



Abschlussbericht für das Forschungsvorhaben:

Maßgefertigte Vakuum-Dämmelemente für das Bauen im Bestand

Forschungsstelle:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Arcisstraße 21
80333 München

Projektleitung:

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Klaudius Henke
Dipl.-Ing. Jörg Schaffrath

unterstützt durch:

Variotec GmbH & Co. KG
Weißmarterstraße 3-5
92318 Neumarkt

gefördert von:

Forschungsinitiative Zukunft Bau
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.
(Aktenzeichen: Z6-10.08.18.7-07.19/II2-F20-07-29)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

München, 30. November 2009

Zusammenfassung

Mehr als die Hälfte der Bautätigkeit in Deutschland ist auf Maßnahmen im Bestand gerichtet. Von einem verstärkten Einsatz von Vorfertigung in diesem Sektor kann eine deutliche Steigerung der Effektivität erwartet werden. Voraussetzung hierfür ist eine präzise und wirtschaftliche Messtechnik, die Bestandsdaten in kompatibler Form für eine digitale Prozesskette in der Bauproduktion zur Verfügung stellt.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, exemplarisch anhand eines geeigneten Baumaterials zu zeigen, wie durch den Einsatz von bereits verfügbaren Messtechniken in Verbindung mit spezieller Auswertesoftware eine computergestützte Planung und Vorfertigung beim Bauen im Bestand realisiert werden kann.

Als Baumaterial für das Projekt wurden Vakuum-Dämmelemente gewählt, deren Verwendung zwingend eine Vorfertigung verlangt: Die einmal erstellte luftdichte Hülle darf nicht verletzt werden, eine Anpassung oder Nachbearbeitung auf der Baustelle ist nicht möglich. Dämmungen mit Vakuum-Technologie verfügen über äußerst geringe Wärmeleitfähigkeiten von bis zu $0,004 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Mit dieser Eigenschaft stellen sie beim Bauen im Bestand oft die einzige Alternative dar, wenn herkömmliche Dämmstoffe aufgrund ihrer Dämmstoffstärke nicht sinnvoll eingesetzt werden können.

Für die Forschungsarbeit wurden auf dem Gelände der Technischen Universität München drei Versuchsobjekte ausgewählt, die die typischen Einbausituationen von Vakuum-Dämmelementen gut repräsentieren und außerdem die Bandbreite möglicher Messsituationen weitgehend abdecken. Die Wahl fiel auf eine Fassade, eine Hallendecke und einen Kellerraum.

Die Versuchsobjekte wurden mit verschiedenen Messtechniken geometrisch erfasst. Hierbei kamen 3D-Laserscanning, Einzelbildphotogrammetrie und Mehrbildphotogrammetrie zum Einsatz. Die Ergebnisse der Geometrieerfassung wurden mit verschiedenen Methoden ausgewertet und vergleichend betrachtet.

Auf der Grundlage der digitalen Bestandsdaten wurden abschließend für das Versuchsobjekt „Fassade“ passgenaue Dämmelemente im Werk vorgefertigt und ohne weiteren Zuschnitt am Objekt montiert.

Es konnte gezeigt werden, dass die verfügbare Messtechnik geeignet ist, Bestandsdaten auf hohem Genauigkeitsniveau für die Vorfertigung von passgenauen Bauteilen zur Verfügung zu stellen. Für die automatisierte Auswertung digitaler Bestandsdaten ist auch weiterhin Entwicklungsarbeit notwendig, die erwartungsgemäß mit dem vermehrten Einsatz der modernen Messtechnik beim Bauen im Bestand einhergehen wird.

Abstract

More than half of the building activity in Germany affects existing buildings. A considerable increase of the efficiency of the construction works on building stock could be achieved by an intensified use of prefabrication. For this purpose an exact and cost-effective measuring technology is needed, which is able to provide stock data for the digital process chain.

The aim of the present research project was to show how computer aided planning and prefabrication can be realised on behalf of modern surveying technologies together with special measuring software.

Vacuum insulation panels (VIP) were chosen for this project, since prefabrication is mandatory here. Because of the gas-tight enclosure, the panels cannot be tailored or reworked on-site. Insulation panels with vacuum technology have a very low conductivity up to only 0,004 W/(m·K). Hence, they often represent the only way for energy-efficient renovation on existing buildings, when the insulation thickness is highly limited.

Three test objects were chosen on the main campus of the Technische Universität München: a façade, a ceiling of a tall hall and a small cellar room. The test objects represent different measuring situations and typical geometries for installing vacuum insulation panels.

These objects were surveyed using different techniques such as 3D-laserscanning and photogrammetry. The results of these measurements were evaluated and comparative studies made.

Finally, prefabricated insulation elements were produced on the basis of the digital data of the test object "façade". These elements were fixed on the object without further modifications.

In summary, it could be demonstrated that using modern measuring technology is a capable way to obtain precise digital data of existing buildings. Such data can easily be used as basis for the prefabrication of accurately fitting elements. It is assumed that prefabrication will be used in building stock more often in future. Further automation of editing digital stock data will go along with this process.

Vorwort

Vor dem Hintergrund der heute verfügbaren Möglichkeiten der 3D-Messtechnik in Verbindung mit einer computergesteuerten, automatisierten Fertigung ist die Verwendung von Fertigteilen beim Bauen im Bestand eine erstaunlich selten geübte Praxis. Diese Beobachtung führte am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München zu dem Wunsch, innerhalb eines Forschungsprojektes die Tauglichkeit dieser Messtechnik als Grundlage für Vorfertigung im Bestand genauer zu untersuchen.

Dem am 15.3.2007 beim Bundesamt für Raumordnung und Bauwesen eingereichten Antrag auf Förderung des Vorhabens aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung wurde mit Bescheid vom 15.10.2007 stattgegeben, so dass im November 2007 mit der Forschungsarbeit begonnen werden konnte.

Mit der Fa. Variotec GmbH & Co. KG aus Neumarkt in der Oberpfalz wurde ein innovationsfreudiger und kompetenter Partner gefunden. Geschäftsführer Christof Stölzel sagte spontan seine Unterstützung zu und war bereit, Sach- und Finanzmittel ebenso in das Projekt zu investieren wie die Arbeitsstunden etlicher Mitarbeiter.

Für die projektbegleitende Expertengruppe konnten Herr Dipl.-Ing. Architekt Hans-Otto Kraus, Geschäftsführer der GWG Gemeinnützige Wohnstätten- und Siedlungsgesellschaft mbH, München, Herr Dipl.-Ing. Christoph Sprengard, Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München und Herr Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich, Ordinarius des Lehrstuhls für Geodäsie der Technische Universität München gewonnen werden. Ihnen sei dafür gedankt, dass sie trotz voller Terminkalender Zeit für das Projekt gefunden und an der Arbeitsgruppensitzung am 31.3.2008 teilgenommen haben.

Die Arbeit wäre ohne die Unterstützung durch die Messgerätehersteller und Softwareanbieter nicht möglich gewesen. Stellvertretend seien hier Herr Johan Baeke (Creaform), Herr Dipl.-Ing. (FH) Alexander Bauer (Faro), Herr Olaf Bijlholt (Topcon), Herr Dr. Hans-Peter Duwe (Duwe-3d), Herr Dipl.-Ing. (FH) Dirk Fichtmüller (Kubit), Herr Jean-Michel Koch (Geomagic), Frau Dipl.-Ing. Nicole Obertreiber (Zoller+Fröhlich), Herr Dipl.-Ing. Olaf Prümm (Lupos3D) und Herr Dipl.-Ing. (FH) Ralf Schafmeister (RolleiMetric) genannt, die uns Gerät und Programmlizenzen, aber auch Zeit und Wissen großzügig zur Verfügung gestellt haben.

