvorschrift in den Graphen G überführt werden. Damit ist G zugleich der duale Graph zu G^* . Der besondere Vorteil des Dualismus liegt darin, dass Unbekanntes bezüglich G leicht aus Bekanntem bezüglich G^* abgeleitet werden kann. Werden z. B. für einen Knoten p_0 des Graphen G die Knoten p_i , die über eine Kante (p_0, p_i) miteinander verbunden sind, als direkte Nachbarknoten verstanden, so liefert die Fläche f^* von G^* , in der p_0 liegt, den Nachbarschaftsbereich für p_0 . Wird dem Graphen G ein neuer Knoten hinzugefügt, der innerhalb von f^* liegt, so kann daraus geschlossen werden, dass die Beziehungen „direkter Nachbarknoten“ für den Knoten p_0 durch den neuen Knoten verändert werden.

6.2.1 Konvexe Hülle

Die *konvexe Hülle* $ch(A)$ einer Teilmenge A des \mathbb{R}^n ist die kleinste konvexe Menge im \mathbb{R}^n , die A enthält.

Ist eine Menge A an Punkten $p \in A$ in der Ebene gegeben, dann enthält die konvexe Hülle $ch(A)$ insbesondere die Eckpunkte eines Polygons, das die konvexe Hülle berandet. Dieses Polygon wird *konvexes Polygon*

genannt. Für jede Kante des konvexen Polygons gilt, dass alle Punkte der Menge A innerhalb genau einer Halbebene liegen, die durch die Polygonkante definiert ist oder auf der Polygonkante liegen. Umläuft das konvexe Polygon die Menge A im Uhrzeigersinn, so liegen die Punkte jeweils rechts der Geraden, die durch die Polygonkanten gegeben sind. Die Komplexität zur Berechnung der konvexen Hülle im \mathbb{R}^2 und \mathbb{R}^3 ist $O(n \log n)$.

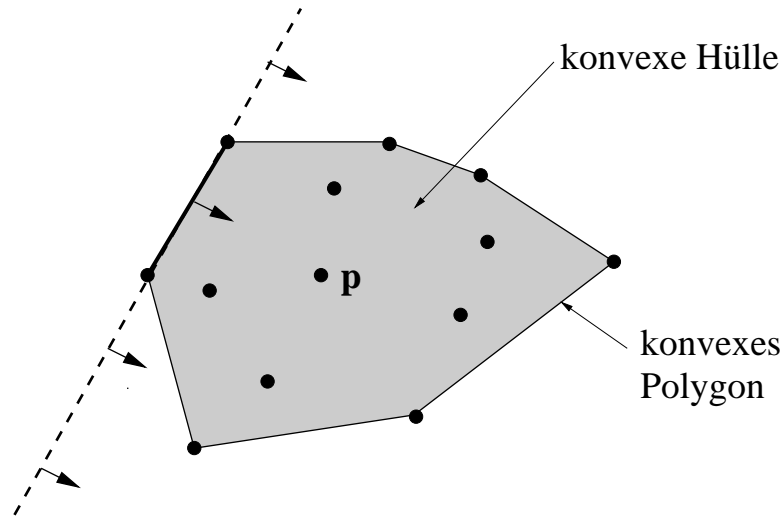


Abbildung 6.3: Konvexe Hülle einer Punktmenge.

6.2.2 Delaunay-Triangulierung

Allgemein versteht man unter einer *Triangulierung* einer Punktmenge S eine maximale Menge von Liniensegmenten mit Endpunkten in S , von denen sich je zwei höchstens in ihren Endpunkten schneiden. Die Kanten der konvexen Hülle $ch(S)$ gehören zu jeder Triangulierung von S . Eine genaue Definition wird in [HL92, S. 379] gegeben.

Definition: Eine Menge $\mathbf{T} = \{i, j, k, \dots\}$ bestehend aus m Tripeln von Indizes $i, j, k \in 1, \dots, n$ bildet eine Triangulierung der Punktmenge $S = \{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n\}$ genau dann, falls gilt:

- die Punkte \mathbf{p}_i , \mathbf{p}_j und \mathbf{p}_k eines Tripels bilden die drei Ecken eines Dreiecks,
- der Durchschnitt des Inneren zweier Dreiecke ist leer, d.h. die Dreiecksseiten schneiden sich nur in den Eckpunkten,
- die Vereinigung aller Dreiecke ergibt die konvexe Hülle $ch(S)$.

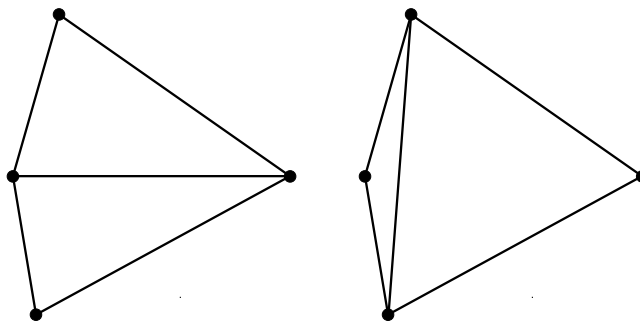


Abbildung 6.4: Zwei Möglichkeiten für die Triangulierung eines Vierecks.

Danach sind für eine gegebene Punktmenge verschiedene Triangulierungen möglich. Durch Wahl eines geeigneten Kriteriums können optimale Triangulierungen definiert werden. Zwei häufig anzutreffende und sinnvolle Kriterien sind:

Kriterium der kürzeren Diagonalen Bei der Betrachtung eines triangulierten Vierecks (Abbildung 6.4) wird die Triangulierung bevorzugt, bei der die kürzere der zwei möglichen Diagonalen im Viereck als Kante enthalten ist. Dieses Kriterium vermeidet nicht das Erzeugen von langen dünnen Dreiecken, insbesondere in der Nähe des konvexen Polygons, die vom Standpunkt der Approximationstheorie aus unerwünscht sind und die zu numerischen Schwierigkeiten führen.

Max-Min-Winkelkriterium Bei Max-Min-Winkelkriterium wird so trianguliert, dass Dreiecke entstehen, dessen kleinster Winkel möglichst groß ist. Man versucht so die Bildung von langen dünnen Dreiecken zu vermeiden.

Eine Triangulierung nach dem Max-Min-Winkelkriterium erzeugt die so genannte *Delaunay-Triangulierung*. Die Delaunay-Triangulierung wird bevorzugt benutzt, da sie als dualen Graphen das Voronoi-Diagramm (auch Thiessen- oder Dirichlet-Diagramm genannt) hat. Das Voronoi-Diagramm lässt sich durch Errichten der Mittelsenkrechten der Verbindungsgeraden $(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j)$ erzeugen. Aus den Schnittpunkten der Mittelsenkrechten ergeben sich die Punkte \mathbf{p}^* des Voronoi-Diagramms. Eine weitere Eigenschaft der Delaunay-Triangulierung ist, dass innerhalb des Umkreises, gebildet aus den Dreieckspunkten, kein weiterer Punkt aus S liegt. Damit ist gewissermaßen gewährleistet, dass die Eckpunkte eines Dreiecks in „nachbarschaftlicher Beziehung“ zueinander stehen. Aus einer Delaunay-Triangulierung können für einen Punkt \mathbf{p}_i alle direkten Nachbarpunkte $\mathbf{p}_{i(j)}$ ($i(j) = \{k_1, k_2, \dots, k_l\}$) mit den kürzesten Entfernungen auf einfache Weise ermittelt werden. Über die Kanten

$$E = \{(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_{i(1)}), (\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_{i(2)}), \dots, (\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_{i(l)})\}$$

ist die Information über die Nachbarpunkte in der Triangulierung enthalten.

Interessant an der Delaunay-Triangulierung ist weiterhin der Zusammenhang mit der konvexen Hülle einer auf eine Paraboloidfläche transformierten Punktmenge. Im Zweidimensionalen ist die Delaunay-Triangulierung identisch mit der Parallelprojektion in die xy -Ebene des unteren Teils der konvexen Hülle, der in die dritte Dimension transformierten Punkte $\mathbf{p}(3D)_i = (x_i, y_i, x_i^2 + y_i^2)$. Die Bestimmung der Delaunay-Triangulierung im \mathbb{R}^2 kann somit auf die Bestimmung einer konvexen Hülle im \mathbb{R}^3 mit der Komplexität $O(n \log n)$ zurückgeführt werden.

Es sind verschiedene Algorithmen zur Erzeugung von Triangulierungen entwickelt worden ([HL92, S. 379ff], [Kle97, Kap. 5.4] und [O'R98]). Ein Algorithmus nach dem *sweep*-Paradigma wurde von *Fortune* entwickelt ([For87]). Im Programm *triangle* von *Shewchuk* ist darüberhinaus ein Algorithmus nach dem *divide and conquer*-Paradigma und ein *incremental-insertion*-Algorithmus implementiert ([She96]).

6.3 Grundalgorithmen der Ausgleichsrechnung

6.3.1 Ausgleichende Ebene

Nach den Ausführungen von [Dri93, S. 44ff] lässt sich eine ausgleichende Ebene durch N gemessene Raumpunkte \mathbf{p}_i im Sinne der Minimierung der Summe der Verbesserungsquadrate berechnen, wobei die Verbesserungen v_i orthogonal zur Ausgleichsebene (Abstände) stehen, wenn die Ebene in der Hesseschen Normalform modelliert wird. Die Verbesserungsgleichungen lauten mit dem normierten Normalenvektor \mathbf{n}_0 der Ebene und dem Abstand d der Ebene zum Koordinatenursprung:

$$v_i = \hat{n}_{0,x}x_i + \hat{n}_{0,y}y_i + \hat{n}_{0,z}z_i - \hat{d}.$$

Werden schwerpunktbezogene Koordinaten

$$x'_i = x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_i, \quad y'_i = y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N y_i, \quad z'_i = z_i - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N z_i$$

eingeführt, so ist der Abstand d eliminiert und die Modalmatrix \mathbf{A} zur Bestimmung des gesuchten Normalenvektors ergibt sich zu:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 \\ x'_1 & y'_2 & z'_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_N & y'_N & z'_N \end{bmatrix}.$$

Durch eine spektralen Zerlegung der symmetrischen Normalgleichungsmatrix

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$$

werden die Eigenwerte λ_1, λ_2 und λ_3 sowie die dazugehörigen normierten Eigenvektoren $\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2$ und \mathbf{w}_3 ermittelt ([PFTV88, S. 60ff]). Die Eigenvektoren stehen zueinander senkrecht und der zum kleinsten Eigenwert λ_{min} gehörende Eigenvektor läuft parallel zum gesuchten Normalenvektor $\hat{\mathbf{n}}_0$.

$$\hat{\mathbf{n}}_0 = \mathbf{w}_{min}$$

Der ausgeglichene Abstandsvektor \hat{d} berechnet sich zu:

$$\hat{d} = \frac{1}{N} (\sum \hat{n}_{x,0} x_i + \sum \hat{n}_{y,0} y_i + \sum \hat{n}_{z,0} z_i).$$

Diese Art der Berechnung einer ausgleichenden Ebene benutzt eine lineare Verbesserungsgleichung, so dass keinerlei Näherungswerte für die Ebenenparameter erforderlich sind. Durch die spektrale Zerlegung der Normalgleichungsmatrix ist gewährleistet, dass auch entartete Fälle, wie z. B. das alle Punkte \mathbf{p}_i auf einer Geraden liegen, mitberücksichtigt sind. Das Berechnungsverfahren ist insbesondere zur Berechnung von Näherungswerten für eine Standardausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen in Kombination mit anderen Beobachtungsgrößen, bei der auch Korrelationen zwischen den Punkten \mathbf{p}_i mit berücksichtigt werden sollen, hilfreich [Ker02c].

6.3.2 Ausgleichende Kugel

Zur Berechnung einer ausgleichenden Kugel in Bezug auf N Raumpunkte \mathbf{p}_i wird der Ansatz von [Ebe99, S. 5ff] verwendet. Ausgangspunkt ist die Verbesserungsgleichung für die fingierte Beobachtung der Abstände zu einer Kugel mit dem Radius r und den Koordinaten x_M, y_M, z_M des Kugelmittelpunktes \mathbf{p}_M :

$$v_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_M)^2 + (y_i - \hat{y}_M)^2 + (z_i - \hat{z}_M)^2} - \hat{r}. \quad (6.1)$$

Damit ist gewährleistet, dass die Verbesserungen zugleich Abstände zur Kugeloberfläche sind. Die nachfolgenden Rechenschritte minimieren die Summe der Quadrate dieser Abstände. Da eine nicht lineare Beziehung zwischen den Beobachtungen und den Unbekannten besteht, sind Näherungswerte $\mathbf{p}_{0,M}$ für den gesuchten Kugelmittelpunkt erforderlich. Näherungswerte für den Kugelradius sind nicht erforderlich, worin der besondere Vorteil dieser Berechnungsart liegt.

$$\begin{aligned} l_i &= \sqrt{(x_i - x_{0,M})^2 + (y_i - y_{0,M})^2 + (z_i - z_{0,M})^2} \\ \hat{r} &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N l_i \\ \bar{x} &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N y_i, \quad \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N z_i \\ \bar{l}_x &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{x_{0,M} - x_i}{l_i}, \quad \bar{l}_y = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{y_{0,M} - y_i}{l_i}, \quad \bar{l}_z = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{z_{0,M} - z_i}{l_i} \\ \hat{x}_M &= \bar{x} + \hat{r} \bar{l}_x, \quad \hat{y}_M = \bar{y} + \hat{r} \bar{l}_y, \quad \hat{z}_M = \bar{z} + \hat{r} \bar{l}_z \end{aligned}$$

Das Verfahren muss aufgrund der nichtlinearen Verbesserungsgleichung mehrmals iterativ durchgeführt werden, wobei der geschätzte Mittelpunkt $\hat{\mathbf{x}}_M$ als Näherungswert für die nächste Iteration benutzt wird.

Kapitel 7

Automatische Modellierung von 3D-Laserscanner-Daten

Die Aufgabe aus einer Punktwolke von dreidimensionalen Koordinaten eine Oberfläche eines Objektes zu rekonstruieren oder geometrische Charakteristiken zu ermitteln wird in der Fertigungsmesstechnik als Flächenrückführung (engl. *reverse engineering*) bezeichnet ([BK96, S. 42], [EH96, S. 153], [Geb00]). Eine Zusammenstellung verschiedener Ansätze für die Flächenrückführung im Rahmen des reverse engineering finden sich in [HD96]. Beim reverse engineering liegt der Schwerpunkt bei der Rekonstruktion von Werkstücken oder Produkten, die eine „organische“, künstlerische oder natürliche Oberflächenform haben, durch mathematisch beschreibbare Freiformflächen, B-Spline-Flächen oder NURBS, sodass für diese eine CAD-gestützte Bearbeitung möglich wird ([Ryb96, S. 19]). Als Sensoren zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke werden dabei Laserscanner (Triangulationsscanner), Koordinatenmessmaschinen oder photogrammetrische Aufnahmesysteme eingesetzt. Die auf die photographische Abbildung des Messobjekts basierenden Messverfahren stellen die inhaltliche Verbindung zur digitalen Bildverarbeitung her. In den Lehrbüchern zur digitalen Bildverarbeitung wird anhand von Tiefenbildern oder Tiefenkarten das Thema der dreidimensionalen Rekonstruktion behandelt ([Hab89], [Jäh89], [KZ92], [Hof93], [Hab95], [JB97], [BV98] u.a.).

Ein spezielles Gebiet der digitalen Bildverarbeitung ist die Medizinische Bildverarbeitung, die sich mit der Auswertung von Bilddaten von bildgebenden Diagnostiksystemen wie z. B. der Computertomographie, Magnetresonanztomographie, Röntgentechnik etc. beschäftigt ([Han00]). Hier wird die dreidimensionale Objektbeschreibung aus „Volumenbildern“ gewonnen, die durch das Übereinanderschichten von Schnittbildern entstehen.

Über die geometrische Objektrekonstruktion hinaus geht die Thematik, aus einem Bild weitere Informationen oder Wissen zu extrahieren, um damit zu einem computergestützten Bildverstehen zu kommen. Mit dieser Aufgabe beschäftigt sich das Fachgebiet Computer Vision, welches neben der digitalen Bildverarbeitung auch Bereiche der Mustererkennung und der künstlichen Intelligenz beinhaltet ([Pin94, S. 6]).

Die unterschiedlichen Verfahren zur Rekonstruktion von Objektmerkmalen, insbesondere der Objektgeometrie, aus den Bereichen der Digitalen Bildverarbeitung, der medizinischen Bildverarbeitung, des Computer Vision und der Photogrammetrie lassen sich in ein einheitliches Auswerteschema, wie in Abbildung 7.1 dargestellt wird, einordnen.

Am Anfang steht die Datenerfassung mit einem oder mehreren geeigneten Sensoren. Die originären Sensordaten werden einer Vorverarbeitung unterzogen, bei der die Daten gefiltert werden, um sie auszudünnen, sie zu glätten, um störendes Messrauschen zu beseitigen oder sie anderweitig in ihrer Qualität zu verbessern (z. B. Kontraststeigerung). Auch eine Umrechnung in eine andere Vektorbasis, z. B. durch eine Fouriertransformation, kann Bestandteil der Vorverarbeitung sein. Innerhalb der aufbereiteten Daten werden im nächsten Schritt charakteristische Merkmale für jedes Datenelement berechnet. In der anschließenden Segmentierung werden Bereiche im Datenraum gesucht, die sich hinsichtlich der charakteristischen Merkmale ähnlich sind. Die Ähnlichkeit, oder was darunter verstanden werden soll, muss z. B. durch Verwendung einer geeigneten Metrik näher definiert werden. Aus dem Ergebnis der Segmentierung werden die gesuchten Informationen abgeleitet. Dies kann in Form einer Klassifikation geschehen, bei der die segmentierten Objekte mit Mustern verglichen werden. Komplexere geometrische Informationen lassen sich ableiten, wenn die Segmente zu Objekten zusammengefasst und klassifiziert werden (Synthese von Objekten oder Objekterkennung). Als letzter Schritt wird anhand der analysierten Datenmenge eine Reaktion abgeleitet in Abhängigkeit von der Ergebnisanalyse. Dies

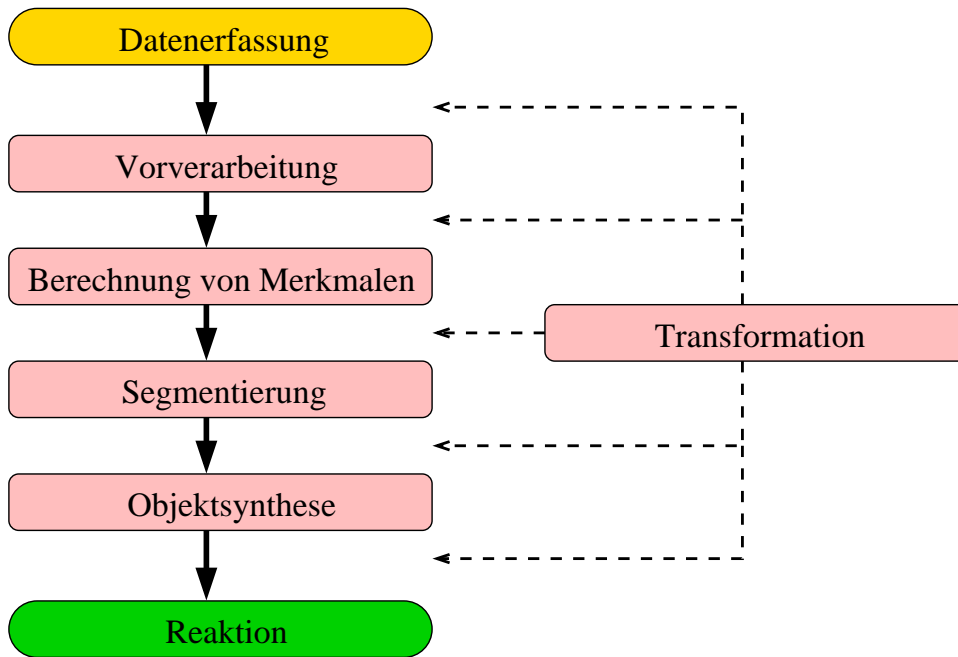


Abbildung 7.1: Die Auswerteschritte in einem allgemeinen Auswerteschema.

kann z. B. die Auslösung eines Alarms bei intolerierbaren Formabweichungen in der Produktion sein oder die Steuerung eines Roboters bewirken.

Vielfach kann das Objekt nicht durch eine einzelne Datenmenge (z. B. ein Bild) vollständig erfasst werden, sodass Daten von unterschiedlichen Standpunkten oder Blickpunkten des Sensors gemeinsam bearbeitet oder analysiert werden müssen. Hierbei ist es erforderlich, die einzelnen Datenmengen in ein übergeordnetes Bezugssystem zu transformieren. Dieser Arbeitsschritt der Transformation wird je nach Auswertekonzept vor, nach oder innerhalb des Auswerteschemas vorgenommen.

7.1 Ziele der Entwicklung

Im folgenden werden vier Verfahren zur automatischen Modellierung vorgestellt. Das erste Verfahren erlaubt eine **Flächenrückführung für Laserscannerdaten** von Objekten mit planaren quaderförmig angeordneten Flächen insbesondere von Gebäudeinnenräumen, die sich durch einfache Oberflächengeometriemodelle beschreiben lassen. Das Verfahren orientiert sich am oben beschriebenen einheitlichen Auswerteschema (Abbildung 7.1). Das zweite Verfahren hat zum Ziel, aus einer Punktwolke zweidimensionale **Schnitte** zu bestimmen, die unmittelbar zu Grundrissen und Vertikalschnitten oder Profilen weiterverarbeitet werden können. Hierzu wird die Flächenrückführung nach der Vorverarbeitung unterbrochen und dem Verfahren der automatischen Berechnung von Grundrissen und Schnitten zugeführt. Das recht einfache dritte Verfahren zeigt, wie die Punktwolke in ein dreidimensionales Modell per **kantenerhaltender Datenfilterung** überführt werden kann. Das vierte Verfahren ermöglicht die automatische Berechnung von **Orthophotos**, z. B. von Gebäudefassaden, durch Ergänzung der Punktwolke mit simultan erfassten digitalen Bildinformationen.

Bei der Auswahl und Konstruktion der Auswertealgorithmen wurde, soweit dies nicht zu einem unverhältnismäßig hohen Aufwand geführt hätte, auf folgende Kriterien Wert gelegt:

Universalität Die zu entwerfenden Auswerteverfahren und zu konstruierenden Algorithmen sollen für möglichst viele Auswerteziele einsetzbar sein.

Einfachheit Die Auswerteverfahren und Algorithmen sollen möglichst einfach zu beschreiben und zu implementieren sein. Ein Rückgriff auf Standardalgorithmen, wie z. B. der Delaunay-Triangulierung, ist dem aufwendigen Entwerfen eines speziellen, unter Umständen optimaleren Algorithmusses, vorzuziehen.

Geräteunabhängigkeit Einhergehend mit der Forderung nach Universalität ist das Ziel, geräteunabhängige Lösungen zu finden. Die Geräteunabhängigkeit wird insbesondere dadurch gewährleistet, dass die Punkt-

wolke nicht zwangsläufig in einem regelmäßigen Raster aufgemessen worden sein muss. Auch für Daten eines reflektorlosen Servo-Tachymeters müssen die Auswertalgorithmen geeignet sein.

Praxisorientiertheit Die Lösungen sollen Ergebnisse bereitstellen, die in der Praxis von Nutzen sind und sich gegenüber den konventionellen Verfahren behaupten können. So hat die Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen Ableitung von Schnitten oder die Berechnung von Orthophotos trotz eines damit verbundenen Rückfalles von einer 3D-Messung auf eine zweidimensionale Objektmodellierung für die Praxis eine große Bedeutung. Zweidimensionale Plandarstellungen bilden weiterhin die Schnittstelle zwischen dem Vermessungsingenieur und den Wissenschaftlern und Ingenieuren anderer Fachdisziplinen.

Automatisierungsgrad Das Erreichen eines Automatisierungsgrades von 100% wird nicht angestrebt, wohlweislich, dass dies nicht erfüllbar ist. Die Automatisierung soll vielmehr dazu beitragen, die große Datenflut der Laserscanner beherrschbar zu machen und so zu einer Beschleunigung der Auswertung zu kommen.

7.2 Die Punktwolke als originärer Messdatensatz

Im Abschnitt 4.2 sind die typischen Abtastungsarten von 3D-Laserscannern erläutert. Allen Abtastungsarten gemeinsam ist, dass der Laserstrahl ausgehend von einem Pol, dem Standpunkt des Laserscanners, schrittweise in verschiedene Raumrichtung abgelenkt wird. Die Raumstrecke D_{jk} , die mit dem Laser gemessen wird, erfolgt in der durch die zwei Winkel $H z_j$ und V_k vorgegebenen Richtung. Die Winkel $H z_j$ und V_k werden während des Scannens in festen Winkelschrittweiten $\Delta H z$ und ΔV verstellt, wobei in der Regel für $\Delta H z$ und ΔV der gleiche Wert z. B. 0.25° gewählt wird. Diese Art der Abtastung erzeugt $H z$ - und V -Profile, die senkrecht zueinander stehen, ähnlich den Breiten- und Längenkreisen eines Globus, wie in Abbildung 4.2(a) gut zu erkennen ist.

Für die Betrachtungen in diesem Kapitel gelten für eine Punktwolke $W(S)$ eines einzigen Scans, der vom Laserscanner-Standpunkt S aus erzeugt wurde:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_i &\in W(S) \\ \mathbf{P}_i &= \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = D_{jk} \begin{bmatrix} \sin H z_j \sin V_k \\ \cos H z_j \sin V_k \\ \cos V_k \end{bmatrix} + \mathbf{P}_S \\ \mathbf{P}_S &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ H z_j &= j \Delta H z \quad j \in [0, 1, \dots, \frac{2\pi}{\Delta H z}] \\ V_k &= k \Delta V \quad k \in [0, 1, \dots, \frac{\pi}{\Delta V}] \end{aligned}$$

Diese Definition für eine Punktwolke nutzt aus, dass dem Laserscanner ein gerätebezogenes Koordinatensystem einbeschrieben ist und durch ihn definiert wird. Der Ursprung dieses Scanner-Koordinatensystems fällt mit dem Schnittpunkt der Rotationsachsen und dem Nullpunkt des Entfernungsmessers zusammen. Die Rotation um die primäre Rotationsachse wird durch den Horizontalwinkel $H z$, die Rotation um die sekundäre Achse mit dem Vertikalwinkel V bezeichnet. Die Nullrichtung bzw. die Ausrichtung der x -Achse des Scanner-Koordinatensystems ist durch $H z_0 = 0$ definiert. Die Zählung des Vertikalwinkels beginnt im Zenit (z -Achse des Scanner-Koordinatensystems). Damit unterscheidet sich das Scanner-Koordinatensystems nicht vom konventionellen gerätebezogenem Koordinatensystem eines Tachymeters (Abbildung 4.1). Im Vergleich zum Tachymeter wird aber ein Laserscanner in der Regel nicht horizontaliert, insbesondere nicht bei camera-view-Laserscannern, d.h. die z -Achse fällt nicht mit der Schwerkrafttrichtung zusammen. Die Werte z_i sind somit auch keine Höhenwerte. Für die Transformation in ein übergeordnetes Bezugssystem (Kap. 7.5) mehrerer Punktwolken eines camera-view-Laserscannern sind daher ausreichend viele Referenzmarken vorzuhalten, um die drei freien Rotationen im Raum jeder Punktwolke bestimmen zu können. Bei panorama-view-Laserscannern hingegen ist nur die Drehung der Punktwolke um die Vertikalachse unbekannt.

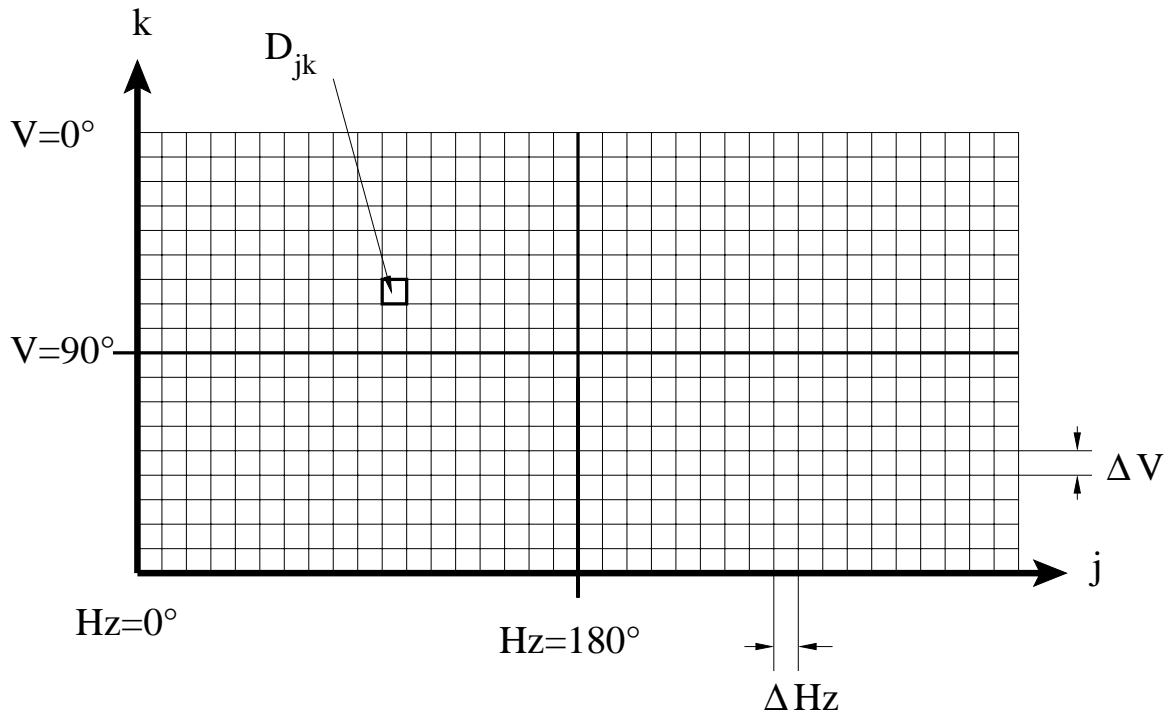


Abbildung 7.2: Die Punktwolke als Matrix von Raumstrecken (Distanzmatrix).

Die äquidistante Abtastung in den Rotationswinkeln erlaubt eine einfache Datenspeicherung der Punktwolke. Die Indizes j und k geben exakt die Richtung im Scanner-Koordinatensystems an, in welcher die Strecke D_{jk} ermittelt wurde. Die Streckenwerte können fortlaufend geordnet nach den Zeilen k und den Spalten j in einer Datei als Matrix gespeichert werden (Abbildung 7.2). Die Punktwolke lässt sich in Gestalt dieser Matrix einfach und schnell auf dem Computerbildschirm als Distanzbild darstellen. Hierzu müssen die Raumstrecken in einen Grau- oder Farbwert kodiert werden.

Die Abbildung 7.3 zeigt beispielhaft zwei derartige Codierungen für einen Innenraumscan ($\Delta Hz = \Delta V = 0.25^\circ$). Diese Art der Visualisierung kann genutzt werden, um sich schnell über den Erfolg einer Messung zu vergewissern. Datenlücken, verursacht durch den Zustand I nach Abschnitt 3.7, werden dabei durch eine besondere Farbgebung (z. B. rot oder blau) schnell auffällig. Häufig werden derartige Visualisierung durch die Laserscanner-Systeme schon während der Messung sukzessive angezeigt.

Die Speicherung und Weitergabe einer gemessenen Punktwolke als Distanzmatrix ist weit verbreitet, wird aber der Tatsache nicht gerecht, dass neben der Streckenmessung auch die Abtastwinkel Messabweichungen unterliegen. Im Sinne einer korrekten statistischen Betrachtung der Punktwolke sind daher alle drei Messwerte des Tripels ($H z_j$, V_k und D_{jk}) als Zufallsgrößen zu behandeln. Danach kann eine Strecke D_{jk} nicht fehlerfrei einer Zelle (j, k) innerhalb der Matrix zugeordnet werden. Zudem werden bei einigen Laserscannersystemen an den originären Messgrößen wichtige Kalibrierwerte angebracht, sodass die resultierenden Koordinaten (x_i, y_i, z_i) nicht mehr in aller Strenge in eine Distanzmatrix umgerechnet werden können. Aus diesen Gründen wird in Anlehnung an die obige Definition folgende Verallgemeinerung hinsichtlich der Abtastung vorgenommen.

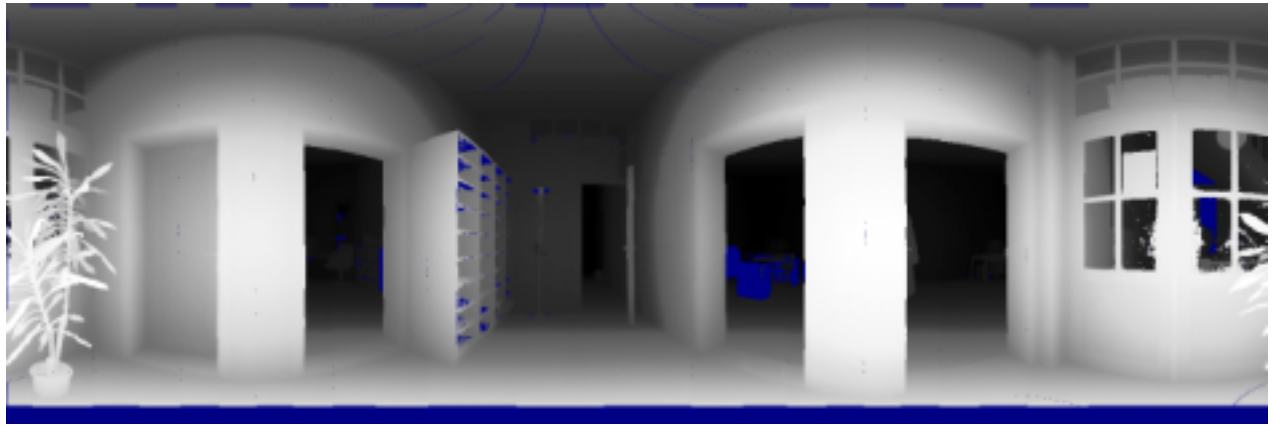
(a) Distanzbild mit 256 Grauwerten (je **dunkler** desto weiter entfernt)(b) Distanzbild mit 256 Grauwerten (je **heller** desto weiter entfernt)

Abbildung 7.3: Einfache Visualisierung einer Punktwolke durch grauwertcodierte Darstellung der Raumstrecken.

Definition: Eine Punktwolke W ist eine Menge von dreidimensionalen kartesischen Koordinaten (x_i, y_i, z_i) bezüglich des Laserscanner-Koordinatensystems eines einzigen Scans, der vom Pol (x_p, y_p, z_p) aus durch polare Streckenmessung erzeugt wurde.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} &\in W \\ \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} &= D_i \begin{bmatrix} \sin H z_i \sin V_i \\ \cos H z_i \sin V_i \\ \cos V_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \\ H z_i &\in [0, 2\pi] \\ V_i &\in [0, \pi] \end{aligned}$$

Die Punktwolke W hat zusammenfassend folgende Eigenschaften:

1. Die Punktwolke diskretisiert die **Oberfläche** des Messobjekts.
2. Vom Pol zum Objektpunkt bestand zum Zeitpunkt der Messung Sichtverbindung. Daraus kann geschlossen werden, dass das Messobjekt bezüglich dieser Sichtgeraden mit Ausnahme von durchsichtigen Dingen leer ist, d.h. das entlang der Sichtgerade keine Objektgeometrie modelliert werden kann und muß. (**Leerraumvermutung**)
3. Zwei Punkte P_i und P_j einer Punktwolke sind benachbart, wenn sie bezüglich ihrer Abtastwinkel $H z_i$ und $H z_j$ sowie V_i und V_j benachbart sind. (**Nachbarschaftsprinzip**)

4. Durch die Wahl der Abtastschrittweiten ΔH_z und ΔV wird festgelegt, dass nur Details der Objektgeometrie größer als $2D_i\Delta H_{z_i} \times 2D_i\Delta V_i$ modelliert werden sollen und können. Nach dem Abtasttheorem von Shannon muss die Abtastfrequenz (Nyquist-Frequenz) theoretisch mehr als das doppelte der größten vorkommenden Signalfrequenz betragen. In der Praxis der Messtechnik wird die Abtastfrequenz um den Faktor 5 – 10 größer als die gesuchte Signalfrequenz gewählt. Übertragen auf das Laserscanning sind Objektdetails durch mind. 5×5 Messpunkte zu diskretisieren. (**Abtasttheorem**)
5. Zwischen benachbarten Punkten der Punktwolke ist die Objektgeometrie linear zu interpolieren (**Interpolationsgebot**). Aufgrund des Abtasttheorems ist es nicht möglich, Details zwischen zwei benachbarten Punkten zu ermitteln. Die Lücke zwischen ihnen darf im Sinne einer flächenhaften Erfassung als geschlossen betrachtet werden.
6. Die Punktwolke beschreibt die Objektoberflächengeometrie insoweit vollständig, wie sie vom Pol des Laserscanners aus sichtbar war. (**Vollständigkeitsvermutung**)

7.3 Automatische Extraktion von Objektgeometrien

Die Schritte der herkömmlichen Auswertung von Punktwolken sind der Abbildung 7.4 in Anlehnung an das Ablaufdiagramm in [NW95, S. 167] zu entnehmen. Am Anfang dieser Auswertestrategie steht die Transformation (engl. *registration*) der einzelnen Punktwolken in ein gemeinsames Bezugssystem. Man kann dieses Verfahren daher kurz: „Auswertung mit **früher** Transformation“ nennen. Nachdem alle für ein Objekt relevanten Punktwolken aufeinander transformiert sind, werden manuell aus dem sich ergebenden Punkthaufen Bereiche selektiert (ausgeschnitten), die anschließend mit ein und der derselben Oberflächenfunktion approximiert werden. Am Schluss der Auswertung steht das Verschneiden (Objektsynthese) der modellierten (approximierten) Einzeloberflächen zu einem geschlossenen Randflächenmodell.

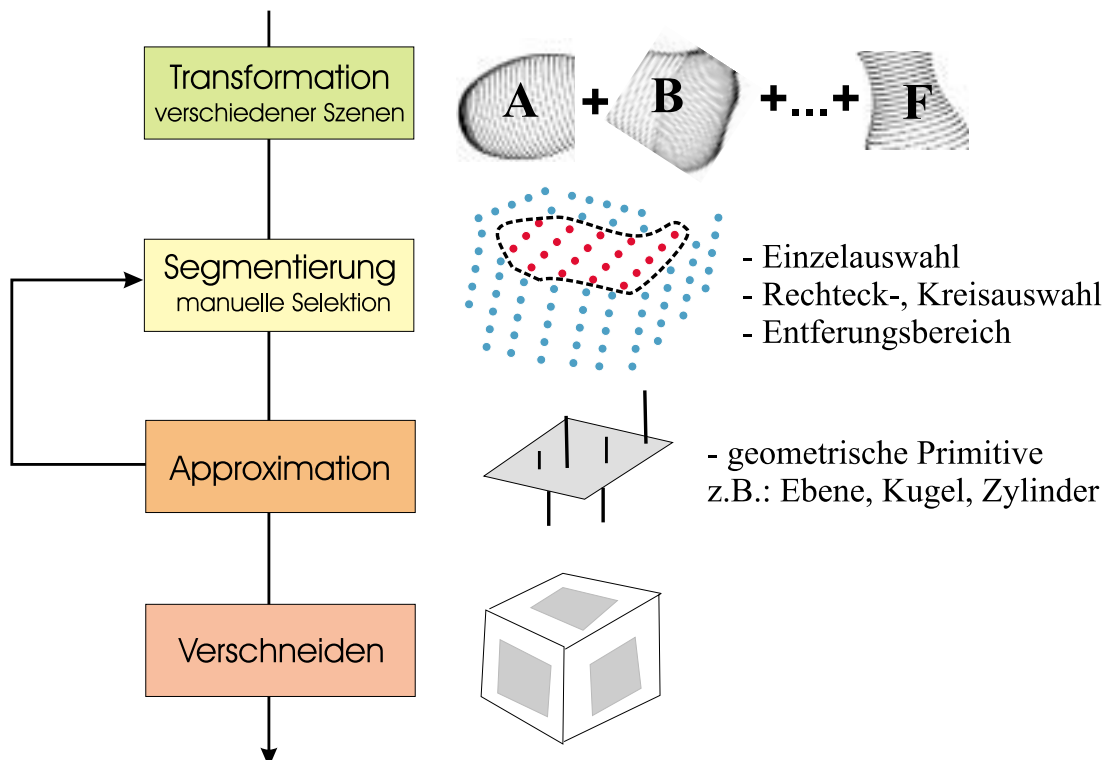


Abbildung 7.4: Konventionelle Auswertestrategie mit Transformation der einzelnen Scanszenen **vor** der Segmentierung, Approximation und dem Verschneiden.