Zuletzt sei den vielen Helfern und Unterstützern aus der näheren Umgebung des Lehrstuhls gedankt: Herrn Dipl.-Ing. Anton Streit-Britschgi vom Staatlichen Bauamt München 2 und Frau Dipl.-Ing. (FH) Tanja Jovanovic von der Zentralabteilung 4 - Immobilienmanagement für die Hilfe bei der Suche nach geeigneten Versuchsobjekten; Herrn Dipl.-Ing. (FH) Konrad Eder vom Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung und den Herren Dipl.-Ing. Thomas Schäfer und Dipl.-Ing. Thomas Weber vom Lehrstuhl für Geodäsie für die geduldige Unterstützung bei den Messungen; und den studentischen Hilfskräften Marco Herrmann, Astrid Indefrey, Nadine Thoma, Michael Schneider sowie unserem Techniker Ulrich Münchow für ihre engagierte und zuverlässige Zuarbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	8
2	Vakuum-Dämmtechnik.....	10
2.1	Prinzip der Vakuum-Dämmtechnik	10
2.2	Aufbau von Vakuum-Dämmelementen mit Stützkörper	11
2.2.1	Hüllmaterial	11
2.2.2	Kernmaterial.....	13
2.3	Herstellung von Vakuum-Dämmelementen mit Kern aus pyrogener Kieselsäure	15
2.4	Anwendungsgebiete von Vakuum-Dämmelementen im Bestand	16
2.5	Anwendungsspezifische Produkte des QASA-Bausystems der Fa. Variotec.....	18
3	Verfahren der geometrischen Bestandserfassung	20
3.1	Handaufmaß.....	20
3.2	Photogrammetrie	21
3.2.1	Einzelbildphotogrammetrie	22
3.2.2	Mehrbildphotogrammetrie	23
3.3	Tachymetrie	25
3.4	3D-Laserscanning.....	27
3.5	Vergleich der Messverfahren	30
4	Auswahl von Versuchsobjekten	32
4.1	Auswahlkriterien.....	32
4.2	Fassade Vorhoelzer-Bau.....	33
4.3	Deckenfeld Meyer-Jens-Halle.....	34
4.4	Kellerraum Gabelsberger Straße.....	35
4.5	Vergleichende Zusammenstellung der Versuchsobjekte	36
5	Erfassung der Versuchsobjekte mit 3D-Lasescanning	37
5.1	Hardware 3D-Laserscanning	37
5.1.1	Allgemeines.....	37
5.1.2	Faro	39
5.1.3	Leica.....	40
5.1.4	Zoller+Fröhlich	42

5.1.5	Topcon.....	43
5.1.6	Creaform	44
5.2	Software 3D-Laserscanning.....	46
5.2.1	Allgemeines.....	46
5.2.2	Geomagic.....	46
5.2.3	Kubit.....	47
5.2.4	Leica.....	47
5.2.5	Lupos3D.....	47
5.2.6	Rhino.....	47
5.2.7	DissNetz3D	48
5.2.8	PolyWorks.....	48
5.3	Auswertung Messdaten 3D-Laserscanning.....	48
5.4	Auswertung Fassade Vorhoelzer-Bau.....	52
5.4.1	Allgemeines.....	52
5.4.2	Leica Cyclone	53
5.4.3	Geomagic Studio	56
5.4.4	Kubit PointCloud.....	59
5.4.5	Vergleich der Modelle	59
5.4.6	Vergleich der Objekte mittels Punktabweichungen	60
5.4.7	Vergleich diskreter Messstrecken.....	70
5.5	Auswertung Deckenfeld Meyer-Jens-Halle.....	74
5.5.1	Allgemeines.....	74
5.5.2	Leica Cyclone	75
5.5.3	Geomagic Studio	76
5.5.4	Kubit PointCloud.....	76
5.6	Auswertung Kellerraum Gabelsbergerstraße.....	77
5.6.1	Allgemeines.....	77
5.6.2	Leica Cyclone	78
5.6.3	Geomagic Studio	79
5.6.4	Kubit PointCloud.....	79

5.7	Auswertung der Messdaten der Totalstation	80
5.8	Auswertung der Messdaten des handgeführten Laserscanners	81
5.9	Zusammenfassung Auswertung Messdaten 3D-Laserscanning	82
6	Erfassung der Versuchsobjekte mit Photogrammetrie.....	83
6.1	Hardware für die photogrammetrische Erfassung der Versuchsobjekte	83
6.2	Software für die photogrammetrische Einzelbildauswertung	83
6.2.1	Bonk Computersysteme – Colorfix 2.24 mit Zusatzmodul Fotoaufmaß.....	86
6.2.2	Fokus GmbH Leipzig – metigo2D 3.0	87
6.2.3	Kubit GmbH – PhoToPlan 4.2.0.8.....	89
6.2.4	RolleiMetric – Metric Single Rectification (MSR) Version 4.2.....	92
6.2.5	Vergleich der Software für Einzelbildauswertung	95
6.3	Software für die photogrammetrische Mehrbildauswertung	97
6.3.1	Geosystems GmbH – Leica Photogrammetry Suite (LPS) Version 9.1.....	97
6.3.2	RolleiMetric – Close-Range Digital Workstation (CDW) Version 2.1	100
6.3.3	Vergleich der Software für die Mehrbildauswertung.....	101
6.4	Aufnahme Fassade Vorhoelzer-Bau	103
6.5	Auswertung Fassade Vorhoelzer-Bau.....	103
6.5.1	Entzerrung über Passpunkte, Einzelbild	106
6.5.2	Entzerrung über Passpunkte, mosaikierte Bilder.....	108
6.5.3	Entzerrung über parallele Linien, Einzelbild	110
6.5.4	Entzerrung über parallele Linien, mosaikierte Bilder.....	112
6.5.5	Entzerrung über Orientierungsdaten aus Mehrbildphotogrammetrie	114
6.5.6	Auswertung mit Mehrbildphotogrammetrie	116
6.5.7	Vergleich der Auswertemethoden.....	118
6.5.8	Bewertung der Auswertesysteme	119
7	Vergleich der Messergebnisse 3D-Laserscanning und Photogrammetrie.....	121
8	Montage vorgefertigter Dämmelemente am Versuchsobjekt Fassade Vorhoelzer-Bau	124
9	Vorschlag für eine Vorgehensweise bei zukünftigen Projekten in der Praxis.....	129
10	Fazit, Ausblick	132
11	Literaturverzeichnis	135

12	Abbildungsverzeichnis	142
13	Tabellenverzeichnis	149
14	Herstellerverzeichnis	150
14.1	Hersteller von 3D-Laserscannern (Impulslaufzeit und Phasendifferenz).....	150
14.2	Software zur Auswertung von 3D-Punktwolken	151
14.3	Photogrammetriesoftware für Einzelbildauswertung	152
14.4	Photogrammetriesoftware für Mehrbildauswertung	153
14.5	Dienstleister für Potogrammetrie und 3D-Laserscanning	154

1 Einleitung

Das Bauen im Bestand hat sich in den letzten Jahren zu einer der wichtigsten Märkte der Bauwirtschaft in Deutschland entwickelt. So sind bereits seit dem Jahr 2000 in den alten Bundesländern die Bauleistungen im Gebäudebestand höher als die Investitionen in Neubauten (Hunger 2004). Dies ist auch ein Beitrag zum Umweltschutz, denn die Umweltbelastung durch Neubauaktivitäten ist etwa um das 4-fache höher, als die durch vergleichbare Erneuerungsmaßnahmen im Bestand (Schulze Darup 2004).

Beim Bauen im Bestand sind häufig neue Bauelemente in die vorgefundene Umgebung einzufügen. Diese Elemente müssen in ihrer Geometrie dem Bestand angepasst werden. Hierfür gibt es gegenwärtig zur handwerklichen Bearbeitung vor Ort praktisch keine Alternative. Die Folge sind lange Bauzeiten, sowie Lärm und Dreck auf der Baustelle mit den bekannten unangenehmen Konsequenzen für Eigentümer und Nutzer. Dieser Umstand legt es nahe, nach Lösungen für einen stärkeren Einsatz von Vorfertigung beim Bauen im Bestand zu suchen.

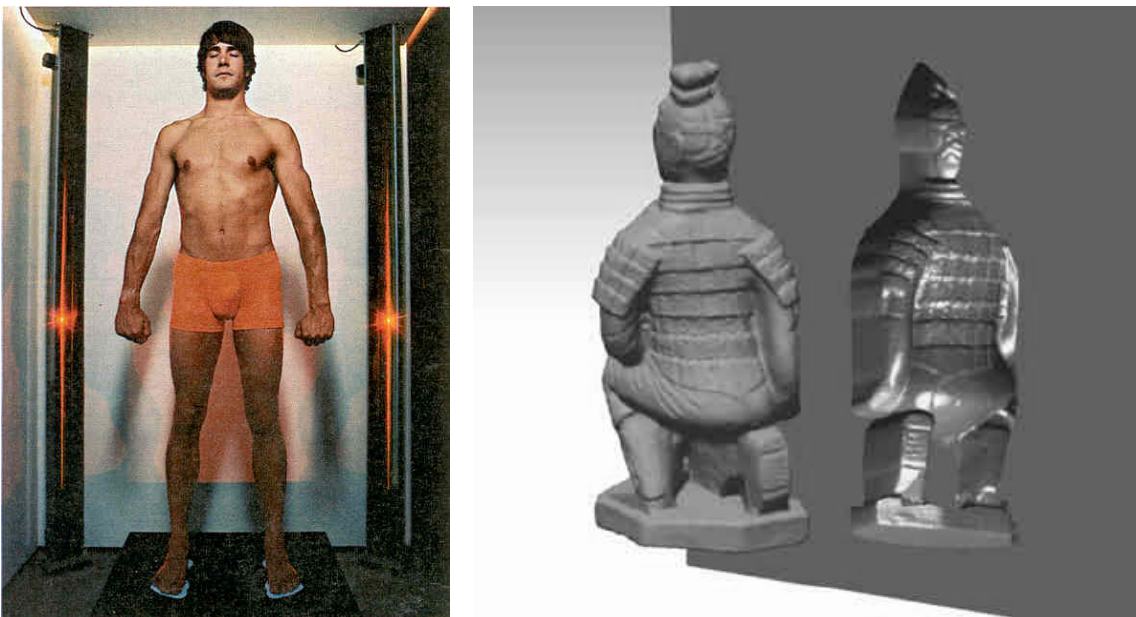


Abbildung 1: links Bodyscanner - Maßnahmen für einen Maßanzug (Krötz 2004); rechts Transportverpackung aus Schaumstoff für ein Kunstobjekt - Modellierung der Negativform (Konica Minolta 2009b)

Anders als im Bauwesen sind moderne Verfahren für eine aufmassbasierte, automatisierte Fertigung in vielen anderen technischen Bereichen bereits tägliche Praxis. Beispiele hierfür sind etwa die Maßanfertigung von Kleidungsstücken (Human Solutions 2009), Hörgeräten (EOS 2009a) und Prothesen (EOS 2009b) oder die passgenaue Fertigung von Verpackungen für den Transport von Kunstgütern (Konica Minolta 2009b). In allen diesen Fällen werden mit opto-elektronischen Messgeräten Bestandsdaten in digitaler Form erhoben und in die computergesteuerte Fertigung der jeweiligen Passteile eingespeist.

Der Grundgedanke des hier beschriebenen Forschungsvorhabens liegt darin, die Übertragbarkeit dieser Methoden auf das Bauwesen zu untersuchen: Ist es möglich, auf der Grundlage eines digitalen Aufmaßes passgenaue Fertigteile für Bestandsbauten zu produzieren?

Dies sollte anhand eines geeigneten Bauproduktes exemplarisch durchgespielt werden. Die Wahl fiel aus mehreren Gründen auf Vakuum-Dämmelemente:

- Wärmedämmung: Bei der Reduzierung des CO₂-Ausstoßes kommt der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes eine Schlüsselrolle zu. Dämmstoffe leisten dabei einen wesentlichen Beitrag.
- Bauen im Bestand: Vakuum-Dämmelemente können aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit von bis zu 0,004 W/(m·K) (Variotec o.J.) mit sehr geringen Stärken verbaut werden; gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen ist bei gleichem U-Wert eine mindestens fünffach geringere Dämmstärke möglich. Diese Eigenschaft prädestiniert sie für den Einsatz im Bestand, wo räumliche oder auch denkmalpflegerische Aspekte den Einbau starker Dämmpakete oft nicht zulassen.
- Vorfertigung: Ihre außerordentliche Dämmwirkung verdanken Vakuum-Dämmelemente einem in ihrem Innern herrschenden atmosphärischen Unterdruck. Aus diesem Grund verlangt ihre Verwendung zwingend eine Vorfertigung: Die einmal erstellte luftdichte Hülle darf nicht verletzt werden; eine Anpassung oder Nachbearbeitung auf der Baustelle ist nicht möglich.

Im Zentrum des Forschungsvorhabens stehen also methodische Untersuchungen, wie auf der Grundlage digitaler Bestandsdaten eine Vorfertigung von Vakuum-Dämmelementen für konkrete bauliche Einbausituationen realisiert werden kann. Die Eignung der verschiedenen verfügbaren Messmethoden ist dabei ebenso zu untersuchen, wie die Potentiale anwendungsbezogener Spezialsoftware.

Wegen des interdisziplinären Charakters der Forschungsarbeit sind die Adressaten des vorliegenden Berichtes in unterschiedlichen Berufssparten zu suchen. Um allen interessierten Lesern den Stoff gleichermaßen zugänglich zu machen, wird nachstehend eine Einführung in die Vakuum-Dämmtechnik und eine Übersicht über die heute verfügbare Messtechnik gegeben.

2 Vakuum-Dämmtechnik

2.1 Prinzip der Vakuum-Dämmtechnik

Die Aufgabe von Wärmedämmstoffen im Bauwesen ist es, dem Verlust von Wärme aus dem Gebäude (winterlicher Wärmeschutz) bzw. dem Eindringen von Wärme in das Gebäude (sommerlicher Wärmeschutz) einen möglichst großen Widerstand entgegenzusetzen.

Grundsätzlich kann der Transport von Wärme über drei verschiedene Wege erfolgen:

Wärmeleitung ist der Transport von Wärmeenergie innerhalb eines Stoffes, ohne dass dieser sich selbst bewegt. Wärmeleitung tritt in festen Körpern, aber auch in Flüssigkeiten und Gasen auf.

Beim Wärmetransport durch Strahlung gibt ein Körper Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung an einen anderen Körper ab oder nimmt sie auf. Die zwei räumlich voneinander getrennten Körper müssen sich hierfür in einem strahlungsdurchlässigen Medium befinden.

Der Transport von Wärmeenergie durch Konvektion erfolgt über Strömungsvorgänge in gasförmigen oder flüssigen Medien.

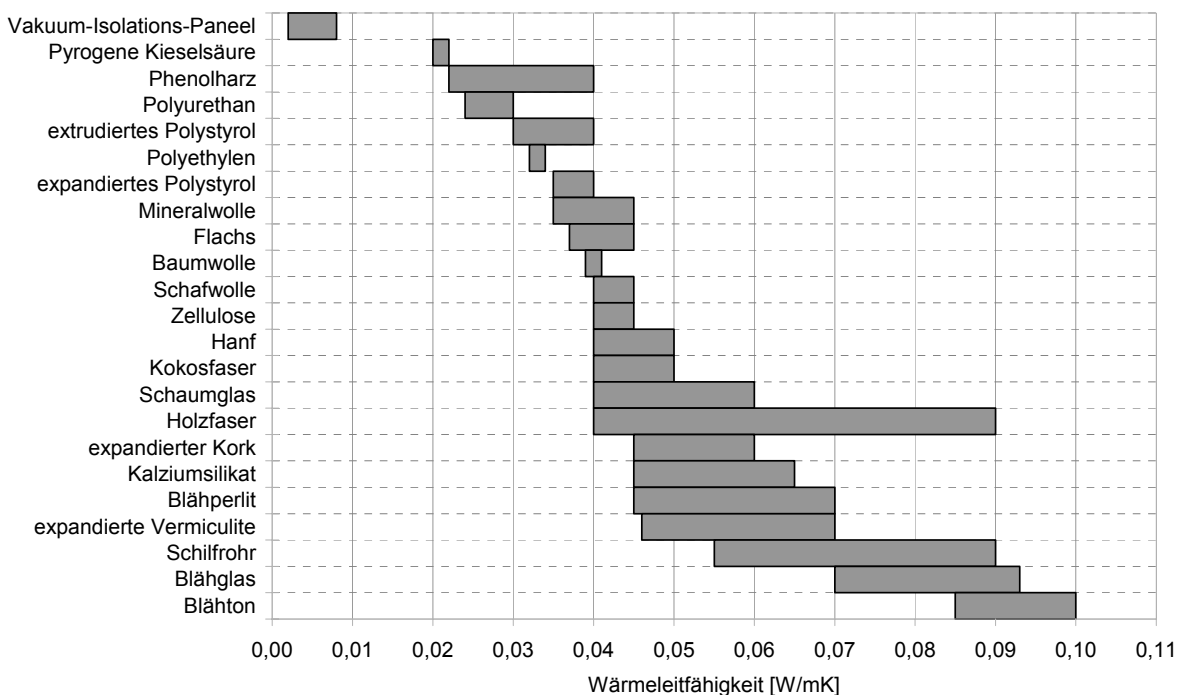


Abbildung 2: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen (Werte nach Pfundstein 2007)