Die Schritte der in dieser Arbeit vorgestellten Punktwolken-Auswertung sind der Abbildung 7.5 zu entnehmen. Hierbei werden im Gegensatz zur Auswertung mit „früher Transformation“ die Punktwolken bzw. die Randflächenmodelle erst am Ende der Auswertekette transformiert, sodass kurz von der „Auswertung mit **später** Transformation“ gesprochen werden kann. Bei dieser Auswertestrategie wird jede Punktwolke für sich

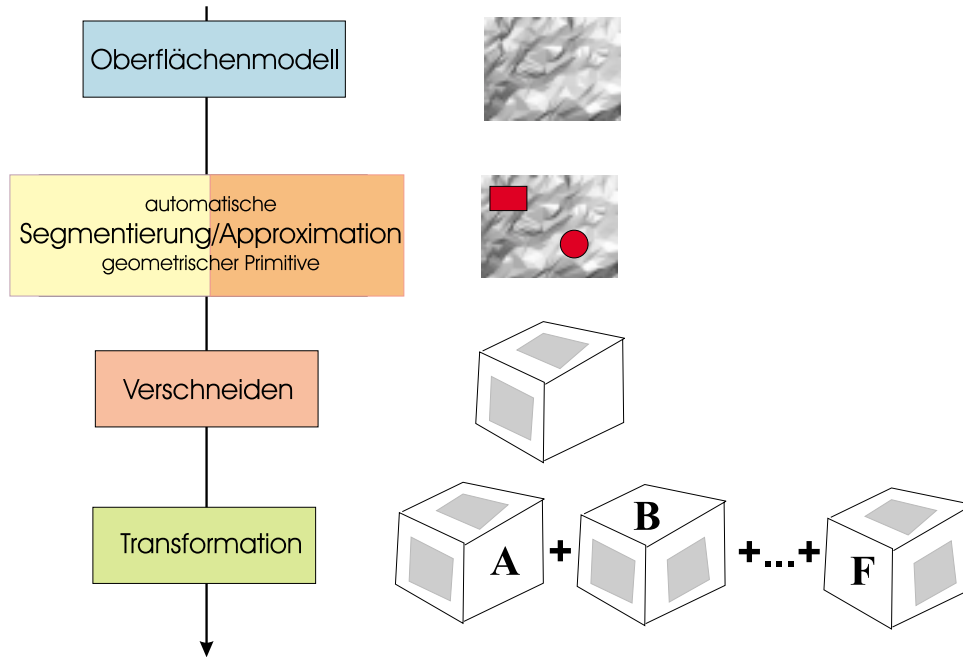


Abbildung 7.5: Strategie der automatischen Auswertung mit Transformation der einzelnen Scanszenen **nach** der Segmentierung, der Approximation und dem Verschneiden.

zuerst in ein Oberflächenmodell überführt und dann einer automatischen Segmentierung unterzogen. Aus den segmentierten Bereichen werden per Approximation Modelloberflächen berechnet, die dann zu einem Randflächenmodell verschnitten werden. Erst nachdem aus jeder Punktvolke ein Randflächenmodell erzeugt wurde, werden diese aufeinander transformiert. Der Vorteil dieser Strategie liegt darin, dass für die automatische Segmentierung die besonderen Eigenschaften einer Punktvolke (Definition S. 89) ausgenutzt werden können. Verstärkt kann dabei auf die Nachbarschafts-Eigenschaften zurückgegriffen werden.

7.3.1 Vorverarbeitung/Triangulierung

Am Anfang der Auswertestrategie Auswertung mit „später Transformation“ steht die Berechnung eines Oberflächenmodells für jede Punktvolke. Als Oberflächenmodell wird ein polygonales Dreiecksnetz erzeugt, bei dem jeweils drei benachbarte Punkte zu einer Dreiecksfläche verbunden werden.

Aus den kartesischen Koordinaten (x_i, y_i, z_i) werden die Raumstrecke D_i , der Horizontalwinkel $H z_i$ und der Vertikalwinkel V_i berechnet, dabei ist es unerheblich unter welcher Zielrichtung die D_i tatsächlich durch den Laserscanner gemessen wurde, solange die Punktvolken-Eigenschaften nicht verletzt werden.

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2}$$

$$H z_i = \arctan \frac{x_i - x_p}{y_i - y_p}$$

$$V_i = \arcsin \frac{z_i - z_p}{D_i}$$

Da eine Punktvolke die Diskretisierung einer Objektfläche ist, kann die Punktvolke als Fläche $\mathbf{W}_f(u, v)$ mit den Flächenparametern u und v umparametrisiert werden. Es wird folgende sehr einfache Parametrisierung als quadratische Plattkarte [Sch88, S. 76ff] der Richtungskugel vorgenommen:

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \mathbf{W}_f(u_i, v_i) = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix}$$

$$u_i = H z_i$$

$$v_i = V_i$$

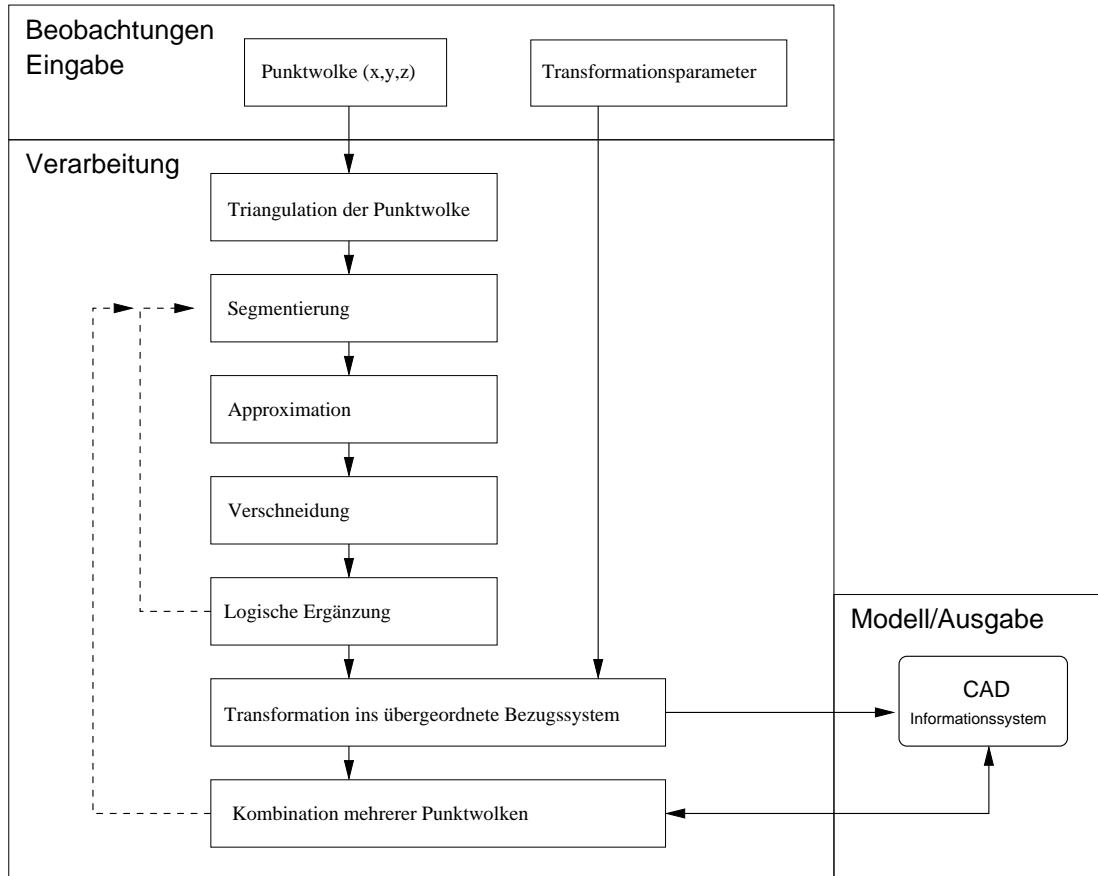


Abbildung 7.6: Auswerteschritte der automatischen Extraktion von Objektgeometrien aus Laserscannerdaten.

Damit gleicht diese Abbildung der Beschreibung der Punktwolke als Distanz-Matrix, mit dem Unterschied, dass keine festen Werte für die Ablenkwinkel eingehalten werden müssen. Bezüglich der Metrik dieser „Verebnung“ der Punktwolke ist festzuhalten, dass diese Plattkarte in den äquatorialen Bereichen ($V_i \approx 90^\circ$) annähernd flächentreu ist, während die Breitenverzerrung zu den Polen hin stark ansteigt. Die Pole selbst werden als Geraden abgebildet. Durch die Verebnung der Punktwolke wird die als geschlossene diskretisierte Objektfläche an den Polen und am Nullmeridian aufgeschnitten. Rechts und links des Nullmeridians ursprünglich nahe beieinander liegende Punkte sind in der Abbildung weit voneinander entfernt.

Zur Bildung des Dreiecksnetzes wird auf die Flächenkoordinaten (u_i, v_i) eine Delaunay-Triangulierung angewendet (Kapitel 6.2.2). Durch die Delaunay-Triangulierung entsteht ein Topologiemodell aus Dreiecken (*face*), Kanten (*edge*) und Knoten (*vertex*), das die Punktwolke als Randflächenmodell nach Kapitel 5.4.3 darstellt. Das Randflächenmodell wird in einer abgewandelten winged-edge-Struktur verwaltet.

Pseudocode 7.1 Datenstruktur für Oberflächenmodell einer Punktwolke. _____

```
typedef struct { double x[3]; /* x, y, z */
                double uv[2]; /* Flächenparameter u, v */
            } Tpoint;
Tpoint  Koordinatenliste[MAX_POINTS];

typedef struct { int  idx; /* Verweis in die Koordinatenliste */
                } TscVertex; /* -vertex- */

typedef struct { int  vertex_i[2]; /* 0: von, 1:nach*/
                int  triangle_i[2]; /* 0: links, 1:rechts*/
            } TscEdge; /* -edge- */
```

```

typedef struct { int vertex_i[3]; /* im Uhrzeigersinn */
                int edge_i[3]; /* -loop- im Uhrzeigersinn */
                } TscTriangle; /* -face- */

typedef struct { int num_triangles;
                TscTriangle *triangles;
                int num_edges;
                TscEdge *edges;
                int num_vertices;
                TscVertex *vertices;
                } TscMesh;

```

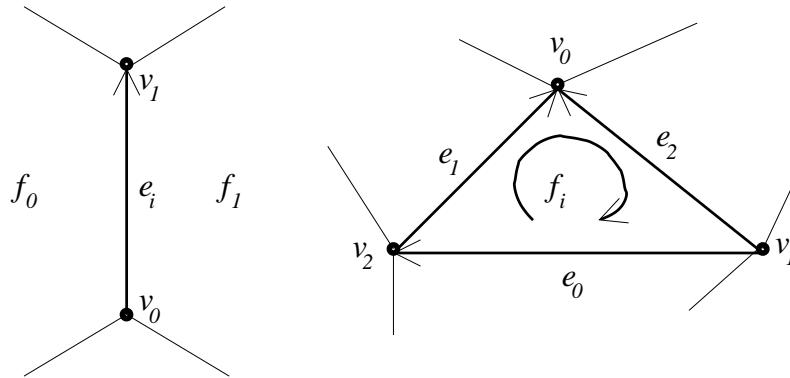


Abbildung 7.7: Abgewandelte winged-edge-Struktur.

Der Pseudocode 7.1 zeigt die verwendete Datenstruktur. Zentrale Elemente dieser Speicherart sind die getrennten Listen für die Dreiecke (`*triangles`), Kanten (`*edges`) und Knoten (`*vertices`). Damit kann die gesamte Oberfläche getrennt nach diesen drei Grundobjekten durchlaufen werden. Jedes Dreieck (`TscTriangle`) hält die Verweise auf die drei Eckpunkte und die drei Kanten jeweils im Uhrzeigersinn geordnet. Für jede Kante (`TscEdge`) werden die Verweise für die Anfangs- und Endknoten sowie Verweise für das rechts- und linksliegende Dreieck gespeichert. Das Datenelement `TscVertex` beinhaltet lediglich einen Verweis auf die Koordinatenliste und dient so zur Trennung zwischen Geometrie- und Topologieinformationen. Für die Triangulierung wird auf die Flächenkoordinaten `uv[2]` aus dem Datenelement `Tpoint` zugegriffen. Für die dreidimensionale Darstellung hingegen werden die Koordinaten `x[3]` im Laserscanner-Bezugssystem benutzt. Die Datenstruktur ist somit gegenüber einer klassischen winged-edge-Struktur hoch redundant, erlaubt aber einen recht einfachen Zugriff auf sämtliche topologischen Details und kann je nach Anforderung auf unterschiedliche Weise durchwandert werden.

Das Oberflächenmodell kann genutzt werden, um einfache Strukturkriterien der Punktwolke zu berechnen. Als interessantes Beispiel für die Berechnung charakteristischer Merkmale im allgemeinen Auswerteschema (Abbildung 7.1) soll die Punktwolke hinsichtlich der lokalen Punktdichte am Objekt klassifiziert werden. Als Punktdichte ρ sei die Anzahl von Punkten n pro Flächeninhalt A eines lokal beschränkten Bereiches einer Punktwolke bzw. aus dem daraus abgeleiteten Oberflächenmodell definiert.

$$\rho = \frac{n}{A}$$

Zur Bestimmung der lokalen Bezugsfläche wird jeder Knoten bzw. Ecke des Oberflächenmodells betrachtet. Anhand der n Nachbarecken $\{\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}, \dots, \mathbf{p}_{i,n}\}$ einer Ecke \mathbf{p}_i (Pivot) ist eine lokale Bezugsfläche gegeben. Für die Menge der Nachbarecken wird die konvexe Hülle bezüglich der Flächenparameter $\{(u_{i,1}, v_{i,1}), (u_{i,2}, v_{i,2}), \dots, (u_{i,n}, v_{i,n})\}$ berechnet. Der Flächeninhalt dieser konvexen Hülle bezüglich des Laserscanner-Bezugssystems wird als Flächeninhalt A der Bezugsfläche interpretiert. Die Pivot-Ecke \mathbf{p} fließt nicht in die Berechnung von A ein, damit die Punktdichte ein ungestörtes Umgebungsmaß für die Pivot-Ecke darstellt. Für Ecken am Rande des Oberflächenmodells, die weniger als drei Nachbarecken haben, kann keine sinnvolle Punktdichte berechnet werden. Sie wird für diese Ecken auf Null gesetzt.

Ein Ergebnis der Klassifizierung nach der Punktdichte zeigt die Abbildung 7.8 für die bereits in der Abbildung 7.3 gezeigte Punktwolke. Die Darstellung ähnelt stark einem Reflektivitäts- bzw. Intensitätsbild. Besonders hervorgehoben werden Dichteunterschiede an den Flächenübergängen, da hier durch vor- bzw. zurückspringende Messpunkte die Auftrefffläche für die Laserscannermessungen verkippt ist und so einen großen Flächeninhalt hat. Gegenüber den angrenzenden Flächen verringert sich die Punktdichte daher sprunghaft.

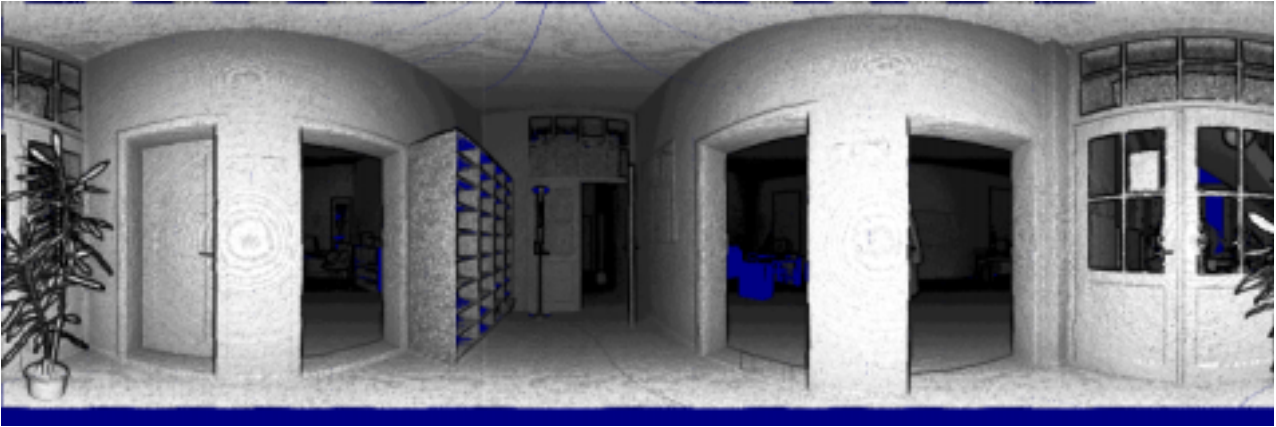


Abbildung 7.8: Die Punktwolke klassifiziert nach der Punktdichte.

7.3.2 Datenfilterung

Bevor der Segmentierungs-Algorithmus auf die Punktwolke erfolgreich angewendet werden kann, ist es bei Punktwolken einiger Laserscannersysteme erforderlich eine Datenfilterung vorzunehmen. Verursacht durch eine ungünstige Abstimmung zwischen der Messgenauigkeit und der Quantisierung der Streckenmesswerte treten systematische Messabweichungen¹ insbesondere im Nahbereich auf (Abbildung 7.9).

Wird für die Abspeicherung der Streckenmesswerte die kleinste signifikante Stelle z. B. 1 mm gewählt, so werden die Strecken maximal mit 1 mm aufgelöst unabhängig von der erreichbaren Messgenauigkeit. Liegt nun die Messgenauigkeit unterhalb der Auflösung z. B. bei 0,5 mm, so werden die Messungen durch das Auf- und Abrunden auf volle Millimeter systematisch verfälscht. In der Abbildung 7.10 ist dieser Effekt dargestellt. Die Wand wird nicht wie zu erwarten durch solche Messpunkte diskretisiert, die innerhalb eines durch die Messgenauigkeit gegebenen Bandes zufällig streuen, sondern man erhält eine Diskretisierung mit Systematiken oberhalb der Genauigkeitsschwelle. Dieser Quantisierungseffekt ist umso heftiger je näher sich das Objekt zum Laserscanner befindet. Das resultierende Oberflächenmodell weist heftige morphologische Schwankungen auf; Täler und Berge wechseln sich ständig ab. Gerade für Innenraumvermessungen, bei denen auf kurzer Distanz zu vermessen ist, ist diese ungünstige Rauigkeit des Oberflächenmodells durch eine Glättung zu vermindern.

Als ein einfaches aber wirkungswolles Glättungsfilter kann ein Mittelwertfilter eingesetzt werden. Hierzu werden für jeden Pivot-Punkt \mathbf{p}_i die Nachbarpunkte $\{\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}, \dots, \mathbf{p}_{i,n}\}$ bestimmt und anhand derer folgende geglätteten Koordinaten \mathbf{p}'_i berechnet.

$$\mathbf{p}'_i = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} = \mathbf{p}_i + \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i,j}$$

Die originären Messdaten werden durch diese Glättung verändert, was im Allgemeinen nicht wünschenswert ist. Nachdem Glätten verliert die Triangulierung ihre Gültigkeit, sodass sie erneut auf die geglättete Punktwolke anzuwenden ist. Durch mehrmaliges Anwenden des Glättungsfilters werden die Systematiken aufgrund der ungünstigen Quantisierung beseitigt. Zugleich werden aber auch die Unstetigkeiten (Kanten) innerhalb des Randflächenmodells „weicher“, was sich ungünstig auf die anschließende Segmentierung auswirkt. Innerhalb des Segmentierungsalgorithmusses wird daher eine weitere Strategie zur Überwindung des Quantisierungseffektes vorgestellt.

¹In [Muc02] wird anhand einer Autokovarianzfunktion ein Signal von 1 mm ermittelt.

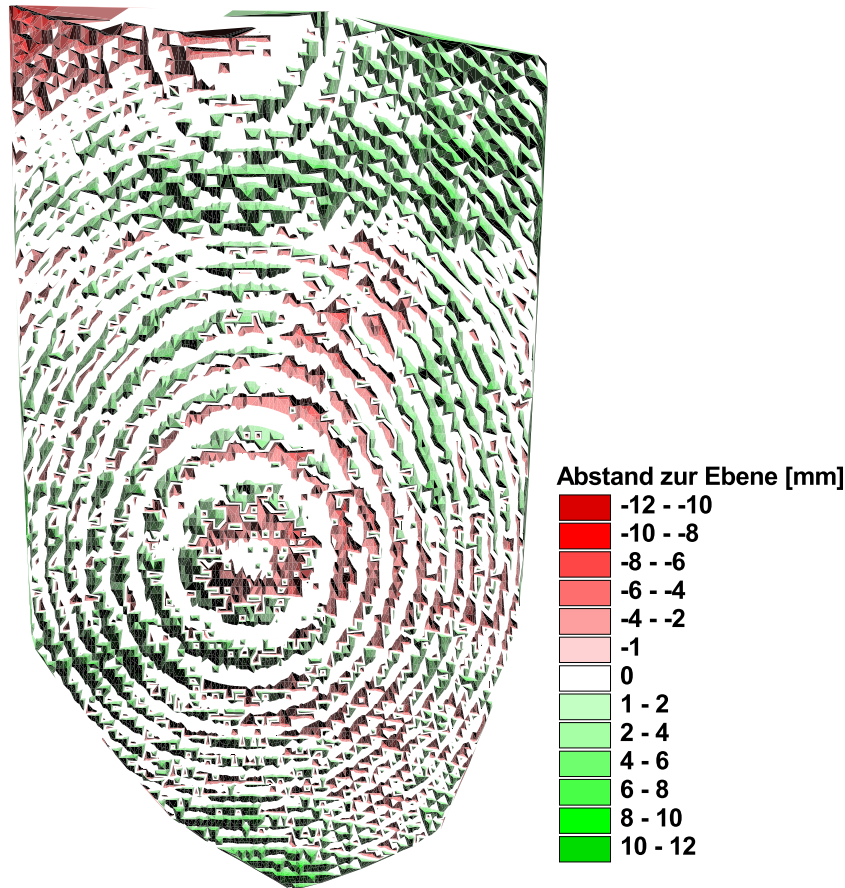


Abbildung 7.9: Abweichungen von einer idealen Ebene für einen Wandabschnitt (links oben zwischen den Türen in Abbildung 7.8).

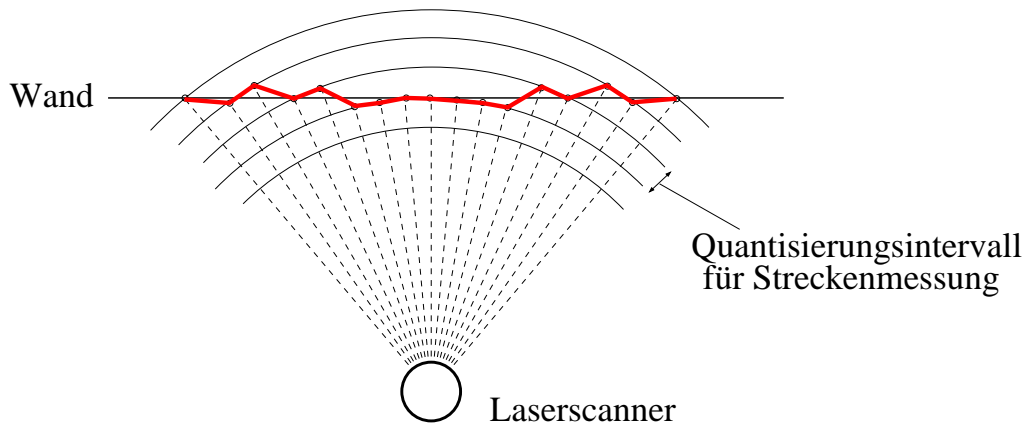


Abbildung 7.10: Auswirkung der Quantisierung in der Streckenmessung auf die Objektdiskretisierung.

7.3.3 Segmentierung

Grundgedanke der Segmentierung ist es, benachbarte Dreiecke des Oberflächenmodells zu einem größeren Flächenstück, im einfachsten Fall zu einer Raumebene, zusammenzufassen. Als Kriterium dafür, dass zwei aneinandergrenzende Dreiecksflächen zu ein und derselben planaren Flächen gehören, werden die Normalenvektoren der Dreiecksflächen benutzt. Der Normalenvektor \mathbf{n}_0 einer Dreiecksfläche mit den Eckpunkten \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 und \mathbf{p}_3 berechnet sich nach:

$$\mathbf{n} = (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1)$$

$$\mathbf{n}_0 = \frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|}$$

Die Richtung des Normalenvektors muss für alle Dreiecke einer Punktwolke in gleicherweise festgelegt werden. Sinnvoll ist es, den Normalenvektor in Richtung des Scannerstandpunktes auszurichten. Dies gelingt durch Ordnen der drei Eckpunkte im Uhrzeigersinn, wenn vom Laserscanner-Standpunkt aus auf das Oberflächenmodell geschaut wird.

Das Zuordnungskriterium ist der Winkel α_n um den sich die Normalenvektoren zweier angrenzender Dreiecke A und B unterscheiden.

$$\begin{aligned} \alpha_n &= \mathbf{n}_{0,A} \cdot \mathbf{n}_{0,B} \\ S &= \begin{cases} [\dots, A, \dots, B] & : \|\alpha_n\| < \alpha_{n,tol} \\ [\dots, A, \dots] & : \|\alpha_n\| \geq \alpha_{n,tol} \end{cases} \end{aligned} \quad (7.1)$$

Liegt $\|\alpha_n\|$ unterhalb eines Grenzwertes $\alpha_{n,tol}$ so können die beiden Dreiecke zu einem Segment S zusammengefasst werden. Mit dem Grenzwert wird ein Toleranzbereich für eine planare Fläche festgelegt innerhalb dessen sich die benachbarten Dreiecke gegeneinander verkippen dürfen.

Das Zusammenfassen von Dreiecken zu einem Segment erfolgt durch rekursives Durchlaufen des Oberflächenmodells. Startpunkt ist ein beliebiges Dreieck der Triangulierung. Für jedes zu betrachtende Dreieck werden die angrenzenden drei Dreiecke untersucht. Ist ein angrenzendes Dreieck noch nicht einem Segment zugeordnet, so wird für dieses die Zuordnungsfrage nach Gleichung 7.1 untersucht. Für alle Nachbardreiecke, die dem Segment zugeordnet werden, sind deren Nachbarn auf Segmentzugehörigkeit zu prüfen. Das Verfahren bricht ab, wenn kein Dreieck dem Eingangssegment mehr zugeordnet werden kann. Die rekursive Suche beginnt für alle noch nicht zugeordneten Dreiecke mit einem neuem Segment von Neuem. Der rekursive Algorithmus kann im Einzelnen aus dem Pseudocode 7.2 entnommen werden.

Pseudocode 7.2 Segmentierungs-Algorithmus

```

WalkTriangle(t,nr) { /* Rekursionschritt */
  triangles[t].Segment = nr; /* gehört zum Segment 'nr' */
  for (i=0;i<3;i++) { /* untersuche die 3 Nachbardreiecke */
    left_triangle = triangles[t].edge_i[i].triangle_i[0];
    right_triangle = triangles[t].edge_i[i].triangle_i[1];
    if (left_triangle!=NIL && left_triangle!=t) {
      next_triangle = left_triangle
    } else if (right_triangle!=NIL && right_triangle!=t) {
      next_triangle = right_triangle
    }
    if (triangle[next_triangle].Segment==NIL) {
      alpha = Angle(triangles[next_triangle].norm,triangles[t].norm);
      if (abs(alpha)<alpha_tolerance) { /* gehört dazu! */
        WalkTriangle(next_triangle,nr); /* Wie steht's mit dessen Nachbarn?*/
      }
    }
  }
}

WalkTriangleStart() { /* Start der Rekursion */
  nr = 0;
  forall t in triangles {
    if (triangles[t].Segment==NIL) { /* noch keine Zuordnung */
      WalkTriangle(t,nr);
      nr++;
    }
  }
}

```

Der Segmentierungs-Algorithmus, wie er bis hierher vorgestellt wird, führt den Zugehörigkeitstest nach Gleichung 7.1 lokal durch, d.h. der Vergleich der Normalenvektoren erfolgt immer nur zwischen zwei angrenzenden Dreiecken unabhängig von der Menge der übrigen Normalenvektoren bereits zusammengefasster Dreiecke. Dadurch werden Dreiecke, die sich innerhalb eines gekrümmten Bereiches des Oberflächenmodells befinden zusammengefasst, sobald dessen Krümmung unterhalb des Grenzwertes $\alpha_{n,tol}$ liegt. Stoßen Flächen einer Bauwerksgeometrie unter einem relativ stumpfen Winkel aneinander oder bestehen Teile der Bauwerksgeometrie aus Kugelflächen oder ähnlich runden Formen, so können je nach Festlegung von $\alpha_{n,tol}$ Segmente

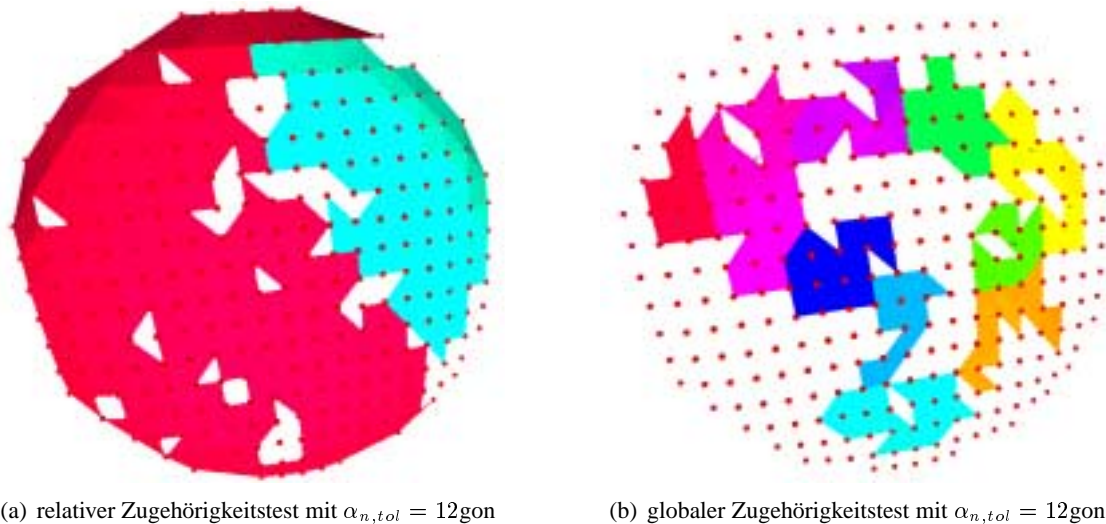


Abbildung 7.11: Ergebnisse der Segmentierung am Beispiel einer gescannten Kugel. (Synthetische Daten für eine Kugel mit dem Radius 5 m. Entfernung des Laserscanners zum Kugelmittelpunkt 18.25 m. Winkelschrittweite: $\Delta H_z = \Delta V = 2$ gon, Messrauschen: $\sigma_{H_z} = \sigma_V = 10$ mgon, $\sigma_D = 3$ cm.

gefunden werden, die mehr oder minder über eine Geometriekante „hinweglaufen“. Die Abbildung 7.11(a) verdeutlicht diese Problematik am Beispiel einer Kugeloberfläche.

Einen globalen Zugehörigkeitstest erhält man, wenn der Normalenvektor des jeweiligen Startdreiecks eines Segmentes über alle Rekursionsschritte hinweg zum Vergleich herangezogen wird. Das „Umlaufen“ von Flächenkanten kann damit größtenteils verhindert werden (Abbildung 7.11(b)). Nachteilig ist, dass das Ergebnis der Segmentierung stark von der Wahl des Startdreiecks abhängt. Eine optimierte Auswahl eines Startdreiecks ist ohne Analyse des Oberflächenmodells nicht möglich, doch diese Analyse kann erst nach einer Segmentierung erfolgreich durchgeführt werden, was auf ein Paradoxion hinausläuft, das gegebenenfalls iterativ gelöst werden muss. Die Segmentierung über das relative Kriterium ist sehr robust gegenüber der Wahl des Startdreiecks, daher wird diese Art bevorzugt genutzt.

7.3.4 Weiterverarbeitung auf „echte Flächen“ beschränken

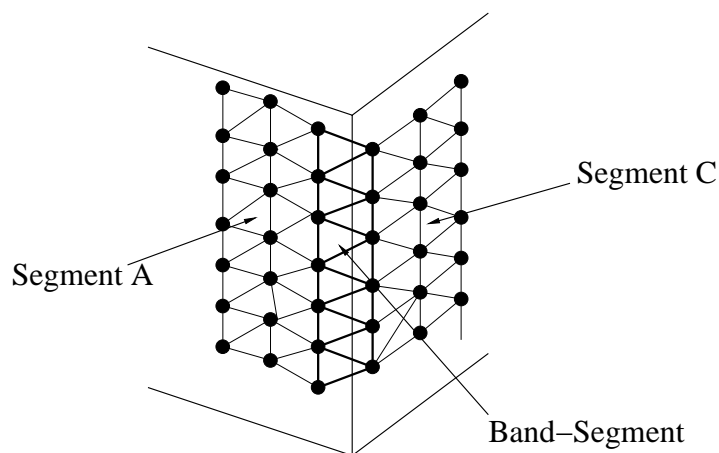


Abbildung 7.12: Ein Band-Segment täuscht eine Fläche vor.

Aufgrund des Ausrundungseffektes, der durch die zufällige Abtastung der Objekt Oberfläche entsteht sowie durch die Strahldivergenz bedingte Ausrundungen (Abbildung 3.25) liefert der Segmentierungsalgorithmus mitunter Segmente, die keiner realen Fläche entsprechen. Dies sind überwiegend Bänder von Dreiecksflächen

entlang von Wandkanten bzw. den Kanten zwischen Boden/Decke und Wand (Abbildung 7.12). Bei genauer Betrachtung stellt man fest, dass bei diesen Bänder-Segmenten jeweils nur zwei nebeneinander liegende Punktreihen miteinander verbunden sind. Die Band-Segmente sind zu entfernen, da diese nach dem Abtasttheorem keine echten Flächen repräsentieren.

Band-Segmente können von anderen Segmenten dadurch unterschieden werden, dass diese mindestens ein Dreieck haben, das drei Nachbardreiecke hat, die ebenfalls zum Segment gehören. Damit ist ein Algorithmus zur Entfernung der Band-Segmente leicht anzugeben: Entferne alle Segmente, die nicht mindestens ein Dreieck mit drei segmentgleichen Nachbardreiecken beinhalten. Zugleich entfernt dieser Algorithmus Segmente, die genau aus einem Dreieck bestehen. Diese können als Störsegmente interpretiert werden. Sie treten insbesondere bei sehr rauen Objektoberflächen auf, für die die Abtastung zu grob ist (z. B. große Zimmerpflanze in Abbildung 7.8 links). Die Abbildung 7.13 zeigt die Auswirkung der Elimination der Band-Segmente am Beispiel eines gescannten Quaders (Simulation).

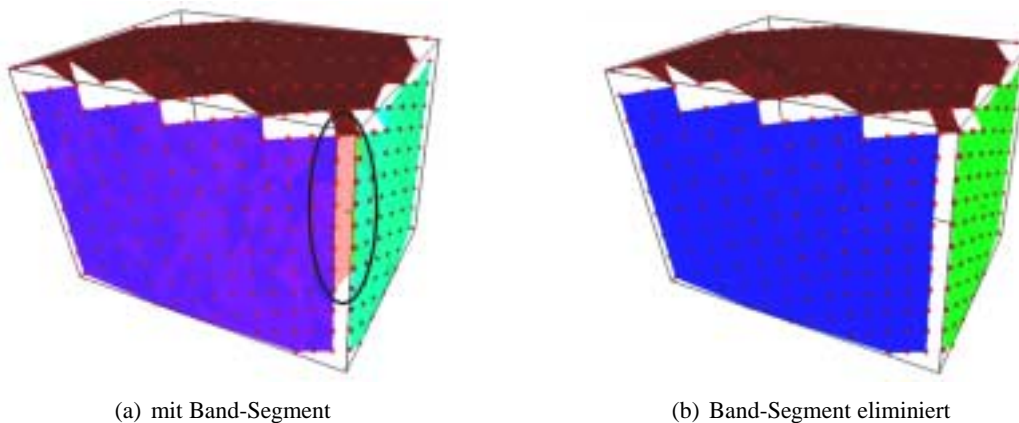


Abbildung 7.13: Ergebnisse der Segmentierung ($\alpha_{n,tol} = 12$ gon) am Beispiel eines gescannten Quaders. (Synthetische Daten für einen Quader mit den Kantenlänge 6 m, 6 m und 8 m . Entfernung des Laserscanners zum Quader ca. 15 m. Winkelschrittweite: $\Delta Hz = \Delta V = 2$ gon, Messrauschen: $\sigma_{Hz} = \sigma_V = 10$ mgon, $\sigma_D = 3$ cm.

In der praktischen Anwendung der Segmentierung zeigt sich, dass die Anzahl der verbleibenden „echten“ Segmente für die anschließende Verschneidung weiter verringert werden kann und zur Begrenzung der Rechenzeit bei komplexeren Punktwolken auch eingeschränkt werden muss. Der Verschneidung werden nur Segmente zugeführt, die über eine ausreichende Ausdehnung verfügen bzw. Größe und damit Bedeutung für die Objektgeometrie haben. Gestützt auf das theoretische Abtasttheorem kann für die Praxis verlangt werden, dass eine reale Fläche durch mind. $10 \times 10 = 100$ Lasermesspunkte diskretisiert sein muss, um zweifelsfrei und zuverlässig rekonstruiert zu werden. Innerhalb der Implementierung des Rekonstruktionsverfahrens ist daher der Schwellwert $n_{t,min}$ vorgesehen, mit dem Segmente für ungültig erklärt werden, die weniger als $n_{t,min}$ Dreiecke umfassen.

7.3.5 Segmentierung und Datenfilterung

Im Kapitel 7.3.2 wurde die Problematik des Quantisierungseffektes einiger Lasermesssysteme erläutert. Konkrete Auswirkungen des Quantisierungseffektes auf die Segmentierung verdeutlicht die Abbildung 7.14(a). Die bearbeitete Punktwolke ist im Nahbereich derart rau, dass selbst mit einem sehr großzügigem $\alpha_{n,tol}$ von 40 gon kein brauchbares Segmentierungsergebnis erhalten wird. Die beiden langen Wände, die Decke und der Boden des Flures sind nicht, wie eigentlich durch das Scannen bezweckt, vollständig durch einzelne Segmentbereiche repräsentiert. Im Nahbereich werden diese Oberflächen in eine Vielzahl von kleinräumigen Segmenten teilweise mit runder Gestalt zerlegt. Die weitere Verarbeitung kann so kaum zum Erfolg führen.

Ein deutlich besseres Ergebnis ergibt sich nach einer Glättung der Punktwolke durch mehrmaliges Anwenden des oben beschriebenen Mittelwertfilters (Abbildung 7.14(b)). Hierbei sind nun, wie gewünscht, die beiden langen Wände, der Boden und die Decke durch ein einzelnes Segment ausreichend diskretisiert. Auch die Türleibungen treten als Einzelsegmente auf. Eine erfolgreiche Verschneidung scheint so möglich.

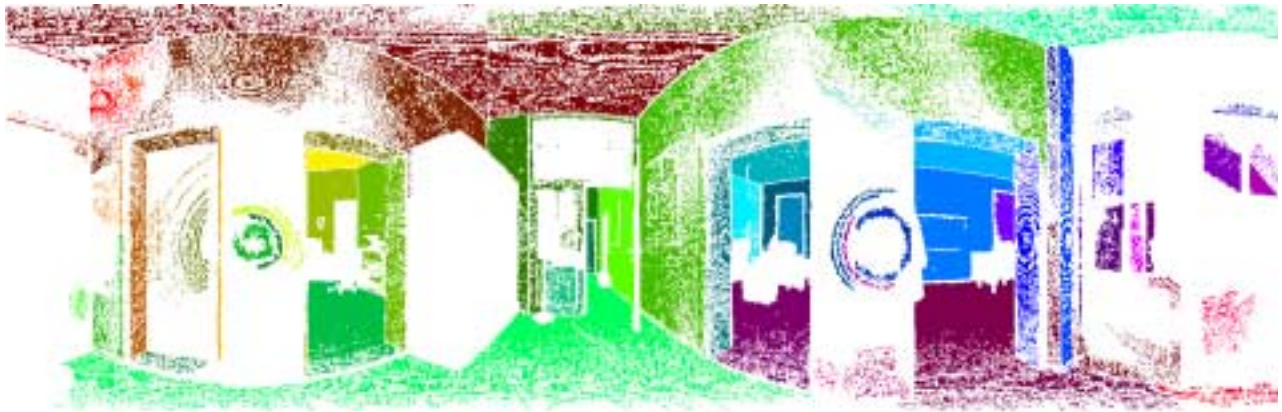
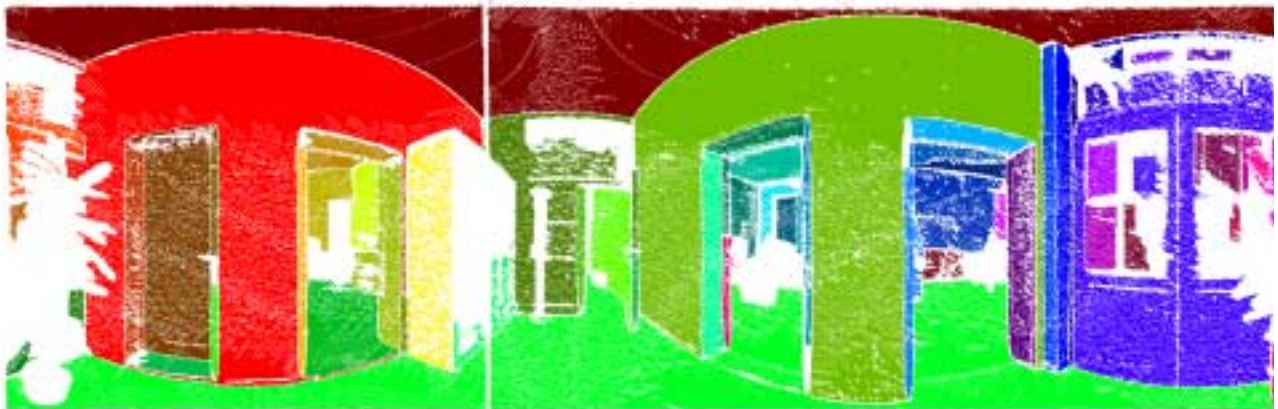
(a) Segmentierung **ohne** Datenfilterung ($\alpha_{n,tol} = 40$ gon, $n_{t,min} = 1000$).(b) Segmentierung nach 30-facher Anwendung des **Mittwertfilters** ($\alpha_{n,tol} = 40$ gon, $n_{t,min} = 1000$).(c) Segmentierung **ohne** Datenfilterung mit **Toleranzfunktion** berechnet aus den Stützwerten: $\alpha(0.8\text{ m})_{n,tol} = 50$ gon und $\alpha(19.4\text{ m})_{n,tol} = 50$ gon und $n_{t,min} = 1000$.