Herkömmliche Wärmedämmstoffe, wie z.B. Mineralfasern, Polystyrolpartikelschaum oder Polyurethan-Hartschaum, bestehen aus einem festen Stoffgerüst, das kleine luft- oder gasgefüllte Hohlräume umschließt. Ihre Dämmwirkung basiert auf der Eigenschaft von Gasen, ein relativ schlechter Wärmeleiter zu sein. Dennoch findet im Feststoffgerüst ebenso wie in den Poren

Wärmeleitung und in letzteren zusätzlich Strahlung und Konvektion statt. Der Wärmetransport in konventionellen Dämmstoffen setzt sich typischerweise aus Anteilen von 20-30% Wärmestrahlung, 5-10% Wärmeleitung über das Gerüstmaterial und ca. 65-75% Wärmetransport über das eingeschlossene Gas zusammen (Cremers 2005). Dämmstoffe dieser Art haben typische Wärmeleitfähigkeiten von 0,02 bis 0,045 W/(m·K).

In einem völlig leeren Raum (Vakuum) hingegen findet Wärmetransport ausschließlich über Strahlung statt. Wärmedämmungen nach dem Vakuum-Prinzip sind deshalb wesentlich leistungsfähiger als herkömmliche Lösungen.

Für die technische Umsetzung des Vakuum-Prinzips gibt es zwei verschiedene Ansätze:

Bei Vakuum-Dämmungen mit *stabiler Hülle* werden Material und Form der Hülle so gewählt, dass diese dem auf sie wirkenden Atmosphärendruck standhalten kann (Beispiel: Thermoskanne). Auf diese Weise sind Wärmeleitfähigkeiten von 0,00001 bis 0,005 W/(m·K) erreichbar (Cremers 2006). Große, flächige Elemente, wie sie für die Bildung der Gebäudehülle benötigt werden, sind mit dieser Bauart jedoch nur schwer herstellbar. Diese finden deshalb in der Baupraxis bis heute keine Anwendung.

Bei Vakuum-Dämmungen mit *Stützkörper* verhindert ein Kernmaterial im Innern des Dämmelementes eine Verformung der Hülle durch den atmosphärischen Druck. Auf diese Weise lassen sich auch große, flächige Vakuum-Dämmelemente herstellen. Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei 0,002 bis 0,008 W/(m·K) (Cremers 2006).

Die angegebenen Wärmeleitfähigkeiten sind die im Labor gemessenen Werte, die im Bauwesen gültigen Bemessungswerte berücksichtigen ein Nachlassen der Dämmwirkung mit der Zeit und liegen zurzeit zwischen 0,007 und 0,011 W/(m·K)

Folgende Darstellung beschränkt sich auf die Beschreibung von den heute für bauliche Anwendungen verfügbaren Vakuum-Dämmungen mit Stützkörper.

2.2 Aufbau von Vakuum-Dämmelementen mit Stützkörper

Vakuum-Dämmelemente mit Stützkörper bestehen im Wesentlichen aus einem druckstabilen Kernmaterial und einer gasdichten Hülle. Für beides können verschiedene Werkstoffe eingesetzt werden.

2.2.1 Hüllmaterial

An das Hüllmaterial werden folgende Anforderungen gestellt: Gasdichtigkeit, geringe Wärmeleitfähigkeit, Dauerhaftigkeit, gute Verarbeitbarkeit und die Verträglichkeit mit anderen Materialien (z.B. Kleber, Kernmaterial).

Die Hülle soll nicht nur den Erhalt des Vakuums über die ganze Lebensdauer des Dämmelements sichern, sondern sie bildet auch die Verbindung zur Umgebung. Verschiedene Materialien wurden bisher untersucht und eingesetzt (Cremers 2006; Jacobsen 2003):

Glas kann als Material grundsätzlich als gasdicht bezeichnet werden. Bei der Herstellung von Vakuum-Dämmelementen mit Glas als Hüllmaterial erweist es sich jedoch als schwierig einen gasdichten Randverbund auszubilden. Glas als Hülle von Vakuumdämmsystemen hat seine Berechtigung vor allem bei transparenten und transluzenten Dämmungen. In China gibt es kommerziell erhältliche Vakuum-Verglasungen. Ihre Dämmwirkung entspricht nur einer herkömmlichen Zweifachverglasung, allerdings haben sie eine geringere Stärke. Vakuum-Verglasung befindet sich jedoch in der Entwicklung (ZAE Bayern 2009).

Metall ist ab einer bestimmten Stärke prinzipiell gasdicht. Durchgehende und gasdichte Randverbundlösungen können durch Umformung geschaffen werden. Allerdings besteht bei Metallen und besonders bei dünnen Folien die Gefahr, dass es bei der Herstellung durch Umformung zu Fehlstellen kommt. Aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit von Metallen stellt der Randverbund stets eine Wärmebrücke dar. Mit Metallhüllen können derzeit die größten Formate von Vakuumdämmungen hergestellt werden (bis zu 3x8 m). Die Evakuierung dieser Paneele wird über einzeln angebrachte Ventile durchgeführt. Wenn nach Einbau der Paneele diese Ventile weiterhin zugänglich sind, kann bei Undichtigkeiten der benötigte Unterdruck nachträglich wieder hergestellt werden. Mechanische Schäden können durch Schweißen repariert werden (Cremers 2006).

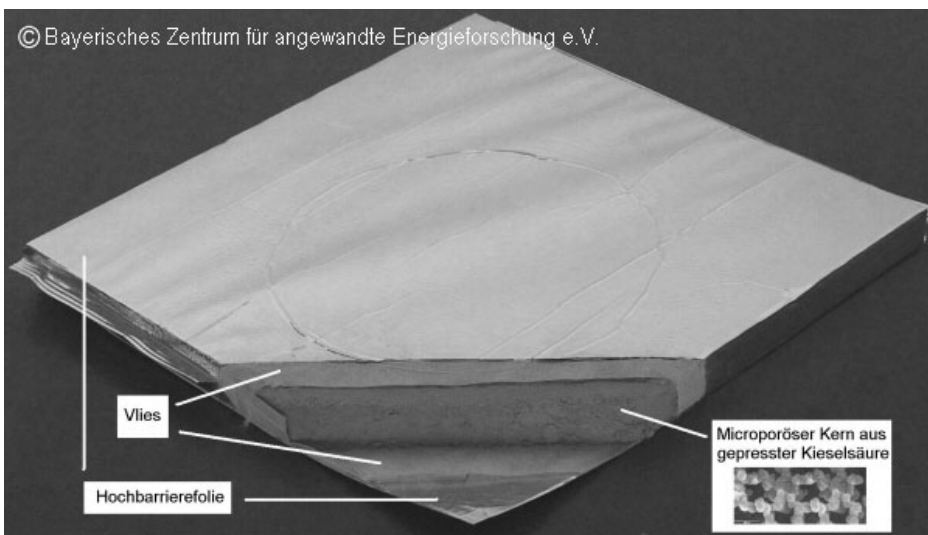


Abbildung 3: Aufbau eines Vakuum-Dämmelementes mit Stützkörper (ZAE Bayern 2008)

Kunststoffe können die Gasdichtigkeit von Glas oder Metall bei weitem nicht erreichen. Allerdings kann ein Randverbund leicht durch Schweißen ausgebildet werden. Meist werden Mehrschichtsysteme verwendet. Reine Kunststoff- und Kunststoffverbundfolien reagieren stark auf klimatische Bedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Dagegen haben sie eine hohe

mechanische Belastbarkeit und eine sehr geringe thermische Leitfähigkeit, womit sie die isolierende Wirkung unterstützen können. Reine Kunststofffolien-Verbünde können auch transparent ausgebildet werden.