Abbildung 7.14: Auswirkung der Datenfilterung auf die Segmentierung.

Für Punktwolken, die nicht so extrem durch den Quantisierungseffekt gestört sind, hat sich folgende Verfeinerung des Segmentierungsalgorithmusses bewährt. Da der Quantisierungseffekt sich mit zunehmender Objektentfernung D weniger schädlich auf die Segmentierung auswirkt, sollte der Zugehörigkeitstest mit einer variablen Toleranz $\alpha(D)_{n,tol}$ durchgeführt werden. Für $\alpha(D)_{n,tol}$ wird ein logarithmischer Funktionsverlauf gewählt, der ein überproportionales Absinken der Schranke mit zunehmender Entfernung herstellt.

$$\alpha(D)_{n,tol} = e^{(-aD+b)}$$

Die Koeffizienten a und b der Toleranzfunktion (Abbildung 7.15) können durch Angabe der gewünschten Toleranz $\alpha(D_1)_{n,tol}$ und $\alpha(D_2)_{n,tol}$ an den zwei Stützstellen D_1 und D_2 leicht berechnet werden.

$$a = \frac{\ln \alpha(D_1)_{n,tol} - \ln \alpha(D_2)_{n,tol}}{D_2 - D_1}$$

$$b = \frac{D_1 \ln \alpha(D_2)_{n,tol} - D_2 \ln \alpha(D_1)_{n,tol}}{D_2 - D_1}$$

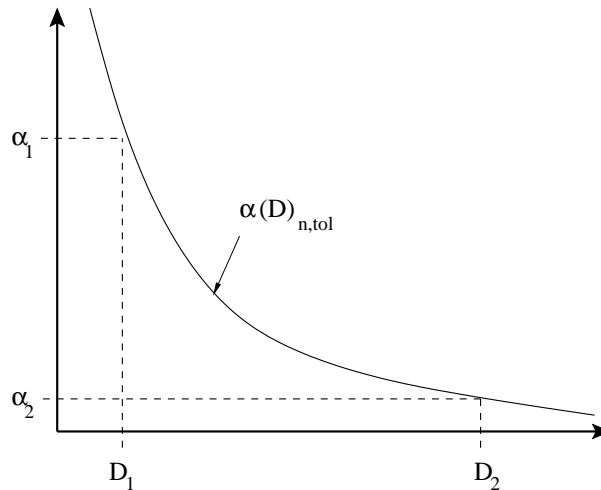


Abbildung 7.15: Toleranzfunktion.

Als Stützstellen D_1 und D_2 erweisen sich die minimale bzw. maximale Entfernung D_{min} bzw. D_{max} als besonders anschaulich zur Festlegung der Toleranzfunktion. Für den Nahbereich der Punktwolke führen in der Praxis durchaus Werte für $\alpha_{n,tol}$ zu einer korrekten Segmentierung, die größer sind als der theoretisch noch vertretbare Verkippungswinkel von 50 gon. Dies gilt insbesondere für Innenraumvermessungen, bei denen die häufig durch den Quantisierungseffekt betroffenen Boden- und Deckenfläche möglichst durch einzelne große Segmente separiert werden sollen. Die Gefahr dadurch Details im Boden- und Deckenbereich zu verlieren ist gering, da in der Regel nur wenige Details vorkommen. Sind Details wie, z. B. Unterzüge nicht zu vernachlässigen, ist die Toleranz entsprechend zu verfeinern oder die Vermessung bereits so vorzunehmen, dass sich keine wichtigen Details im unmittelbaren Nahbereich des Laserscanners befinden.

7.3.6 Verschneidung der Grundgeometrien

Als Vorbereitung für die Verschneidung der Grundgeometrien sind für alle gültigen Segmente, die Ränder zu bestimmen. Der Segmentrand setzt sich aus Kanten des Oberflächenmodells zusammen. Kanten, die zugleich Segmentrand sind, trennen zwei Maschen voneinander, wobei nur genau eine der Maschen zum betrachteten Segment gehört. Das Aufsuchen des Segmentrandes trennt die Menge aller zu einem Segment gehörenden Kanten in zwei Mengen auf. Die eine Menge enthält die im Inneren des Segmentes liegende Kanten, die andere Menge enthält die (Rand-)Kanten am Rande des Segmentes.

Im u, v -Raum werden die Ecken der Randkanten trianguliert, wobei die Randkanten als Zwangskanten (Bruchkanten) berücksichtigt werden müssen. Ist in der Triangulierung eine direkte (ungerichtete) Kante zwischen Segment A und B sowie zwischen Segment B und C sowie Segment C und A zu finden, so kann vermutet werden, dass sich die Segmente A , B und C im Punkt p_s im x, y, z -Raum schneiden können (Abbildung 7.16).

Bei der Ableitung potentieller Schnittpunkte sind neben den Kanten zwischen zwei Segmenten auch Eckpunkte zu berücksichtigen, die zu Randkanten mindestens zweier verschiedener Segmente gehören. Diese direkten Schnittpunkte und die Nachbarschaftskanten zwischen zwei verschiedenen Segmenten bilden die Basis zur Ableitung der Verschneidungsmengen. Mit der Regel aus dem Pseudocode 7.3 können nur Objektecken aufgespürt werden, die sich als Schnitt dreier angrenzender Ebenen (Wände etc.) beschreiben lassen.

Für Ecken an denen mehr als drei Ebenen zusammenlaufen, ist das Ergebnis nicht vorhersehbar. Zwei Fälle können auftreten. Zum einen kann kein Schnitt detektiert werden, da die Verschneidungsregel nicht anspricht. Zum anderen können für einen Mehrfach-Schnitt mehrere Dreifach-Schnitte gefunden werden. Dies hat zur

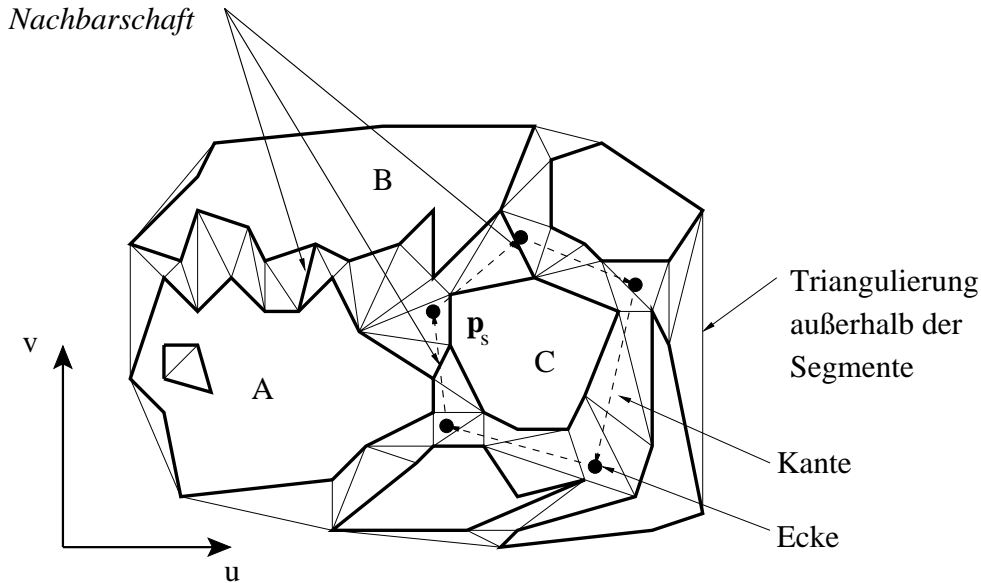


Abbildung 7.16: Prinzip der Verschneidung der Segmente.

Folge, dass die Ecke mehrfach über Dreifach-Schnitte redundant bestimmt wird und zu Störungen bei der Ableitung eines konsistenten Randflächenmodells führt. Als häufigste Störung tritt auf, dass keine Maschen aus den betroffenen Kanten gebildet werden können, da diese keinen geschlossenen Polygonzug am Mehrfachpunkt bilden können. In der Regel treten bei Gebäudegeometrien überwiegend Dreifach-Schnitte auf und selten sind Vierfach-Schnitte (z. B. bei einem Walmdach) zu beobachten. Schnitte mit mehr als vier Ebenen sind eher zufälliger Natur und können so getrost ignoriert werden.

Pseudocode 7.3 Verschneidung.

```

/* Verbindungskanten ermitteln und in ExistEdge[][] speichern.*/
for (i=0;i<num_edges;i+) {
  if (edges[i].segment_from!=edges[i].segment_to) {
    if (!ExistEdge[edges[i].segment_from][edges[i].segment_to]) {
      ExistEdge[edges[i].segment_from][edges[i].segment_to] = true;
      num_ExistEdge++;
    }
  }
}
/* Randpunkte mit Verbindung zu unterschiedlichen Segmenten als
   Verbindungskanten in ExistEdge[][] speichern.*/
for (i=0;i<num_vertices;i+) {
  edge_list = FindAllEdgesWithVertex(i);
  for (e=0;e<num_edge_list;e++) {
    if (edge_list[e].segment_from!=edge_list[e].segment_to) {
      if (!ExistEdge[edge_list[e].segment_from][edge_list[e].segment_to]) {
        ExistEdge[edge_list[e].segment_from][edge_list[e].segment_to] = true;
        num_ExistEdge++;
      }
    }
  }
}
/* Verschneidungsregel für Dreifach-Schnitt*/
for (A=0;A<num_segments;A++) {
  for (B=0;B<num_segments;B++) {
    for (C=0;C<num_segments;C++) {
      if ( (ExistEdge[A][B] || ExistEdge[B][A]) &&
           (ExistEdge[B][C] || ExistEdge[C][B]) &&
           (ExistEdge[C][A] || ExistEdge[A][C]) ) {
        SchnittDreierEbenen[A][B][C] = true; }
    }
  }
}

```

Nachdem die potentiellen Dreifach-Schnitte ermittelt sind, ist zu prüfen, ob sich die Ebenen, die sich hinter den drei Segmenten verbergen, im x, y, z -Raum schneiden. Dies ist nicht immer gegeben, da durch die Segmentierung einer Punktwolke auch solche Segmente voneinander getrennt werden, die parallel zueinander verlaufende Ebenen repräsentieren. Typischerweise tritt diese Situation an Wand- und Türleibungen auf wie die Abbildung 7.17 zeigt. Aus den Dreifach-Schnitten A, B, C und A, B, D können die Raumpunkte 5 und 6 nicht bestimmt werden, da die Ebenen der Segmente A und B parallel verlaufen. Für die Punkte 2 und 4 zeigt sich, dass sie nicht wie naiv vermutet auf der Laibung bestimmt werden, sondern auf die hintere Wand verschoben werden. Dies ist durchaus im Einklang mit der oben getroffenen Punktwolkendefinition und dessen Eigenschaft. Zwischen der hinteren Kante der Laibung und der hinteren Wand sind in der Punktwolke keine Informationen vorhanden, sodass angenommen werden darf, dass diese unmittelbar aneinandergrenzen (Interpolationsgebot und Vollständigkeitsvermutung).

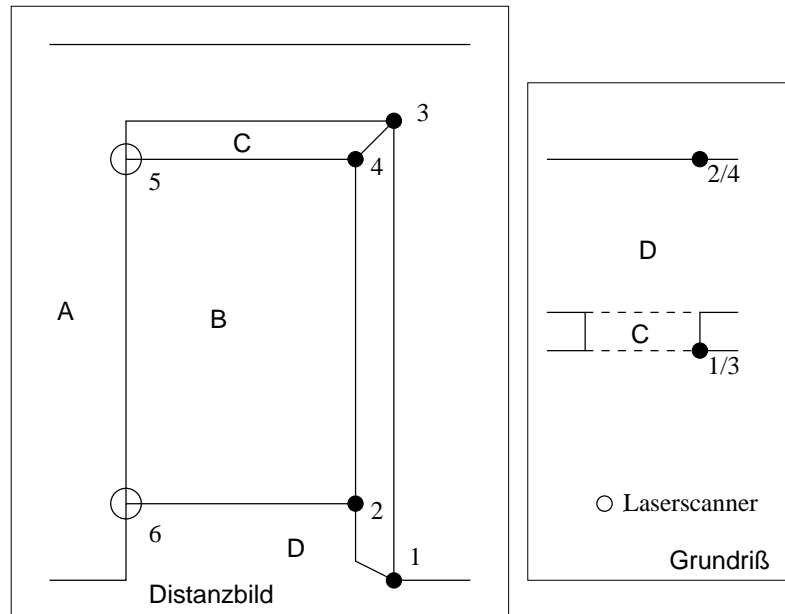


Abbildung 7.17: Nicht jeder Dreifach-Schnitt im u, v -Raum führt zu einem Schnittpunkt im x, y, z -Raum.

Die lineare Unabhängigkeit der drei Ebenen E_1, E_2 und E_3 , eines Dreifach-Schnittes kann anhand folgender Determinante det , gebildet aus den normierten Normalenvektoren $\mathbf{n}_{0,1}, \mathbf{n}_{0,2}$ und $\mathbf{n}_{0,3}$, beurteilt werden.

$$det = \begin{vmatrix} n_{0,1,x} & n_{0,1,y} & n_{0,1,z} \\ n_{0,2,x} & n_{0,2,y} & n_{0,2,z} \\ n_{0,3,x} & n_{0,3,y} & n_{0,3,z} \end{vmatrix}$$

Liegt der Betragswert für $det \in [0, 1]$ unterhalb der Toleranzschwelle det_{tol} so wird der Dreifach-Schnitt für ungültig erklärt, da sich die drei Ebenen nicht deutlich in einem gemeinsamen Punkt schneiden. Dies tritt insbesondere dann auf, wenn zwei der drei Ebenen annähernd parallel zueinander verlaufen. Bewährt haben sich für det_{tol} Werte > 0.1 .

Die Normalenvektoren werden anhand einer Ebenenapproximation aus sämtlichen Messpunkten eines Segmentes bestimmt. Die Ebenenapproximation wird nach dem in [Dri93, S. 44ff] beschriebenen Verfahren über eine Hauptachsentransformation der Normalgleichungsmatrix durchgeführt.

Die Schnittpunkte sämtlicher gültiger Dreifach-Schnitte werden durch eine gemeinsame Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen bestimmt. Hierzu ist für jeden Punkt \mathbf{p}_i der Punktwolke, der zum Segment s mit der Ebene $E_s : \mathbf{n}_s \cdot \mathbf{p} - 1 = 0$ gehört, folgende Beobachtungsgleichung aufzustellen.

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{1} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} \text{ allgemein} \\ v. &= \hat{n}_{s,x} x_i + \hat{n}_{s,y} y_i + \hat{n}_{s,z} z_i - 1 \end{aligned}$$

Hinzu kommen für jeden gültigen Schnittpunkt \mathbf{p}_j drei Beobachtungsgleichungen zur Festlegung, dass dieser auf jeder der drei Ebenen $E_{j(1)}$, $E_{j(2)}$ und $E_{j(3)}$ des Dreifach-Schnittes liegt.

$$\begin{aligned} v. &= \hat{n}_{j(1),x} \hat{x}_j + \hat{n}_{j(1),y} \hat{y}_j + \hat{n}_{j(1),z} \hat{z}_j - 1 \\ v. &= \hat{n}_{j(2),x} \hat{x}_j + \hat{n}_{j(2),y} \hat{y}_j + \hat{n}_{j(2),z} \hat{z}_j - 1 \\ v. &= \hat{n}_{j(3),x} \hat{x}_j + \hat{n}_{j(3),y} \hat{y}_j + \hat{n}_{j(3),z} \hat{z}_j - 1 \end{aligned}$$

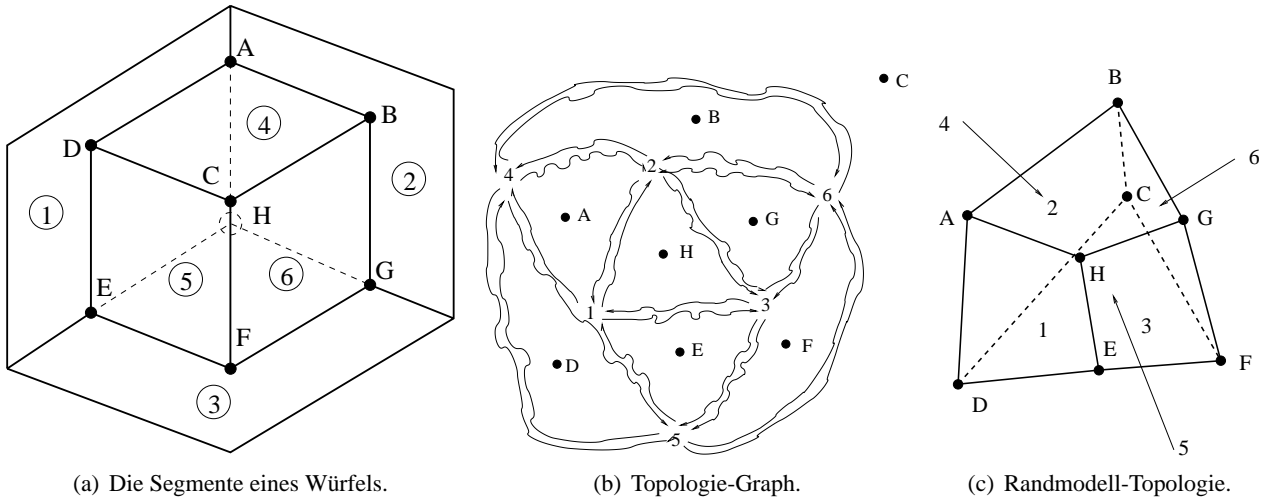
Wird für diese Ausgleichungsaufgabe ein Standardprogramm ([Ker02c]) verwendet, so können die gesuchten Normalenvektoren $\hat{\mathbf{n}}$ und die gesuchten Schnittpunktkoordinaten $\hat{x}_j, \hat{y}_j, \hat{z}_j$ unter Berücksichtigung etwaiger Korrelationen bzw. Kofaktoren zwischen den Messwerten inklusive eines statistischen Modells geschätzt werden. Auch können Verfahren zur Ausreißerelimination (Data-Snooping, robuste Schätzverfahren etc. ([Höp80], [Nie02]) auf die Daten der Punktwolke angewendet werden. Die Beseitigung von Ausreißern ist ein wichtiges Element bei der Bestimmung der Schnittpunkte, da die Punktwolke bislang im Rahmen der Segmentierung durch recht grobe Schwellwerte z. B. für $\alpha_{n,tol}$ in ihrer Qualität nur unzureichend beurteilt wurde. Wie mit der Abbildung 7.11 verdeutlicht wird, werden durch die Segmentierung gekrümmte Flächen grob in planare Flächenstücke zerlegt. Im Zuge der Ausgleichung treten für diese mehr oder minder dann deutlich Ausreißer auf, die eine weitere Analyse der Punktwolke in diesem Bereich erforderlich macht bzw. erlaubt.

Mit der Bestimmung der markanten Punkte (Ecken) des abgescannten Objektes ist die Ableitung eines 3D-Modelles noch nicht abgeschlossen. Das zu ermittelnde Modell sollte die Objektoberfläche in möglichst einfacher Weise darstellen und auf geometrische Primitive zurückführen. Betrachtet man ein Randflächenmodell, das sich aus planaren Flächen (Polyedern) zusammensetzt als ausreichend zur Beschreibung der Objektgeometrie, so ist ein Topologiemodell zu bestimmen, das die bereits extrahierten Schnittpunkte (Ecken) durch Kanten verbindet und die resultierenden Kanten zu Maschen zusammenfasst.

Ausgangspunkt für die Bestimmung des Topologiemodells ist die Menge aller Dreifach-Schnitte (Abbildung 7.18(e)). Die Menge der Dreifach-Schnitte wird in einen (topologischen) Graphen umgesetzt (Abbildung 7.18(b)). Dabei bildet jeder Dreifach-Schnitt ein Dreieck innerhalb des Graphen. In der Mitte dieses Dreieckes kann der Schnittpunkt symbolisch eingezeichnet werden. Ein Dreifach-Schnitt definiert drei gerichtete Kanten zwischen jeweils zwei Segmenten im Graphen. Die Richtung der Kanten ist dadurch gegeben, dass die drei Kanten eines Dreifach-Schnittes im Uhrzeigersinn um den Schnittpunkt herumlaufen. Jede Kante kann mindestens zweimal innerhalb der Menge der Dreifach-Schnitte vorkommen. Aus einer doppelt vorkommenden Kante kann die Verbindung zwischen zwei Schnittpunkten ermittelt werden. Diese Verbindung stellt eine Kante im gesuchten Randflächenmodell dar. Für jede Kante im Randflächenmodell wird in der winged-edge-Struktur zusätzlich gespeichert, welches Segment auf seiner rechten Seite und welcher auf seiner linken Seite liegt (Abbildung 7.18(f)). Aus der Menge der so erzeugten Kanten im Randflächenmodell lassen sich die Maschen des Randflächenmodells bilden (Abbildung 7.18(c)). Diejenigen Kanten, die gemeinsam eine Masche begrenzen, werden dieser Masche zugeordnet und zugleich so geordnet, dass sie die Maschen in Form eines geschlossenen Polygonzugs umlaufen. Damit ist die Rekonstruktion des 3D-Modells abgeschlossen.

Überraschenderweise wird für den in Abbildung 7.19 gezeigten Quader ein vollständiges Randmodell mit 8 Ecken, 12 Kanten und 6 Seiten (Maschen) rekonstruiert, obwohl nur drei Seiten innerhalb der Punktwolke erfasst sind. Ursache hierfür ist die Bestimmung des Dreifach-Schnittes des verdeckten Eckpunktes über die Wände der angedeuteten Raumecke. Der Algorithmus zur Bestimmung der Dreifach-Schnitte verhindert nicht, dass Segmente, die innerhalb einer Schleife liegen, die aus den drei Verbindungskanten gebildet wird, durch diese umlaufen werden. Dieser Effekt ist für die Praxis eher von Vorteil als von Nachteil, denn es werden somit auch ungewollt potentielle Kandidaten für verdeckte Raumecken bestimmt. Ein durch diese Pseudo-Ecken fehlerhaft bestimmtes Randflächenmodell kann hingegen in der Nachverarbeitung mit CAD leicht bereinigt werden.

Eine automatische Bereinigung kann dadurch erreicht werden, dass für jeden Schnittpunkt (Dreifach-Schnitt) untersucht wird, ob dieser durch das Randflächenmodell verdeckt wird; also hinter der Punktwolke zum liegen kommt. Für die Sichtprüfung wird ein Sehstrahl ausgehend vom Laserscannerstandpunkt zum zu untersuchenden Schnittpunkt berechnet. Für jedes Dreieck der Triangulation der Punktwolke wird nun der Schnitt mit dem Sehstrahl bestimmt. Wird ein Dreieck durch den Sehstrahl getroffen und ist der Abstand des Dreieckes zum Laserscannerstandpunkt kürzer als die Entfernung zum Schnittpunkt, so liegt dieser in einem Bereich, der von Laserscanner nicht einsehbar ist, d.h. er ist kein gültiger Schnittpunkt und ist aus der Menge der Dreifach-Schnitte zu entfernen und diese erneut in ein Randflächenmodell zu konvertieren. Die Zweckmäßigkeit und



(a) Die Segmente eines Würfels.

(b) Topologie-Graph.

(c) Randmodell-Topologie.

Segment i	Segment j
1	2
1	3
1	4
1	5
2	3
2	4
2	6
3	5
3	6
4	5
4	6
5	6

(d) Verschneidungskanten

Ecke	Segment		
	i	j	k
H	1	2	3
A	1	2	4
E	1	3	5
D	1	4	5
G	2	3	6
B	2	4	6
F	3	5	6
C	4	5	6

(e) Dreifach-Schnitte

Kante	Ecke		Masche	
	von	nach	links	rechts
a	A	B	2	4
b	A	D	4	1
c	A	H	2	1
d	B	C	6	4
e	B	G	2	6
f	C	D	5	4
g	C	F	6	5
h	D	E	5	1
i	E	F	5	3
j	E	H	3	1
k	F	G	6	3
l	G	H	2	3

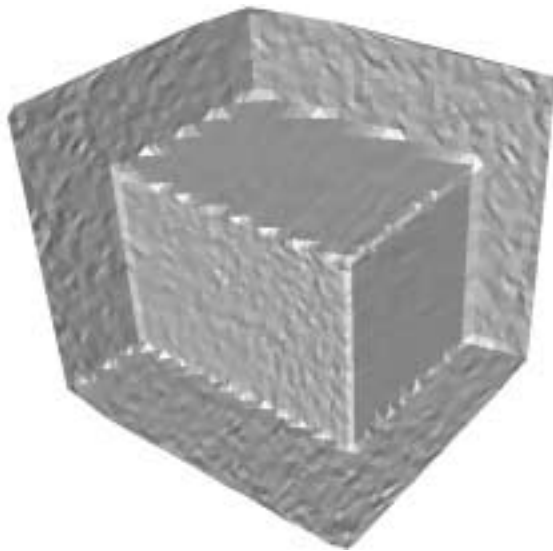
(f) Randflächenmodell

Abbildung 7.18: Ergebnis der Verschneidung für einen Würfel.

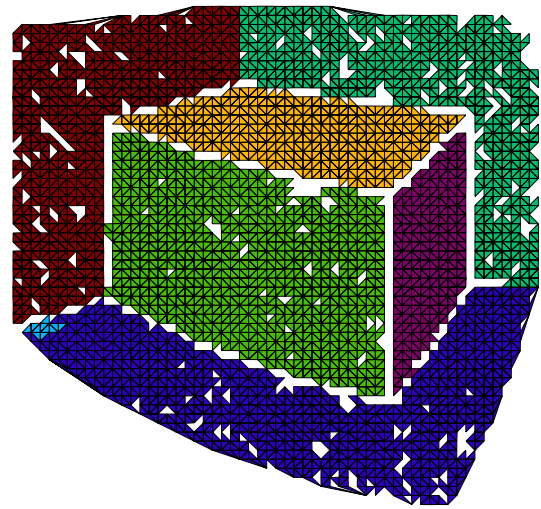
Richtigkeit dieser Vorgehensweise ergibt sich unmittelbar aus der *Leerraum-* und *Vollständigkeitsvermutung* bezüglich einer Punktwolke.

7.3.7 Zusammenfassung

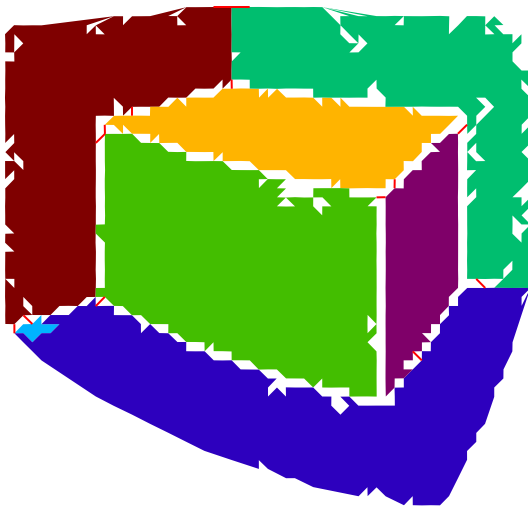
Das hier vorgestellte Verfahren zur automatischen Extraktion und Modellierung von Objektgeometrien bearbeitet genau eine Punktwolke. Die Punktwolke wird hierzu bezüglich des u, v -Raumes (Plattkarte) verebnet und in diesem trianguliert. Das resultierende dreidimensionale Randflächenmodell (Dreiecksnetz) wird in planare



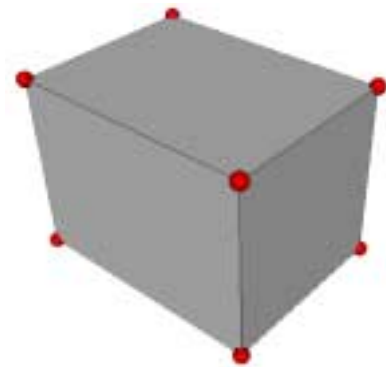
(a) Punktwolke.



(b) Segmentierung.



(c) Verschnittungskanten zwischen den Segmenträndern.



(d) Rekonstruiertes 3D-Modell (Knoten, Kanten, Maschen).

Abbildung 7.19: Das Verfahren der automatische Modellierung ($\alpha_{n,tol} = 15 \text{ gon}$, $det_{tol} = 0.1$) angewandt auf den synthetischen Datensatz `quader02` (Synthetische Daten für einen in einer Raumecke stehenden Quaders mit den Kantenlängen $6 \times 8 \times 6 \text{ m}$. Aufnahmeentfernung: $D = 12 \dots 20.5 \text{ m}$, Winkelschrittweite: $\Delta Hz = \Delta V = 1 \text{ gon}$, Messrauschen: $\sigma_{Hz} = \sigma_V = 10 \text{ mgon}$, $\sigma_D = 2 \text{ cm}$.)

Segmente zerlegt (Segmentierung). Aus der Menge der Segmente werden Verschnittungsmöglichkeiten genau dreier Segmente bestimmt, die die Eckpunkte des gesuchten Objektmodells bilden. Die Eckpunkte werden hinsichtlich ihrer topologischen Anordnung untersucht, um ein Randflächenmodell für das Objekt, bestehend (Objekt-)Kanten und Maschen (Objektflächen) abzuleiten. Das Verfahren benötigt die Festlegung von Stellgrößen, die zugleich auch den Erfolg des Verfahrens beeinflussen. Bei Rohdaten einiger Laserscanner tritt ein Quantisierungseffekt auf, der es erforderlich macht, eine Datenfilterung vorzunehmen bzw. geeignete Strategien anzuwenden. Die Stellgrößen sind in der Tabelle 7.1 zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 7.1: Stellgrößen für die automatische Extraktion.

Arbeitsschritt	Stellgröße	Formelzeichen	typisch
Vorverarbeitung Datenfilterung	Mittelwertfilter		10×
Segmentierung Zugehörigkeitstest Zuordnungskriterium	konstant dynamisch	relativ o. global $\alpha_{n,tol}$ $\alpha(D_1)_{n,tol}$ $\alpha(D_2)_{n,tol}$	global 30 gon $D_1 = D_{min}, 50 \text{ gon}$ $D_2 = D_{max}, 20 \text{ gon}$
Verschneidung	minimale Anzahl Dreiecke pro Segment minimaler Schnittwinkel	$n_{t,min}$ det_{tol}	1000 0.1

7.4 Automatische Berechnung von Grundrissen und Schnitten

Für viele Aufgaben im Bereich der Bauaufnahme und der Dokumentation sind Grundrisse, Schnitte und Ansichten die zweckmäßige und bevorzugte Darstellungsart einer Bauwerksgeometrie. Unter einem Schnitt ist die Schnittmenge einer dreidimensionalen Objektgeometrie mit einer beliebig im Raum platzierten und geneigten Schnittebene zu verstehen. Grundrisse sind besondere Schnitte, bei denen der Normalenvektor parallel zum Schwerkraftvektor verläuft. Ein Grundriss zeigt, wie der Name es bereits sagt, die räumliche Erstreckung bezüglich eines Horizontes. Die Höhe des Horizontes wird im allgemeinen so gewählt, dass sich Wand- und Türöffnungen in der Schnittlinie niederschlagen. In der Regel wird daher ein Horizont in 1,0 oder 1,5 m Höhe über dem Geschossfußboden gewählt. Für die Dokumentation der räumlichen Erstreckung in der Vertikalen werden Vertikalschnitte benötigt. Diese entstehen durch Schnitt des Bauwerkes mit einer senkrecht auf der Grundrissebene stehenden Ebene. Vertikalschnitte verlaufen in der Regel entlang der Bauachsen. Unter Ansichten sind Schnittzeichnungen zu verstehen, die auch die orthogonale Projektion von Wand-, Fassaden-, Deckenstrukturen etc. hinter der Schnittebene schematisch anschaulich darstellen. In der DIN 1356-1 [DIN95] werden Darstellungsregeln (Stricharten, Symbole etc.) für Bauzeichnungen, wie Ausführungs-, Baubestands- und Bauaufnahmezeichnungen gegeben. Dort finden sich auch genauere Definitionen für Draufsichten, Ansichten und Schnitte.

Mit einem 3D-Laserscanner können die Objektoberflächen einer Bauwerksgeometrie schnell, einfach und umfassend erfasst werden. Wird der automatische Modellierungsprozess nach Abschnitt 7.3 nach der Triangulierung der Punktwolke angehalten, so kann das damit entstandene Oberflächenmodell zur Schnittberechnung genutzt werden. Mit dem nachfolgend vorgestellten Verfahren können wesentliche Schnittlinien einer Bauwerksgeometrie automatisch berechnet werden. Die erzeugten Profile bilden eine gute Ausgangsbasis zur manuellen Zeichnung/Konstruktion von Grundrissen und Schnitten. Da durch das Laserscanning die Bauwerksgeometrie vollständig dreidimensional erfasst wird, sind Schnitte mit beliebig definierten Schnittebenen möglich. Insbesondere auch solche, die mit den konventionellen Aufmaßmethoden nur mit erheblichen Aufwand realisiert werden können. Hierzu zählen z. B. generell alle Vertikalschnitte, die per Handaufmaß nur bei entsprechender Einrüstung des Gebäude bestimmt werden können.

7.4.1 Schnitt einer Punktwolke mit einer Schnittebene

Eine Schnittebene E in ihrer allgemeinsten Form ist definiert durch die Hessesche Normalform einer Ebene:

$$E : \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{p} - d = 0 \quad (7.2)$$

Dabei ist \mathbf{n}_0 der auf die Länge Eins normierte Normalenvektor und \mathbf{p} ein Punkt, der in der Ebene liegt.

$$\mathbf{n}_0 = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

d ist der Abstand der Ebene vom Koordinatenursprung. Für einen Horizontalschnitt in der Höhe $z = 1,50$ m z. B. lauten die Ebenenparameter:

$$\mathbf{n}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad d = 1,50 \text{ m} \quad (7.3)$$

Das Oberflächenmodell M einer Punktwolke nach der Triangulierung besteht aus einer Menge M von Dreiecken

$$\begin{aligned} M &= \{T_1, T_2, \dots, T_m\} \text{ mit} \\ T_i &= \{\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}, \mathbf{p}_{i,3}\}. \end{aligned}$$

Die Triangulierung kann aber auch durch die Menge K der gerichteten Kanten repräsentiert werden.

$$\begin{aligned} K &= \{E_1, E_2, \dots, E_k\} \text{ mit} \\ E_i &= \{\mathbf{p}_{i,\text{von}}, \mathbf{p}_{i,\text{nach}}, T_{i,\text{rechts}}, T_{i,\text{links}}\} \end{aligned}$$

Wobei jede Kante zwei Dreiecke, die rechts und links der Kante liegen, voneinander trennt. Bildet eine Kante zugleich den Rand der Triangulierung, so ist das rechts oder links liegende Dreieck undefiniert.

Die Schnittpunkte \mathbf{p}_j der Triangulierung mit der Schnittebene lassen sich durch Berechnung der Durchstoßpunkte derjenigen Kanten (Geraden) finden, deren Endpunkte $\mathbf{p}_{i,\text{von}}$ und $\mathbf{p}_{i,\text{nach}}$ auf verschiedenen Seiten der Schnittebene liegen. Für jede Kante K_i ist zu berechnen:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_g &= \mathbf{p}_{i,\text{nach}} - \mathbf{p}_{i,\text{von}} \\ t &= \frac{d - \mathbf{p}_{i,\text{von}} \cdot \mathbf{n}_0}{\mathbf{n}_g \cdot \mathbf{n}_0} \end{aligned}$$

Wenn für t gilt:

$$t \in [0, 1],$$

so liegt der Schnittpunkt zwischen dem Anfangs- und Endpunkt der Kante, bzw. bei $t = 0$ oder $t = 1$ ist dieser identisch mit dem Anfangs- oder Endpunkt. Der gefundene gültige Schnittpunkt berechnet sich zu:

$$\mathbf{p}_j = \mathbf{p}_{i,\text{von}} + t\mathbf{n}_g.$$

Die Schnittpunkte \mathbf{p}_j werden in einer Liste gesammelt inklusive der Information, durch welche Kante dieser erzeugt wurde. Aus der Liste können dann anhand der Kanteninformation über das rechts und links liegende Dreieck die Schnittpunkte zu Polygonzügen verkettet werden. Aufgrund der Dreidimensionalität der Punktwolke können sich mehrere, nicht zwangsläufig geschlossene, Polygonzüge ergeben.

Die resultierenden Schnittlinien entsprechen in der Regel nicht den Linien, die in einen Grundriss und dergleichen zu zeichnen sind. Zum einen können sie durch Störobjekte unvollständig sein, zum anderen sind sie durch die Messgenauigkeit verrauscht, so dass z. B. durchgehende Wände durch eine Vielzahl von Linienstücken unterschiedlicher Richtung repräsentiert sind. Zu Bedenken ist auch die Auswirkung des Ausrundungseffektes in den Wandecken. Die Schnittlinien sind insbesondere dort nicht exakt. In der Summe bedürfen die Schnittlinien einer händischen Überarbeitung z. B. mit einem CAD-Programm.

7.4.2 Beispiel

Das Verfahren soll anhand eines Beispiels veranschaulicht werden. Bearbeitet wurde die Punktwolke mit der Bezeichnung *teekueche*, die durch einen Panoramascanner in einem ca. 5×5 m großen Raum entstanden ist. Der Raum wurde samt seines Mobiliars und seiner Einrichtungen (z. B. Spülbecken) mit einer Schrittweite von 1° abgescannt (Abbildung 7.20(a)). Es war ein CAD-Grundriss für diesen Raum mit Dachschrägen abzuleiten. Hierzu wurde die Punktwolke mit einer horizontalen Schnittebene in 1,50 m Höhe über dem Fußboden geschnitten. Das resultierende Schnittpolygon ist in Abbildung 7.20(b) dargestellt. Das Ergebnis liefert den Wandverlauf nur stückweise und von den insgesamt zehn Raumecken sind nur vier zweifelsfrei abgebildet worden. Der Wandvorsprung innerhalb der nördlichen Wand ist nur wagen zu erkennen. Durch die geöffnete Tür wurden störenderweise Bereiche der Nachbarräume miterfasst. Dadurch war es aber möglich, die Türbreite zu bestimmen. Die Lage und Größe der Dachfenster konnte recht zuverlässig anhand der inneren Laibungspunkte bestimmt werden. Hilfreich waren hierzu auch die Berechnung weiterer Grundrisslinien in einer anderen Höhe, die die Entwicklung der Laibung in der Höhe deutlich machten. Die Lage der Dachschrägen vom Drempeel zur Decke waren der Schnittlinie eines vertikalen Schnittes einfach zu entnehmen (Abbildung 7.20(c)); ebenso die Lage der Dachfenster oberhalb der Grundrissebene. Die Wandstärken sind per Handaufmaß ermittelt.

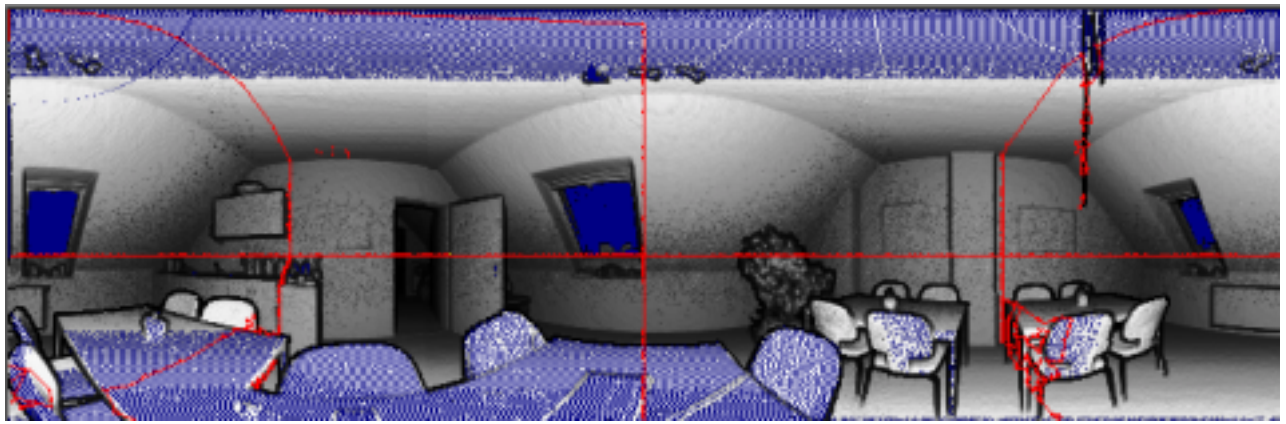
Sämtliche berechneten Schnittlinien sind in einem 3D-CAD eingelesen und bearbeitet worden. Der Grundrissplan in Abbildung 7.20(e) ist durch Hochzeichnen der automatisch generierten Grundrisslinien entstanden. Hierbei sind fehlende Geometrieinformationen unter der Annahme von Parallelitäten, Rechtwinkligkeiten und Symmetrien sowie bekannter Wandstärken konstruiert worden.