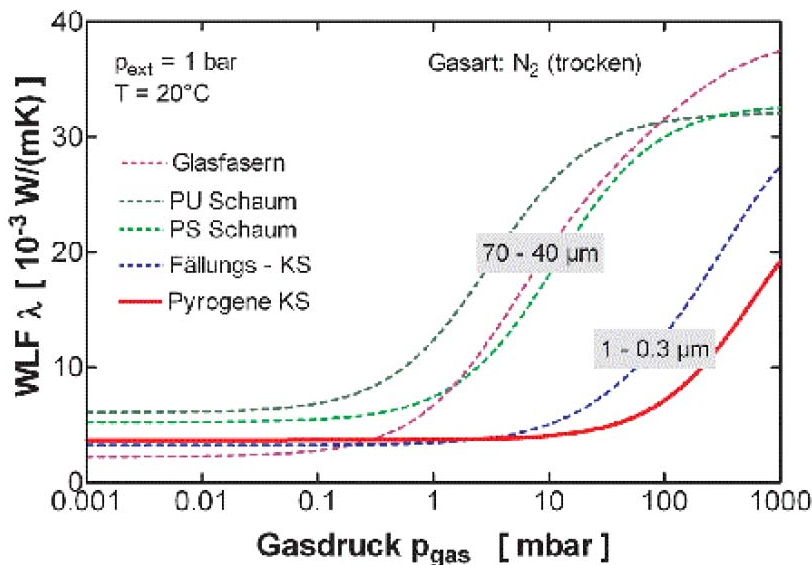
Neben Kunststoff- kommen auch Metallfolien zur Anwendung. Ein *Kunststoff-Metallfolien-Verbund* enthält meist eine Schicht aus Aluminium. Das Aluminium wird von Polymer-Schichten umhüllt, um es vor mechanischer Beschädigung oder Korrosion zu schützen. Aluminium stellt eine hervorragende Gassperre dar, besitzt aber andererseits eine sehr hohe thermische Leitfähigkeit.

Die am meisten verwendeten Mehrlagensysteme sind solche mit *metallisierten Kunststofffolien*. Sie bestehen aus mehreren Polymerschichten, die mit einem Metall, meist Aluminium, bedampft sind. Durch diese Technik ist die metallische Schicht wesentlich dünner und somit ist die thermische Leitfähigkeit geringer als beim Kunststoff-Metallfolien-Verbund. Die Barrierefunktion ist gut im Vergleich zu reinen Kunststofffolien. Die geringe Bruchfestigkeit, Haftungsprobleme zwischen Folien und aufgedampften Schichten und die Korrosionsanfälligkeit des Aluminiums sind die Nachteile metallisierter Kunststofffolien (Cremers 2006; Jacobsen 2003).

2.2.2 Kernmaterial

Das Kernmaterial muss vor allem folgende Eigenschaften aufweisen: Druckstabilität und geringe Wärmeleitfähigkeit. Heute zur Anwendung kommende Materialien werden nachstehend beschrieben. In Zukunft könnten als Kernmaterial auch sog. Aerogele (hochporöse Festkörper mit bis zu 95% Porenanteil) zum Einsatz kommen (Cremers 2006).

Organische Schäume haben Porendurchmesser von etwa 20-100 μm . Um die Gaswärmeleitung in diesen vergleichsweise großen Poren zu unterdrücken, bedarf es eines starken Unterdrucks ($< 0,1$ mbar). Folglich werden an die Gasdichtigkeit der Hüllschicht sehr hohe Anforderungen gestellt, wie sie z.B. Metallfolien oder Glas erfüllen könnten. Zudem erweist es sich als technisch schwierig, vollständig offenporige Strukturen aus organischen Schäumen herzustellen. Es verbleiben geschlossene Poren, aus denen das Gas nur schlecht evakuiert werden kann. Der verbleibende Wasserdampf macht es nötig, Trocknungsmittel, so genannte „Getter“, in die Elemente mit einzubauen.



© Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.

Abbildung 4: Wärmeleitfähigkeit von Vakuum-Dämmelementen mit verschiedenen Kernmaterialien in Abhängigkeit vom Gasdruck (Kleinhempel 2005)

Unter den Vakuumdämmungen mit Kernmaterial erreichen solche mit einem Stützkörper aus *thermisch behandelten und gepressten Glasfasern* die geringsten Werte für die Wärmeleitfähigkeit. Jedoch sind auch bei diesem Material sehr geringe Innendrucke und damit hochdichte Hüllschichten erforderlich.



Abbildung 5: mikroporöse Kieselsäure, links Rohmaterial (Microtherm 2009), rechts gepresste Platten (Cremers 2006)

Vakuumdämmungen mit einem Stützkern aus *mikroporöser Kieselsäure* sind die am häufigsten im Bauwesen verwendeten. Bei den mikroporösen Kieselsäuren handelt es sich um feinkörnige Pulver aus Siliziumdioxid. Sie sind nicht brennbar, emissionsfrei und recyclebar. Synthetische Kieselsäure für die Verwendung in Vakuumdämmungen kann entweder in der Flamme (pyrogene Kieselsäure) oder nasschemisch (Fällungskieselsäure) hergestellt werden. Pyrogene Kieselsäuren

können zu Platten verpresst und in einem zweiten Schritt auf die benötigte Größe und Form zugeschnitten werden. Fällungskieselsäuren hingegen müssen aufgrund ihrer andersartigen Teilchenstruktur in vorformatierte Vliesbeutel gefüllt und in speziell den Formaten angepassten Formen gepresst werden (Eberhardt 2005). Kernmaterial aus mikroporöser Kieselsäure hat sehr geringe Porenweiten von $< 0,5 \mu\text{m}$ (Kleinhempel 2005). Dies führt schon bei Atmosphärendruck (1000 mbar) zu einer erheblichen Behinderung der Wärmeübertragung durch Gaswärmeleitung in den Poren. Bereits ein vergleichsweise mäßiger Unterdruck von 1/100stel des Atmosphärendrucks (10 mbar) ist ausreichend, um Wärmeleitungsvorgänge in den Poren vollständig zu unterbinden. Deshalb müssen an das Hüllmaterial bei dieser Bauweise nur geringe Anforderungen gestellt werden, wie sie z.B. durch Mehrlagensysteme aus metallisierten Kunststofffolien erreicht werden. Getter sind bei Vakuumdämmungen mit dem Kernmaterial Kieselsäure nicht erforderlich, da die Kieselsäure selbst in der Lage ist, Wasserdampf zu absorbieren.

2.3 Herstellung von Vakuum-Dämmelementen mit Kern aus pyrogener Kieselsäure

Vakuum-Dämmelemente mit einem Stützkern aus Fällungskieselsäure sind wegen der oben beschriebenen Einschränkungen bezüglich der Formate für die in dieser Arbeit untersuchten Aufgaben im Baubestand wenig geeignet. Im Folgenden wird ausschließlich die Herstellung von Elementen mit einem Kern aus pyrogener Kieselsäure, wie sie auch vom Projektpartner Variotec verwendet werden, beschrieben.

Für die Herstellung des Stützkörpers werden der Kieselsäure zwei Zusatzstoffe beigemischt: zum einen Trübungsmittel, welche die Infrarotstrahlung absorbieren und damit den Wärmedurchgang weiter reduzieren, zum anderen Faserstoffe, welche die Festigkeit steigern und die Handhabbarkeit verbessern. Meist werden für die Herstellung neuer Kernmaterialien Anteile von vermahlener, recycelten Stützkörpern mitverwendet. Die Bestandteile werden gründlich durchmischt und in Formen zu Plattenrohlingen gepresst. Die Platten können vor der Weiterverarbeitung auf die jeweils benötigten Formate zugeschnitten werden. Da Kieselsäure in der Lage ist, Feuchtigkeit aufzunehmen, kann es notwendig sein, die Platten kurz vor dem Einschweißen in einem Ofen zu trocknen. Sie werden mit Flies ummantelt oder in perforierte Polyethylenfolie eingeschrumpft um die Handhabbarkeit zu verbessern. Die so vorbereiteten Stützkörper werden in bereits dreiseitig geschlossene, maßgeschneiderte Beutel des gewählten Hüllmaterials eingetütet und anschließend in einer Vakuumkammer evakuiert. Noch in der Vakuumkammer wird die letzte Seite des Beutels vakuumdicht verschlossen.



Abbildung 6: Herstellung von Vakuum-Dämmelementen bei Variotec (von links oben nach rechts unten): 1. Zugeschnittene Platten aus pyrogener Kieselsäure, 2. mit Flies ummantelte Stützkörper, 3. dreiseitig geschlossener Beutel aus Hochbarrierefolie, 4. Vakuumkammer und 5. maßgefertigte Vakuum-Dämmelemente.

Vor Auslieferung der Dämmelemente werden diese einer Qualitätskontrolle unterzogen. Die Dichtigkeit der Hülle wird geprüft, indem der im Innern des Elementes herrschende Unterdruck zweimal im Abstand von 24 Stunden gemessen wird. Bleibt der Druck innerhalb dieses Intervalls konstant auf niedrigem Niveau, so lässt das auf eine einwandfrei funktionierende Hülle schließen.

2.4 Anwendungsgebiete von Vakuum-Dämmelementen im Bestand

Wie oben erläutert verfügen Dämmungen mit Vakuum-Technologie über äußerst geringe Wärmeleitfähigkeiten. Deshalb stellen sie im Baubereich überall dort eine Alternative zu herkömmlichen Dämmstoffen dar, wo letztere aufgrund der damit erforderlichen fünf bis zehn mal größeren Dämmstoffstärken nicht oder nicht sinnvoll eingesetzt werden können, also Situationen, wie sie vor allem beim Bauen im Bestand anzutreffen sind.

Die Motivation für die Verwendung von Vakuum-Dämmungen kann sehr verschieden sein. So können technische (z.B. wenig Platz in Fensterleibung), wirtschaftliche (z.B. Vermeidung von Nutzflächen-Verlusten), rechtliche (z.B. Grenzbebauung) oder denkmalpflegerische Gesichtspunkte ausschlaggebend sein.

Von den Herstellern und Verarbeitern von Vakuum-Dämmelementen wird eine Vielzahl von Anwendungsgebieten im Baubestand angeführt. In Variotec (o.J., 2009a), va-Q-tec (2008) und Porextherm (2007) werden u.a. genannt:

- Aufdoppelung bestehender Fensterrahmen
- Rollladenkastendämmung (Modernisierung)
- Traufdämmung (auch bei Renovierung von Bestandsgebäuden)
- Ortgangprofile (seitlich des Mauerwerks)
- Fassadendämmung bei Denkmalschutzobjekten oder Grenzbebauung
- Traufprofile zur nachträglichen Wärmebrückenlösung
- Außeneck-Profile
- Profil für Sockellösung (außen und im Kellerbereich)
- Innenwandabschlüsse nach oben (statt Abschlagen vom Mauerwerk unterhalb der Dachhaut)
- Leibungsdämmung bei Einsatz von WDVS bei bestehenden Fenstern ...
- Dämmkeile für Wärmebrückenanschlüsse von Innendämmungen
- Sockelprofile
- Dämmung unter der Kellerdecke bei niedrigen Raumhöhen
- Innentüren im Bestand (zu Kaltbereichen)
- Estrichdämmungen
- Innendämmung zur Vermeidung von Nutzflächen-Verlusten
- hinter Wandheizung in historischer Kirche
- Aufdachdämmsystem
- Flachdächer

In Tabelle 1 wurden die von den Herstellern genannten Anwendungsgebiete ergänzt (z.B. Heizkörpernische oder Dachgaube) und, geordnet nach dem jeweiligen Abschnitt der Gebäudehülle, zusammengestellt.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

Vakuum-Dämmelemente können in praktisch allen Teilen der Gebäudehülle von Bestandsbauten zur Anwendung kommen. Das gilt für Wände, Decken und Dächer ebenso, wie für Fenster- und Türöffnungen.

Großflächige Anwendungen sind vor allem im Bereich der Fassadensanierung, aber auch bei Dämmmaßnahmen an Decken- und Dachflächen zu finden. Die anderen genannten Anwendungsgebiete sind eher kleinteilig. Je nach Situation kommt Vakuum-Dämmtechnik als Innen- oder Außendämmung zum Einsatz.

Tabelle 1: Anwendungsgebiete von Vakuum-Dämmelementen im Bestand

Abschnitt der Gebäudehülle		Anwendungsgebiet
Außenwand	geschlossene Wand	Wandfläche
		Decken-, Dach- und Wandanschlüsse
		Sockelbereich
		Heizkörpernische
	Fensteröffnung	Fensterrahmen
		Fensterleibung
		Rolladenkasten
	Türöffnung	Türblatt
		Türleibung
Decke		Bodenplatte
		Decke über Keller
		oberste Geschossdecke
		ins Freie auskragende Decke
Dach	geneigtes Dach	Dachfläche
		Traufe
		Ortgang
		Dachgaube
	Flachdach	nicht begehbare Flachdach
		begehbare Flachdach

2.5 Anwendungsspezifische Produkte des QASA-Bausystems der Fa. Variotec

Der Projektpartner Variotec GmbH & Co. KG hat für Anwendungen im Baubereich spezielle Vakuum-Dämmelemente entwickelt, welche unter dem Markennamen QASA in verschiedenen Ausführungen vermarktet werden. Basis aller QASA-Produkte ist eine Vakuum-Dämmplatte aus pyrogener Kieselsäure mit einer Hülle aus metallisierter Kunststoffolie. Der Innendruck bei Auslieferung liegt bei 1 bis ca. 5 mbar, der Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit bei 0,007 W/(m·K). Dieser Wert berücksichtigt eine mögliche Zunahme der Wärmeleitfähigkeit infolge Alterung. Die Platten sind in Stärken von 10 – 50 mm und in Formaten bis 1250 x 3000 mm lieferbar. Je nach vorgesehener Anwendung wird die Basisplatte um weitere Schichten ergänzt, deren Funktion in erster Linie darin besteht, die empfindliche Hüllschicht zu schützen.

Für allgemeine Bauanwendungen werden die Produkte *QASAlight* und *QASAsandwich* angeboten. Darüber hinaus gibt es unter Namen wie *QASARoof*, *QASAFloor*, *QASAbalcony* usw. eine Reihe von Produkten für spezifische Anwendungen. Weitere Informationen über die QASA-Produkte bei Variotec (2009b).

Während der Laufzeit des Projektes wurde von Variotec in Zusammenarbeit mit dem Putzhersteller Maxit das Produkt *QASAMax* (Variotec 2008) zur Marktreife gebracht. Hierbei handelt es sich um ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) aus Vakuum-Dämmelementen, welche mit Polystyrolschaumplatten allseitig ummantelt sind. Über ihre Funktion als Schutzschicht hinaus dienen die Schaumplatten als Haftmittler zu Mauerwerk bzw. Putz.

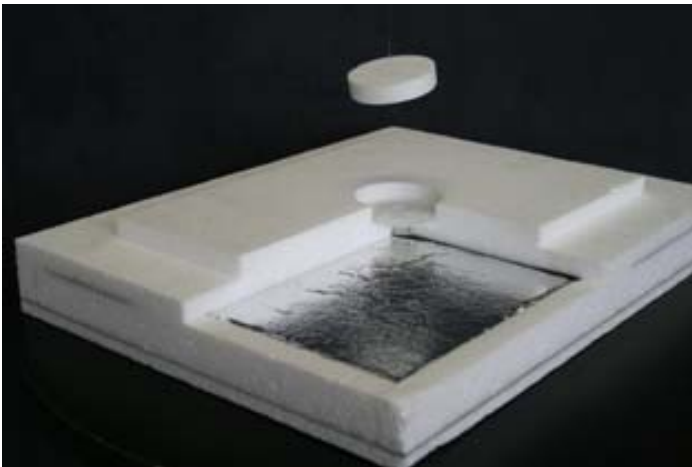


Abbildung 7: QASAmx-Element (Variotec 2008)

Das Standardformat der QASAmx-Elemente ist 600 x 1200 mm. Zusätzlich gibt es „halbe“ Elemente mit 600 x 600 mm. Sonderformate können nach Maß innerhalb von 24 Stunden angefertigt werden. Die Befestigung der Dämmelemente erfolgt über Rand- und Flächendübel. Randedübel können im Bereich des umlaufenden Schaumstoffstreifens angeordnet werden. Für die Flächendübel sind beim Standardformat zwei Dübellöcher werkseitig vorgesehen, bei „halben“ Elementen eines. Untenstehende Tabelle 2 gibt einen Überblick über die verfügbaren Stärken.