7.4.3 Bewertung

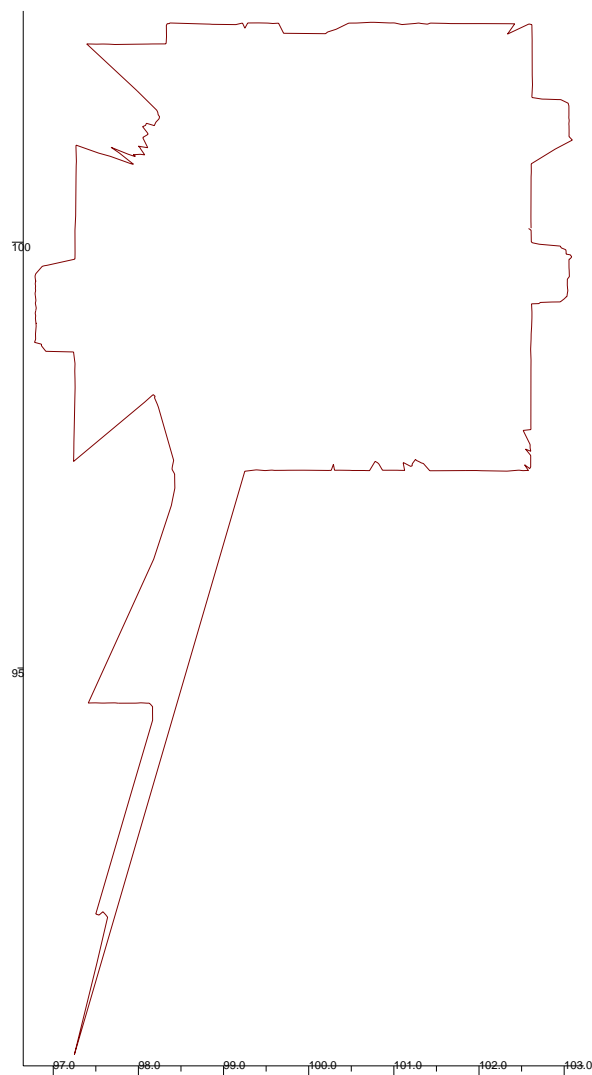
Das Beispiel zeigt die Möglichkeit auf, mittels eines Laserscanners unter Benutzung der automatischen Berechnung von Schnittlinien zu Grundrissen, Schnitten und Ansichten zu gelangen, die denen mit konventionellen Verfahren erstellten in nichts nachstehen. Als Vorteil bei der laserscannergestützte Bestimmung erweist sich, dass die komplette 3D-Geometrie verfügbar ist, sodass beliebig gelagerte Schnitte gebildet werden können. Die Bauwerksgeometrie kann so auf vielfältigste Weise analysiert und dargestellt werden. Auch wenn keine Schnitte anzufertigen sind, kann das Verfahren bei der Auswertung der Punktwolke wertvolle Dienste leisten, da es die Punktwolke auf charakteristische, leicht verständliche Informationen reduziert.

Aufgrund der hohen Kosten für die Beschaffung eines Laserscanners und der notwendigen Rüst- und Messzeiten kann das Laserscanning nicht mit einem Handaufmaß oder mit einer tachymetrischen Aufnahme konkurrieren, wenn es darum geht, Pläne von Bauwerken mit einfacher Geometrie zu erstellen. Handelt es sich hingegen um ein Objekt mit komplexer Geometrie (z. B. Freiformflächen), so kann das Laserscanning seine besondere Stärke, die flächenhafte dreidimensionale Vermessung, ausspielen und durchaus als Ersatz, Ergänzung oder zur Vorbereitung eines konventionellen Aufmasses eingesetzt werden. Mit der automatischen Schnittlinienbestimmung kann der Kostennachteil teilweise wieder aufgeholt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich um ein volldigitalisiertes und in der Auswertung variierbares Verfahren handelt. Ein Handaufmaß bedarf hingegen auch heute noch der Führung eines analogen Feldbuches und ist hinsichtlich seiner Richtigkeit anzweifelbar.

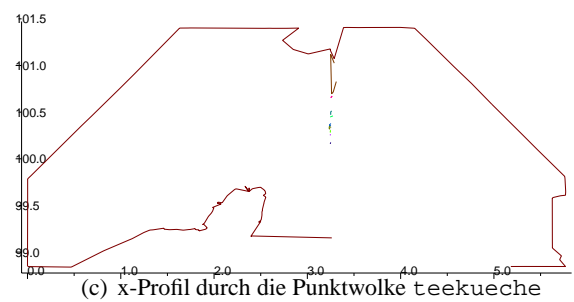
Das vorgestellte Verfahren zeigt eine mögliche Verbindung zwischen moderner Messtechnik und konventionellen Ansprüchen an Vermessungsprodukten auf. Mit dem Laserscanning können sowohl die althergebrachten Produkte als auch völlig neue Produkte erstellt werden. Es scheint durchaus sinnvoll, in einer ersten Erfassungsstufe z. B. für ein Bürogebäude dieses mit einem Laserscanner vorzunehmen und anhand dieser Aufnahme Pläne zu erstellen. Der anfängliche übertriebene Aufwand kann sich als wirtschaftlich erweisen, wenn sich im Nachgang weitere Informationsbedürfnisse ergeben, die auch eine dreidimensionale Beschreibung erfordern. Sobald dies der Fall ist, kann direkt ohne eine weitere Erfassungsleistung auf die bereits vorliegenden Laserscannerdaten zugegriffen werden. Die Idee dieser mehrstufigen und mehrfachen Nutzung der Punktwolken stützt sich auf die Tatsache, dass mit einem Laserscanner die Objektgeometrie automatisch und damit objektiv (ohne Interpretationen) dokumentiert wird; in gleicher Weise wie dies für ein Photo gilt. Das Laserscanning unterscheidet sich hier von den konventionellen Verfahren mit Ausnahme der Photogrammetrie deutlich.



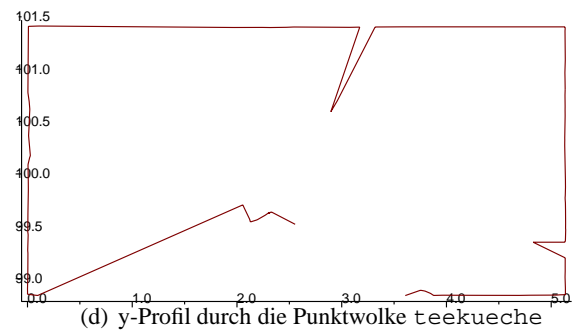
(a) Dichtbild der Punktwolke teekueche mit eingezeichneten Schnittlinien.



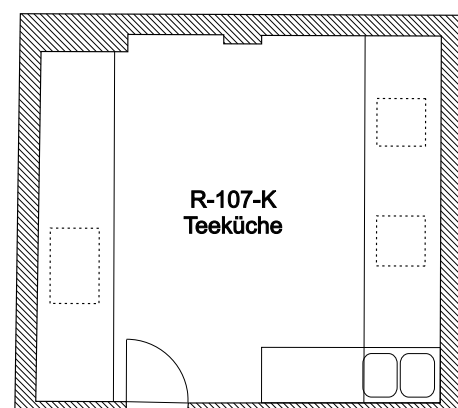
(b) Horizontalschnitt durch die Punktwolke teekueche



(c) x-Profil durch die Punktwolke teekueche



(d) y-Profil durch die Punktwolke teekueche



(e) Mittels des Horizontalschnittes „hochgezeichneter“ Grundrissplan

Abbildung 7.20: Ein automatisch abgeleiteter Horizontalschnitt (a) und zwei Vertikalschnitte (b)+(c) dienen als Vorlage für einen Grundrissplan (d).

7.5 Transformation von Punktwolken ins übergeordnete Bezugssystem (Standpunktverknüpfung)

Für die Transformation von Punktwolken ins übergeordnete Bezugssystem, kurz mit Standpunktverknüpfung bezeichnet, gibt es verschiedenste Verfahren. Das übergeordnete Bezugssystem kann durch ein amtliches Festpunktfeld realisiert sein oder es wird speziell für das Messobjekt/-gebiet ein eigenes objektbezogenes Festpunktfeld eingerichtet. Durch geodätische Messungen z. B. mit einem Tachymeter wird das Festpunktfeld ausgemessen und so die Koordinaten im übergeordneten Bezugssystem bestimmt. Die Festpunkte oder Anschlusspunkten werden in der Regel dauerhaft vermarktet und zur Stationierung temporär mit geeigneten Hilfsmitteln wie z. B. einem Retroreflektor oder einer Zieltafel signalisiert.

In Analogie zur Stationierung eines Tachymeters können die Verfahren zur Standpunktverknüpfung grob in zwei Klassen eingeteilt werden.

Direkte Stationierung Bei der direkten Stationierung steht der Messsensor auf einem bekannten Festpunkt und seine Orientierung, die Drehung des Sensorkoordinatensystems, wird durch die Horizontierung des Sensors und Ausrichtung des Teilkreises zu einem weiteren Festpunkt vorgenommen. Dies einfachste Art der Standpunktverknüpfung wird erstaunlicher Weise durch die Laserscanner-Hersteller nicht unterstützt. Kaum ein Laserscanner lässt sich zentrisch auf einem Festpunkt aufstellen und nur bei panorama-view-Laserscannern ist eine Horizontierung möglich.

Freie Stationierung Bei der freien Stationierung wird der Messsensor beliebig im Raum platziert. Seine Position im übergeordneten Bezugssystem und seine Orientierung sind durch Messung zu mehreren Anschlusspunkten zu bestimmen. Kann der Laserscanner horizontiert werden ist eine Mindestanzahl von zwei Anschlusspunkte notwendig; ansonsten werden drei Anschlusspunkten benötigt, um die sechs Freiheitsgrade, drei Translationen in X, Y, Z und drei Drehungen um die X, Y, Z -Achse, zu bestimmen.

Diese Verfahren aus der geodätischen und photogrammetrischen Praxis setzen voraus, dass mit dem Sensor eine Zielung direkt zum Signal, das auf einem Festpunkt aufgebaut ist, realisiert werden kann. Diese direkte Zielung steht im Widerspruch zum Messprinzip eines Laserscanners, der „ziellos“ in einem festen Raster das Messobjekt abtastet. Aus diesem Grunde sind spezielle Verfahren der Standpunktverknüpfung für das Laser-scanning notwendig. Dies bezieht sich insbesondere auf die Art der Signalisierung der Anschlusspunkte durch speziell entwickelte Referenzmarken.

7.5.1 Standpunktverknüpfung mittels Referenzmarken

Die Referenzmarken sind so konstruiert, das sich Messungen mit einem Laserscanner zu ihnen von den sonstigen Objektmessungen unterscheiden lassen. Eine Unterscheidung kann zum einen durch Unterschiede in der Reflektivität und zum anderen durch geometrische Merkmale, die es in der Punktwolke zu entdecken gilt, realisiert werden.

Retromarken als Referenzmarken

Werden Referenzmarken als Retroreflektor (Retrofolie oder Prisma) (Abbildung 7.21(a)) ausgebildet, so wird das Laserlicht von diesen fast ungedämpft zum Laserscanner zurückgeworfen. Die dabei zu registrierende extrem große Intensität enttarnt so die Referenzmarke innerhalb der Punktwolke. Damit gewährleistet ist, das mehrere Messungen auf die Fläche einer Retromarke treffen, bedarf diese einer bestimmten Größe in Abhängigkeit von der Messentfernung. Aus dem Bereich der Punktwolke, der mit der Retrofläche zur Deckung kommt, muss eine Zielung berechnet werden, die zum Mittelpunkt der Marke zeigt. Dies kann z. B. durch eine Schwerpunktbildung erreicht werden. Dabei wird zu einem lokalen Reflektivitätsmaximum ρ_{max} an der Stelle (Hz_i, V_j) innerhalb der Punktwolke eine Umgebung

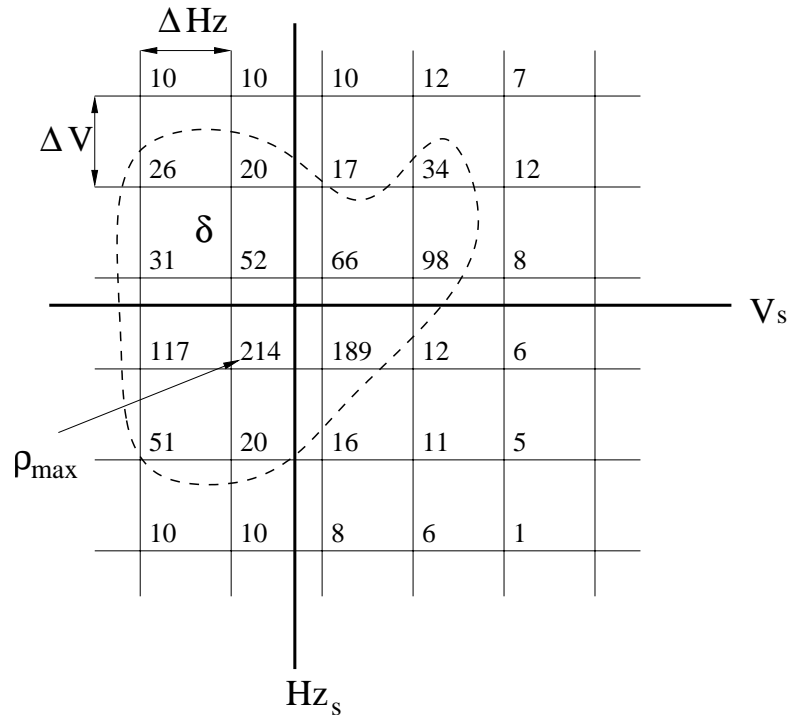
$$\delta = [Hz_{i-r}, \dots, Hz_i, \dots, Hz_{i+l}] \times [V_{i-u}, \dots, V_i, \dots, V_{i-o}]$$

betrachtet. Die Richtung (Hz_s, V_s) zum Schwerpunkt der Reflektivitätsfläche ergibt sich dann zu:

$$(Hz_s, V_s) = \frac{\sum_{\delta} \rho(Hz_{\delta}, V_{\delta}) \delta}{\sum_{\delta} \rho(Hz_{\delta}, V_{\delta})}$$



(a) Cyrax-Referenzmarke als Halbkugel und Retromarke verwendbar.



(b) Bestimmung der Zielrichtung zur Retromarkenmitte.

Abbildung 7.21: Retroreflektierende Referenzmarke.

Die Abbildung 7.21(b) veranschaulicht diese Berechnung.

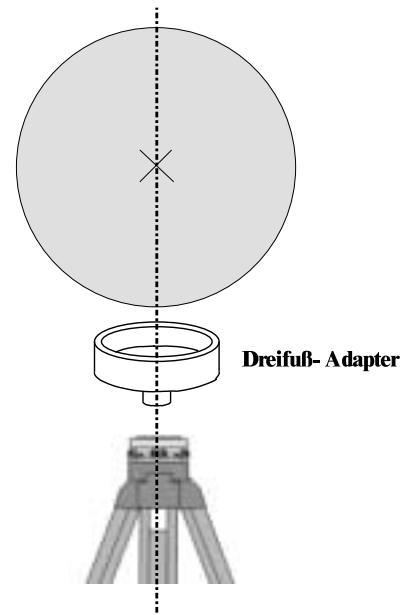
Vorteil dieser Art der Standpunktverknüpfung, ist die Kombinationsmöglichkeit mit tachymetrischen Messungen und die Möglichkeit, die Retromarken automatisch in der Punktwolke zu detektieren. Wobei nur bestimmt werden kann, wo sich eine Referenzmarke befindet, aber nicht auf welchem Festpunkt diese platziert ist. Da alle Referenzmarken für den Laserscanner gleich aussehen, ist eine automatische Identifikation nicht möglich. Um eine hohe Genauigkeit für die Anschlussmessung zu erreichen ist insbesondere bei kleinen Referenzmarkenflächen ein zusätzlicher Feinscan mit höherer Abtastrate von den Laserscannersystemen vorgesehen. Die Feinscans können so die Messzeit unwirtschaftlich erhöhen. Auf die Feinscans könnte verzichtet werden, wenn man die Referenzmarken mit einer größeren Retrofläche versehen würde. Dies würde aber zu unhandlichen Geräte führen, die zudem windanfällig wären, was wiederum das sichere fixieren auf der Festpunktvermarkung erschweren würde.

Passkugeln, Passebenen und Passkörper als Referenzmarken

Neben der Möglichkeit der Festpunktsignalisierung mit Retromarken kann dies auch durch besonders geformte Referenzmarken geschehen. Eine besonders geeignete Form als Referenzmarke ist die Kugel. Die Kugeloberfläche ist, von welcher Seite sie auch betrachtet bzw. abgescannt wird, immer gleich groß in Abhängigkeit von der Messentfernung und immer von gleicher Gestalt (Ellipse bei zentralperspektivischer Betrachtung). Damit kann eine Referenzkugel von allen Seiten von einem Laserscanner „angezielt“ werden. Ein Ausrichten, wie dies bei den Retromarken unter Umständen erforderlich ist, entfällt.

Als weitere Passkörper kommen Passebenen oder -zylinder in Frage. Als künstliche Objekte, die zusätzlich in die Objektszene gestellt werden, sind sie in ihrer Anwendbarkeit gegenüber der von allen Seiten anzielbaren Kugel unterlegen. Als Objektraumreferenz hingegen können sie sinnvoll eingesetzt werden (Kap. 7.5.2).

Passkugel-Konstruktion Die Abbildung 7.22(a) zeigt eine für das System Callidus entworfene Passkugel. Sie ist aus zwei Polystyrol-Halbkugeln gefertigt und hat einen Durchmesser von 43 cm. Die Oberfläche wurde mit Gipsmörtel geglättet und mit einer Schablone in Form geschliffen. Die Kugeloberfläche ist weiß und annähernd diffus reflektierend. Für die zentrische Fixierung über einem Festpunkt wird ein Dreifuß-Adapter

(a) Passkugel $r = 0,215$ m.

(b) Verbindung Dreifuß/Passkugel

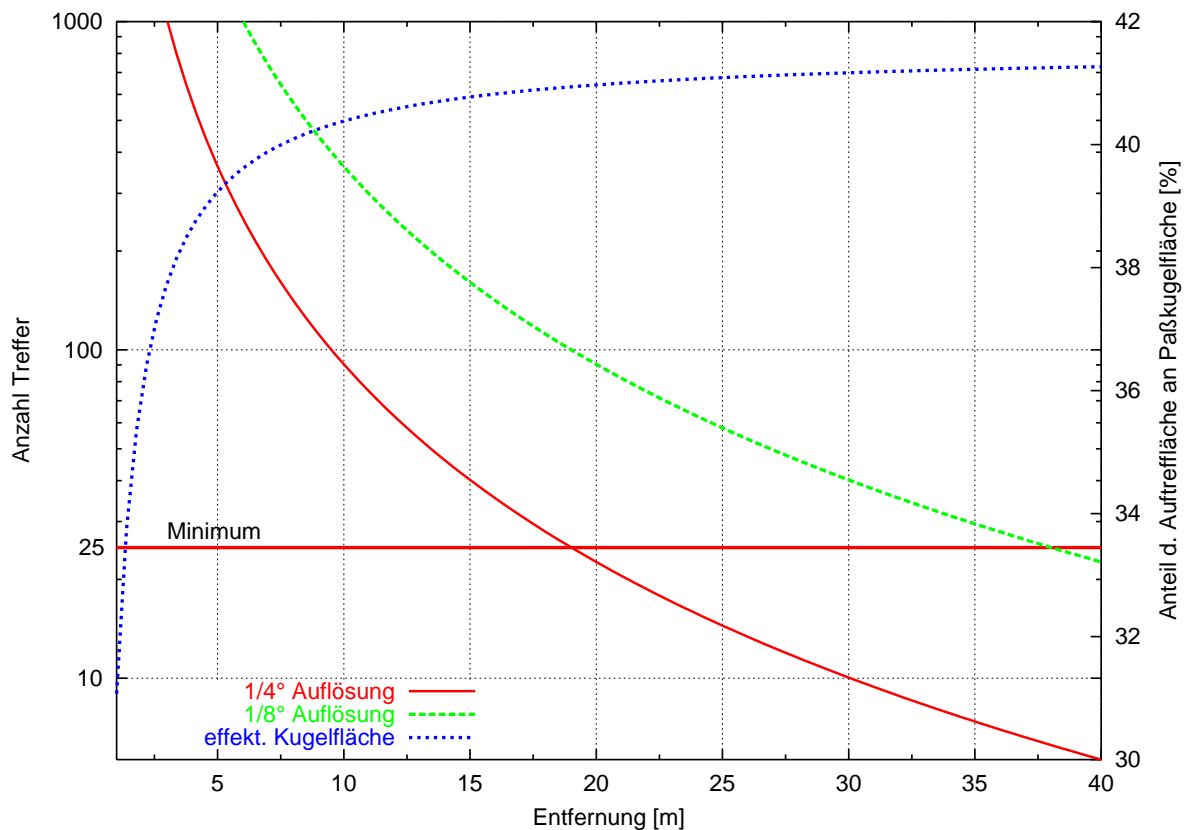
(c) Anzahl Lasermesspunkte auf eine Passkugel $r = 215$ mm in Abhängigkeit von der Messentfernung und Abtastauflösung (Mindestauftreffwinkel 90 gon).

Abbildung 7.22: Passkugel als Referenzmarke.

benutzt. Dieser besteht aus einem Kunststoffring mit etwa 15 cm Durchmesser, in dem die Kugel beliebig hineingesetzt werden kann. Der Dreifuß-Adapter garantiert, dass der Kugelmittelpunkt immer zentrisch über der Festpunktvermarkung liegt, nachdem der Dreifuß horizontalisiert und zentriert über dem Festpunkt aufgebaut ist (Abbildung 7.22(b)). Das aufgebaute Stativ kann so auch für tachymetrische Vermessungen genutzt werden. Der Dreifuß-Adapter erlaubt es, die Zwangszentrierung aufrechtzuerhalten. Der Durchmesser der Passkugel wurde so festgelegt, dass sie bis zur Maximalentfernung des Callidus-Laserscanners von ca. 30 m verwendbar ist. Dabei wurde unterstellt, dass die Lage der Passkugel aus der Punktwolke bestimmt werden kann, wenn

mindestens 16 Messpunkte in einem quadratischen Gitter (4×4) die Kugeloberfläche diskretisieren. Die Abbildung 7.22(c) zeigt die Anzahl der Treffer in Abhängigkeit von der Messentfernung für die typische Abtastauflösung von $1/4^\circ$ des Callidus-Systems und für den Fall, dass die Abtastauflösung halbiert werden könnte. Mit berücksichtigt wurde in der Untersuchung, dass Treffer, die unterhalb eines Auftreffwinkels von 90° zustande kommen, für eine zuverlässige Bestimmung zu stark verrauscht oder systematisch verfälscht sind, nicht benutzt werden können. Die Praxis zeigte abweichend von der theoretischen Voruntersuchung, dass mitunter erheblich mehr Treffer erforderlich sind, um eine einseitig abgescannte Kugel zuverlässig approximieren zu können. Die Anzahl notwendiger Treffer sollte ein Minimum von $5 \times 5 = 25$ nicht unterschreiten. Daraus ergibt sich als maximale Zielentfernung für die Passkugel ca. 20 m.

Störend an der Standpunktverknüpfung über Passkugeln ist, dass diese sehr groß dimensioniert sein müssen. Dies kann leicht dazu führen, dass sie zu erheblichen Objektabschattungen führen können. Geeignete Standorte wie z. B. Fensterbänke sind daher auszuwählen. Das große Kugelvolumen ist zudem sehr hinderlich bei der Handhabung und beim Transport. Werden Passkugeln mit unterschiedlichen Radien verwendet, besteht die Möglichkeit diese danach unterscheiden zu können. Diese Art der Identifikation würde eine automatische Festpunktzuordnung erlauben. Im Hinblick auf eine automatische Verarbeitung ist dies ein bedeutender Unterschied zu dem Verfahren mit Retromarken.

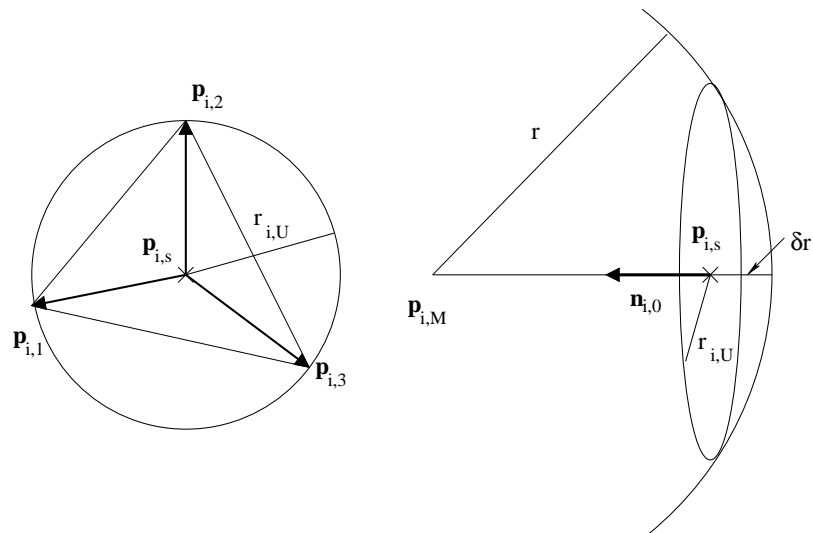


Abbildung 7.23: Bestimmung des Kugelmittelpunktes einer Passkugel.

Passkugel-Detektion Das Auffinden von Kugeln innerhalb einer Punktwolke kann vollständig automatisiert werden. Hierzu wird für jedes Dreieck $T_i = \{\mathbf{p}_{i,1}, \mathbf{p}_{i,2}, \mathbf{p}_{i,3}\}$ der triangulierten Punktwolke ein Kugelmittelpunkt $\mathbf{p}_{i,M}$ unter Verwendung des Sollradiuses r berechnet (Abbildung 7.23). Die Dreieckspunkte definieren eine eindeutige Ebene mit dem normierten Normalenvektor $\mathbf{n}_{i,0}$. Ausgehend vom Schwerpunkt

$$\mathbf{p}_{i,s} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^3 x_{i,j} \\ \sum_{j=0}^3 y_{i,j} \\ \sum_{j=0}^3 z_{i,j} \end{bmatrix}$$

des Dreiecks i wird der Umkreisradius $r_{i,U}$ in der Dreiecksebene bestimmt. Der Mittelpunkt findet sich dann durch polares Anhängen an $\mathbf{p}_{i,s}$ mit der Entfernung $r - \delta r$ und der durch $\mathbf{n}_{i,0}$ gegebenen Richtung.

$$r - \delta r = r \sqrt{1 - \left(\frac{r_{i,U}}{r}\right)^2} \quad \text{falls } r_{i,U} \leq r$$

$$\mathbf{p}_{i,M} = \mathbf{p}_{i,s} + (r - \delta r) \mathbf{n}_{i,0}$$

Dreiecke, deren Umkreis bereits größer ist als der Sollradius, scheiden als Verdachtsflächen für die Passkugeloberfläche aus und werden im weiteren nicht mehr berücksichtigt. Im nächsten Schritt werden benachbarte

Dreiecke darauf hin geprüft, ob deren Kugelmittpunkte $\mathbf{p}_{i,M}$ unterhalb der Schranke Δs_{tol} voneinander entfernt liegen. Dazu wird der im Pseudocode 7.2 dargelegte rekursive Segmentierungs-Algorithmus um die entsprechende Zugehörigkeitsentscheidung abgewandelt. Es ergeben sich so Segmente, die dem Merkmal einer Oberfläche einer Kugel vom Radius r entsprechen. Anhand aller Punkte, die zu einem Kugelsegment gehören, wird eine Kugelapproximation nach Kapitel 6.3.2 durchgeführt. Es ergibt sich ein geschätzter Kugelradius \hat{r} , der nur innerhalb einer Toleranz von Δr vom Sollradius r abweichen darf. Ist die Abweichung oder die Standardabweichung a posteriori s_0 zu groß, so wird vermutet, dass das entsprechende Segment nicht zu einer Passkugel gehört. Für ein gültig befundenes Segment liefert der approximierte Kugelmittelpunkt $\hat{\mathbf{p}}_{i,M}$ die Passkoordinaten im Laserscanner-Bezugssystem.

Transformation mittels Passkugeln Sind ausreichend² viele Passkugeln in einer Punktwolke vorhanden und bestimmbar, so kann die Stationierung und Orientierung durch Transformation des Laserscanner-Bezugssystems L (Lokalkoordinaten) ins übergeordnete Bezugssystem W (Weltkoordinaten) durchgeführt werden. Die Umrechnung von Koordinaten eines Punktes \mathbf{p} im System L zum System W ist durch folgende allgemeine Transformationsgleichung gegeben.

$$\mathbf{p}(W) = \begin{bmatrix} x(W) \\ y(W) \\ z(W) \end{bmatrix} = \mathbf{p}_{0,L \rightarrow W} + m_{L \rightarrow W} \mathbf{R}_{L \rightarrow W} \mathbf{p}(L) \quad (7.4)$$

mit

$$\mathbf{p}(L) = \begin{bmatrix} x(L) \\ y(L) \\ z(L) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{L \rightarrow W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} : \text{Rotation}$$

$$\mathbf{p}_{0,L \rightarrow W} = \begin{bmatrix} p_{0,x} \\ p_{0,y} \\ p_{0,z} \end{bmatrix} : \text{Translation}$$

$$m_{L \rightarrow W} : \text{Maßstab}$$

Im Sinne einer kombinierten Ausgleichung unter Berücksichtigung sämtlicher Korrelationen lassen sich die Kugelapproximationen und die Bestimmung der Transformationsparameter in Gleichung 7.4 in einem Gesamtmodell gemeinsam durchführen. Hierzu sind die Beobachtungsgleichungen für die Kugeloberflächenpunkte (Gleichung 6.1) mit Gleichung 7.4 zu verbinden. Die Verbesserungsgleichung einer Passkugel lautet:

$$v_i = \sqrt{(x_i(W) - \hat{x}_M(W))^2 + (y_i(W) - \hat{y}_M(W))^2 + (z_i(W) - \hat{z}_M(W))^2} - \hat{r} \quad (7.5)$$

Durch dieses Zusammentragen aller verfügbaren Beobachtungen werden die Passkugelbestimmungen auf Messpunkte aller beteiligten Punktwolken gestützt. Messwerte über den gesamten Umfang der Kugeloberflächen können so in die Berechnung einfließen. Etwaige Restsystematiken in der Passkugelgestalt (Fertigungstoleranz) können durch Freigeben des Kugelradius berücksichtigt werden. Würde man sich nur auf die extrahierten Kugelmittelpunkte beschränken und sie als Passpunktkoordinaten für die Transformation nutzen wäre dies nicht möglich. Auch wenn in einer Punktwolke für eine Passkugel nicht ausreichend viele Treffer für eine getrennte Kugelapproximation vorhanden sind, erlaubt der Gesamtmodellansatz diese in die Stationierung und Orientierung der Punktwolke einfließen zu lassen.

7.5.2 Standpunktverknüpfung mittels Objektraumreferenzen

Die Standpunktverknüpfung mittels künstlicher Passkörper kann leicht auf Passkörper übertragen werden, die zugleich Bestandteil der Objektgeometrie selbst sind. Sind Objektbereiche in verschiedenen Punktwolken ganz oder teilweise erfasst worden, so können diese Bereiche genutzt werden, die Standpunktverknüpfungen zu

²Mindestens zwei für die Stationierung und Orientierung eines horizontierten Laserscanner und mindestens drei für einen beliebig gedrehten und gekippten camera-view-Laserscanner

bestimmen ([NW95], Abbildung 7.24). Der Vorteil bei der Nutzung dieser Objektraumreferenzen liegt im wesentlichen darin, dass keine speziellen Referenzmarken oder Passkörper aufgestellt werden müssen. Ein entscheidender Nachteil ist aber, dass die automatische Bestimmung korrespondierender Objektbereiche verschiedener Punktwolken von komplexer Natur ist. Die Extraktion von Objektraumreferenzen ähnlich der Extraktion von Passkugeln erscheint nicht mit gleicher Zuverlässigkeit möglich. In der Regel ist die Auswahl geeigneter Objektbereiche und ihre Identifikation manuell vorzunehmen.

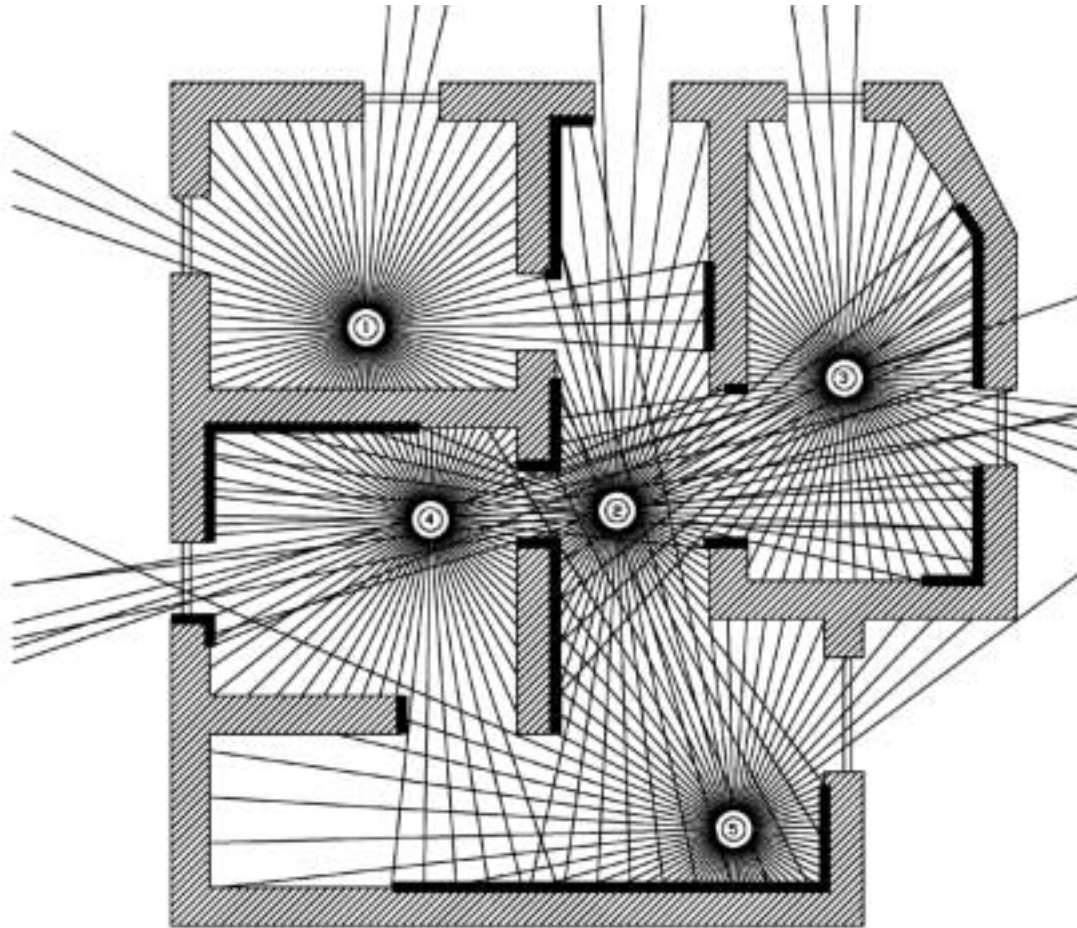


Abbildung 7.24: Standpunktverknüpfung über Objektraumreferenzen (fett gezeichnete Wandlinien) [NK01].

Die in Kapitel 7.3 vorgestellte automatische Extraktion von Objektgeometrien kann genutzt werden, in jeder zu verknüpfenden Punktwolke Kandidaten für Passebenen zu bestimmen. Lediglich die Korrespondenz zwischen den Passebenen ist dann noch manuell herzustellen.

Nachdem Prinzip der Passkugeln lässt sich die Verbesserungsgleichung für eine Passebene leicht angeben:

$$v_i = n_x(W)x_i(W) + n_y(W)y_i(W) + n_z(W)z_i(W) - 1 = 0 \quad (7.6)$$

Zur eindeutigen Stationierung und Orientierung einer Punktwolke sind drei Passebenen notwendig, die nicht zueinander coplanar sein dürfen. Jede Passebene bindet den Laserscannerstandpunkt auf eine parallel verlaufende Ebene. Der Abstand dieser Ortsebene ist durch den Abstand des Laserscanners zur Passebene gegeben. Der Schnittpunkt von drei dieser Ortsebenen liefert den Standpunkt im jeweiligen lokalen System. Die Orientierung der Systeme zueinander ergibt sich aus den Schnittwinkel der Normalenvektoren zu gleichen Passebenen in unterschiedlichen Systemen. Weitere sinnvolle Passoberflächen stellen zylindrische Körper dar, die als Säulenschäfte vielfach an Bauwerksgeometrien zu beobachten sind.

7.5.3 Zusammenfassung

In der Tabelle 7.2 sind die Vorteile und Nachteile der vorgestellten Verfahren zur Standpunktverknüpfung zusammengetragen. Im Hinblick auf einen automatischen Auswerteprozess erscheint das Passkugelverfahren

ren als besonders geeignet; mit dem Nachteil der unpraktischen Handhabung der großen Passkugeln. Das Referenzmarken- und Passkugelverfahren kann höchste Genauigkeiten, verbunden mit einer sehr guten Zuverlässigkeit, bieten. Grund hierfür ist nicht zuletzt, dass die Standorte der Passpunkte optimal gewählt werden können. Eine Standpunktverknüpfung ausschließlich über Objektraumreferenzen setzt voraus, dass die Objektgeometrie ausreichend viele Bereiche mit charakteristischer Geometrie besitzt. Eine Verknüpfung von Punktwolken einer Fassade z. B. ist mittels Objektraumreferenzen nicht möglich, da nicht alle Freiheitsgrade der räumlichen Transformation aufgrund der fehlenden Raumtiefe einer Fassade bestimmbar sind.

Tabelle 7.2: Verfahren der Standpunktverknüpfung im Vergleich.

	Referenzmarken	Verfahren mit Passkugeln	Verfahren mit Objektraumreferenzen z.B. Passebenen
Vorteile			
kombinierbar mit Tachymeter	ja	ja	nein
automatische Extraktion	ja	ja	nein
individualisierbar	nein	ja	nein
Nachteile			
Abhängigkeit v. Zielrichtung	ja	nein	ja
Einrichtungsaufwand	gering	gering	kein
Intensitätsmessung nötig	ja	nein	nein
Charakteristik			
Handhabung	gut	befriedigend	ausreichend
Genauigkeit	sehr gut	sehr gut	befriedigend
Zuverlässigkeit	sehr gut	gut	befriedigend

Die Verfahren mittels Referenzmarken und Passkugeln lassen sich gut in die allgemeine Arbeitsweise einer Bauaufnahme integrieren, weil die Festpunkte des Messnetzes mitbenutzt werden können. Bedauerlich ist, dass die einfachste Art einer Standpunktverknüpfung, die direkte Stationierung, durch keiner der kommerziellen Laserscannersysteme unterstützt wird. Einige Systeme können zwar horizontalisiert und zentriert werden, aber allen fehlt eine Möglichkeit der direkten Anzielung einer Messmarke z. B. durch ein Zielfernrohr. Für viele Einsatzbereiche wäre die schnell durchzuführende direkte Stationierung auch unter hohen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsansprüchen ausreichend. Laserscanner ohne Möglichkeit der Horizontalisierung benötigen mehr Passpunktinformationen, um die zwei zusätzlichen Freiheitsgrade der Geräteneigung zu bestimmen.

Alle miteinander verbundenen Standpunkte sollten aus dem Gesichtspunkt der Fehlerfortpflanzung und der Korrelation immer als ein Gesamtproblem betrachtet und in einem Guss ausgeglichen werden. In [PKSU00] wird diese Vorgehensweise als verkettete räumliche Ähnlichkeitstransformation beschrieben.

7.6 Datenfilterung

Im Kapitel 7.3 wurde bereits eine Möglichkeit zur Datenfilterung vorgestellt, der Mittelwertfilter. Diese Art der Datenfilterung hatte zum Zweck die Punktwolke zu glätten. Eine Datenfilterung ist auch sinnvoll, um die Datenmenge zu reduzieren. Im folgenden wird eine Filterungsmethode dargestellt, die eine erhebliche Datenreduktion ermöglicht und an dessen Ende ein Randflächenmodell für die Punktwolke steht, das für viele Zwecke an Stelle eines exakt ausmodelliertem Objektmodells benutzt werden kann.

Wir betrachten die Abbildung 7.25, die die Nachbarschaft eines Pivot-Punktes \mathbf{p} zeigt und stellen fest: Wenn a unterhalb eines Grenzwertes a_{min} ist, dann wird die Geometrieinformation, die in \mathbf{p}_i enthalten ist, bereits durch die umliegenden Punkte $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots$ ausreichend „mitgetragen“. Die Punkte $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots$ beschreiben eine planare Fläche, in die der Punkt \mathbf{p}_i im Rahmen des Grenzwertes a_{min} hinein interpoliert werden kann. Punkt \mathbf{p}_i ist also zur Beschreibung der Objektgeometrie entbehrlich und darf in Anbetracht einer gegebenen Genauigkeitsanforderung gelöscht werden.

In einem einzelnen Filterschritt wird jeder Punkt der Punktwolke bezüglich des Grenzwertes a_{min} unter-

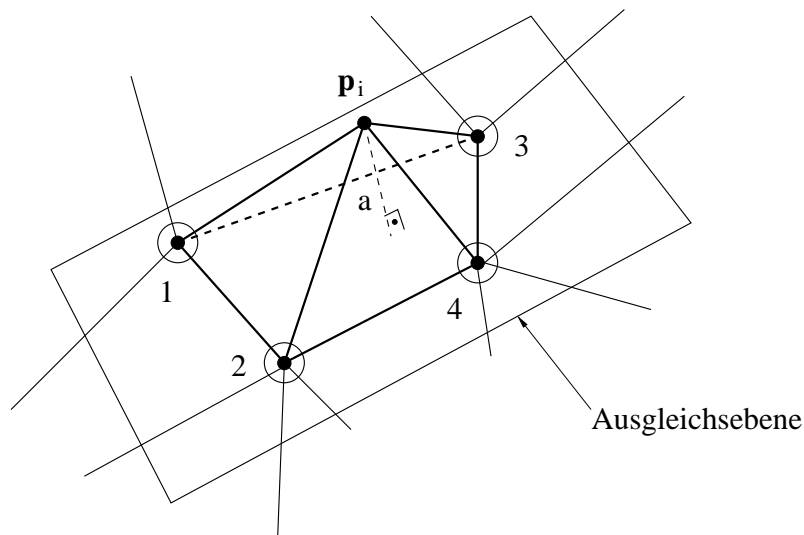


Abbildung 7.25: Prinzip der kantenerhaltenden Datenfilterung.

sucht. Hierzu wird aus den Nachbarpunkten eine Ausgleichsebene nach Kapitel 6.3.1 berechnet und der Abstand a bestimmt. Nach Abschluss der Filterung ist die Triangulierung (Kapitel 7.3.1) der Punktwolke erneut auf die erhalten gebliebenen Punkte auszuführen. Sinnvoll ist die Einführung einer Mindestanzahl für die Nachbarpunkte. Sie sollte so groß gewählt werden, dass die umgebende Ebene zuverlässig geschätzt werden kann. Da im u, v -Raum trianguliert wird, hat bei einer rasterförmig abgetasteten lückenlosen Punktwolke jeder innere Punkt mindestens vier und maximal acht Nachbarpunkte. Nach dem ersten Filterschritten und den folgenden sind beliebig viele Nachbarpunkte möglich. Es werden gute Ergebnisse erzielt, wenn mehrere Filterschritte mit gestaffelten Grenzwerten hintereinander ausgeführt werden.

Die Tabelle 7.3 zeigt eine bewährte Sequenz für Scannerdaten mit einer Messgenauigkeit von 3 mm. Zuerst werden Punkte eliminiert die eine große Ablage aufweisen. Die Bezugsebene muss dabei aber auf möglichst viele Nachbarpunkte gestützt werden. Mit abnehmender Anzahl an Nachbarpunkten wird a_{min} strenger gefasst, bis zur gewünschten Grenzgenauigkeit (6. Schritt in Tabelle 7.3). Nach diesem Schritt haben sich die Ecken und Kanten verbunden mit einem kleinteiligen Dreiecksnetz herausgebildet; planare Objektflächen werden durch wenige große Dreiecke repräsentiert. Die Filterleistung nach diesem Schritt ist zu ca. 80% erbracht. In den nachfolgenden Schritten wird a_{min} wieder erhöht, um einzelne Abweichler innerhalb der großen Dreiecke zu entfernen.

Wird das Verfahren mehrfach iterativ mit unterschiedlichen Grenzwerten wie oben beschrieben auf eine Punktwolke angewendet, so werden je nach Komplexität der Objektgeometrie bis weit über 90% der Daten gelöscht. Der Vorteil an dieser Datenfilterung liegt daran, dass es das Bestreben hat, Punkte, die Ecken und Kanten in der Punktwolke repräsentieren, zu erhalten. Dies gilt leider auch für einzelne Störpunkte, die daher vorab zu eliminieren sind.

Die vorgeschlagene kantenerhaltenden Datenfilterung kann dem Verfahren zur Ableitung von Grundrissen und Schnitten sowie der Ableitung von Panoramen und Orthophotos vorgeschaltet werden. Dies reduziert die erforderlichen Rechenzeiten erheblich ohne entscheidende Qualitätsverluste hinnehmen zu müssen.

7.7 Nutzung von digitalen Photos

Greift man die in Kapitel 4.6 angeführte Erkenntnis auf, dass Laserscanning und Photogrammetrie sich in idealerweise ergänzen, so folgt daraus, dass beide Messmethoden kombiniert werden sollten. Eine Kombination lässt sich leicht dadurch realisieren, dass ein Laserscanner zusätzlich mit einer Digitalkamera ausgerüstet wird, die simultan zum Scanvorgang Bildinformationen über das Messobjekt sammelt. Unter günstigen Rahmenbedingungen können so Innenräume über den Laserscanner vollständig hinsichtlich der Geometrie und über die Photos hinsichtlich zusätzlicher Sachinformationen innerhalb weniger Minuten vermessen und dokumentiert werden. So kann z. B. eine Wandfläche in ihren Dimensionen und zusätzlich dessen Wandbelag, z. B. weiße Rauhfasertapete oder Vertäfelung, bestimmt werden.

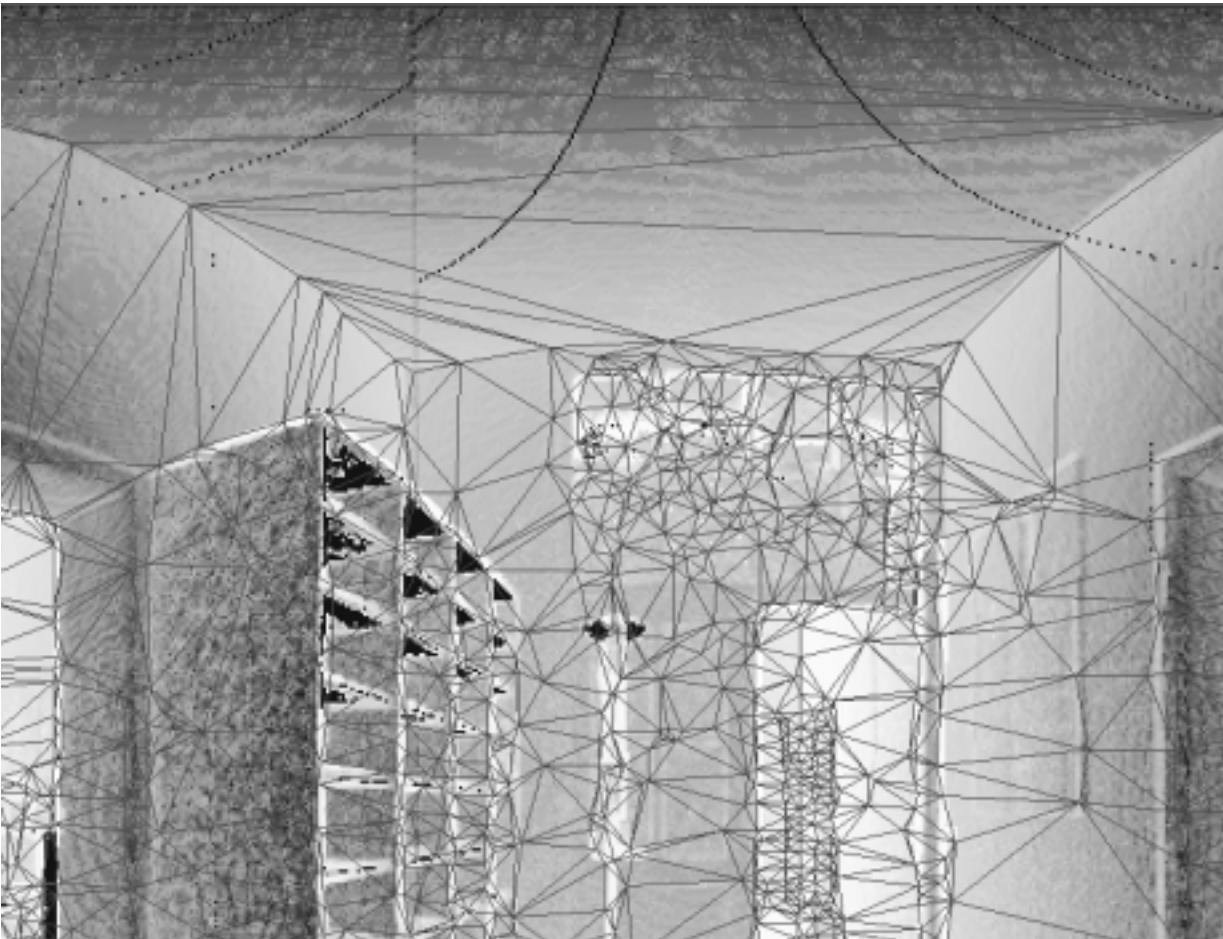


Abbildung 7.26: Beispiel einer kantenerhaltenden Datenfilterung; Datenreduktion um 99.4% (3.883 statt 660.044 Punkte). -Ausschnitt-

Tabelle 7.3: Standardparameter für eine iterative kantenerhaltende Datenfilterung.

Schritt	mind. Anz. Nachbarpunkte	a_{min} [mm]	Anzahl Iterationen
1	8	30,0	1
2	7	15,0	1
3	6	10,0	1
4	5	7,5	1
5	4	6,0	1
6	3	5,0	10
7	3	7,5	10
8	3	10,0	10
9	3	12,5	10
10	3	15,0	10
11	3	17,5	10

Eine Kopplung von Scanner- und Bildinformationen bedeutet Photos bezüglich der Punktwolke zu georeferenzieren und hat folgende Vorteile:

Interpretationssteigerung

Eine Überlagerung der Punktwolke mit Bildinformationen führt zu einer deutlich besseren Interpretationsmöglichkeit. Objekte können vom Menschen besser anhand seines visuellen Eindrucks erkannt und analysiert werden als anhand rein geometrischer Merkmale. Die Punktwolke wird durch ergänzende Bildinformationen „lebendig“ und kann so die geometrische Auswertung entscheidend erleichtern.

Auflösungssteigerung

Bereits einfache digitalen Amateurkameras haben eine deutlich größere Objektauflösungsleistung als die meisten Laserscannersysteme. Die Winkelabtastrate einer Kamera mit einem Bildwinkel von 40° und einer Bildbreite von 512 Pixeln beträgt bereits weniger als $1/12^\circ$ und ist somit dreimal feiner als die typische Auflösung des Callidus-Systems mit $1/4^\circ$. Bei einer Kombination beider Informationen könnten anhand von referenzierten Photos Objektdetails unterhalb der Laserscannerauflösung vermessen werden. Wie in Abbildung 7.27 schematisch angedeutet, wird ein Photo durch drei oder mehr Stützpunkte der Punktwolke referenziert und dadurch gewissermaßen differentiell entzerrt. Neben der gezeigten linearen Interpolation zwischen den Stützpunkten sind komplexere Interpolationsmodelle denkbar.

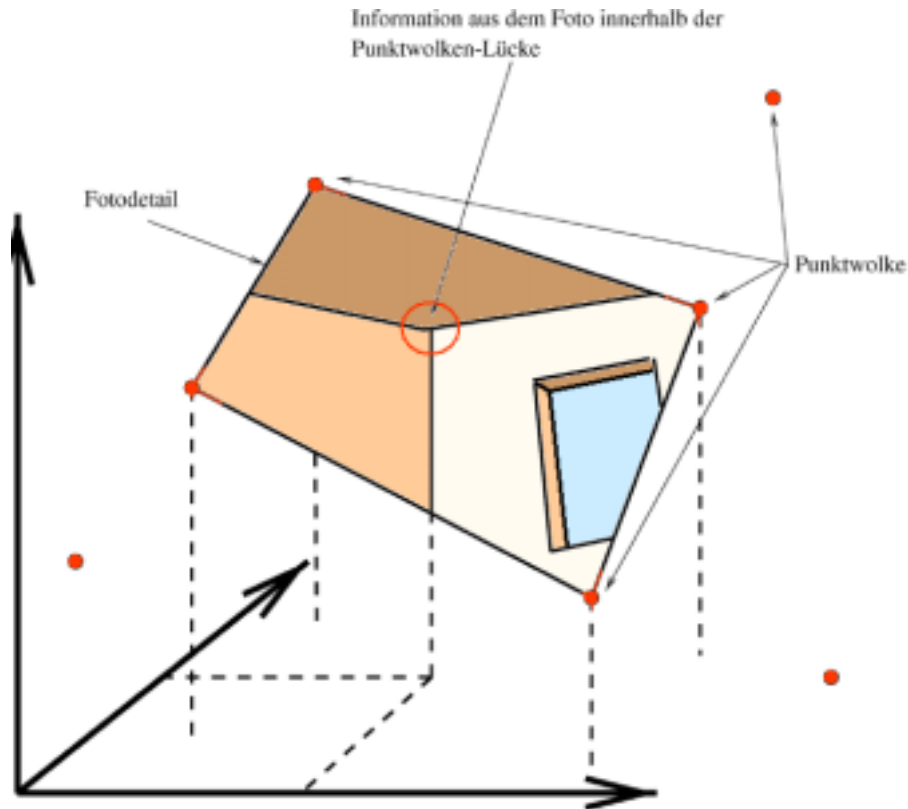


Abbildung 7.27: Auflösungssteigerung durch Kombination mit Digitalphotos.

Verbreiterung der Menge an Erfassungssubjekten

Viele Objektdetails sind nicht durch geometrische Merkmale klassifizierbar aber sehr wohl durch Farbinformationen. Ein extremes Beispiel ist die Wandmalerei, die bis auf die Dicke der Farbschicht, welche unterhalb jeglicher geodätischer Messgenauigkeit liegt, sich nicht von der geometrischen Form und Gestalt der Wand, auf der sie aufgetragen ist, unterscheidet. In einem Photo hingegen sind die Grenzen zwischen Wand und Wandmalerei zweifelsfrei dokumentiert. Das Photo bietet in so einem Fall über die vom Laserscanner erfasste Geometrie hinausgehende geometrische Informationen. Hinzu kommen nicht-geometrische Informationen, die durch Interpretation aus dem Photo gewonnen werden können z. B. Materialparameter oder Erhaltungszustände. Das Photo liefert also das „Was“ und die Scannerdaten das „Wo“ ([SE02, S. 61]).

In [Wie01] wird eine Kombination von Laserscanning und Photogrammetrie vorgestellt, wobei der konventionelle Weg der differentiellen Entzerrung ([Luh00, S. 306ff]) von Aufnahmen einer Teilmesskammer besprochen wird. Die Punktwolke wird dabei als digitales Oberflächenmodell aufgefasst, bei dem jedem Oberflächenpunkt nur genau eine Höhe $z = f(x, y)$ zugeordnet werden kann. Hier soll ein allgemeinerer Ansatz dargestellt werden, mit dem beliebige Oberflächen mit einer Phototextur versehen werden können.

7.7.1 Algorithmus zur Kopplung von Scanner- und Bildinformationen

Der Grundgedanke der Kopplung von Scanner- und Bildinformationen ist die relative Orientierung der sensoreigenen Bezugssysteme durch Kalibrierungsmessungen herzustellen und dann die Sichtstrahlen, die durch die Pixel eines Photos definiert sind, mit der triangulierten Punktwolke zum Schnitt zu bringen. Der Schnittpunkt ist der geometrische Ort an dem das Objekt eine Farberscheinung zum Zeitpunkt der Aufnahme hatte, die dazu geführt hat, dass im Photo der Pixelfarbwert dokumentiert (gemessen) werden konnte. Durch sukzessive Abarbeitung sämtlicher Sehstrahlen (Pixel) eines Photos wird so die triangulierte Punktwolke virtuell eingefärbt. Voraussetzung für dieses Verfahren ist, oben bereits mit relativer Orientierung bezeichnet, die Kenntnis des Aufnahmeortes, der Aufnahmerichtung und der Abbildungsvorschrift der Kamera bezüglich des Laserscanner-Bezugssystems.

Der Kopplungsalgorithmus wird anhand des Callidus-Systems dargestellt, da dieses werksseitig über eine integrierte Videokamera verfügt. Während des Scanvorganges können an festen Positionen ($H_{z,c}, V_{i,c}$) mit dieser Kamera Standbilder aufgenommen und digital gespeichert werden. Die Abbildung 7.28 zeigt die relative Anordnung der Kamera zur Steh- und Zielachse des Lasers rechts neben dem Pol, von dem aus die Streckenmessungen ausgehen. Mit der horizontalen Rotation des Laserscanners um die Vertikale wird die Kamera mitgedreht. Getrennt dazu kann die Videokamera noch zusätzlich beliebig nach oben und unten gekippt werden. Damit kann, ausgenommen des Bereiches unterhalb des Gerätes, die komplette Umgebung mit einer unterschiedlichen Anzahl von Bildern mosaikartig aufgenommen werden. Dieses System ist somit geeignet, eine simultane Erfassung von geometrischen und Bildinformationen vorzunehmen.

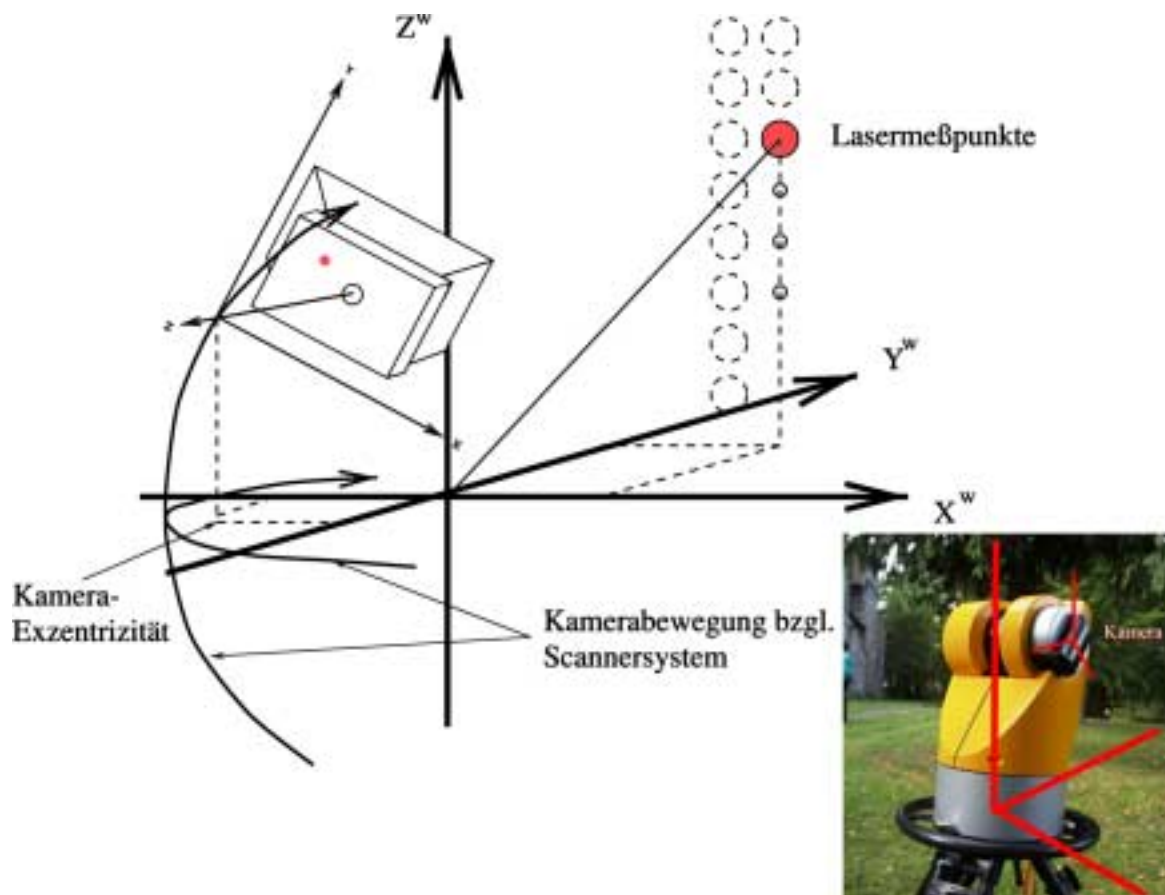


Abbildung 7.28: Digital-Kamera und Laserscanner benutzen verschiedene Bezugssysteme.

7.7.2 Umrechnung der Weltkoordinaten in kamerazentrierte Koordinaten

Die Kopplungsaufgabe besteht im wesentlichen darin ein mathematisches Modell aufzustellen, welches die Bildkoordinaten eines Pixels in Beziehung zu einem dreidimensionalen Punkt einer Punktwolke setzt. Um zu einem übersichtlichen Formelapparat zu gelangen wird die Identität ohne Beschränkung der Allgemeingültig-

keit zwischen übergeordneten Bezugssystem und Laserscanner-Bezugssystem vorausgesetzt. Damit liegen die Koordinaten $X_i(W), Y_i(W), Z_i(W)$ einer originären Punktwolke im Weltsystem (W) vor. Für die Umrechnung der Punktwolke in das kamerazentrierte System mit den Koordinaten X_i, Y_i, Z_i gilt:

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{R}^T (\mathbf{X}_i(W) - \mathbf{X}_0(W)) \tag{7.7}$$

mit

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

α : Kippung der Kamera

β : Neigung der Kamera

γ : Kantung der Kamera

$\mathbf{X}_0(W)$: Aufnahmeort bzw. Exzentrizität der Kamera zum Laserscannersystem

Umrechnung der kamerazentrierten Koordinaten in unverzerrte Bildkoordinaten

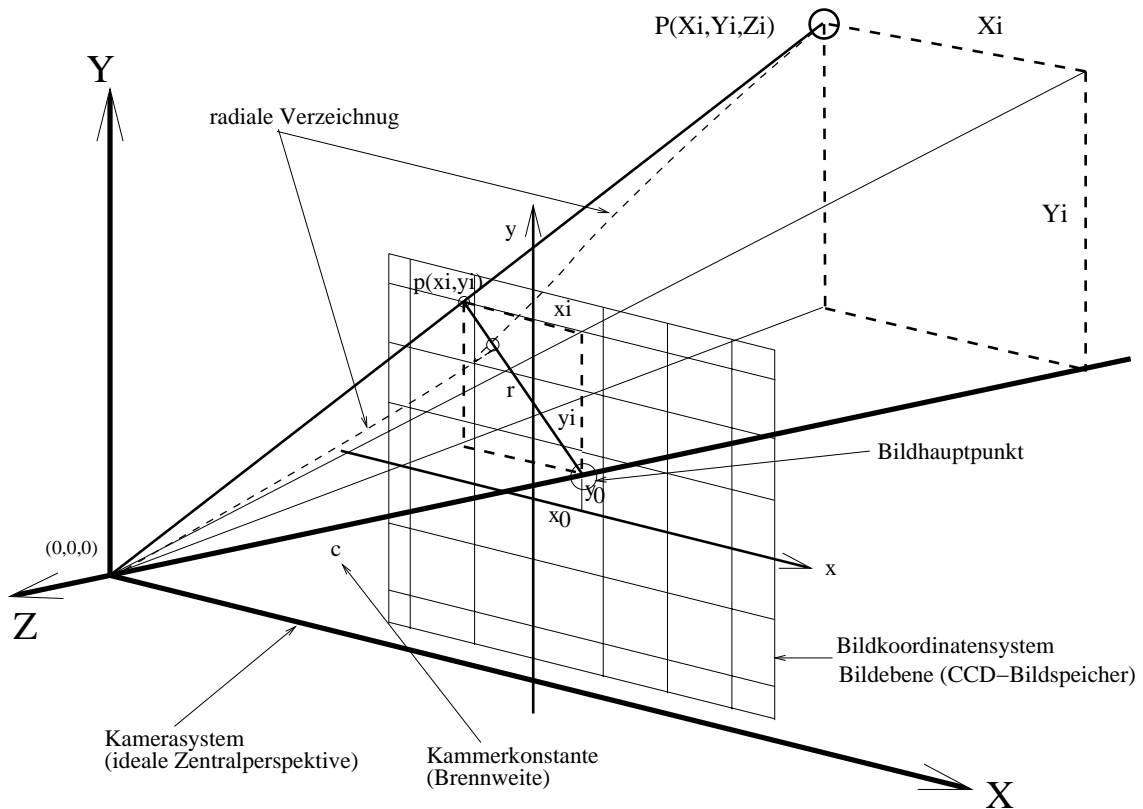


Abbildung 7.29: Zentralperspektive mit radialer Verzerrung.

Die Abbildung des Objektraumes durch eine Kamera kann ausreichend genau mit der Zentralprojektion einer Lochkamera modelliert werden (Abbildung 7.29). Die Objektkoordinaten im kamerazentrierten System $\mathbf{X}_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T$ werden auf der Bildebene wie folgt abgebildet:

$$\begin{aligned} x_i &= c \frac{X_i}{Z_i} \\ y_i &= c \frac{Y_i}{Z_i} \end{aligned} \tag{7.8}$$

mit

c : Kammerkonstante bzw. Brennweite der Kamera

Umrechnung der unverzerrten Bildkoordinaten in Pixelkoordinaten

Die idealisierten, unverzerrten Bildkoordinaten (x_i, y_i) sind in der Praxis wegen der Unvollkommenheit der Sensoren nicht messbar. Vielmehr erhält man, hauptsächlich durch die Verschiebung der Bildhauptpunktlage (x_0, y_0) und die Objektivverzeichnung verursacht, verzerrte Koordinaten (x'_i, y'_i) . Diese wiederum müssen entsprechend der endlichen Größe eines CCD-Bildpunktes auf das Pixelgitter quantifiziert (Auf- und Abrunden) werden. Durch den Ansatz einer Verzerrungsfunktion können radialsymmetrische, tangentielle und asymmetrische sowie andere Systematiken und Störeinflüsse eliminiert werden. Die Umrechnungsformeln für einen in der Photogrammetrie üblichen Ansatz lauten:

$$\begin{aligned} x'_i &= x_0 - f_x(x_i, y_i) \\ y'_i &= y_0 - f_y(x_i, y_i) \end{aligned} \quad (7.9)$$

mit

$$f_x(x, y) = x (a_1 r^2 + a_2 r^4) \text{ Verzerrungsfunktion}$$

$$f_y(x, y) = y (a_1 r^2 + a_2 r^4)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

a_1, a_2 : Koeffizienten der Verzerrungsfunktion

x_0, y_0 : Bildhauptpunktlage

Wird in die Gleichung 7.9 (Innere Orientierung) die Gleichung 7.8 (Zentralperspektive) eingesetzt und die resultierende in die Gleichung 7.7 ergeben sich die so genannten Kollinearitätsgleichungen $(k_x(), k_y())$ der Photogrammetrie, welche die Beziehung zwischen Objektkoordinaten und Bildkoordinaten modellieren.

$$\begin{aligned} x'_i &= k_x(\mathbf{X}_0(W), \alpha, \beta, \gamma, c, x_0, y_0, a_1, a_2, \dots) \\ y'_i &= k_y(\mathbf{X}_0(W), \alpha, \beta, \gamma, c, x_0, y_0, a_1, a_2, \dots) \end{aligned} \quad (7.10)$$

7.7.3 Kamera-Kalibrierung

Für die oben aufgezeigte Kopplung werden die Kalibrierparameter

$$\mathbf{X}_0(W), \alpha, \beta, \gamma, c, x_0, y_0, a_1, a_2, \dots$$

benötigt. Die äußere Orientierung mit den Parametern $(\mathbf{X}_0(W), \alpha, \beta, \gamma)$ ist für jedes Photo neu zu bestimmen. Die Parameter der inneren Orientierung $(c, x_0, y_0, a_1, a_2, \dots)$ werden oftmals für einen längeren Zeitraum als stabil angenommen und werden daher vorab einmalig im Labor bestimmt.

Für die Bestimmung der inneren Orientierung der integrierte Videokamera des Callidus-Systems kann nicht auf die lehrbuchmäßigen Verfahren ([Luh00, Kap. 7.2]) zurückgegriffen werden, da diese nur unter erheblichen Aufwand unabhängig vom Messkopf untersucht werden kann. Zudem könnte der Aus- und Einbau der Kamera die innere Orientierung verändern. Als weitere Kalibriergrößen kommen beim Callidus-System die Exzentrizitäten hinzu. Die Bildhauptpunkte eines Bild-Mosaiks beschreiben einen Kreis mit der Exzentrizität r wie der Abbildung 7.30 zu entnehmen ist. Ist der Wert r , die Verschwenkung α_0 und die Verkippung β_0 bekannt, so lassen sich allein durch die Einstellwerte $\Delta\alpha$ und $\Delta\beta$ für die Bilder eines $n \times m$ -Mosaikes die äußeren Orientierungen berechnen.

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \alpha_0 + i\Delta\alpha \quad i \in [1, \dots, n] \\ \beta_j &= \beta_0 + j\Delta\beta \quad j \in [1, \dots, m] \end{aligned}$$

Die Verschwenkung α_0 und die Verkippung β_0 stellen gewissermaßen den Einbaufehler der Kamera bezüglich der Laserscannereinheit dar.

Für die Callidus-Kamera ist ein spezielles Verfahren zur in-situ-Kalibrierung entwickelt worden [Ker01b]. Für die Bestimmung der Kalibrierparameter ist dabei eine ausreichende Anzahl von Passpunkten erforderlich,

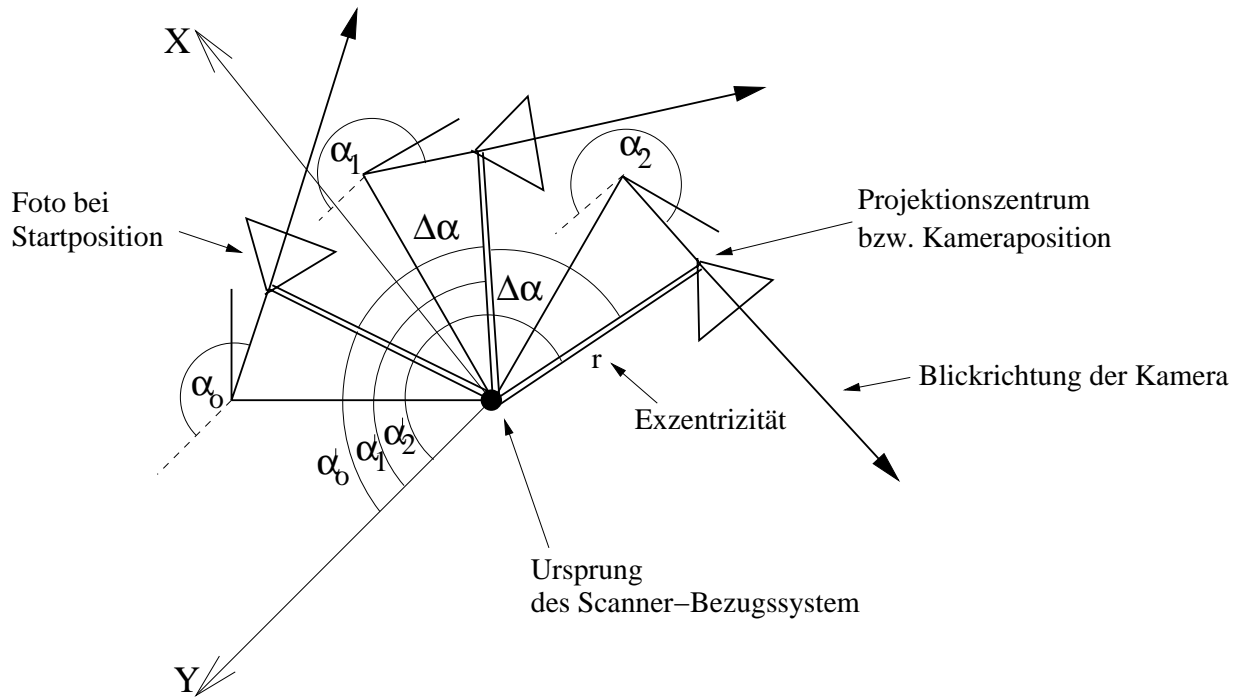


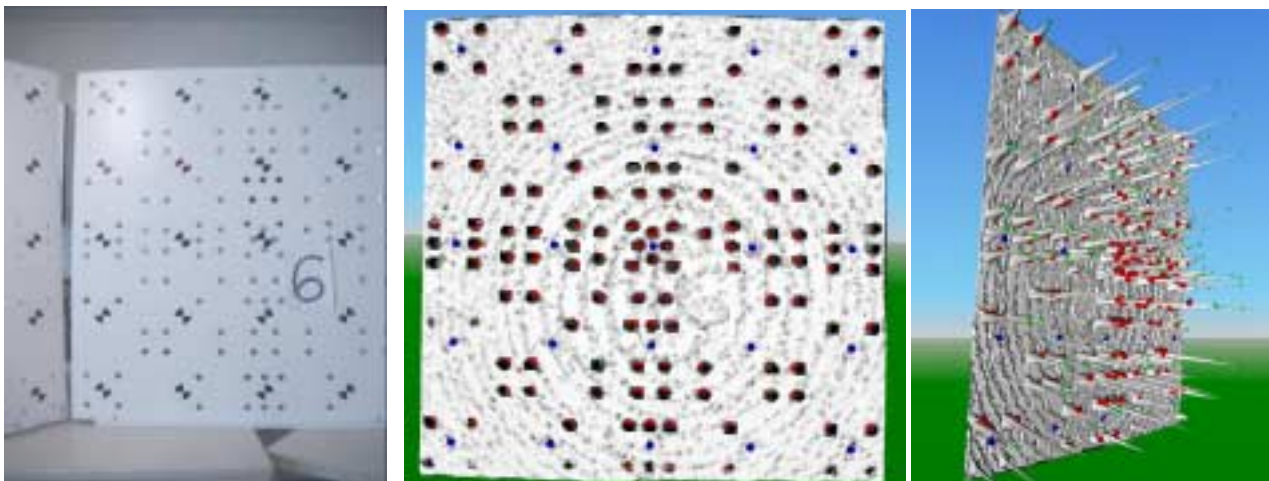
Abbildung 7.30: Auswirkung der Exzentrizität auf die äußere Orientierung.

für die sowohl Koordinaten im Scannersystem als auch Bildkoordinaten vorliegen müssen, um über die Kollinearitätsgleichungen 7.10 ein überbestimmtes Gleichungssystem aufzubauen. Die Eigenschaft des Laserscannens keine diskreten Punkte messen zu können verhindert aber korrespondierende Koordinaten bereitzustellen. Das Problem, welcher Bildpunkt welchem Laserscannerpunkt entspricht, erfordert die Entwicklung besonderer Passpunkt-Tafeln (Abbildung 7.31(a)), die während des Scannens im Objektraum aufgestellt werden.

Entwicklungsziel der Tafeln war es, diese so mit Punktmarken zu versehen, dass sie sowohl als photogrammetrisches Passpunktfeld dienen können als auch für den Laserscanner zu identifizierbaren diskreten Passpunktobjekten führen. Für die Bildmessungen sind auf den ca. $1,2 \times 1,2$ m großen Passpunkttafeln rasterförmig Passpunktmarken in herkömmlicher Ausführung aufgezeichnet worden. Für die Laserpasspunkte ist jede Tafel mit 132 Bohrungen (Löchern) in schematisierter Anordnung versehen worden. Die Idee der Laserpasspunkte ist es, den einzelnen Lasermessstrahl mit einem Loch „einzufangen“. Wird durch ein Loch gemessen, so ergibt dies eine Streckenmessung, die von den benachbarten Messungen auf der Tafel weiter weg ist. Damit ist ein Unterscheidungsmerkmal, dass zur Separation der Lochmessungen aus der Punktwolke genutzt werden kann, gegeben. In der Summe lässt sich die Passpunkttafel bezüglich der Entfernung und Orientierung vom Lasergerät leicht durch eine Ebenenapproximation bestimmen. Lochmessungen fallen dabei durch das deutlich über der Messgenauigkeit liegende Residuum auf.

Bei der Identifikation der Lochmessungen kommt die auf Golomb-Lineale [Sta87] beruhende Anordnung der Löcher ins Spiel. Perfekte Golomb-Lineale haben eine minimale Anzahl von Teilstrichen, die so angeordnet sind, dass jedes Vielfache der Grundeinheit mit dem Lineal ausgemessen werden kann und keines der Vielfachen doppelt im Lineal verkörpert ist. Das Golomb-Lineal mit Teilstrichen an den Positionen 0, 1, 4 und 6 z. B. erlaubt die Messung der Längen von 1 bis 6 Einheiten. Bildet man paarweise alle möglichen Abstände zwischen den Teilstrichen so kommt kein Abstand doppelt vor und jedes Vielfache der Grundeinheit kommt vor. In der Umkehrung dieser Eigenschaft lässt sich anhand eines Abstandes das Pärchen der Teilstriche zurückverfolgen.

Die Bohrungen in der Passpunkt-Platte sind in Anwendung des (nicht perfekten, vollkommenen) Golomb-Lineals 0, 1, 4, 9 und 11 mit der Einheit $\frac{1}{30}$ m hergestellt. Durch das unvollkommene Golomb-Lineal, es fehlt der Abstand mit 6 Einheiten, und der Übertragung in die zweite Dimension kommen Lochabstände mind. viermal, max. 16-fach vor. Für die Identifikation der vom Laser „getroffenen“ Löcher werden deren gemessenen Abstände im Passpunkt-Tafel-Koordinatensystem untereinander mit den Konstruktionsabständen verglichen. Der verwendete Algorithmus für diese Aufgabe vollzieht diesen Vergleich in allen Kombinationsmöglichkeiten und ist daher sehr zeitintensiv. Wird eine ausreichend hohe Übereinstimmung z. B. 60-70% erreicht bricht der Algorithmus ab. Die Identifikation gelingt so in der Regel bis auf unvermeidliche aber unkritische Spiegel-



(a) Passpunkt-Tafel.

(b) Scanner-Punktwolke einer Passpunkt-Platte als Oberflächenmodell. Die Messstrahlen durch die Löcher sind als Kugel innerhalb der Platte erkennbar und die daraus resultierenden Koordinaten für die photogrammetrischen Passpunktmarken anhand der beige-schriebenen Punktnummern, welche zugleich zeigen, wie erfolgreich die Punktidentifikation vorgenommen werden konnte.

Abbildung 7.31: Passpunkt-Tafel

ungen, verursacht durch die symmetrische Bohrungsanordnung, vollautomatisch und zuverlässig. Abbildung 7.31(b) verdeutlicht dies.

Über die Passpunkt-Tafeln lassen sich aus der Punktwolke heraus die Passpunktkoordinaten sämtlicher photogrammetrischer Marken bestimmen. Mit Hilfe dieser Passpunkte können nun die Parameter der äußeren Orientierung der Videobilder bestimmt werden. Aufgrund der festen Verbindung der Videokamera mit dem Laserscanner ist es nicht möglich, die Bestimmung der inneren Orientierung unabhängig von der äußeren Orientierung inklusive der Exzentrizität durchzuführen. Zur gleichzeitigen Kalibrierung aller Parameter werden rings um den Laserscanner herum 10 Passpunkttafeln arrangiert. Mittels solch einer Szene kann für eine typische Grundeinstellung bestehend aus einem 14×1 -Mosaik mit 60° Querüberdeckung die Kalibrierung durchgeführt werden.

Bei mehrfach unabhängig durchgeführten Kalibrierungen über Passpunktplatten konnten Standardabweichungen a posteriori für die Bildkoordinaten von $s_0 = 0.5$ Pixel erreicht werden. Dies ist Angesichts der mäßigen Bildqualität der Videokamera und des nicht abschaltbaren Autofokus ein für geringe Genauigkeitsansprüche befriedigendes Ergebnis. Die Exzentrizität wird vom Hersteller mit $r = 0.1376$ m angegeben. Bei den Überprüfungen konnte dieser Wert bestätigt werden.

7.7.4 Ableitung von Panoramen und Orthophotos

Ist für ein Messbild oder ein anderes Photos die innere und äußere Orientierung bekannt und ebenso die Stationierung und Orientierung einer Punktwolke, so können beide Informationsdomänen zu texturierten 3D-Modellen oder bildhaften Produkten, wie Panoramen und Orthophotos weiterverarbeitet werden.

Durch die Kalibrierwerte Exzentrizität r , Verschwenkung α_0 und Verkipfung β_0 ist die äußere Orientierung der simultan durch das Callidussystem aufgenommen Photos unmittelbar nach der Stationierung und Orientierung (Standpunktverknüpfung) gegeben. Bei Photos und Messbildern, die unabhängig vom Laserscanner frei im Raum orientiert vorliegen, kann die äußere Orientierung über markante Punktbereiche der Punktwolke bzw. anhand des Randflächenmodells einer Flächenrückführung nach Kapitel 7.3 bestimmt werden.

Grundschema

Die Berechnung von synthetischen Bildern, wie Panoramen und Orthophotos, können nach einem einheitlichen Grundschema erfolgen.