Tabelle 2: QASAmx - Plattenstärken (Variotec 2008)

QASAmx Gesamtdicke	mm	60	65	70	75	80	90
Dicke VIP-Kern	mm	20	25	30	35	40	50

Bei den Versuchen für das Forschungsprojekt „Maßgefertigte Vakuum-Dämmelemente für das Bauen im Bestand“ kamen QASAmx-Elemente zum Einsatz.

3 Verfahren der geometrischen Bestandserfassung

Für die geometrische Erfassung von Bestandsgebäuden steht eine Reihe von Verfahren zur Verfügung, die sich in vier Gruppen zusammenfassen lassen: das Handaufmaß, die geodätischen Verfahren, die Photogrammetrie und das 3D-Laserscanning. Die geodätischen Verfahren, bei denen die Raumkoordinaten einzelner Objektpunkte durch Winkel- und Streckenmessungen bestimmt werden, kommen heute meist in Form von Tachymetrie zur Anwendung. Die einzelnen Methoden werden im Folgenden, in der Reihenfolge ihres geschichtlichen Auftretens, kurz beschrieben und anschließend in Hinblick auf die hier thematisierte Aufgabenstellung verglichen.

3.1 Handaufmaß

Das traditionelle Handaufmaß ist nach wie vor als eigenständige oder ergänzende Methode der Bauaufnahme von großer Bedeutung. Neben den teils seit Jahrhunderten verwendeten Messwerkzeugen wie Meterstab und Bandmaß, Lot und Wasserwaage, Niveliergerät und Theodolit (vgl. Cramer 1984 und Wangerin 1992) kommen heute auch elektronische Laserentfernungsmesser zum Einsatz. Bei letzteren können die Messwerte z.B. kabellos mittels Bluetooth an einen PC übertragen und dort in verschiedene Programme (z.B. Excel, AutoCAD) eingelesen werden.

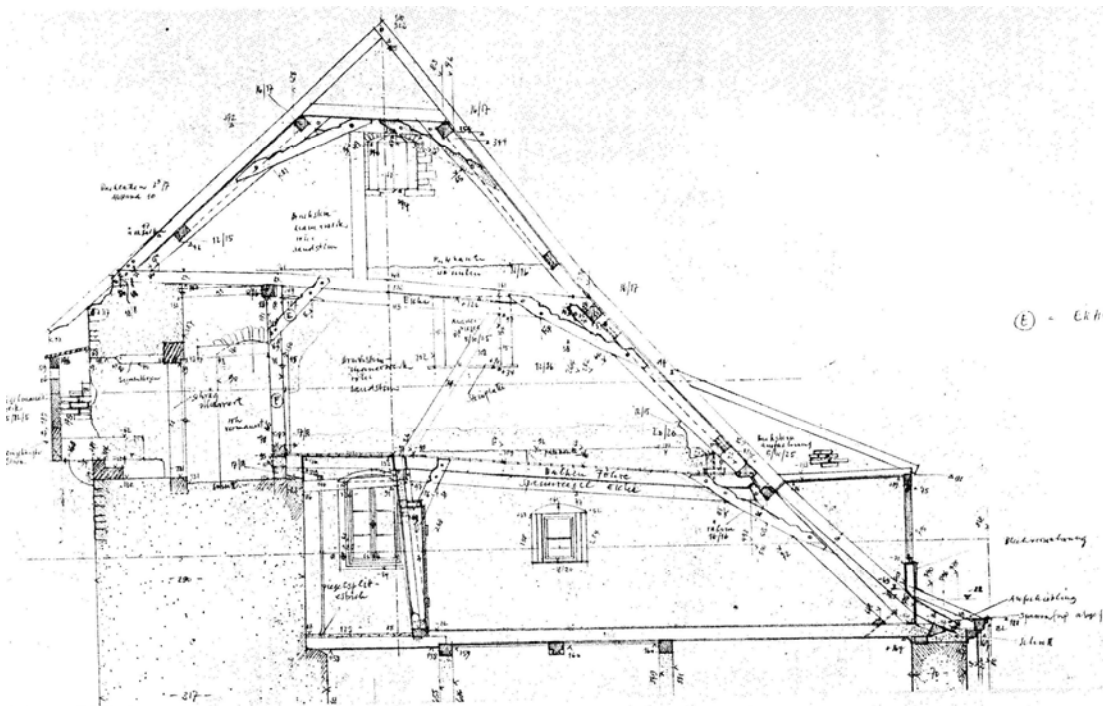


Abbildung 8: Verformungsgetreue Bauaufnahme mit Schadensdarstellung, Querschnitt des sog. ‚Westpalas‘ der Burg Rothenfels (Mader 1991)

Die Anschaffungskosten der Messgeräte für ein Handaufmaß sind gering und das Verfahren ist leicht zu erlernen. Einfache Objekte mit ebenen Flächen und rechten Winkeln sind gut von Hand

zu vermessen. Aber auch komplexe Geometrien können erfasst werden, z.B. verformte Altbauten in der Baudenkmalpflege - in der Regel durch maßstäblichen zeichnerischen Auftrag direkt vor Ort. Der große zeitliche Aufwand wird hier durch den Zugewinn an Information begründet, der sich aus der unmittelbaren Arbeit am Objekt ergibt.

3.2 Photogrammetrie

Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts - folglich nur wenige Jahre nach Erfindung der Fotografie und knapp ein Jahrhundert vor Erfindung des Computers - wurden etwa zeitgleich durch Laussedat in Frankreich und Meydenbauer in Deutschland Methoden entwickelt, um aus fotografischen Bildern die Lage und die Form von Objekten messen zu können (vgl. Kraus 2004 und Luhmann 2003). Damit ist die Photogrammetrie die älteste der im Folgenden besprochenen Messtechniken.

Heute werden für photogrammetrische Aufgaben in der Regel digitale Kameras in Kombination mit spezieller Bildauswertesoftware eingesetzt.

Als Aufnahmegesetz kommen je nach Anwendungsgebiet und Verfügbarkeit unterschiedliche Geräte - vom Fotohandy über digitale Kompakt- und Spiegelreflexkameras bis hin zu speziellen Messkameras („Messkammer“) oder 360°-Panoramakameras - zum Einsatz. Werden hohe Anforderungen an die Genauigkeit gestellt, so muss die Kamera kalibriert werden: Das heißt es werden Größen wie die Lage des Projektionszentrums (Brennweite) und die Abweichung vom theoretischen Modell der Perspektive bestimmt, wie sie (z.B. durch die Verzeichnungen des Objektivs) bei jeder Kamera mehr oder weniger gegeben sind. Die Kalibrierung gilt jeweils bei einer einzigen Kamera mit einem einzigen Objektiv nur für eine Brennweite und eine Fokussierung. Fokussierung und bei Zoomobjektiven auch die Brennweite werden deshalb bei kalibrierten Kameras fixiert.

Charakteristisch für die Photogrammetrie ist, dass nicht am Objekt selbst, sondern im Bild gemessen wird; Tiefenmaße sind folglich nur schwer zu nehmen. Die Erfassungszeit am Objekt ist extrem kurz. Das Verfahren ist sehr robust gegenüber klimatischen Einflüssen. Anders als bei Tachymetrie und 3D Laserscanning sind Bewegungen des Aufnahmegesetzes während der Erfassung nicht zwangsläufig problematisch; das ermöglicht die Arbeit von Hub- oder Fluggeräten (unmanned aerial vehicle, UAV) aus. Die Anschaffungskosten für Gerät und Lizenzen sind gering; die Betriebskosten verschwindend klein. Voraussetzung für photogrammetrische Aufnahmen sind ausreichend gute Lichtverhältnisse. Die sozusagen als Nebenprodukt mitgelieferten Bild- und Farbinformationen sind oft von großem Wert für Auswertung und Interpretation.

In Hinblick auf die Anwendungen im Bauwesen kann die Photogrammetrie in zwei Gruppen eingeteilt werden: Einzelbildphotogrammetrie und Mehrbildphotogrammetrie. Während bei der Einzelbildphotogrammetrie ausschließlich in einer Ebene (etwa in einer Fassade) gemessen werden kann, können bei der Mehrbildphotogrammetrie die Lage von Objektpunkten im Raum ermittelt werden. Auch die photogrammetrische Software lässt sich in solche für Einzelbild- und

solche für Mehrbildphotogrammetrie unterteilen (zur Einteilung der Photogrammetrie vgl. Luhmann 2003).