Für das synthetische Bild wird ein Aufnahmestandort \mathbf{p}_0 in Weltkoordinaten und eine Blickrichtung \mathbf{n}_s vorgegeben. Zudem sind die Abbildungseigenschaften, z. B. bei einer Zentralperspektive die Brennweite, und

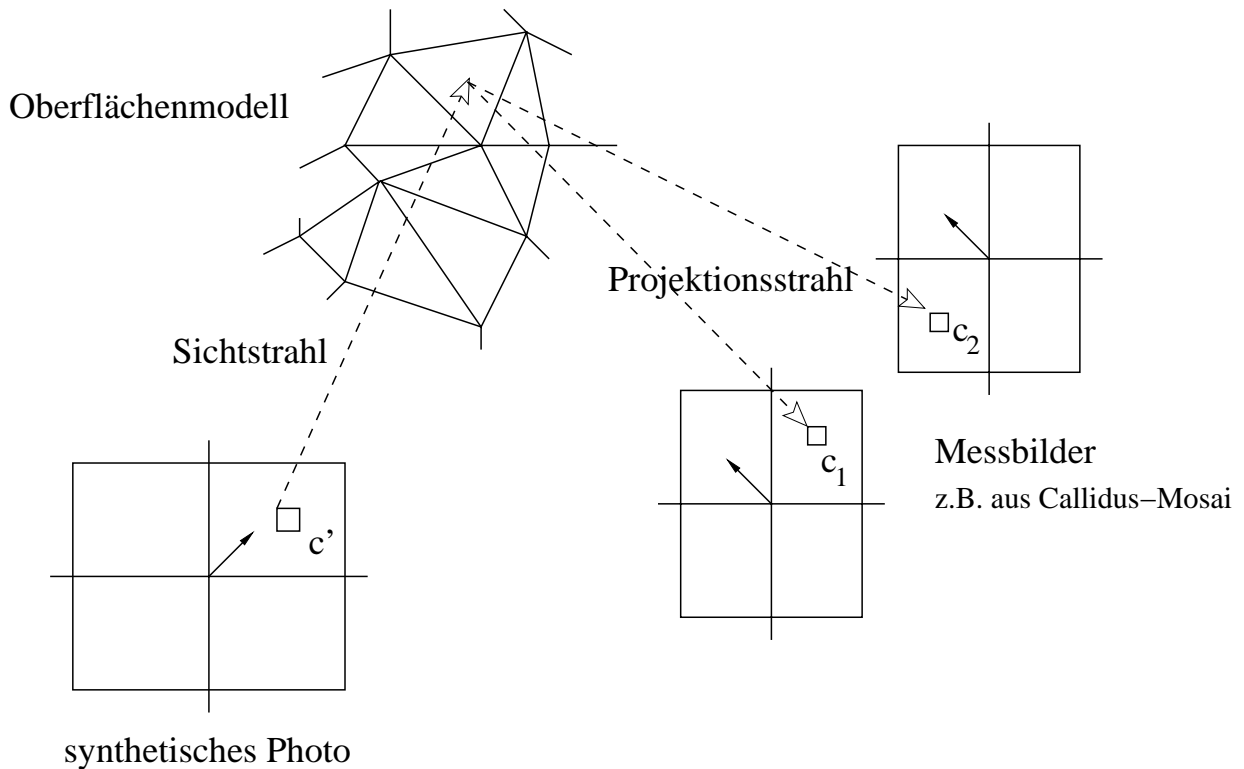


Abbildung 7.32: Grundschemata zur Berechnung synthetischer Bilder.

die Größe $n \times m$, sowie die Auflösung des synthetischen Bildes zu definieren. In der Summe bilden diese Parameter die äußere Orientierung einer virtuellen Kamera mit gewünschter innerer Orientierung. Indem für jedes Pixel

$$(p_{x,u}, p_{x,v}) \quad u \in [1 \dots n], v \in [1 \dots m]$$

auf der Bildebene der virtuellen Kamera der entsprechende Sichtstrahl

$$\vec{s} : \mathbf{p}_0 + t\mathbf{n}_s$$

ermittelt und mit dem virtuellen Objekt, in der Regel mit einer triangulierten Punktwolke, geschnitten wird, entsteht das synthetische Bild. Das Rechenverfahren ahmt auf diese Weise den Vorgang des Photographierens nach. Für jede Schnittpunktberechnung nach Kapitel 6.1.2 zwischen Sichtstrahl und Punktwolke kann sich kein oder können sich beliebig viele Schnittpunkte ergeben. Aus der Menge der Schnittpunkte sind diejenigen unberücksichtigt zu lassen, bei denen der Sichtstrahl \vec{s} von hinten auf die Objektoberfläche trifft. Aus den verbleibenden Schnittpunkten ist derjenige Schnittpunkt \mathbf{p} weiter zu betrachten, der zur virtuellen Kamera die kürzeste Entfernung aufweist. Der Schnittpunkt \mathbf{p} kann nun anhand der gegebenen Kollinearitätsgleichungen in die Bildebene eines Messbildes I abgebildet werden. Man erhält die Bildkoordinaten $p'_{x,i}$ und $p'_{y,i}$ für \mathbf{p} und seinen Farbwert c_i . Sind mehrere Messbilder vorhanden, die das Objekt überlappend abbilden, so sind weitere Farbwerte c_i über Anwendung der entsprechenden Kollinearitätsgleichungen bestimmbar. Die redundante Farbinformation kann durch eine geeignete wählende Mittelwertberechnung auf einen Farbwert c reduziert werden. Die Pixelfarbe $I(u, v) = c$ des synthetischen Bildes I ist somit bestimmt. Die Abbildung 7.32 skizziert dieses Mappingverfahren.

Die im Überlappungsbereich mehrerer Photos auftretenden redundanten Farbinformationen ermöglichen die unterschiedlichen Helligkeiten und Farbunterschiede benachbarter Photos anzugleichen. Hierzu empfiehlt sich eine gewichtete Mittelbildung in Abhängigkeit von der radialen Entfernung r des Farbwertes zum Bildhauptpunkt.

$$\hat{c} = \frac{1}{\sum_i r_i} \sum_i r_i c_i$$

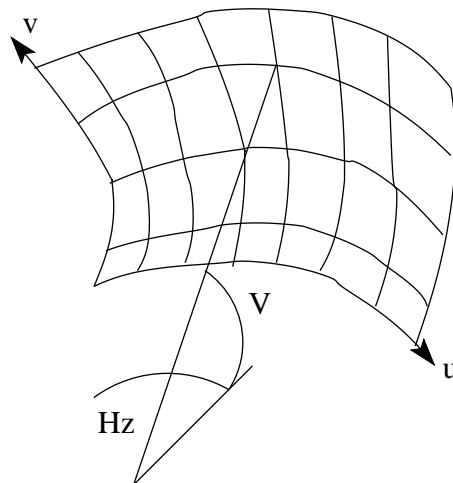


Abbildung 7.33: Zylindrisches Panorama.

mit

$$r_i = \sqrt{(p'_{x,i} - x_{0,i})^2 + (p'_{y,i} - y_{0,i})^2}$$

Eine weitere Glättung der Bildübergänge kann erreicht werden, wenn zusätzlich die Farbwerte in der Umgebung (*Filterfenster*) um jedes c_i betrachtet und in die Mittelbildung einbezogen wird.

Da sich für eine Punktwolke mit einer Million Punkten eine Triangulierung mit ca. drei Millionen Dreiecken ergibt, kann die Berechnung eines synthetischen Bildes nach obigem Grundschemata aufgrund der dabei erforderlich werdenden astronomischen Rechenzeiten nicht vorgenommen werden. Die oben beschriebene kantenerhaltende Datenfilterung leistet hier aber gute Dienste. Die Datenfilterung zerlegt die Objektoberfläche gewissermaßen in einzelne Entzerrungsebenen. Zugleich wird das lokale Oberflächenrauschen, das sich überproportional negativ im synthetischen Bild bemerkbar machen würde, beseitigt.

Das vorgestellte Grundschemata unterscheidet sich von herkömmlichen Methoden der Panoramaphotographie dadurch, dass es die geometrischen Information der Objekte ausnutzen kann und so ein **geometrisch** exaktes Panorama erzeugen kann. Herkömmliche Panoramamethoden versuchen angrenzende Bildbereiche möglichst optimal **optisch** anzugleichen. Vielfach sind sie bereits bei Photoserien überfordert, dessen Photos nicht streng mit horizontaler Visur aufgenommen wurden. Ein weiterer Vorteil auch gegenüber den gebräuchlichen photogrammetrischen Entzerrungen ist, dass Photos, die mit verschiedenen Kameras aufgenommen wurden, zu einem synthetischen verarbeitet werden können, da das Mischen der Photos pixelorientiert im synthetischen Bild vorgenommen wird. Die Berechnungen werden auf die originären Bildinformationen zurückgeführt.

Panoramen

Für Laserscannersysteme mit einem panorama-view-Gesichtsfeld bietet es sich an, Geometrie und Bildinformationen gemeinsam in Gestalt eines 360° -Panoramas darzustellen. Ein zylindrisches Panoramabild besteht in seiner einfachsten Form aus einem rechteckigen Bild, welches die Abbildung der Oberfläche einer Richtungskugel ist (Abbildung 7.33). Das Panoramabild entspricht so der Plattkarte der Richtungskugel. Die Bildkoordinatenachse u steht für den Horizontalwinkel und die v -Achse für den Vertikalwinkel der Blickrichtung

$$\mathbf{n}_s(u, v) = \begin{bmatrix} \sin u \\ \cos v \\ 1/\tan v \end{bmatrix}$$

mit

$$u = Hz$$

$$v = V.$$

Ein Panorama-Bild kann nun durch die Betrachtung der Sichtstrahl-Menge $\mathbf{n}_s(u, v)$

$$u \in \{Hz_{min}, Hz_{min} + q\Delta Hz, \dots\}$$

$$v \in \{V_{min}, V_{min} + q\Delta V, \dots\}$$

mit einer Auflösung q erzeugt werden. Die Auflösung q gibt an, in welchen Schritten die Blickrichtung je Pixel zu variieren ist.

Ein Panoramabild, welches auf Grundlage einer simultanen Messung mit einem Laserscanner erzeugt wurde, kann genutzt werden, um Auswertungen der Punktwolke unter Zuhilfenahme des Panoramabildes vorzunehmen. In [KTMG02] wird das Werkzeug *ScanReader* vorgestellt, mit dem Koordinaten sowie einfache Längen- und Flächemaße aus einer Punktwolke abgegriffen werden können. Der Auswerter betrachtet dabei das Panoramabild in einer zentralperspektivischen Ansicht. Den im Angesicht der Bildinformationen gewonnen Geometrieinformationen können Sachinformationen zugeordnet werden, die im Panoramabild sichtbar und klassifizierbar sind. Der *Scanreader* ist als unterstützendes Erfassungswerkzeug innerhalb eines Facility-Management-System konzipiert.

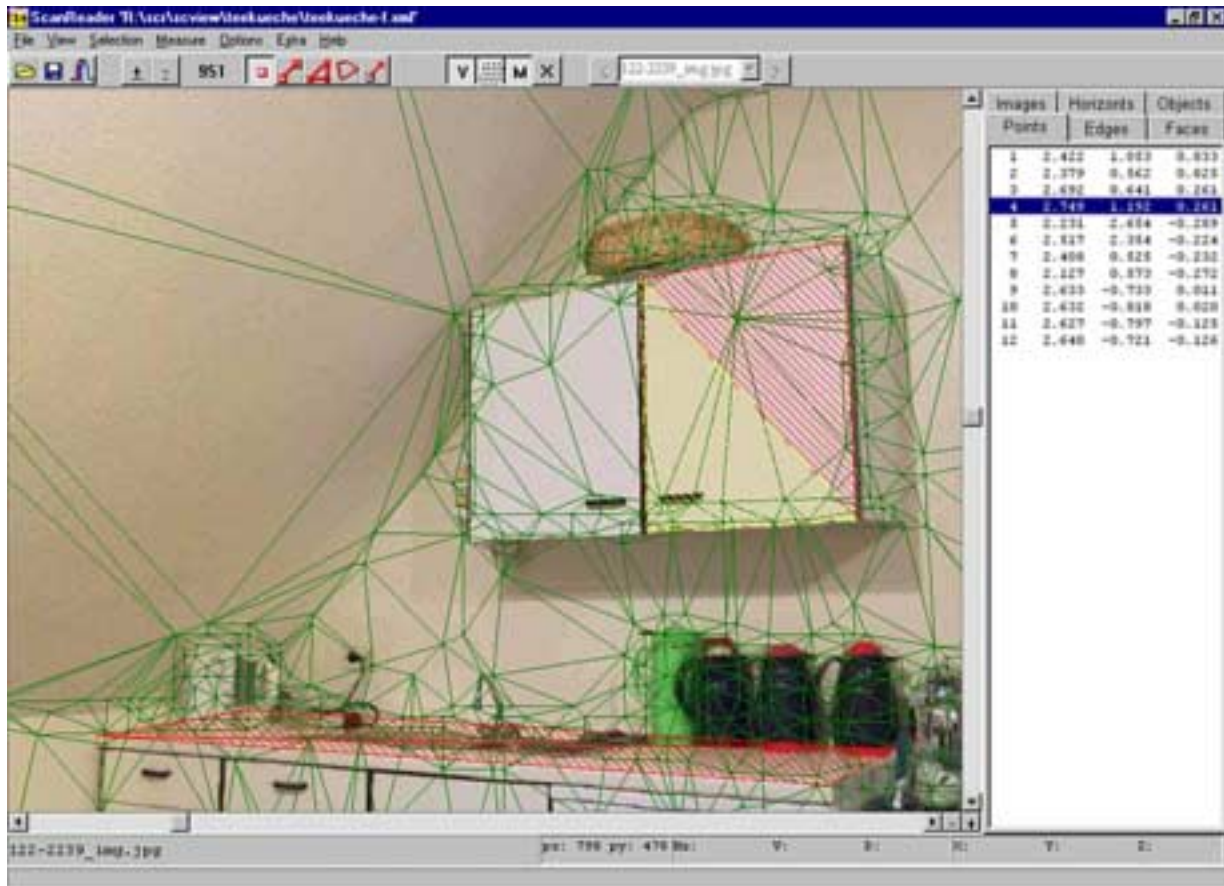


Abbildung 7.34: *ScanReader*-Screenshot: abgegriffene Flächen sind schraffiert dargestellt; die optional anzeigbare Triangulation verbindet die nach der Filterung verbliebenen Scanner-Messpunkte; rechts werden die 3D-Koordinaten der Flächeneckpunkte angezeigt.

Über die Anwendungsmöglichkeiten von Panoramen in der Architektur berichtet *Gatermann* [Gat99a], [Gat99b]. Mit einem interaktiven Panorama lässt sich der Raumeindruck, der von einem Architekturobjekt ausgeht, virtuell vermitteln. Im Bereich des Facility Management können Immobilien dokumentiert und illustriert werden.

Orthophotos

Orthophotos entstehen durch eine orthogonale Projektion der Objektszene. In der Photogrammetrie versteht man im Allgemeinen unter einem Orthophoto ein Bild, das aus einem Messbild durch photographische oder rechnerische Umprojektion, der so genannten Entzerrung, entstanden ist ([Wei88, S. 82-107] u.a.). Ein Orthophoto stellt die abgebildeten Objekte in einer orthogonalen Projektion bezüglich einer Projektionsebene dar. Das Bildkoordinatensystem des Orthophotos ist gegenüber dem Weltkoordinatensystem gemäß der Gleichung

7.7 verschoben, gedreht und skaliert. Daher können in einem Orthophoto Längen und Winkel „unverzerrt“, lediglich im Maßstab f verändert, parallel zur Projektionsebene abgegriffen werden. Tiefeninformation gehen bei der orthogonalen Projektion verloren. Die Abbildungsvorschrift lautet angewendet auf die kamerazentrierten Koordinaten \mathbf{X} :

$$\begin{aligned} p_x &= fX \\ p_y &= fY \end{aligned}$$

Die äußere Orientierung der virtuellen Kamera einer Orthogonalprojektion kann aus den Elementen der Projektsebene

$$E_{ortho} : \mathbf{n}_o \mathbf{p} - d = 0$$

bestimmt werden.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_0(W) &= d \mathbf{n}_o && \text{Translation} \\ \mathbf{i} &= \begin{bmatrix} \frac{d}{n_{o,x}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \mathbf{X}_0(W) \\ \mathbf{i}_0 &= \frac{\mathbf{i}}{\|\mathbf{i}\|} \\ \mathbf{j}_0 &= \mathbf{i}_0 \times \mathbf{n}_o \\ \mathbf{R}^T &= [\mathbf{i}_0 \quad \mathbf{j}_0 \quad \mathbf{n}_o] && \text{Rotation} \end{aligned}$$

Für die Menge der zu untersuchenden Sichtstrahlen liegt die Richtung \mathbf{n}_s bereits in Gestalt des Normalenvektors \mathbf{n}_o vor. Im Koordinatensystem der Projektionsebene ist eine Schar an Startpunkten $\mathbf{p}_0(u, v)$ der Sichtstrahlen zu berechnen.

$$\mathbf{p}_0(u, v) = \mathbf{R} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R} \mathbf{X}_0(W) + \mathbf{p}_I$$

mit

$$\begin{aligned} u &\in \{u_{min}, u_{min} + q\Delta u\} \\ v &\in \{v_{min}, v_{min} + q\Delta v\} \end{aligned}$$

Der Parameter \mathbf{p}_I gibt den Ursprung des Orthobildes in Weltkoordinaten an. Die ermittelten Farbwerte c_i sind unter Berücksichtigung des Bildmaßstabes f dem Orthobild I zuzuordnen.

$$I(f u, f v) = c_i$$

Durch leichte Variation des Grundschemas zur Berechnung von synthetischen Bildern können auch Orthophotos bezüglich einer Abwicklung, z. B. einer Zylinderfläche, hergestellt werden. Lediglich die Menge der zu betrachtenden Sichtstrahlen ist entsprechend zu generieren.

7.7.5 Zusammenfassung

Die Kombination von schnell erfassbaren detaillierten Geometrieinformation des 3D-Laserscannens mit hochauflösenden, aussagekräftigen und preiswert zu erstellenden Photos bietet viele Vorteile und bereichert beide Methoden. Eine Trennung scheint angesichts der problemlosen Berechnung von Orthophotos nicht mehr wünschenswert. Durch die Punktwolke könnten differentielle Entzerrungen nie gekannter Qualität erzeugt werden.

Aufgezeigt wurde ein Verfahren zur Kalibrierung der integrierten Videokamera des Callidus-Systems. Aufgrund der schlechten Bildqualität der Videokamera konnten nur mäßige Kalibrierungsergebnisse erzielt werden. Die innere Orientierung dieser Videokamera ist sehr instabil und insbesondere von der Autofokussierung und dem automatischen Weißabgleich abhängig. Wünschenswert wäre es, wenn die Gerätehersteller in Zukunft hochwertigere Bildsensoren integrieren würden. Damit ergebe sich ein Messsystem, das kaum noch in seiner Flexibilität, Schnelligkeit und seiner Dokumentationsqualität überboten werden kann.

Kapitel 8

Auswertebeispiele

8.1 3D-Modell „Braunschweiger Löwe“

Auf dem Burgplatz steht das Wahrzeichen der Stadt Braunschweig: Der „Braunschweiger Löwe“. Er ist die erste monumentale Freifigur des Mittelalters. Der heute von den Touristen bewunderte Bronzelöwe, 1166 von Heinrich dem Löwen als Zeichen seiner Macht aufgestellt, thront auf einem etwa fünf Meter hohen steinernen Sockel; dem „Löwenstein“. Der Löwe ist eine in den 1980er-Jahren angefertigte Kopie. Das durch die jahrhundertelange Einwirkung der Witterung stark beschädigte, einst vergoldete Original, befindet sich in der Burg Dankwarderode, die zusammen mit dem Braunschweiger Dom und dem Vieweg-Haus den malerischen Burgplatz umschließen. Für die Restaurationsarbeiten wurden umfangreiche photogrammetrische Vermessungen in den Jahren 1981 und 1983 durchgeführt [LW85]. Entstanden sind Kontur- und Höhenlinienpläne im Maßstab 1 : 2 von den sechs orthogonalen Ansichten des Löwen. Eine den damals verfügbaren technischen Möglichkeiten angepasste Art der Formdokumentation. An eine vollständige dreidimensionale Dokumentation, wie sie heute mit CAD möglich ist, war damals vor dem Aufkommen preiswerter Personal-Computer nicht zu denken.

An dem Objekt „Braunschweiger Löwe“ soll die Leistungsfähigkeit der 3D-Laserscanning-Technik aufgezeigt werden. Ziel der Vermessung war es, das Passkugelverfahren zur Standpunktverknüpfung auf seine Praxistauglichkeit hin zu testen und die 3D-Modellierung einer Skulptur anhand von Laserscannerdaten vorzunehmen.

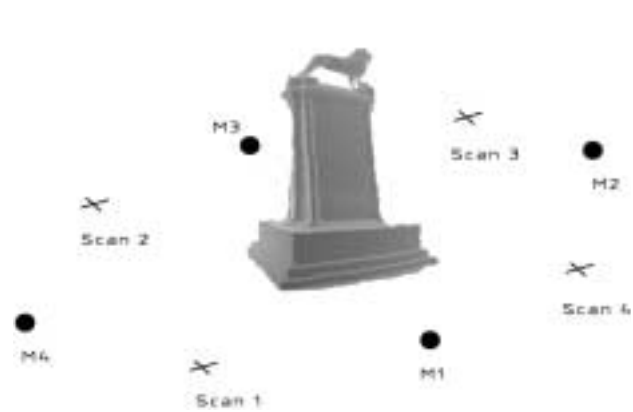
Mit einem Callidus-Laserscanner sind im Herbst 2000 vier Scans vom Löwenstein vorgenommen worden. Der Zeitbedarf für die Vermessung vor Ort betrug lediglich eine Stunde incl. der erforderlichen Rüstzeiten. Es wurde mit einem Winkelinkrement von $\frac{1}{4}^\circ$ abgetastet, sodass jede Punktwolke aus etwa 400.000 Messpunkten besteht. Durch die Begrenzung des Systems auf eine maximale Messentfernung von ca. 32 m konnten nicht wie ursprünglich geplant auch die umliegenden Gebäuden vollständig erfasst werden. Für die Standpunktverknüpfung wurden vier Passpunktkugeln mit einem Radius von 0,215 m so um das Standbild gestellt, dass in jeder Punktwolke mindestens drei abgescannt werden konnten (Abbildung 8.1(b)).

Mit dem im Kapitel 7.5.1 erläuterten Verfahren wurden alle Kandidaten für eine Passkugel in den vier Scans automatisch detektiert und extrahiert. Abbildung 8.1(c) zeigt das Ergebnis dieses Auswerteschrittes für den Scan 3. Zusätzlich zu den wirklich vorhandene Passkugeln wird in diesem Scan irrtümlicherweise ein Bereich des Löwensteins als Passkugel erkannt. Dieser Bereich einer abgerundeten Steinecke lässt sich mit einer Genauigkeit von 5 mm als Kugel mit einem Radius von $r = 0,2615$ m ($s_r = 0,4$ mm) approximieren. Diese Pseudo-Kugel ist anhand der statistischen Kennzahlen als solche von den anderen nicht zu unterscheiden. Nachdem die Identifikation der Passkugeln in den Scans manuell vorgenommen wurde, ist eine Gesamtausgleichung durchgeführt worden. In dem Ausgleichsmodell sind für alle vier Passkugeln ein einheitlicher Radius mitgeschätzt worden. Als weiteres waren die Stationierungen und Orientierungen (Transformationen) der Punktwolke als Unbekannte zu schätzen. Anhand einer L1-Norm-Schätzung ([Kam88]) sind 14 Ausreißer in den 1.977 Beobachtungen bestimmt worden, deren Residuen zehn mal größer sind als die Standardabweichung a priori von 5 mm.

In der Tabelle 8.1 sind die geschätzten Koordinaten der Kugelmittelpunkte und ihre Standardabweichungen zusammengetragen. Die Koordinaten beziehen sich auf das lokale Laserscannersystem des Scans 1. So sind auch nur drei Transformationen zu bestimmen gewesen. Da der Laserscanner horizontalisiert wurde, reichte es aus für jeden Scan die Translation $\mathbf{X}_0(W)$ und die Rotation γ um die Z-Achse zu schätzen. Zudem ist die Verteilung der Passkugeln für eine vollständige Transformation der Punktwolken nicht optimal, da diese nur



(a) Messanordnung für Scan 1.



(b) Passkugelverteilung und Aufnahmestandorte.



(c) Automatisch erkannte Passkugeln im Scan 3.

Abbildung 8.1: Standpunktverknüpfung „Braunschweiger Löwe“.

Tabelle 8.1: Ergebnis der Standpunktverknüpfung –Kugelmittelpunkte–

Kugel	X	Y	Z	s_X	s_Y	s_Z	Bemerkung
	m	m	m	mm	mm	mm	
M1	4,3092	-0,8065	-1,6814	1,1	0,9	0,9	
M2	10,4089	8,0917	-1,8444	1,8	1,8	1,4	
M3	2,6393	14,6686	-1,7572	2,0	3,3	1,8	
M4	-4,2239	7,2705	-1,6295	1,5	1,5	1,6	
M6	-1,1498	7,0803	-1,5801	3,4	3,0	2,3	verschobene Kugel 4
M7	1,7776	7,3291	3,3184	2,7	3,0	3,1	Löwenstein

auf dem Erdboden platziert wurden und so in der Höhelage kaum variieren.

In Tabelle 8.2 ist das Ergebnis der Standpunktverknüpfung zusammengestellt. Die Genauigkeiten für die

Tabelle 8.2: Ergebnis der Standpunktverknüpfung –Transformationen–

Transformation	Translation			Rotation	$s_{X,0}$	$s_{Y,0}$	$s_{Z,0}$	s_γ
	X_0	Y_0	Z_0	γ				
	m	m	m	gon	mm	mm	mm	mgon
Scan 2→Scan 1	8,6315	1,5523	-0,0844	1,7037	1,21	1,53	1,22	13,80
Scan 3→Scan 1	-2,3111	13,1052	-0,0884	2,0473	3,05	3,61	1,95	27,00
Scan 4→Scan 1	8,7628	13,7791	-0,2887	0,1301	3,11	1,90	1,64	18,47

Gesamttranslation in Lage und Höhe liegen unter 5 mm, was sich gut mit der Messgenauigkeit in Einklang bringen lässt. Bei der Rotation des nur über zwei Passkugeln orientierten Scans 3 entspricht die Genauigkeit einer Ablage von 5 mm auf 10 m. Die beiden anderen Rotationen mit jeweils drei Passkugeln sind um das Doppelte genauer (2,5 mm auf 10 m).



(a) Vorderansicht



(b) Rückansicht.

Abbildung 8.2: Modell „Braunschweiger Löwe“.

Im nächsten Auswerteschritt wurden die jeweiligen Bereiche der Punktwolke manuell selektiert, die zum Löwenstein bzw. Löwen gehören. Für die vier Teiloberflächen des Standbildes wurden separate Triangulierung durchgeführt und anschließend in das gemeinsame Koordinatensystem transformiert. Die Kombination wurde dann mittels CAD nachbearbeitet. Dabei waren doppelte Bereiche zu harmonisieren und Dreiecksverbindungen zwischen den Einzel-Triangulierungen herzustellen. Dieser Arbeitsschritt war im Vergleich zur schnellen Datenerfassung sehr zeitaufwendig und ist daher nicht bis zur Perfektion ausgeführt worden. Da keine Hebebühne zur Verfügung stand, konnte kein Scan von oben auf den Löwen vorgenommen werden. Die Rückenpartie des Löwen wurde daher frei modelliert. Das resultierende Modell ist in der Abbildung 8.2 in zwei Ansichten dargestellt. Etwas enttäuschend ist die deutlich rau diskretisierte Oberfläche des Löwensteins, die tatsächlich aus glatt gehauenen Kalkstein besteht. Die Ursache ist im Quantisierungseffekt (Kapitel 7.3.2) zu suchen.

Die Bearbeitung dieses Projektes erfolgte im Rahmen einer zweimonatigen Studienarbeit. Der Zeitaufwand lässt sich, wie in Tabelle 8.3 dargelegt, unter Vernachlässigung der Programmierarbeiten für die Datenkonvertierung auf die Einzelschritte verteilen.

Als Ergebnis dieses Projektes ist festzuhalten, dass eine Standpunktverknüpfung über Passkugeln wirtschaftlich durchzuführen ist. Das Passkugelf Verfahren ist leicht in seiner Handhabung durchschaubar und liefert genaue Ergebnisse, deren Qualität mit herkömmlichen Mitteln der Ausgleichsrechnung beurteilt werden können. Obwohl in diesem Projekt nur mit einer recht kleinen Datenmenge von ca. 100.000 Punkten für das Gesamtmodell des „Braunschweiger Löwen“ hantiert werden musste, stieß das eingesetzte CAD-Programm bereits an seine Kapazitätsgrenzen. Für die Bearbeitung einer Standard-Punktwolke mit einer Million Punkten mittels CAD-Programm kann vermutet werden, dass keine befriedigende Verarbeitungsgeschwindigkeit mehr gegeben wäre.

Tabelle 8.3: Zeitaufwand für das Modell „Braunschweiger Löwe“

Vermessung	1 h
Datenkonvertierung $\rightarrow x, y, z$	2 h
Standpunktverknüpfung	
Detektion	2 h
Ausgleichung	3 h
Triangulierung	2 h
Datenkonvertierung \rightarrow CAD	1 h
CAD-Modellierung	60 h
Visualisierung	20 h
	<hr/>
	91 h

8.2 Volumenbestimmung auf der Mülldeponie Deiderode

Der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft eingerichtete Sonderforschungsbereich „Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung“ befasst sich unter anderem mit der Standsicherheit von Bauwerken. Hierzu zählen auch Deponien, bei denen über mehrere Jahre hinweg Materialien mit unbekanntem bauphysikalischen Parametern aufgeschüttet werden. Um das Bauwerk „Deponie“ besser verstehen zu können, wurde im November 2001 auf der Hausmülldeponie Deiderode des Landkreises Göttingen an einer günstig gelegenen Böschung in mehreren zwei Meter hohen Stufen auf einer Breite von ca. sechs Metern ein Schurf angelegt. Das sukzessive Abgraben erlaubte es, die Materialdichte als einen wichtigen bauphysikalischen Parameter in drei Schichttiefen zu ermitteln. Hierzu musste in jeder Schicht das Volumen und das Gewicht einer Probe ermittelt werden. Die Dichte der Probe ergab sich dann als Verhältnis des Volumens zu seinem Gewicht.

Für die Oberflächenbestimmung jeder Ausbauschicht stand nur ein Zeitfenster von 30 min zur Verfügung, sodass für diese Aufgabe nur ein Laserscanner in Frage kam. Der Laserscanner wurde soweit möglich mittig in der Grube platziert. In jeder Ausbaustufe war daher der Laserscanner neu zu stationieren und zu orientieren. Für die Standpunktverknüpfung wurde das Passkugelfverfahren angewandt. Die Einmessung der fünf Passkugeln ($r = 0.1687$ m) im übergeordneten Deponie-Bezugssystem erfolgte durch ein reflektorloses Tachymeter. Dabei wurde jede Kugeloberfläche einem Scanner gleich mit minimal 12 Messpunkten überzogen. Aus diesen Messungen ließ sich das Kugelzentrum im Deponiesystem berechnen. Weitere Details zum Messablauf finden sich in [Ker02b].

Der Volumenbestimmung der Proben liegt der Gedanke zugrunde, dass das Volumen als Differenz zwischen den Oberflächen vor und nach der Probeentnahme definiert werden kann. Konventionelle Volumenberechnungen benutzen hierbei eine vereinfachte Modellbildung, bei der beide Oberflächen als Funktion der Höhe $z = f(x, y)$ dargestellt werden. Dies kommt einer Parallelprojektion der Oberfläche auf eine Höhenbezugsebene gleich. Diese Vorgehensweise war hier nicht möglich, da die Grubenoberfläche aufgrund der steilen Wände und der rauhen Struktur des Hausmülls viele Hinterschnidungen besitzt. Eine allgemeinere Lösung der Volumenberechnung erhält man, wenn die Oberfläche als Triangulierung modelliert und für jede Dreiecksfläche das Volumen des Tetraeders berechnet wird, das die Dreieckspunkte mit einem beliebigen aber konstanten Pol bilden (Abbildung 8.3(c)). Als Pol bietet sich das Rotationszentrum des Laserscanners an und realisiert so eine Kugelprojektion $z' = k(Hz, V)$ der Oberfläche. Unterschnidungen beeinflussen so das Ergebnis nur noch unwesentlich, wenn der Laserscanner so positioniert wird, dass die Oberfläche fast vollständig ohne Abschattungsgebiete abgescannt werden kann. Beide Oberflächen erzeugen über die Kugelprojektion ein fiktives Volumen, das um einen konstanten Anteil verfälscht ist. In der Differenz der Volumina fällt dieser konstante Anteil heraus und es ergibt sich das gesuchte Volumen der Probe.

Die Einzelschritte der Auswertekette waren:

1. Aus den tachymetrischen Messungen sind die Kugelzentren mittels Kugelapproximation im Deponiesystem zu bestimmen.
2. Die Punktwolken der Scans vor (Scan A) und nach der Probenentnahme (Scan B) sind über die Passkugeln in das Deponiebezugssystem zu transformieren.

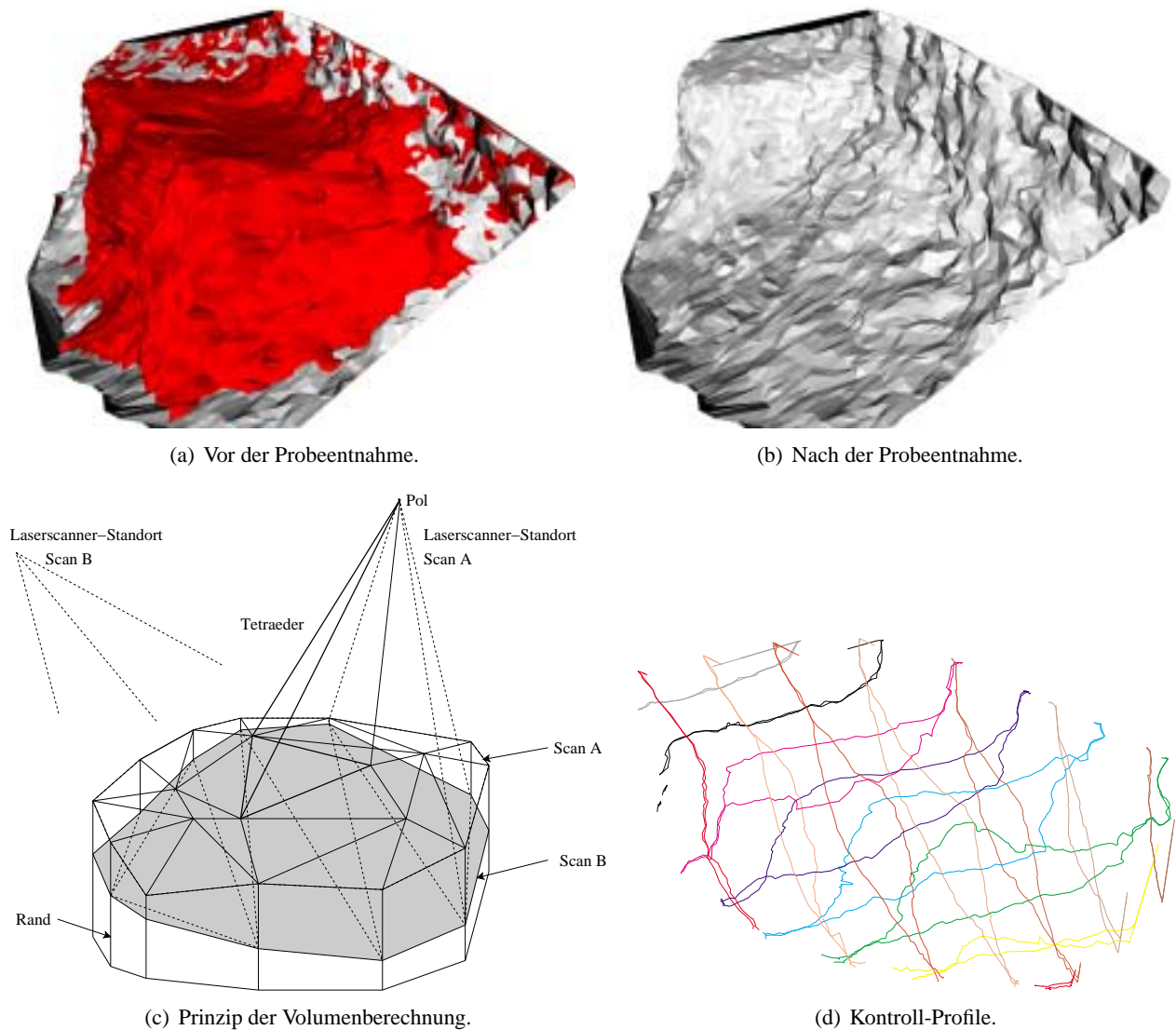


Abbildung 8.3: Volumen einer Probe.

3. Aus dem transformierten Scan A werden die Punkte ausgewählt, welche die Oberfläche der Probe beschreiben. Zusätzlich sind an den Rändern Messpunkte zu selektieren, die deckungsgleich mit der unveränderten Oberfläche nach der Probeentnahme sind.
4. Für die selektierten Punkte des Scans A wird der Rand festgelegt.
5. Anhand des Randes des Scans A wird der korrespondierende Bereich im Scan B ausgeschnitten.
6. Die ausgewählten Punktbereiche der Scans A und B werden durch eine Triangulierung in eine Oberfläche überführt.
7. Aus jeder Oberfläche wird das Volumen bezüglich des Scannerstandpunktes im Deponie-Bezugssystem berechnet.
8. Das Volumen der Probe ist die Differenz der beiden Volumina.

Die Volumenberechnung wurde durch Profile kontrolliert, die virtuell durch die Punktwolken nach dem Verfahren aus Kapitel 7.4 gelegt wurden. Die korrespondierenden Profillinien schließen eine Fläche A_i ein. Bei n Profilen und einem Profilabstand von δh berechnet sich das Volumen nach:

$$\sum_{i=0}^{n-1} = \frac{1}{2}(A_{i+1} - A_i) \delta h.$$

Die Standpunktverknüpfungen wurden als Gesamtausgleichung in einem Guss incl. der tachymetrischen Passkugelmessungen mit Ausreißerelimination durchgeführt. Für die Kugelzentren ergaben sich Punktgenauigkeiten von kleiner 2,5 mm. Die Punktgenauigkeiten für die Translationen lagen unterhalb von 2,1 mm und

die Rotationen γ_i konnten mit einer Genauigkeit kleiner 13 mgon (2 mm/10 m) geschätzt werden. Der Kugelradius wurde mit einem Zuschlag von 4,2 mm auf $r = 0.1729$ m geschätzt. Hierbei blieb unberücksichtigt, dass aufgrund der Fertigungsungenauigkeit Unterschiede bei den fünf Kugeln bestehen können. Es ist weiterhin zu bedenken, dass sich das Schätzen des Kugelradius wie das Schätzen eines Maßstabes auswirkt. In dem Zuschlag sind also auch Spannungen des Deponienetzes und ein Maßstabsunterschied zwischen den Tachymeterstrecken und denen des Laserscanners sowie nicht berücksichtigte atmosphärische Einflüsse enthalten.

Exemplarisch wird das Ergebnis für die Probe 2 dargestellt. In der Abbildung 8.3 sind die beiden Oberflächen, die zur Differenz gebracht werden mussten, zu sehen. Für diese Probe ergab sich ein Volumen von $16,0 \text{ m}^3$. Die Kontrollrechnung über Profile bestätigte diesen Wert, soweit diese überhaupt eine Kontrolle gewährleisten können. Der Gesamtaufwand für die Volumenermittlung dieser Probe betrug ca. vier Stunden (Tabelle 8.4).

Tabelle 8.4: Zeitaufwand für die Volumenermittlung

Datenkonvertierung $\rightarrow x, y, z$	60 min
Standpunktverknüpfung	
Detektion	30 min
Ausgleichung	45 min
Rand ermitteln und beschneiden	60 min
Triangulierung	10 min
Volumenberechnung	5 min
Visualisierung	45 min
	255 min

Dieses Projekt zeigte die Potentiale des Laserscanning bei der Bestimmung komplexer Oberflächengeometrien auf. Mit keinem anderen konventionellen Verfahren hätten diese Volumenbestimmungen mit der hier erreichten Auflösung in so kurzer Zeit durchgeführt werden können. Eine photogrammetrische Vermessung hätte hier von der Erfassungsgeschwindigkeit her Vorteile. Aber der verrottete Müll gleicht in seiner Oberflächen-
texturierung einer gleichmäßig gefärbten Erd- oder Humusmasse, sodass sich kaum markante Messpunkte im Photo hätten finden lassen können, die zur 3D-Bestimmung notwendig wären. Die Proben mit ihrer zerklüfteten Oberfläche lassen sich nicht mit einer idealisierten Form modellieren (z. B. Quader). Da sich bei so kleinen Volumina ($2 - 16 \text{ m}^3$) Veränderungen in der Formbestimmung überproportional stark in der Genauigkeit der Volumenbestimmung niederschlagen¹, dienen die Punktwolken zugleich der Form- und Größenbestimmung.

Auch bei diesem Projekt hat sich die Standpunktverknüpfung über Passkugeln bewährt. Der Algorithmus der automatischen Kugelextraktion funktionierte schnell, zuverlässig und ohne Irrtümer. Die Kombination mit der tachymetrischen Anschlussmessung bereitete keinerlei praktischen Schwierigkeiten.

8.3 Flächenrückführung

Die Möglichkeiten und Grenzen der automatischen Flächenrückführung aus Kapitel 7.3 sollen anhand eines synthetischen und eines realen Datensatzes dargestellt werden.

8.3.1 Simulation

Der synthetische Datensatz besteht aus einer Punktwolke, die aus einem simulierten Scan innerhalb einer 35 m^2 großen 1-Zimmer-Wohnung stammt. Die Geometrie der Wohnung setzt sich ausschließlich aus planaren Flächen (Wänden, Decke, Boden) zusammen (Abbildung 8.4(a)). Eine Wand auf der Fensterseite des Wohnraumes verläuft in einem 60° Winkel zu den angrenzenden Wänden. Simuliert wird eine leerstehende Wohnung, sodass keine Abschattungen durch Mobiliar und Ausstattungen auftreten. Hingegen sind Fenster- und Türailbungen als solche im Modell enthalten (Abbildung 8.4(b)). Der Scan simuliert einen panorama-view-Laserscanner mit einer Winkelschrittweite von 1° . An Messrauschen sind für die Streckenmessung 5 mm und

¹Das Volumen einer Sandmenge ist in Form eines Sandhaufens leichter bzw. genauer zu vermessen, als wenn die gleiche Menge Sand als millimeterhohe Schicht auf einem Fußballplatz verteilt wird. Für den Sandhaufen reicht eine zentimetergenaue Vermessung aus; die Sandschicht ist aber millimeterscharf zu vermessen, um das Volumen mit gleicher Genauigkeit bestimmen zu können.

für die Winkelabgriffgenauigkeit 5 mgon angesetzt worden. Für die automatische Extraktion der Objektgeo-

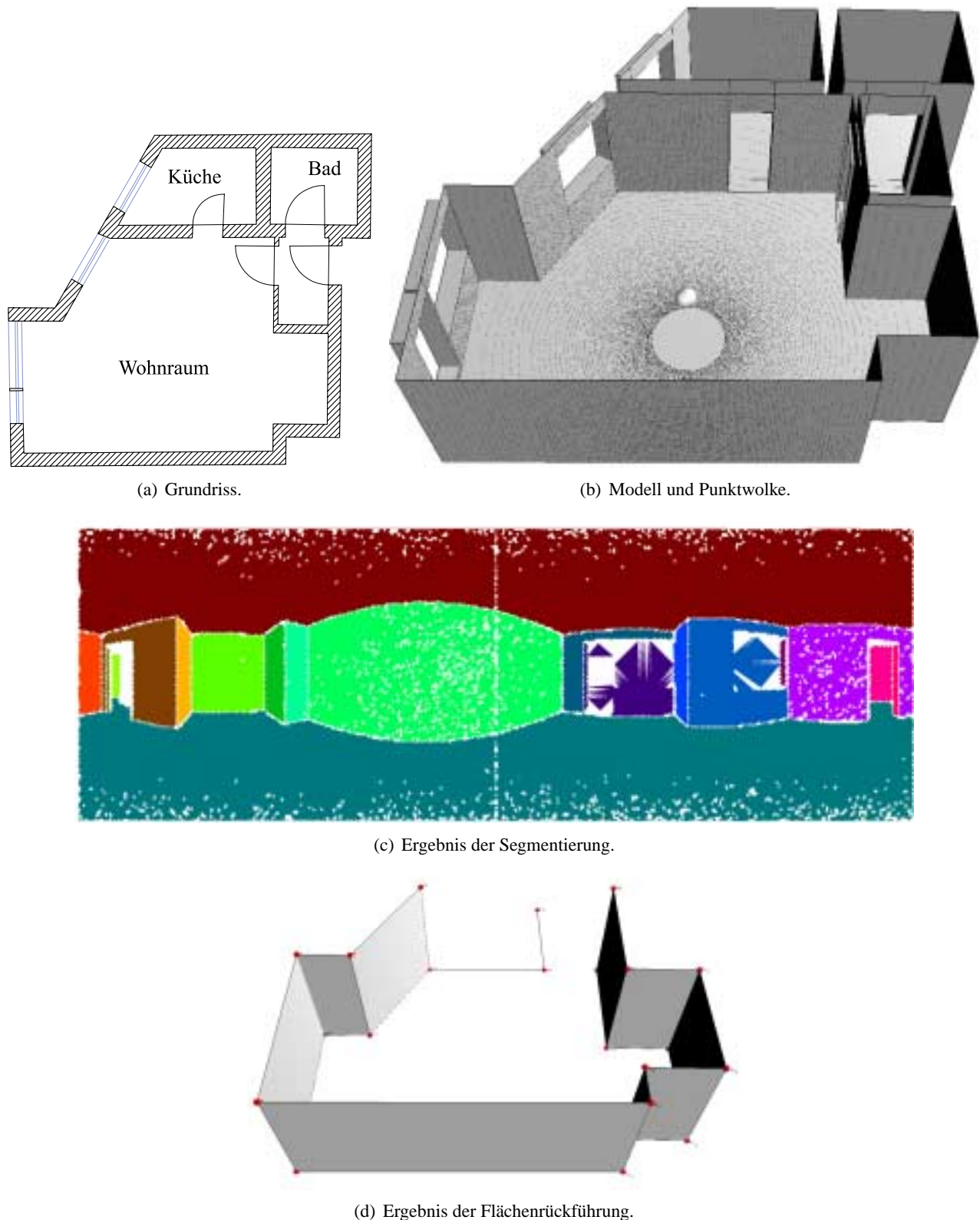


Abbildung 8.4: Beispiel mit synthetischen Laserscannerdaten.

metrien aus dieser Punktwolke sind die in Tabelle 8.5 angegebenen Parameter gewählt worden. Das Ergebnis ist in der Abbildung 8.4(c) dargestellt und das Resultat der Verschneidung ist in Abbildung 8.4(d) zu sehen. Von den insgesamt zehn Wänden des Wohnraumes konnten neun millimetergenau rekonstruiert werden. Die zehnte Wand kann durch den Verschneidungsalgorithmus (Kapitel 7.3.6) nicht als Masche erkannt werden, da die Punktwolke rechts neben der Küchentür für die Triangulierung aufgetrennt wurde. Gleiches gilt für die

Tabelle 8.5: Stellgrößen für die automatische Extraktion.

Arbeitsschritt	Stellgröße	Einstellung
Vorverarbeitung Datenfilterung	keine	
Segmentierung Zugehörigkeitstest Zuordnungskriterium	dynamisch	global $\alpha(D_{min})_{n,tol}=60\text{gon}$ $\alpha(D_{max})_{n,tol}=30\text{gon}$
Verschneidung	minimale Anzahl Dreiecke pro Segment minimaler Schnittwinkel	$n_{t,min}=100$ $det_{tol}=0.1$

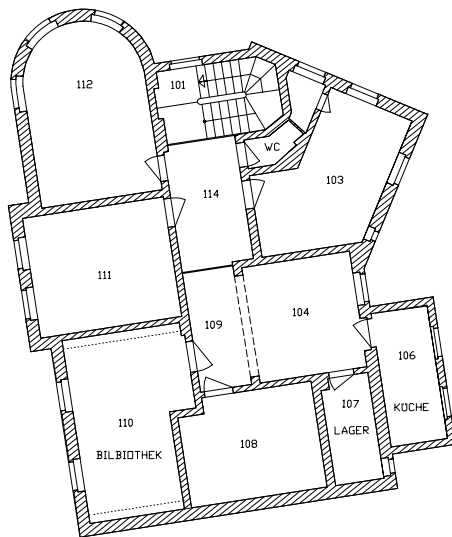
Boden- und Deckenfläche, da sie durch die Auftrennung nicht geschlossen durch Kanten berandet sein können. Die Wandöffnungen finden sich nicht im Randflächenmodell wieder, da sich deren Begrenzungen (Laibungen) in der Punktwolke nicht deutlich als Segmente abzeichnen. Sie bilden Segmente, die aus weniger als $n_{t,min}$ Dreiecken bestehen. Wird diese Schranke herabgesetzt, können Eckpunkte der Laibungen teilweise rekonstruiert werden. Zur Küche hin wird eine Pseudo-Kante generiert. Die Erklärung für das Modellieren dieser Kante ist die Annahme, dass ein Schnitt im u, v -Raum zugleich ein Schnitt im x, y, z -Raum repräsentiert (Abbildung 7.17).

In der Summe sind sämtliche Wände, der Boden und die Decke des Wohnraumes extrahiert. Durch kleine manuelle Ergänzungen lässt sich aus dem automatisch erzeugten Randflächenmodell ein vollständiges und korrektes Modell konstruieren. Die fehlenden Eckpunkte und Kanten der Laibungen können entweder durch weitere Flächenrückführungen mit anderen Parametern gewonnen werden oder durch manuelle Schnittberechnungen zwischen den bereits extrahierten Segmenten.

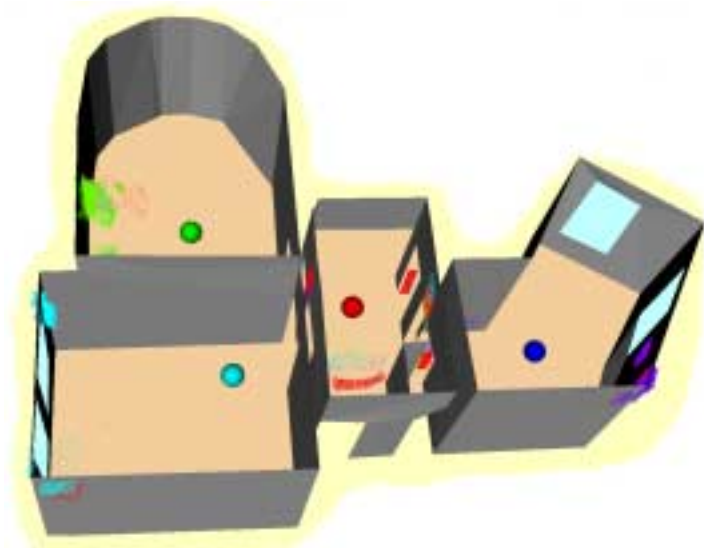
8.3.2 Praxisbeispiel

Für die praktische Erprobung wurden die Räumlichkeiten des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie in der Gaußstraße 22 in Braunschweig mit einem Callidus-Laserscannersystem aufgemessen. Es sind drei über einen Flur miteinander verbundene Räume abgescannt worden. Die Lage der Räume Nr. 103, 111 und 112 sowie des Flures Nr. 114 kann dem Grundriss aus Abbildung 8.5(a) entnommen werden. Jeder Raum bzw. der Flur ist mit nur einer Punktwolke erfasst worden. Die Laserscannerstandpunkte sind in der Abbildung 8.5(b) als Kugeln dargestellt. Die Laserstandpunkte sind so gewählt worden, dass möglichst auch Flächen der anderen Räume miterfasst wurden. Über die so mehrfach erfassten Flächen sollte die Standpunktverknüpfung nach dem Passebenen-Verfahren (Kap. 7.5.2) erfolgen. Die Räume sind für die Vermessung nicht leergeräumt worden. Sämtliches Mobiliar wurde so belassen, wie es täglich im Gebrauch ist. Lediglich die Stühle wurden entfernt und die Jalousien heruntergezogen. Die Jalousien begrenzen so die Punktwolke nach außen ab. Die Scans wurden mit einer Winkelauflösung von $\frac{1}{4}^\circ$ vorgenommen.

Im ersten Auswerteschritt musste die Standpunktverknüpfung berechnet werden. Dazu wurden geeignete Passebenen in den Punktwolken ausgesucht. Die Enge der Räume und die Möglichkeit, dass Flächen anderer Räume nur über die Türöffnungen erfassbar waren, führte dazu, dass nur wenige korrespondierende Flächen in den Punktwolken vorhanden waren. Die Boden- und Deckenflächen waren in allen Punktwolken mehr als ausreichend erfasst. Als Passebenen wurden nur Teilbereiche der Boden- und Deckenflächen gewählt, um ihnen nicht ein unnötig großes Gewicht zu geben. Es wurden nach Möglichkeit nur deckungsgleiche Teile ausgewählt, da nicht davon auszugehen war, dass die Boden- und Deckenflächen über ihre Gesamtfläche ein einheitliches Niveau haben. Insbesondere war die Bodenfläche durch den groben Bodenbelag nicht als eine große Ebene anzusehen. Durch die Passebenen aus dem Boden- und Deckenbereich waren die Laserstandpunkte in ihrer Höhe zueinander festgelegt. Ausreichend viele Passebenen für die horizontale Lage zu finden erwies sich als sehr schwer. Nicht immer konnten deckungsgleiche Bereiche gefunden werden. Tür-laibungen waren häufig mehr als einmal in den Punktwolken abgebildet. Nur leider lagen sie konzentriert innerhalb des gesamten Messgebietes, sodass von ihnen nur eine unsichere Bestimmung der Standpunktverknüpfung zu erwarten war. Es wurden vermehrt Passebenen in der Tiefe der Räume gewählt. Eine Übersicht über die insgesamt 18 Passebenen



(a) Grundriss.



(b) Verteilung der Laserstandpunkte und Passebenen.

Abbildung 8.5: Innenraumvermessung „Villa Gaußstraße 22“

Tabelle 8.6: Innere Verknüpfung zwischen den Punktwolken über die Passebenen.

Punktwolke	Passebene																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
103	•	•	•	•	•	•	•			•				•				
111	•						•		•	•		•	•	•				
112				•			•						•	•	•	•	•	•
114		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

ist mit der Abbildung 8.5(b) gegeben. Die innere Verknüpfung zwischen den Punktwolken ist in der Tabelle 8.6 zusammengestellt. Wie man erkennt, verknüpfen die meisten Passebenen lediglich zwei Punktwolken miteinander.

In die Gesamtausgleichung der Standpunktverknüpfung sind 26.295 Messpunkte eingeflossen. Als Unbekannte sind drei Transformationssätze mit vier unbekanntenen Parametern, drei Translation und die Rotation um die z-Achse, geschätzt werden. Hinzu kamen jeweils drei Ebenenparametern für jede Passebene. In der Summe hatte das Ausgleichsproblem 66 Unbekannte und war mit 26.229 Freiheitsgrade gut überbestimmt. Als übergeordnetes Bezugssystem wurde das lokale Laserscannersystem der Punktwolke aus dem Flur (Raum 114) gewählt. Als Standardabweichung a priori wurde $\sigma = 2 \text{ mm}$ angenommen und für die Ausreißerelimination wurden 2σ angehalten. So mussten 3.573 Ausreißer akzeptiert werden. Die hohe Anzahl an Ausreißern ist zum einem im Quantisierungseffekt zu suchen und zum anderen in der nicht immer deckungsgleichen Auswahl der Passebenenbereiche auf zum Teil recht rauen Oberflächen (Bodenbelag).

Das Ausgleichsergebnis für die Passebenen ist in Tabelle 8.7 zusammengetragen. Bis auf die Passebene 17 liegen die Standardabweichungen für die Abstände der Ebenen vom Koordinatenursprung deutlich im Millimeterbereich. Auch die Normalenvektoren konnten zuverlässig bestimmt werden. Die Standardabweichungen sind hier um weit mehr als ein tausendstel kleiner als die Parameterwerte. In den Parameterwerten zeichnen sich gut die horizontalen (Nr. 4, 5, 6, 12, 15 und 18) und vertikalen Ebenen (Nr. 1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14 und 16) ab. Die vertikalen Passebenen auf den Wänden sind etwas systematisch verkippt. Dies liegt weniger an der Schiefe der Wände als an der Schiefstellung des Laserscanners beim Scan im Flur trotz der Horizontierung über einen Neigungssensor. Die Standpunktverknüpfung reagierte zudem empfindlicher auf Änderung an lagebestimmenden Passebenen.

Das Ergebnis der Standpunktverknüpfung ist mit der Tabelle 8.8 dargelegt. Die Translationen sind besser als mit einem Millimeter bestimmt und die Genauigkeiten der Rotationen liegen trotz der kleinen Zielweiten im Milligonbereich.

Tabelle 8.7: Geschätzte Passebenen.

Passebene	Normalenvektor \mathbf{n}_0			Abstand d [m]	Standardabweichung			
	[]				$s_{\mathbf{n}_0}$ [10^{-3}]		s_d [mm]	
1	0.352732	-0.935710	0.005278	0.1028	0.2	0.1	0.1	0.7
2	0.983150	-0.182682	-0.006514	5.9845	0.2	1.3	0.7	1.3
3	0.356034	-0.934410	0.010825	3.0444	0.9	0.3	0.6	4.3
4	-0.021402	-0.013823	-0.999675	1.0769	0.5	0.5	0.0	1.0
5	0.008323	-0.000273	0.999965	0.9001	1.1	0.6	0.0	1.8
6	-0.010833	0.009026	-0.999901	1.1177	0.1	0.2	0.0	0.2
7	-0.932747	-0.360275	0.013617	1.1510	0.1	0.3	0.2	0.3
8	0.344219	-0.938882	0.003719	4.6173	0.8	0.3	0.6	4.8
9	-0.354862	0.934917	0.001929	0.9065	0.9	0.3	0.2	1.4
10	0.983961	-0.177990	0.011846	6.0216	0.3	1.4	0.8	2.3
11	-0.935310	-0.353820	0.002675	6.3505	0.7	1.8	1.6	9.2
12	0.006468	0.016840	0.999837	2.2259	0.7	0.6	0.0	2.9
13	0.934224	0.356685	-0.001600	1.3326	0.1	0.2	0.1	0.2
14	-0.980952	-0.192027	-0.029290	6.1080	0.1	0.3	0.8	0.8
15	-0.004824	0.002748	-0.999985	1.1627	0.3	0.2	0.0	1.8
16	0.349843	-0.936806	0.002042	1.2856	1.0	0.4	0.3	1.6
17	-0.716167	0.697929	0.000168	5.0133	1.2	11.5	6.3	51.4
18	0.002140	0.005649	0.999982	2.3232	0.2	0.3	0.0	1.2

Tabelle 8.8: Geschätzte Transformationen.

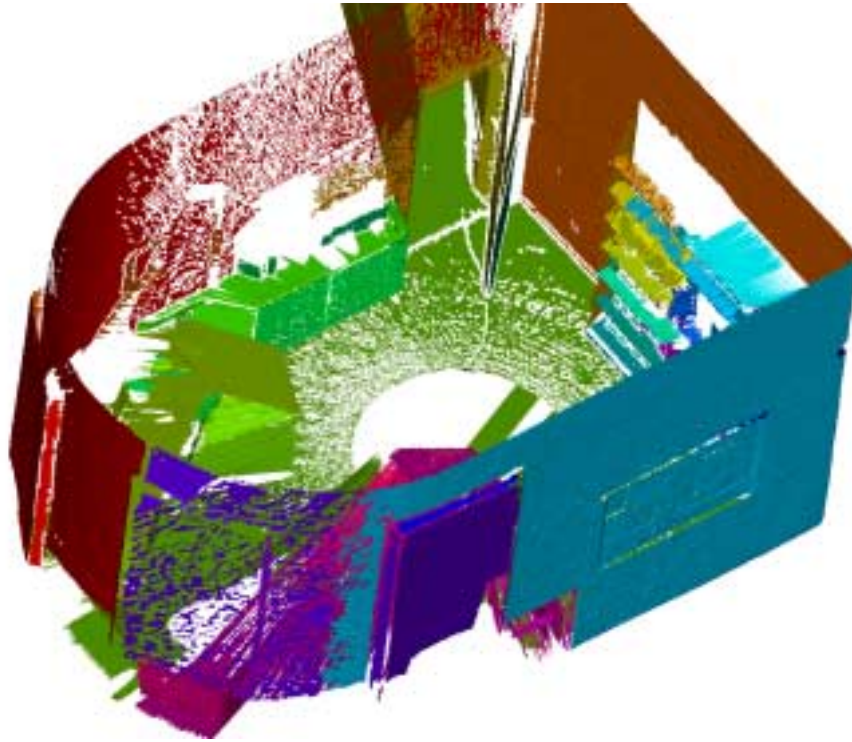
Punktwolke	Translation \mathbf{X}_0			Rotation γ [gon]	Standardabweichung			
	[m]				$s_{\mathbf{X}_0}$ [mm]		s_γ [mgon]	
103	4.1373	0.3431	0.0011	11.3577	0.19	0.23	0.10	10.85
111	-1.9454	-2.4250	-0.0294	2.1828	0.20	0.28	0.12	4.51
112	-3.9218	0.5812	-0.0178	34.5602	0.21	0.85	0.13	9.46

Als Vorbereitung für die Flächenrückführung sind die vier Punktwolken einer zehnfachen Datenfilterung mit einem Mittelwertfilter unterzogen worden, denn die Punktwolken sind erheblich durch den Quantisierungseffekt gestört gewesen.

Tabelle 8.9: Stellgrößen für Flächenrückführung.

Arbeitsschritt	Stellgröße	Einstellung
Vorverarbeitung Datenfilterung	keine	
Segmentierung Zugehörigkeitstest Zuordnungskriterium	dynamisch	global $\alpha(D_{min})_{n,tol}=45\text{gon}$ $\alpha(D_{max})_{n,tol}=15\text{gon}$
Verschneidung	minimale Anzahl Dreiecke pro Segment minimaler Schnittwinkel	$n_{t,min}=500$ $det_{tol}=0.1$

Für die Segmentierung sind die Werte aus Tabelle 8.9 benutzt worden. Das Segmentierungsergebnis zeigt die Abbildung 8.6, wobei die Deckensegmente der Übersichtlichkeit wegen nicht dargestellt sind. Für die Modellierung der groben Raumgeometrie reichte es aus, die Verschneidung auf Segmente zu beschränken, die mindestens aus 500 Punkten bestehen. Damit konnte z.B. der Bereich des Wandregals im Raum 112 (rech-



(a) Raum 112.



(b) Gesamtansicht.

Abbildung 8.6: Ergebnis der Segmentierung.

te Wand in Abbildung 8.6(a)) zufriedenstellend modelliert werden. Das aus der Segmentierung abgeleitete Randflächenmodell zeigt die Abbildung 8.7. Die Objektgeometrie konnte, was die Ecken und Kanten anbetrifft, erstaunlich vollständig rekonstruiert werden. Viele durch Möbel verstellte Ecken sind durch den „Umlauf“-Effekt modelliert worden. Das Mobiliar hat viele kleinere Stöckecken und -kanten erzeugt, die es in der CAD-Nachbearbeitung zu löschen galt. In Teilen sind auch Ecken und Kanten der Tür- und Fensterlaibungen rekonstruiert. Die Kanten einer Wand laufen parallel zueinander und stoßen rechtwinklig bzw. im korrekten Winkel (Raum 103) auf die Nachbarkanten. Die runde Wand im Raum 112 ist durch vier ebene Wandsegmente approximiert in Übereinstimmung mit den Parametern der Toleranzfunktion.

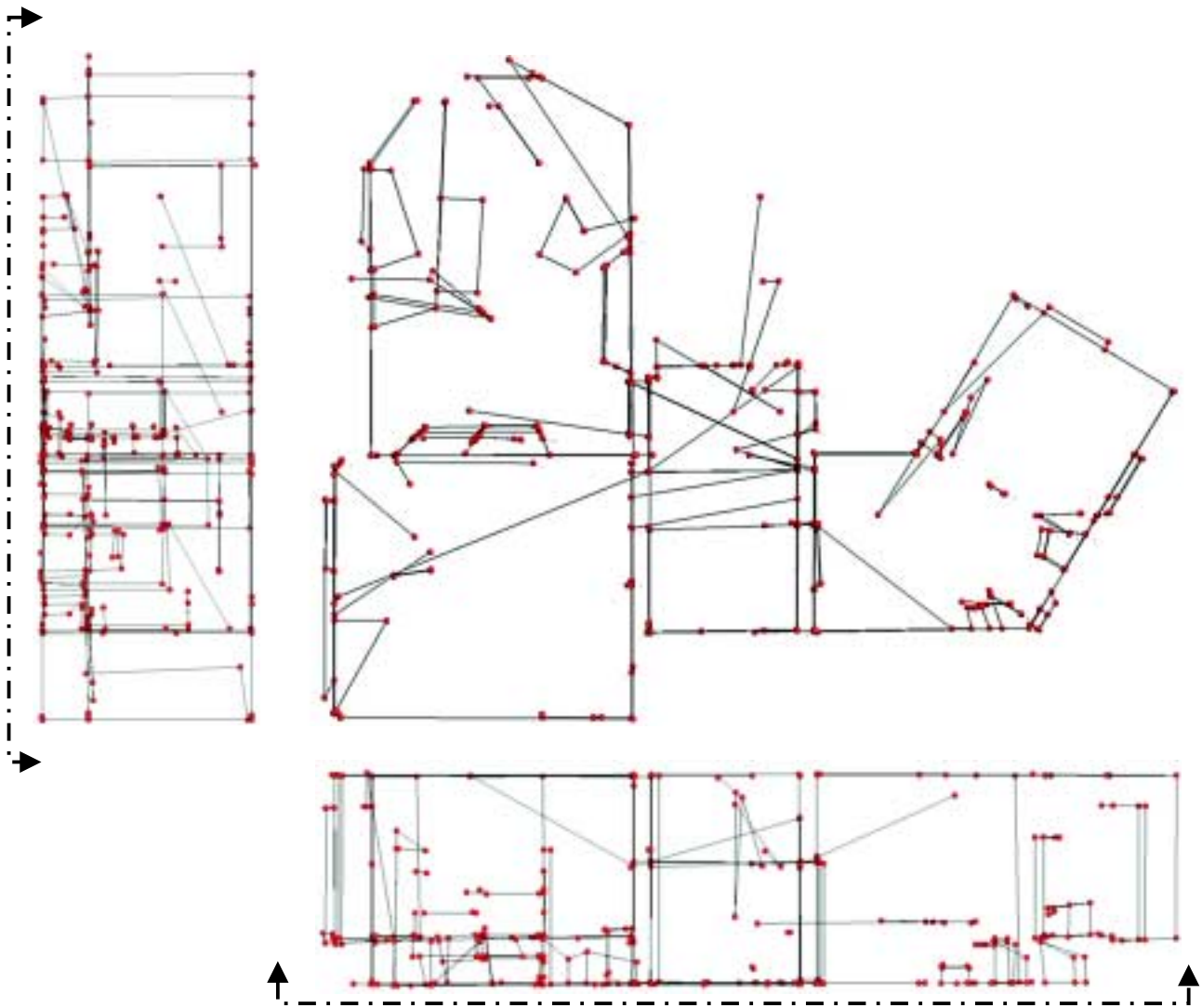


Abbildung 8.7: Ergebnis der Flächenrückführung (Ecken und Kanten).

Für die vorgestellten Ergebnisse war ein Bearbeitungsaufwand von drei Arbeitstagen erforderlich, der überwiegend auf das Konto der interaktiven Auswahl geeigneter Passebenen geht (Tabelle 8.10). Die eigentlichen Flächenrückführungen benötigten nur wenige Minuten an Rechenzeit.

Als Fazit ist festzuhalten, dass das Passebenenverfahren erfolgreich mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit eingesetzt werden konnte. Trotzdem ist es für Innenraumaufnahmen nur eingeschränkt einsetzbar, da es voraussetzt, dass die Objektgeometrie ausreichend variant ist bezüglich unterschiedlich orientierter Wandflächen. Das automatisch abgeleitete Randflächenmodell mit 460 Ecken und 961 Kanten stellte eine brauchbare Konstruktionsbasis dar für die dreidimensionale Modellierung der Räume in einem CAD. Der erforderliche Nachbearbeitungsaufwand war gering und im Vergleich zur alternativen manuellen Modellierung in den Punktwolken (2, 5 Millionen Punkte) wesentlich schneller durchzuführen.

Tabelle 8.10: Zeitaufwand für die Flächenrückführung „Gaußstraße 22“

Standpunktverknüpfung	
Auswahl der Passebenen	8 h
Ausgleichung	4 h
Flächenrückführung (4 Punktwolken)	1 h
Visualisierung	4 h
	<hr/>
	17 h

Kapitel 9

Fazit und Ausblick

Das 3D-Laserscanning ist ein recht neues Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung und steht im Bereich der Erfassung und Dokumentation von Bauwerksgeometrien erst am Anfang einer vielversprechenden Entwicklung. Das Wesen der Bauwerkserfassung mit einem Laserscanner unterscheidet sich sehr stark von der Arbeitsweise anderer konventioneller Mess- und Auswerteverfahren. Beim 3D-Laserscanning muss bedacht werden, dass nicht die für die idealisierte Geometrie notwendigen diskreten Eckpunkte unmittelbar erfasst werden. Nur in ganz wenigen Ausnahmen wird z. B. eine Raumecke durch den Lasermessstrahl getroffen. Die für die geometrische Modellierung notwendigen diskreten Punkte sind vielmehr indirekt aus dem Verschneiden idealisierter Oberflächen zu berechnen, z. B. als Schnittpunkt dreier Ebenen. Da eine Objektoberfläche im Allgemeinen durch eine Vielzahl von Scannermesspunkten diskretisiert wird, ist die Ableitung der idealisierten Form meist kein Problem, sodass die Eckpunkte zuverlässig berechnet werden können. Das Messen mit dem Laserscanner erfordert eine stark Oberflächengeometrie-orientierte Arbeitsweise. Diese unterscheidet sich deutlich von der punkt- und linienorientierten Messung der tachymeterischen und photogrammetrischen Messung und Auswertung. Ein isoliert betrachteter 3D-Punkt innerhalb der Punktwolke reicht zur Diskretisierung eines Objektes oder -teiles nicht aus. Erst ein Punkthaufen von minimal drei (Dreieck) oder mehr Scannermesspunkten stellt eine brauchbare Diskretisierung dar.

In dieser Arbeit wird die flächenorientierte Arbeitsweise dadurch erreicht, dass sämtliche Algorithmen eine triangulierte Punktwolke voraussetzen. Die Triangulierung erfolgt dabei auf der verebneten Richtungskugel und führt zu einem geschlossenen Oberflächenmodell ohne Annahmen über das Abtastmuster, Gitter oder Raster, zu treffen. Es ist lediglich darauf zu achten, dass die Punktwolke von einem Pol aus aufgenommen worden ist. Daher sind die entwickelten Auswerteverfahren unabhängig von den Abtasteigenschaften des benutzten Laserscanners. Die Triangulierung auf einer Platkarte ist nicht optimal und hat Schwächen. Zum einen das Auftrennen der an sich geschlossenen Kugeloberfläche und zum anderen die starke Winkelverzerrung an den Polen, sodass die dreidimensionalen Nachbarschaftsbeziehungen dort falsch in der Triangulierung wiedergegeben werden. Abhilfe würde eine Triangulierung auf der Oberfläche der Richtungskugel schaffen. Die Kanten würden dann längs von Orthodromen verlaufen und die Metrik wäre überall gleich.

Für die eingangs der Arbeit dargelegten Erwartungen an die Auswertung von 3D-Laserscanner-Daten sind Techniken entwickelt worden, die in einem ersten Schritt Lösungen bieten für

- die Datenreduktion/-filterung,
- das automatische Berechnung von Grundrissen und Schnitten,
- die Transformation von Punktwolken in ein übergeordnetes Bezugssystem und
- die automatische Ableitung von Panoramen und Orthophotos.

Keine dieser Lösungen weist dabei bereits das Optimum auf. Mit dieser Arbeit konnte aufgrund der Vielfältigkeit des Problemkreises Laserscanning nur ein Grundgerüst für die automatisierte Auswertung bereitgestellt werden. Nach der Bewältigung grundlegender Probleme sind nun eine Vielzahl von Detailproblemen zu bearbeiten und es sollten Verfeinerungen vorgenommen werden.

Der automatische Berechnung von Schnitten sollte ein Verfahren zur Homogenisierung nachgeschaltet werden. Im Homogenisierungsprozess könnten Annahmen über Rechtwinkligkeiten und Parallelitäten genutzt werden, um eindeutigere und vollständige Schnittlinien zu erhalten.

Die automatische Orthophotoherstellung kann bislang nur auf eine ebene Projektionsfläche angewendet werden. Eine Erweiterung auf beliebige Abwicklungsflächen wäre wünschenswert.

Für die Standpunktverknüpfung sollten weitere Passkörper, wie z. B. Zylinder, genutzt werden können. Hierzu sind auch Algorithmen zur automatischen Extraktion der Passkörper bereitzustellen.

Die automatische Extraktion von Objektgeometrien mit dem dargelegten Verfahren wird den hohen Erwartungen an eine nachbearbeitungsfreie Modellgenerierung nicht gerecht. Unter Praxisbedingungen sind die Ergebnisse nur unter speziellen, gutmütigen Rahmenbedingungen brauchbar. Die Objektgeometrie muss sich aus planaren Flächen zusammensetzen und sämtliche Ecken und Kanten des gesuchten Modells müssen in der Punktwolke ausreichend diskretisiert sein; d. h. sie dürfen nicht abgeschattet sein z. B. durch Mobiliar, Ausstattungsgegenstände oder Maschinen. Das resultierende Randflächenmodell kann nur die grobe Objektgeometrie beschreiben. Sinnvoll anwendbar ist das Verfahren bei Innenräumen als Unterstützung zur herkömmlichen manuellen Rekonstruktion. Die während der Flächenrückführung berechnete Segmentierung kann dabei wichtige Hinweise für die Modellierung geben und erlaubt eine schnelle Verschneidung der Ebenen. Hierzu müssen lediglich drei oder mehr Segmente angewählt und einer Schnittpunktberechnung zugeführt werden. Der Algorithmus zur Flächenrückführung bearbeitet nur Schnitte dreier Segmente. Eine Erweiterung auf Vier- bzw. Mehrfach-Schnitte ist anzustreben.

Die Verfahren für die Auswertung von Laserscanner-Daten sind in voneinander unabhängigen Computerprogrammen implementiert worden. Wünschenswert wäre die Vereinigung dieser unter einer gemeinsamen leichtbedienbaren, graphischen Benutzeroberfläche, die auch eine dreidimensionale Betrachtung und Manipulation der Punktwolken sowie der Auswertergebnisse erlaubt. Von Vorteil wäre die Integration in ein vollwertiges 3D-CAD-Programm, um so auf die umfassenden Konstruktions- und Visualisierungswerkzeuge zurückgreifen zu können. Nachteilig an solch einer Integration wären die hohen Anforderungen an Rechenleistung und Speicherkapazität, die an die Punktverwaltung des CAD-Programmes zu stellen sind. Es ist zu befürchten, dass in Zukunft weit größere Punktwolken von den Laserscannern bereit gestellt werden können als heute. Die durch das Anwachsen der Datenmenge notwendig werdenden Rechnerkapazitäten werden kaum durch die Entwicklung leistungsfähigerer Computer befriedigt werden können.

Für das 3D-Laserscanning gilt ebenso wie für andere Erfassungstechniken incl. der Photogrammetrie, dass sie keine „eierlegende Wollmilchsau“ sind. Diese Ausführungen und Beispiele legen dar, dass eine Vielzahl von Messaufgaben zweckorientiert mit einem 3D-Laserscanner durchführbar sind. Einige dieser Aufgaben können in ihrer Art nur mit der Laserscannertechnik wirtschaftlich bewältigt werden. Dazu zählen insbesondere Vermessungen hochkomplexer Objekte wie z. B. Skulpturen oder Oberflächen mathematisch unbestimmter Form wie sie z. B. bei Massenermittlungen auftreten.

Das vorgestellte Verfahren zur automatischen Ableitung von Orthophotos weist ein besonders günstiges Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen auf, sodass davon auszugehen ist, dass das etablierte Verfahren der Bildentzerrung, wie es für Fassaden mit geringer Tiefenvariation erfolgreich eingesetzt wird, bald auch für aufwendigere Objektoberflächen Anwendung findet.

Das terrestrische 3D-Laserscanning erschließt viele neue Anwendungsfelder und stellt weniger eine Konkurrenz für die konventionellen Verfahren dar als vielmehr eine sinnvolle Ergänzung. Ein Bauwerk kann und sollte unter Berücksichtigung aller Rahmenbedingungen nicht ausschließlich mit einer Technik vermessen werden, sondern mit der optimalen Kombination verschiedener Verfahren. Für die Anlage eines Grundlagnetzes oder die Bestimmung von einzelnen Hochpunkten sind weiterhin tachymetrische Verfahren am besten geeignet. Bei der Vermessung von sich bewegenden Objekten oder wenn hohe Genauigkeiten erzielt werden sollen können photogrammetrische Verfahren ihre Vorteile besonders gut ausspielen. Das Handaufmaß ist unschlagbar bei der Detailaufnahme, die Interpretations- oder Analyseleistungen am Objekt erfordern. Das 3D-Laserscanning wird sich zum Standardverfahren für die Vermessung von komplexen Oberflächen entwickeln.

An die Hersteller von Laserscannersystemen sei der Wunsch geäußert, einen Laserscanner stärker als geodätisches Instrument aufzufassen. So mangelt es derzeit an der Kompatibilität mit anderen Vermessungsgeräten und Auswertprogrammen sowie an Möglichkeiten der Kalibrierung und Justierung der Geräte im Rahmen eines Qualitätsmanagements.

Die Entwicklung terrestrischer 3D-Laserscanner für verschiedenste Vermessungsaufgaben haben erst in den letzten Jahren auf breiter Front begonnen. Neben der Entwicklung von schnelleren, auflösungsreicheren und genaueren Systemen sind zugleich Auswertprogramme zu entwickeln, die den Prozess des automatischen Erfassens ebenbürtig fortsetzen. Die heutige Regel, dass eine Stunde Messaufwand drei Stunden und mehr an Auswertarbeit nach sich zieht, wird in Zukunft in Anbetracht der steigenden Personalkosten wirtschaftlich nicht mehr aufrecht zu halten sein und die Einsatzmöglichkeiten einschränken. Abhilfe können hier nur automatische Auswertprozesse schaffen.

Literaturverzeichnis

- [Aße02] ASSENMACHER, L.: Laser Klasse 3R. In: *Der Vermessungsingenieur* Heft 6 (2002), S. 456–458
- [AM91] ABRAMOWSKI, S. ; MÜLLER, H.: *Geometrisches Modellieren*. Mannheim, Wien, Zürich : BI Wissenschaftsverlag, 1991 (Reihe Informatik, Band 75)
- [ANM96] AMES, A.L. ; NADEAU, D.R. ; MORELAND, J.L.: *The VRML Sourcebook*. Jon Wiley & Sons, 1996
- [Are94] ARENDT, C.: *Technische Untersuchungen in der Altbausanierung*. Köln : Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1994
- [Bal95] BALCK, F.: Computergestützte Vermessung und zeichnerische Dokumentation; TRIGOMAT. In: SCHRADER, B. (Hrsg.): *Gebäudeinformationssysteme*. Wittwer, 1995 (DVW-Schriftenreihe Band 19/1995), S. 175–184
- [Bal96] BALCK, F.: Bogenschlag mit elektronischen Meßbändern. Eine effektive rechnergestützte Methode zur Kartierung und Vermessung. In: *Vermessung und Raumordnung* Heft 1 (1996), S. 13–24
- [BDGV85] BOLSAKOV, V.D. ; DEUMLICH, F. ; GOLUBEV, A.N. ; VASILEV, V.P.: *Elektronische Streckenmessung*. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1985
- [Bec93] BECKSCHÄFER, M.: Quo Vadis, Photogrammetria. In: *EDV in der Denkmalpflege, Fachtagung 1993*. Köln : Rheinland-Verlag, 1993 (Mitteilungen aus dem Rheinischen Amt für Denkmalpflege Heft 10), S. 25–29
- [Ber90] BERGER, H.: *Baudenkmalpflege, Beiträge zur Methodik und Technologie*. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1990
- [Ber97] BERTZKY, R.: Facility Management –Berücksichtigen Sie Baufolgekosten bei der Planung!–. In: *Bauinformatik* Heft 2 (1997), S. 14–21
- [BGZ96] BUNGARTZ, H.J. ; GRIEBEL, M. ; ZENGLER, C.: *Einführung in die Computergrafik*. Braunschweig : Vieweg, 1996
- [BHM00] BOEHLER, W ; HEINZ, G. ; MARBS, A.: *The Potential of Non-Contact Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording*. www.i3mainz.fh-mainz.de : CIPA Working Group VI, 2000
- [BHM01] BOEHLER, W. ; HEINZ, G. ; MARBS, A.: The Potential of Non-Contact Close Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.): *XVIII. International CIPA Symposium. Surveying and Documentation of Historic Buildings - Monuments - Sites Traditional and Modern Methods.*, CIPA, 18.-21. September 2001, S. 430–436
- [BK96] BONITZ, P. ; KRZYSZEK, P.: Reverse Engineering in Combination with Digital Photogrammetry. In: HOSCHEK, J. (Hrsg.) ; DANKWORT, W. (Hrsg.): *Reverse Engineering*. B.G. Teubner, 1996, S. 33–50
- [BMB01] BARBER, D. ; MILLS, J. ; BRYAN, P.G.: Laser Scanning and Photogrammetry: 21ST Century Metrology. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.): *XVIII. International CIPA Symposium. Surveying and Documentation of Historic Buildings - Monuments - Sites Traditional and Modern Methods.*, CIPA, 18.-21. September 2001, S. 360–366
- [BOH99] BRAUN, H.P. ; OESTERLE, E. ; HALLER, P.: *Facility Management*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1999

- [Bor96] BORRI, A.: Die Domkuppel zu Florenz –Baugeschichtliche Aspekte, Beobachtung der Bauwerksschädigung und Ergebnisse der meßtechnischen Überwachung–. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 45 (1996)
- [Bra77] BRAUNER, H.: *Baugeometrie*. Bd. 1. Wiesbaden, Berlin : Bauverlag, 1977
- [Bra82] BRAUNER, H.: *Baugeometrie*. Bd. 2. Wiesbaden, Berlin : Bauverlag, 1982
- [Bra97] BRASCH, U.: Bestandsaufnahme –Sicheres Aufmaß mit Rechner und Laser–. In: *Bauinformatik* Heft 1 (1997), S. 21–23
- [BRM⁺02] BERNARDINI, F. ; RUSHMEIER, H. ; MARTIN, I.M. ; MITTLEMAN, J. ; TAUBIN, G.: Model of Michelangelo's Florentine Pietà. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* Heft Januar/Februar (2002), S. 59–67
- [Bro97] BROCKMEYER, C.: Von der photogrammetrischen Aufnahme bis zum digitalen 3D-CAD-Modell am Beispiel der Alten Synagoge Essen. In: *Der Vermessungsingenieur* Heft 6 (1997), S. 320–323
- [BS93] BERGMANN, L. ; SCHAEFER, C.: *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Bd. III. Optik. Berlin : Walter de Gruyter, 1993
- [BS94] BUCHMANN, P. ; SCHERER, M.: Bauaufnahme mit einem computergesteuerten 3D-Laserscanner. In: *Der Vermessungsingenieur* Heft 5 (1994), S. 210–215
- [BSS95] BENNING, W. ; SIEPRATH, A. ; SPARLA, P.: Berührungslose 3D-Vermessung von Sickerwasserschächten im Deponiebereich. In: *Vermessung und Raumordnung* Heft 7+8 (1995), S. 397–407
- [Böt92] BÖTTCHER, J.: Intelligentes Sensorsystem zur Online-Überwachung der Dehnungen und Spannungen in Betonbauwerken. In: *VDI-Fortschrittsberichte*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1992 (Reihe 8 Nr. 277)
- [Buc96] BUCHMANN, P.: *Entwicklung eines Meßsystems zur automatischen polaren Objekterfassung am Beispiel der Bauaufnahme*. München : Deutsche Geodätische Kommission, 1996 (Reihe C, Heft Nr. 456)
- [BV98] BÄHR, H-P. ; VÖGTLE, T.: *Digitale Bildverarbeitung -Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung–*. 3. Aufl. Heidelberg : Wichmann, 1998
- [BW89] BERGER, F. ; WENZEL, F.: Einsatzmöglichkeiten zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden an Mauerwerk insbesondere an historischen Bauten. In: WENZEL, F. (Hrsg.): *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Jahrbuch 1988/Sonderforschungsbereich 315*. Universität (TH) Karlsruhe, 1989, S. 69–106
- [Cal01] CALLIDUS^(R): *Technische Daten für das LMS „Callidus“ Vers. 1.1*. www.callidus.de: Callidus Precision Systems GmbH, Halle (Saale), Deutschland, 2001. – Firmenprospekt
- [Che99] CHESHANKOV, L.: Laser Systems for Determining and Control of Three-Dimensional Parameters in the Engineering Geodesy. In: ALTAN (Hrsg.) ; GRÜNDIG (Hrsg.): *Third Turkish-German Joint Geodetic Days* Bd. II. Istanbul, 1.-4. Juli 1999 1999, S. 541–548
- [CMG96] CAREY, R. ; MARRIN, C. ; G., Bell: *The Virtual Reality Modeling Language Specification - The VRML 2.0 Specification*. <http://www.vrml.org>, 1996
- [Cra84] CRAMER, J.: *Handbuch der Bauaufnahme*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1984
- [CT01] CYRA-TECHNOLOGIES: Alles-Scanner. In: *AUTOCAD-Magazin* Heft 2 (2001), S. 78–79
- [Cyr00] CYRA: *Cyrax^(R) 2500 Product Specifications*. www.cyra.com: Cyra Technologies Inc., Oakland, USA, Dezember 2000. – Firmenprospekt
- [DIN95] DIN1356-1: *Bauzeichnungen Teil 1: Arten, Inhalte und Grundregeln der Darstellung*. Februar 1995. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., 1995
- [Don00] DONGES, A.: *Physikalische Grundlagen der Lasertechnik*. 2. neubearb. und erweiter. Aufl. Heidelberg : Hüthig, 2000
- [Dri93] DRIXLER, E.: *Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum*. München : Deutsche Geodätische Kommission, 1993 (Reihe C, Heft Nr. 409)

- [DS02] DEUMLICH, F. ; STAIGER, R.: *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. 9. völlig neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg : Wichmann, 2002
- [DSAW98] DEMANT, Ch. ; STREICHER-ABEL, B. ; WASZKEWITZ, P.: *Industrielle Bildverarbeitung - Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1998
- [Dum01] DUMFARTH, E.: Die Welt in drei Dimensionen. In: *GeoBIT* Heft 10 (2001)
- [Dzi90] DZIERZON, M.: *Altbauten zerstörungsmäßig untersuchen: Bauaufnahme, Holzuntersuchungen, Mauerfeuchtigkeit*. Köln : Rudolf Müller Verlagsgesellschaft, 1990
- [EaSK97] ENCARNAÇÃO, J. ; STRASSER, W. ; KLEIN, R.: *Graphische Datenverarbeitung 2*. 4. aktualisierte und wesentlich erw. Aufl. München, Wien : Oldenbourg, 1997
- [Ebe99] EBERLY, D.: Least Squares Fitting of Data. In: www.magic-software.com/lfit.pdf (1999)
- [Eck99] ECKSTEIN, G.: *Empfehlungen für Baudokumentationen*. Stuttgart : Konrad Theiss Verlag, 1999 (Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Arbeitsheft 7)
- [EE02] EICHLER, H.J. ; EICHLER, J.: *Laser*. 4. aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2002
- [EH96] ECK, M. ; H., Hoppe: Reverse Engineering using B-Splines. In: HOSCHEK, J. (Hrsg.) ; DANKWORT, W. (Hrsg.): *Reverse Engineering*. B.G. Teubner, 1996, S. 153–158
- [Eng92] ENGELHARDT, K.: Methoden und Systeme der optischen 3-D Messtechnik. In: MATTHIAS, H.J. (Hrsg.) ; GRÜN, A. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 92*. Dümmler, 1992 (Beiträge zum XI. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung Band 1), S. II 1/1–II 1/12
- [FD96] FOLEY, J.D. ; VAN DAM, A.: *Computer Graphics*. 2. Aufl. Boston, San Francisco, New York : Addison-Wesley, 1996
- [Fec99] VON FECHT, A.: *Beitrag zur Entwicklung von bildgebenden augensicheren Laser Radar System basierend auf dem Gated Viewing Verfahren*. Hamburg : Fachbereich Maschinenbau der Universität der Bundeswehr Hamburg, 1999 (Dissertation)
- [Fel92] FELLNER, W.D.: *Computergraphik*. 2. vollst. überarb. Aufl. Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich : BI Wissenschaftsverlag, 1992 (Reihe Informatik, Band 58)
- [FFGM01] FANGI, G. ; FIORI, F. ; GAGLIARDINI, G. ; MALINVERNI, E.S.: Fast and Accurate Close Range 3D Modelling by Laser Scanner System. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.): *XVIII. International CIPA Symposium. Surveying and Documentation of Historic Buildings - Monuments - Sites Traditional and Modern Methods.*, CIPA, 18.-21. September 2001, S. 196–197
- [FM01] FÖRSTER, D. ; MÜLLER, W.: *Laser in der Metallverarbeitung*. Leipzig : Fachbuchverlag, 2001
- [FMSN95] FRÖHLICH, Ch. ; METTENLEITER, M. ; SCHMIDT, G. ; NOVAK, K.: Integration of an Imaging Laser in Mobile Mapping Systems. In: COLOMINA, I. (Hrsg.) ; NAVARRO, J. (Hrsg.): *Integrated Sensor Orientation: Theory, Algorithms and Systems*. Wichmann, 1995, S. 208–218
- [For87] FORTUNE, S. J.: A Sweepline Algorithm for Voronoi Diagrams. In: *Algorithmica* 1 (1987), S. 153–174
- [Frö00] FRÖHLICH, H.: Wer und Was verbergen sich hinter einer Delaunay Triangulation. In: *Der Vermessungsingenieur* 6 (2000), S. 360–361
- [Gat99a] GATERMANN, H.: Faszination Panoramen, Interaktive Panoramatechnik in Fotografie, CAD und Animation, Teil 1. In: *CAD forum* Heft 3 (1999), S. 34–39
- [Gat99b] GATERMANN, H.: Faszination Panoramen, Interaktive Panoramatechnik in Fotografie, CAD und Animation, Teil 2. In: *CAD forum* Heft 3 (1999), S. 36–39
- [Gat99c] GATERMANN, H.: Faszination Panoramen, VRML: mehr als nur 3D-Datenaustausch im Internet. In: *CAD forum* Heft 4 (1999), S. 36–40
- [Göb01] GÖBEL, J.: *Radartechnik*. Berlin, Offenbach : VDE-Verlag, 2001
- [Geb00] GEBHARDT, A.: *Rapid Prototyping –Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung–*. 2., völlig überarb. Aufl. München, Wien : Carls Hanser, 2000

- [GK95] GROSSMANN, W. ; KAHMEN, H.: *Vermessungskunde I*. Berlin, New York : Walter de Gruyter, 1995 (Sammlung Göschen)
- [GN96] GOTTWALD, R. ; NYFELDER, P.: Produktionssteigerung und Kostenoptimierung im technischen Anlagenbau durch den konsequenten Einsatz von Polarmesssystemen. In: BRANDSTÄTTER, G. (Hrsg.) ; BRUNNER, F. K. (Hrsg.) ; SCHELLING, G. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 96*. Dümmler, 1996 (Beiträge zum XII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung Band 1), S. A1/1–A1/12
- [Gre94] GREFE, J.: Anforderungen an eine Software für die Bauaufnahme. In: *Der Vermessungsingenieur* Heft 5 (1994), S. S. 206–207
- [Gro93] GROSSMANN, G. U.: *Einführung in die historische Bauforschung*. Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1993
- [GV02] GUARNIERI, A. ; VETTORE, A.: 3D-Modelling of Road Tunnel with Laser Scanner. In: KAHMEN, H. (Hrsg.) ; NIEMEIER, W. (Hrsg.) ; RETSCHER, G. (Hrsg.): *Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering II*, 2002, S. 522–527
- [Hab89] HABERÄCKER, P.: *Digitale Bildverarbeitung*. 3. bearb. Aufl. Leipzig, Berlin : Hanser, 1989
- [Hab95] HABERÄCKER, P.: *Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung*. München, Wien : Hanser, 1995
- [Haf94] HAFERKORN, H.: *Optik*. 3. bearb. und erw. Aufl. Leipzig, Berlin, Heidelberg : Barth, 1994
- [Hak82] HAKE, G.: *Karthographie I*. 6. neubearb. Aufl. Berlin, New York : de Gruyter, 1982 (Sammlung Göschen)
- [Han00] HANDELS, H.: *Medizinische Bildverarbeitung*. Stuttgart, Leipzig : B.G. Teubner, 2000
- [Han01] HANSEN, C.G.: Bauaufnahme als gezeichnete Deutungspraxis. In: WEFERLING, U. (Hrsg.) ; HEINE, K. (Hrsg.) ; WULF, U. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech*. Verlag Philipp von Zabern, 2001, S. 32–33
- [Har97] HARTERMANN, W.: Facility Management (FM) und Gebäudeinformationssysteme –ein interdisziplinäres Dualsystem als Planungs- und Entscheidungshilfe–. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* Heft 11 (1997), S. 520–528
- [Has97] HASE, H.L.: *Dynamische virtuelle Welten mit VRML 2.0*. Heidelberg : dpunkt-Verlag, 1997
- [HD96] HOSCHEK, J. (Hrsg.) ; DANKWORT, W. (Hrsg.): *Reverse Engineering*. Stuttgart : B.G. Teubner, 1996
- [Hec01] HECHT, E.: *Optik*. München, Wien : Oldenbourg, 2001
- [Hei91] HEILIGER, R.: Fassadenaufnahme mit MOBI. In: *Der Vermessungsingenieur* Heft 3 (1991), S. 93–96
- [Hei92] HEILIGER, R.: Tachymetrische Bestandsaufnahme mit MOBI. In: *Der Vermessungsingenieur* Heft 1 (1992), S. 25–29
- [Hei93a] HEILIGER, R.: Architektengerechte geodätische Gebäudebestandserfassung. In: *Der Vermessungsingenieur* Heft 4 (1993), S. 172–177
- [Hei93b] HEILIGER, R.: Architektur-Vermessung. In: *EDV in der Denkmalpflege, Fachtagung 1993* Bd. Heft 10. Rheinland-Verlag, 1993, S. 48–51
- [Hei94a] HEILIGER, R.: Architektur-Vermessung. In: *Der Vermessungsingenieur* Heft 5 (1994), S. 197–200
- [Hei94b] HEILIGER, R.: Werkzeuge und Verfahren in der Bauaufnahme. In: *Der Vermessungsingenieur* Heft 5 (1994), S. 201–205
- [Hei99] HEILIGER, R.: Die Gebäude-Bestandsaufnahme - eine geodätische Disziplin? In: *Vermessung und Raumordnung* Heft 3 (1999), S. 153–156
- [Hei00] HEILIGER, R. (Hrsg.): *Architektur-Vermessung – Erfassen und Dokumentieren von Gebäuden*. Bonn : Selbstverlag, 2000
- [Hel97] HELM, F.: Geometrisierung und Rektifizierung manueller Skizzen. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen* Heft 8 (1997), S. 355–368

- [Hip86] HIPPE, J.: Reflektorlose Entfernungsmessung mit Pulslaufzeit-Meßverfahren (FEN 101). In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* Heft 5 (1986), S. 209–211
- [HL92] HOSCHEK, J. ; LASSER, D.: *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*. 2. neubearb. u. erw. Aufl. Stuttgart : Teubner, 1992
- [HLH⁺98] HANCOCK, J. ; LANGER, D. ; HEBERT, M. ; SULLIVAN, R. ; INGIMARSION, D. ; HOFFMAN, E. ; METTENLEITNER, M. ; FRÖHLICH, Ch.: Active Laser Radar for High-Performance Measurements. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation* Mai (1998), S. 1465–1470
- [HMFS02] HEINZ, I. ; METTENLEITNER, M. ; FRÖHLICH, Ch. ; STEPHAN, A.: Hochgeschwindigkeits-Laserscanner IMAGER 5003 für As-Built-Dokumentation. In: LUHMANN, Th. (Hrsg.): *Photogrammetrie und Laserscanning*. Wichmann, 2002, S. 73–83
- [Hof93] HOFMANN, G. R. (Hrsg.): *Imaging Bildverarbeitung und Bildkommunikation*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1993 (Beiträge zur Graphischen Datenverarbeitung)
- [Höp80] HÖPCKE, W.: *Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung*. Berlin, New York : Walter de Gruyter, 1980
- [HS97] HOVENBITZER, M. ; SCHLEMMER, H.: A Line-Scanning Theodolit-Based System for 3D Applications in Close Range. In: GRÜN, A. (Hrsg.) ; KAHMEN, H. (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques IV*, 1997, S. 339–345
- [HSS01] HEMMLEB, M. ; SIEDLER, G. ; SACHER, G.: Digitale Bildverzerrungen und -abwicklungen für die Anwendung in Denkmalpflege, Bauforschung und Restaurierung. In: WEFERLING, U. (Hrsg.) ; HEINE, K. (Hrsg.) ; WULF, U. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech*. Verlag Philipp von Zabern, 2001, S. 74–82
- [Hud99] HUDER, B.: *Einführung in die Radartechnik*. Stuttgart, Leipzig : Teubner, 1999
- [Hue95] HUEP, W.: Zum Einsatz der reflektorlosen Tachymetrie bei der Gebäude-Bestandserfassung. In: SCHRADER, B. (Hrsg.): *Gebäudeinformationssysteme*. Wittwer, 1995 (DVW-Schriftenreihe Band 19/1995), S. 99–110
- [HW97] HUG, Ch. ; WEHR, A.: Application of Imaging Laser Sensors in Close-Range Metrology and Remote Sensing. In: GRÜN, A. (Hrsg.) ; KAHMEN, H. (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques IV*, 1997, S. 141–148
- [HY92] HEWITT, W.T. ; YIP, D.: *The NURBS Procedure Library*. Manchester : Manchester Computing Center Computer Graphics Unit, 1992 (CGU 76)
- [Ing99] INGENSAND, H.: Robotertachymeter –Polare Positioniersysteme der Zukunft–. In: DEUTSCHER INGENIEURE VDI, Verein (Hrsg.): *Moderne Sensorik für die Bauvermessung*, VDI-Verlag, 1999 (VDI-Berichte 1454), S. 33–47
- [Jac93] JACOBS, U.: Kombinierte EDV-unterstützte Verfahren. In: *EDV in der Denkmalpflege, Fachtagung 1993*. Köln : Rheinland-Verlag, 1993 (Mitteilungen aus dem Rheinischen Amt für Denkmalpflege Heft 10), S. 19–23
- [Jar95] JARNACH, M.: Einsatz eines Laser-Scanners in der Denkmalpflege. In: HÜNERFELD, L. (Hrsg.) ; KUPP, W. (Hrsg.) ; VOLLBRACHT, R. (Hrsg.): *78. Deutscher Geodätentag in Mainz*. Wittwer, 1995 (DVW-Schriftenreihe Band 12/1994), S. 181–188
- [JB97] JIANG, B. ; BUNKE, H.: *Dreidimensionales Computersehen*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1997
- [Jes99] JESSE, K.: *Laser*. Berlin, Offenbach : VDE-Verlag, 1999
- [Jäh89] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1989
- [JS91] JOECKEL, R. ; STOBBER, M.: *Elektronische Entfernungsmessung*. 2. erweiterte Aufl. Stuttgart : Wittwer, 1991 (Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 18)
- [JS99] JOECKEL, R. ; STOBBER, M.: *Elektronische Entfernungsmessung*. 4. neubearb. u. erweiterte Aufl. Stuttgart : Wittwer, 1999 (Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 18)

- [Kah77] KAHMEN, H.: *Elektronische Meßverfahren in der Geodäsie*. Karlsruhe : Wichmann, 1977 (Sammlung Wichmann Neue Folge Band 8)
- [Kam88] KAMPMANN, G.: *Zur Kombinativen Norm-Schätzung mit Hilfe der L1-, der L2- und der Böković-Laplace-Methode mit den Mitteln der Linearen Programmierung*. Aachen : Geodätisches Institut der Rheinisch-Westfälischen Hochschule Aachen, 1988 (Dissertation Nr. 43)
- [Kat89] KATOWSKI, O.: Deformationsmessung an Bauwerken mit dem automatischen Theodolitmess-System ATMS. In: GRÜN, A. (Hrsg.) ; KAHMEN, H. (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques*, Wichmann, 1989, S. 393–403
- [Keh89] KEHNE, G.: *Beiträge zum Einsatz tachymetrischer Verfahren bei der Bauaufnahme*. Braunschweig : Geodätische Schriftenreihe der Technische Universität Braunschweig, Heft 9, 1989 (Dissertation)
- [Ker87] KERSTING, N.: Optimale Konfiguration beim Vorwärtseinschneiden mit Industriemeß-Systemen. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten* Heft 5 (1987), S. 169–178
- [Ker01a] KERN, F.: Supplementing Laser Scanner Geometric Data with Photogrammetric Images for Modeling. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.): *XVIII. International CIPA Symposium. Surveying and Documentation of Historic Buildings - Monuments - Sites Traditional and Modern Methods.*, CIPA, 18.-21. September 2001, S. 454–461
- [Ker01b] KERN, F.: Bauaufnahme der Synagoge Wörlitz mittels reflektorloser Polaraufnahme. In: WEFERLING, U. (Hrsg.) ; HEINE, K. (Hrsg.) ; WULF, U. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech*. Verlag Philipp von Zabern, 2001, S. 198–205
- [Ker02a] KERN, F.: *Informationen zum Thema Laserscanner -Marktübersicht-*. Internet: www-public.tu-bs.de:8080/~fkern/; Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, 2002. – Stand Frühjahr 2002
- [Ker02b] KERN, F.: Precise Determination of Volume with Terrestrial 3D-Laserscanner. In: KAHMEN, H. (Hrsg.) ; NIEMEIER, W. (Hrsg.) ; RETSCHER, G. (Hrsg.): *Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering II*, 2002, S. 531–534
- [Ker02c] KERN, F.: *Xdesy - Programm zur Ausgleichung geodätischer Netze*. Internet: www.xdesy.de; xdesy@gmx.de, 2002. – Freeware, Version 1.8
- [KF00] KOCH, B. ; FRIEDLAENDER, H.: Erste Erfahrungen zum Einsatz von Laserscannerdaten zur Erfassung von vertikalen und horizontalen Strukturen im Wald. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.): *Vorträge 19. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*. 2000 (Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung Band 8), S. 335–343
- [Köh94] KÖHLER: Einige theoretische Grundlagen für die reflektorlose Messung mit dem Zeiss-Tachymeter Rec Elta RL. In: *Der Vermessungsingenieur* Heft 5 (1994), S. 216–221
- [KH00] KLAUSING, H. ; HOLPP, W.: *Radar mit realer und synthetischer Apertur*. München, Wien : Oldenburg, 2000
- [KL84] KONECNY, G. ; LEHMANN, G.: *Photogrammetrie*. 4. völlig neu bearb. Aufl. Berlin, New York : Walter de Gruyter, 1984
- [Kle97] KLEIN, R.: *Algorithmische Geometrie*. Bonn : Addison-Wesley, 1997
- [Kle01] KLEIN, U. ; GERNER, M. (Hrsg.): *Bauaufnahme und Dokumentation*. Stuttgart, München : Deutsche Verlags-Anstalt, 2001 (Reihe Altbausanierung)
- [Kog01] KOGOJ, D.: Reflektorlose Distanzmessung. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten* Heft 5 (2001), S. 186–190
- [Kol02] KOLLMANNBERGER, G.: *Hinweise zum Betrieb von Lasern an der Universität Konstanz*. Konstanz: Laserschutzbeauftragter, Universität Konstanz, Juli 2002. – Merkblatt 05, Version 2
- [Kor95] KORTE, M. H.: Erfassungstechniken für die maßlich-graphische und alphanumerische Bestandsaufnahme. In: SCHRADER, B. (Hrsg.): *Gebäudeinformationssysteme*. Wittwer, 1995 (DVW-Schriftenreihe Band 19/1995), S. 111–124
- [Kra86] KRAUS, K.: *Photogrammetrie*. 2. Aufl. Bonn : Dümmler, 1986 (Band 1)
- [KS95] KNEUBÜHL, F.K. ; SIGRIST, M. W.: *Laser*. 4. durchg. Aufl. Stuttgart : Teubner, 1995

- [KS99] KNEUBÜHL, F.K. ; SIGRIST, M. W.: *Laser*. 5. Aufl. Stuttgart : Teubner, 1999
- [KTMG02] KERN, F. ; THOMSEN, S. ; MITTELSTÄDT, D. ; GAY, O.: Integrierte Auswertung von Laserscanner- und Bilddaten für das Facility-Management. In: LUHMANN, Th. (Hrsg.): *Photogrammetrie und Laserscanning*. Wichmann, 2002, S. 107–117
- [KZ92] KLETTE, R. ; ZAMPERONI, P.: *Handbuch der Operatoren für die Bildverarbeitung*. Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg, 1992
- [Lan94] LANGE, W.: *Einführung in die Laserphysik*. 2. völlig überarb. Aufl. Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1994
- [LH01] LEMMENS, M.J.P.M ; VAN DEN HEUVEL, F. A.: 3D Close-range Laser Mapping Systems. In: *GIM International* 1 (2001), S. 30–33
- [Loe00] LOEDEMANN, J.H.: Construction Surveyors Cut out by 3D-Laserscanning? – GIM Interviews Dr. Erik Niebuhr. In: *GIM International* 14 (2000)
- [LR01] LINGUA, A. ; RINAUDO, F.: The Statue of Ramsete II - Integration of Digital Photogrammetry and Laser Scanning Technique for 3D Modelling. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.): *XVIII. International CIPA Symposium. Surveying and Documentation of Historic Buildings - Monuments - Sites Traditional and Modern Methods.*, CIPA, 18.-21. September 2001, S. 206–211
- [Luh00] LUHMANN, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie*. Heidelberg : Wichmann, 2000
- [LW85] LADSTÄTTER, P. ; WEIMANN, G.: Photogrammetrische Aufnahme und Auswertung des Braunschweiger Löwen. In: SPIES, G. (Hrsg.): *Der Braunschweiger Löwe*. 1985, S. 429–445
- [Maa92] MAAS, H.-G.: Schnelle Oberflächenvermessung. In: MATTHIAS, H.J. (Hrsg.) ; GRÜN, A. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 92*. Dümmler, 1992 (Beiträge zum XI. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung Band 1), S. II 3/1–II 3/12
- [Maa98] MAAS, K.: *Modellierung gekrümmter Flächen zur Uterstützung der markscheiderischen Bearbeitung von Speicherkavernen im Salzgebirge*, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, Dissertation, 1998
- [Mad01] MADER, G. T.: Vergleich händischer und rechnergestützter Verfahren; Anwendung, Wirtschaftlichkeit. In: WEFERLING, U. (Hrsg.) ; HEINE, K. (Hrsg.) ; WULF, U. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech*. Verlag Philipp von Zabern, 2001, S. 99–110
- [MBF⁺01] MONTI, C. ; BRUMMA, R. ; FREGONESE, L. ; SAVI, C. ; ACHILLE, C.: Integrated Methodologies of Survey - Digital Photogrammetry and 3D Model Laser Scanning. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.): *XVIII. International CIPA Symposium. Surveying and Documentation of Historic Buildings - Monuments - Sites Traditional and Modern Methods.*, CIPA, 18.-21. September 2001, S. 437–444
- [Meß01] MESSMER, E.: Moderne Aufnahmetechnologie im Online-Betrieb. In: WEFERLING, U. (Hrsg.) ; HEINE, K. (Hrsg.) ; WULF, U. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech*. Verlag Philipp von Zabern, 2001, S. 111–115
- [Men01] MENSI: *SoisicTM Millennium Edition*. www.mensi.com: Mensi SA, Fontenay-sous-Bois, Frankreich, April 2001. – Firmenprospekt
- [MF00] METTENLEITER, M ; FRÖHLICH, Ch.: Visuelles Laserradar zur 3D-Erfassung und Modellierung realer Umgebungen. In: *at – Automatisierungstechnik* Heft 4 (2000), S. 182–190
- [MH02] MEIXNER, J. ; HEINZ, I.: Bildgebendes Laserradar Präzisionsvermessungssystem. In: *Eisenbahningenieur* Heft 5 (2002), S. 32–43
- [Mic93] MICHELbacher, E.: Ein neues elektronisches Tachymeter mit reflektorloser Distanzmessung. In: *Vermessung und Raumordnung* Heft 5+6 (1993), S. 307–315
- [Muc02] MUCKE, J.: Zur Leistungsfähigkeit des Lasermesssystems Callidus. In: LUHMANN, Th. (Hrsg.): *Photogrammetrie und Laserscanning*. Wichmann, 2002, S. 84–92
- [Nie98] NIEBUHR, E.: Callidus^(R) revolutioniert das Bauwesen. In: *Der Vermessungsingenieur* Heft 8 (1998), S. 376
- [Nie02] NIEMEIER: *Ausgleichsrechnung*. Berlin, New York : Walter de Gruyter, 2002

- [NK01] NIEMEIER, W. ; KERN, F.: Anwendungspotentiale von scannenden Meßverfahren. In: WEFERLING, U. (Hrsg.) ; HEINE, K. (Hrsg.) ; WULF, U. (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech*. Verlag Philipp von Zabern, 2001, S. 134–140
- [Nov92] NOVAK, K.: Recification of Digital Imagery. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Heft 3 (1992), S. 339–344
- [NTS02] NIEMEIER, W. ; THOMSEN, S. ; SCHÄFER, M.: 3D-Geometrieerfassung mit terrestrischen Laserscannern. In: LUHMANN, Th. (Hrsg.): *Photogrammetrie und Laserscanning*. Wichmann, 2002, S. 15–26
- [NW95] NIEMEIER, W. ; WILD, P.: Einsatz von Laserscannern für die Erfassung von Gebäudegeometrien. In: SCHRADER, B. (Hrsg.): *Gebäudeinformationssysteme*. Wittwer, 1995 (DVW-Schriftenreihe Band 19/1995), S. 155–168
- [O'R98] O'ROURKE, J.: *Computational Geometry in C*. 2. Aufl. Cambridge : Cambridge University Press, 1998
- [PFTV88] PRESS, W.H. ; FLANNERY, B.P. ; TEUKOLSKY, S.A. ; VETTERLING, W.T.: *Numerical Recipes in C*. Cambridge, New York, Port Chester : Cambridge University Press, 1988
- [Pie96] PIEGL, W.: *The NURBS-Book*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1996
- [Pin94] PINZ, A.: *Bildverstehen*. Wien, New York : Springer, 1994 (Springers Lehrbücher der Informatik)
- [PKSU00] PFEIFER, N. ; KRAUS, K. ; SCHWARZ, R. ; ULLRICH, A.: Nahbereichs-Laser-Scanner für die Innenraum-Aufnahme. In: SCHNÄDELBACH, K. (Hrsg.) ; SCHLICHER, M. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying*. Wittwer, 2000 (Vermessungswesen bei Konrad Wittwer Band 33), S. 114–121
- [PM93] PETZET, M. ; MADER, G.: *Praktische Denkmalpflege*. 2. Aufl. Stuttgart, Berlin, Köln : Kohlhammer, 1993
- [PPBS96] PEDROTTI, L. ; PEDROTTI, F. ; BAUSCH, W. ; SCHMIDT, H.: *Optik*. 1. Aufl. München, London, New York : Prentice Hall, 1996
- [PRT99] POV-RAY-TEAM: *Persistence of Vision™ Ray Tracer (POV-Ray™) Version 3.1*. www.povray.org, 1999
- [Rüe96] RÜEGER, J.M.: *Electronic Distance Measurement*. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1996
- [Ric93] RICHTER, R.: Ein räumliches Bauaufmaß ohne Distanzmessung. In: *Vermessung und Raumordnung* Heft 7 (1993), S. 373–382
- [Ric96] RICHTER, R.: Verknüpfung von Ingenieurvermessung und terrestrischer Photogrammetrie in der Bauaufnahme. In: *DVW-Mitteilungen Landesvereine Hessen e.V. und Thüringen e.V.* Heft 1 (1996), S. 35–40
- [Ric00] RICHTER, R.: Objektbestimmung mit berührungslosem Aufmaß. In: *Vermessung und Raumordnung* Heft 2 (2000), S. 104–112
- [Ric01] RICHTER, Ch.: Elektromagnetische Schrittantriebe. In: STÖLTING, H.D. (Hrsg.) ; KALLENBACH, E. (Hrsg.): *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*. München, Wien : Hanser, 2001, S. 111–135
- [Rie02] RIEGL: *3D Laser Imaging Sensor LMS-Z210*. www.riegl.co.at: Riegl Laser Measurement Systems GmbH, Horn, Österreich, 2002. – Firmenprospekt
- [RNK01] RUNNE, H. ; NIEMEIER, W. ; KERN, F.: Application of Laser Scanners to Determine the Geometry of Buildings. In: GRÜN, A. (Hrsg.) ; KAHMEN, H. (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques V*, 2001, S. 41–48
- [Roi96] ROIC, M.: *Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten*. Wien : Studienrichtung Vermessungswesen der Technischen Universität Wien, 1996 (Geowissenschaftliche Mitteilungen Heft 43)
- [RS90] ROONEY, J. ; STEADMAN, P.: *CAD – Grundlagen von Computer Aided Design*. München, Wien : Oldenbourg, 1990

- [Run89] RUNNE, K.H.: *Geodätische Datengewinnung für Gebäudeinformationssysteme unter Anwendung reflektorloser tachymetrischer Verfahren*. Braunschweig : Geodätische Schriftenreihe der Technische Universität Braunschweig, Heft 11, 1989 (Dissertation)
- [Ryb96] RYBAK, H.: Surface Reconstruction. In: HOSCHEK, J. (Hrsg.) ; DANKWORT, W. (Hrsg.): *Reverse Engineering*. B.G. Teubner, 1996, S. 19–31
- [Sch88] SCHROEDER, E.: *Kartenentwürfe der Erde*. Thun, Frankfurt am Main : Harri Deutsch, 1988 (Deutsch Taschenbücher Band 61)
- [Sch95] SCHRADER, B. (Hrsg.): *Gebäudeinformationssysteme*. Heidelberg : Wittwer, 1995 (DVW-Schriftenreihe Band 19/1995)
- [Sch96a] SCHERER, M.: Automatische Objekterfassung durch Profilschannen. In: BRANDSTÄTTER, G. (Hrsg.) ; BRUNNER, F. K. (Hrsg.) ; SCHELLING, G. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 96*. Dümmler, 1996 (Beiträge zum XII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung Band 1), S. B8/1–B8/12
- [Sch96b] SCHLEMMER, H.: *Grundlagen der Sensorik*. Heidelberg : Wichmann, 1996
- [Sch96c] SCHNEIDER, P.J.: NURB Curves: A Guide for the Uninitiated. In: *develop, The Apple Technical Journal* (devworld.apple.com) Juni (1996)
- [Sch99] SCHERER, M.: Ein System zur Erfassung geometrischer und bildhafter Daten von Bauwerken. In: *Vermessung und Raumordnung* Heft 4+5 (1999), S. 285–298
- [Sch01a] SCHERER, M.: Objekterfassung: Was? – Wie? – Wozu? Eine Analyse mit Schwerpunkt bei der Bauaufnahme. In: *Flächenmanagement und Bodenordnung* Heft 4 (2001), S. 188–199
- [Sch01b] SCHERER, M.: A System for Collecting Geometrical Data and Describing Data of Buildings an Historic Monuments. In: ALTAN (Hrsg.) ; GRÜNDIG (Hrsg.): *Third Turkish-German Joint Geodetic Days*. Istanbul, 2001 (Vol. I), S. 303–312
- [Sch02] SCHWARZ, W.: Moderne Messverfahren in der Ingenieurgeodäsie und ihr praktischer Einsatz. In: *Flächenmanagement und Bodenordnung* Heft 2 (2002), S. 87–97
- [SE02] SCHWERMANN, R. ; EFFKEMANN, Ch.: Kombiniertes Monoplotting in Laserscanner- und Bilddaten mit PHIDIAS. In: LUHMANN, Th. (Hrsg.): *Photogrammetrie und Laserscanning*. Wichmann, 2002, S. 57–70
- [She96] SHEWCHUK, R.: Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. In: *First Workshop on Applied Computational Geometry May 1996*, ACM, 1996
- [SHM⁺02] STEPHAN, A. ; HEINZ, I. ; METTENLEITER, M. ; HÄRTL, F. ; FRÖHLICH, C. ; DALTON, G. ; HINES, D.: Laser Sensor for As-Built-Documentation. In: KAHMEN, H. (Hrsg.) ; NIEMEIER, W. (Hrsg.) ; RETSCHER, G. (Hrsg.): *Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering II*, 2002, S. 396–403
- [SJ00] SCHERER, M. ; JURETZKO, M.: Ein System zur hochgenauen polaren Fassadenvermessung. In: SCHNÄDELBACH, K. (Hrsg.) ; SCHLICHER, M. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying*. Wittwer, 2000 (Vermessungswesen bei Konrad Wittwer Band 33), S. 400–405
- [SM02] STAIGER, R. ; MÜHL, A.: Der Einsatz des Laserscanners im Stahlwerk. In: LUHMANN, Th. (Hrsg.): *Photogrammetrie und Laserscanning*. Wichmann, 2002, S. 118–127
- [Sta87] STAIGER, R.: Die Anwendung von Golomb-Linealen zur Anlage von Prüfstrecken für elektronische Distanzmesser. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten* 94 (1987), S. 361–367
- [Str91] STRAUB, B.: *Ein Verfahren zur Rekonstruktion von dreidimensionalen Objektmodellen aus digitalen Bilddaten*. München : Deutsche Geodätische Kommission, 1991 (Reihe C, Heft Nr. 380)
- [Str99] STREILEIN, A.: *Digitale Photogrammetrie und CAAD*. Zürich : Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, 1999 (IGP-Mitteilungen Nr. 68)
- [Str01] STRUVE, B.: *Laser*. Berlin : Verlag Technik, 2001
- [SW02] SCHUBERT, S. ; WEHMANN, W.: Der Einsatz reflektorlos messender Tachymeter zur Gebäudeeinnmessung. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten* Heft 5 (2002), S. 173–177

- [TC91] TORIYA, H. (Hrsg.) ; CHIYOKURA, H. (Hrsg.): *3D-CAD – Principles and Applications*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1991 (Computer Science Workbench)
- [Wan92] WANGERIN, G.: *Bauaufnahme –Grundlagen, Methoden, Darstellung–*. 2. Aufl. Braunschweig : Vieweg, 1992
- [Web98] WEBER, H. (Hrsg.): *Laser*. München : C.H. Beck, 1998 (Beck'sche Reihe 2090)
- [Web02] WEBER, Th.: Laserscanning zur Erfassung, Modellierung und intelligenten Visualisierung eines historischen Kirchendachstuhls. In: LUHMANN, Th. (Hrsg.): *Photogrammetrie und Laserscanning*. Wichmann, 2002, S. 133–140
- [Weh91] WEHR, A.: *Entwicklung und Erprobung von opto-elektronischen Entfernungsmesssystemen mit CW-Halbleiterlasern*. Stuttgart : Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, 1991 (Dissertation)
- [Weh95] WEHR, A.: Laserscanner zur dreidimensionalen Oberflächenbestimmung. In: HÜNERFELD, L. (Hrsg.) ; KUPP, W. (Hrsg.) ; VOLLBRACHT, R. (Hrsg.): *78. Deutscher Geodätentag in Mainz*. Wittwer, 1995 (DVW-Schriftenreihe Band 12/1994), S. 200–204
- [Weh96] WEHR, A.: CW-Laser-Scanner für variable Aufnahmenentfernungen. In: BRANDSTÄTTER, G. (Hrsg.) ; BRUNNER, F. K. (Hrsg.) ; SCHELLING, G. (Hrsg.): *XII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung*. Bonn : Dümmler, 1996, S. A3/1–A3/13
- [Weh97] WEHR, A.: Abbildende Laserscanner – Anwendungen in Bauaufnahme und Denkmalpflege. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.) ; WIEDEMANN, A. (Hrsg.): *Architekturphotogrammetrie gestern – heute – morgen*, Technische Universität Berlin, 1997, S. 114–127
- [Weh98] WEHR, A.: Scannertechniken zur dimensionellen Oberflächenbestimmung. In: HEISTER, H. (Hrsg.) ; STERNBERG, H. (Hrsg.): *Hybride Vermessungssysteme*. 1998 (DVW-Schriftenreihe Band 29/1998), S. 125–148
- [Weh00] WEHR, A.: 3D-Digitalisierung mit abbildenden Laserscannern. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.): *Vorträge 19. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*. 2000 (Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung Band 8), S. 49–56
- [Wei88] WEIMANN, G.: *Architektur-Photogrammetrie*. Karlsruhe : Wichmann, 1988
- [Whi99] WHITE, D.A.: Coherent Laser Radar: True Noncontact 3-D Measurement Has Arrived. In: *Quality Digest* (www.metricvision.com) August (1999)
- [Wie97] WIEDEMANN, A.: Orthophototechnik in der Architekturphotogrammetrie – Möglichkeiten und Grenzen. In: ALBERTZ, J. (Hrsg.) ; WIEDEMANN, A. (Hrsg.): *Architekturphotogrammetrie gestern – heute – morgen*, Technische Universität Berlin, 1997, S. 79–94
- [Wie01] WIEDEMANN, A.: Kombination von Laserscanner-Systemen und photogrammetrischen Methoden im Nahbereich. In: *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* (2001), Nr. 4, S. 261–270
- [WLW92] WEDDERWILLE-LAFUGE, K. ; WOLF, V.: Das Kanalmeßsystem SMP2000 für Kanalaufnahme und Kanalkataster. In: *Vermessung und Raumordnung* Heft 2+3 (1992), S. 143–147
- [WS00] WITTE, B. ; SCHMIDT, H.: *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik im Bauwesen*. 4. Neubearb. Aufl. Stuttgart : Wittwer, 2000 (Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 17)
- [Wun01] WUNDERLICH, Th.: Operational and Economic Prospects of Terrestrial Laser Scanning. In: GRÜN, A. (Hrsg.) ; KAHMEN, H. (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques V. Aufsätze der Konferenz vom 1.-4. Oktober 2001 in Wien*, 2001, S. 18–25
- [WW99] WALTHER, Th. ; WALTHER, H.: *Was ist Licht?* München : C.H. Beck, 1999 (Beck'sche Reihe 2122)
- [Zol02] ZOLLER+FRÖHLICH: *Der neue IMAGER 5003 von Z+F*. www.zofre.de: Zoller+Fröhlich Elektrotechnik GmbH, Januar 2002. – Firmenprospekt

Dank

An dieser Stelle möchte ich all denen danken, die mir direkt oder indirekt dabei geholfen haben, diese Arbeit zu beginnen, anzufertigen und erfolgreich zu beenden.

Mein Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Niemeier für das langjährige Vertrauen und die ideelle und materielle Unterstützung meiner Arbeit. Herrn Univ.-Prof. habil. Dr.-Ing. Thomas A. Wunderlich von der Technischen Universität München danke ich für die Übernahme des Berichtes.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie möchte ich für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre danken. Besonderen Dank hat sich Dipl.-Ing. Markus Schäfer durch die vielen hilfreichen Diskussionen, Anregungen und organisatorischen Hilfestellungen verdient. Zudem danke ich ihm und Herrn Dipl.-Ing. Sven Thomsen für das anstrengende Korrekturlesen des Manuskripts und die kritischen Anmerkungen. Bei Fragen zum Buchsatz hat mir Herr Dipl.-Ing. James Perlt sehr geholfen. Bei Problemen zur analytischen Geometrie hatte Herr Dipl.-Ing. Wolfgang Katrycz immer ein Füllhorn an interessanten Lösungen für mich parat.

Notwendige Motivationsstützen über die Jahre hinweg und wertvolle Beiträge allgemeinerer Art gaben mir die Herren Dr.-Ing. Holger Salbach (Oberrottweil), Dipl.-Ing. Markus Rennen (Island), Dr.-Ing. John-Bosco Miima (Kenia), Dipl.-Ing. Stefan Willgalis (Hannover) und Dipl.-Geoökol. Marc Anthony (Braunschweig) sowie Frau Dipl.-Ing. Birgit Kraus (Braunschweig).

Ein großer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Dirk Mittelstädt und seinen Mitarbeitern vom Vermessungsbüro ÖbVI Mittelstädt&Schröder aus Scheeßel für die fruchtbaren Anmerkungen aus dem Blickwinkel der Praxis während des gemeinsamen Forschungsprojektes. Ohne die dabei entstandenen Datensätze wäre es mir nicht möglich gewesen, meine Entwicklungen auf Herz und Niere zu testen und dem Leser „lebendige“ Ergebnisse zu präsentieren.

Für die Erstellung dieser Arbeit sind folgende freie bzw. kostenlose Computerprogramme eingesetzt worden:

MikTeX, TeXnicCenter, Ghostscript, GhostView, CosmoPlayer, XFig, Gnuplot, Blender, Octave, Batik, Gimp, Cygwin, POV-Ray, Opera, Netscape, CUBA und Xdesy

Lebenslauf

Fredie Kern

Geburtstag: 3. September 1965
Geburtsort: Salzgitter-Lebenstedt
Familienstand: ledig



1972 - 1976 Grundschule am Fredenberg, Salzgitter
1976 - 1978 Orientierungsstufe am Fredenberg, Salzgitter
1978 - 1985 Gymnasium am Fredenberg, Salzgitter
Abschluß: Allgemeine Hochschulreife

1985 -1986 Grundwehrdienst in Hannover und Wolfenbüttel

1986 Praktikum beim Katasteramt Braunschweig
1986 - 1992 Studium der Geodäsie an der Universität Hannover
Abschluß: Diplom

1991 - 1993 Angestellter bei der Fa. Winrich Schwarz+Partner, Hildesheim
1993 - 1996 Vorbereitungsdienst für die Laufbahn des höheren
vermessungstechnischen Verwaltungsdienstes bei der
Bezirksregierung Braunschweig
Abschluß: Große Staatsprüfung

1996 - 2003 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie,
Technische Universität Braunschweig