3.2.1 Einzelbildphotogrammetrie

Im perspektivischen Bild, wie es durch Fotografie entsteht, können wegen der für diese Projektionsart typischen Fluchtung, Strecken in der Regel nicht unmittelbar gemessen werden. Eine Ausnahme stellen solche Perspektiven dar, bei denen eine Ebene des Objektes parallel zur Bildebene verläuft: Strecken in dieser Ebene des Objektes werden maßstäblich abgebildet. Der Maßstab kann ermittelt werden, wenn ein Streckenmaß bekannt ist.

In der Praxis wird es, schon allein wegen räumlicher Zwänge, selten möglich sein, die Bildebene des Fotoapparates exakt auf das Objekt auszurichten. Es werden immer mehr oder weniger perspektivisch fluchtende Abbildungen entstehen. Dennoch können, unter Ausnutzung der geometrischen Gesetzmäßigkeiten der Perspektive, Objektmaße aus Messungen im Bild errechnet werden: photogrammetrische Einzelbildauswertung. Um Fluchtung und Maßstab errechnen zu können, müssen eine geringe Anzahl von Maßen z.B. per Handaufmaß oder Tachymetrie am Objekt selbst genommen werden. Dies können etwa ein vertikales und ein horizontales Maß oder die Koordinaten dreier Punkte in der zu vermessenden Objektebene sein. Eine Alternative besteht darin, Maßstäbe mit zu fotografieren. Alle übrigen Strecken können in der Folge aus dem Bild errechnet werden.



Abbildung 9: photogrammetrische Einzelbildentzerrung (Fokus 2004)

Eine komfortable Variante der Einzelbildauswertung stellt die Einzelbildentzerrung dar. Hier wird das Bild so umgewandelt (=entzerrt), dass eine Ebene des Objektes, z.B. eine Fassadenebene, unverzerrt erscheint (Orthofoto). Strecken können anschließend unmittelbar im entzerrten Bild gemessen werden.

Bei großen Objekten oder beengten Verhältnissen müssen gegebenenfalls mehrere Bilder zu einem großen Bild zusammengesetzt werden (Stitching bzw. Mosaikieren). Dennoch handelt es sich dabei um Einzelbildphotogrammetrie, da nach wie vor in einer Ebene gemessen wird.

Software für die Einzelbildentzerrung wird für Preise zwischen ca. 100 € und 2.000 € angeboten und ist leicht zu erlernen. Oft sind die Programme auf spezielle Anwendungen zugeschnitten (Angebotserstellung für Malereibetriebe, Energiepass) und in entsprechende Softwarepakete eingebunden. Günstige Lösungen beschränken sich auf wenige Grundfunktionalitäten. Programme am anderen Ende der Kostenspanne zeichnen sich durch Funktionalitäten wie den Import von Kalibrierungsdaten, Stitching-Fähigkeit oder Exportschnittstellen (Excel, CAD) aus.

Eine Liste aktuell verfügbarer Programme für die Einzelbildphotogrammetrie ist im Anhang zusammengestellt.

3.2.2 Mehrbildphotogrammetrie

Durch gleichzeitige Auswertung mehrerer Bilder kann die räumliche Geometrie von Objekten aus fotografischen Bildern hergeleitet werden. Voraussetzung ist auch hier, dass einzelne Maße z.B. per Hand am Objekt selbst genommen wurden. Die Auswertung geschieht heute in der Regel mit spezieller Software am Computer. Das Ergebnis sind zunächst die Raumkoordinaten von Einzelpunkten. Mit Hilfe der Software lassen sich aus Eckpunkten Kanten und aus Kanten wiederum Flächen des Objektes modellieren. Die Flächen des Modells können mit den Bildinformationen aus den Fotos texturiert werden. Schließlich kann das Modell als Datei in einem geeigneten Format exportiert und in ein CAD-Programm eingelesen werden. Einige Softwarelösungen für die Mehrbildphotogrammetrie sind von vornherein als Applikation zu einem CAD-System wie AutoCAD oder MicroStation programmiert.

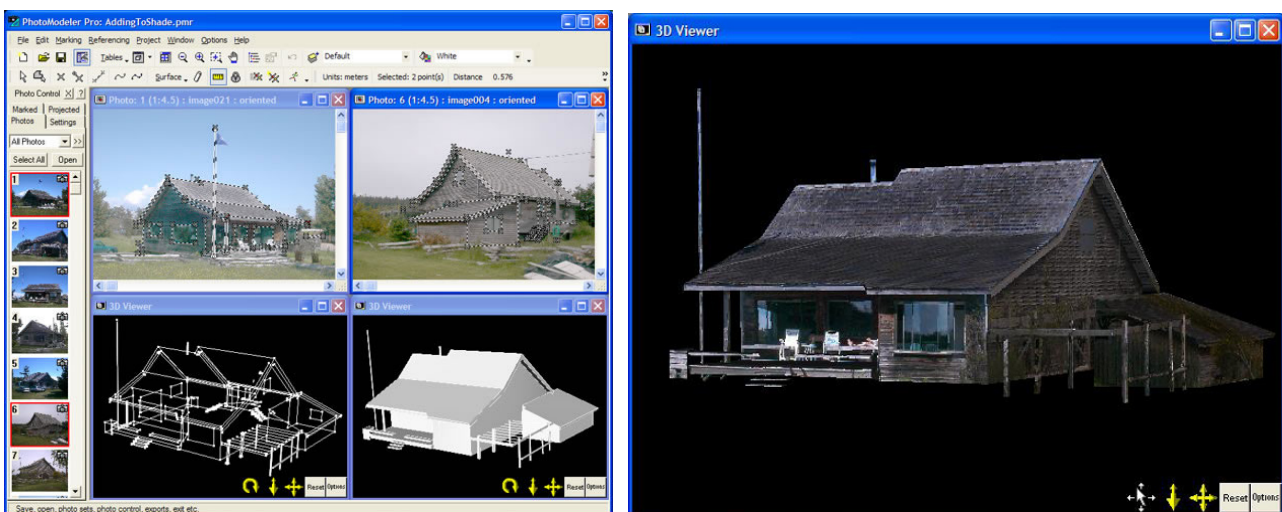


Abbildung 10: Mehrbild-Photogrammetrie - Kanten- und Flächenmodell (linkes Bild) und texturiertes Flächenmodell (rechtes Bild) (Eos 2008)

Im Folgenden sind beispielhaft die typischen Arbeitsschritte für eine Mehrbildauswertung aufgeführt, die Reihenfolge kann je nach Programm und Anwender variieren:

- Einlesen der Fotos (evtl. zur Verbesserung der Lesbarkeit zuvor nachbearbeitet mit Bildbearbeitungssoftware)
- Eingeben der Kameradaten, in der Regel durch Abruf einer Kalibrierungsdatei
- räumliche Verknüpfung der Bilder zueinander (Mehrbildorientierung) durch Identifizieren mehrerer Objektpunkte in mehreren Bildern
- Festlegen des Maßstabes durch Eingabe von am Objekt genommenen Maßen (z.B. von Hand gemessene Strecken)
- Bestimmung der Raumkoordinaten von weiteren Objektpunkten, Modellieren von Kanten und Flächen, evtl. Export in CAD
- Strecken- und Flächenmessungen
- evtl. Texturieren von Flächen

Die Preisspanne bei den Softwarepaketen für die Mehrbildauswertung reicht von ca. 1.000 € bis ca. 10.000 €. Außerdem entstehen Kosten für die Einarbeitung von ca. 1-3 Tagen bzw. Schulung. Der Funktionsumfang ist bei den angebotenen Programmen weitgehend gleich. Ausnahmen stellen Spezialfunktionen dar, wie etwa die kombinierte Auswertung mit Punktwolken z.B. aus 3D-Laserscanning. Außerdem gibt es bei einigen Programmen Beschränkungen bei der Anzahl von Bildern, die miteinander verrechnet werden können. Es gibt jedoch erhebliche Unterschiede bezüglich Benutzeroberfläche und Bedienkomfort. Eine Liste aktuell verfügbarer Programme für die Mehrbildphotogrammetrie ist im Anhang zusammengestellt.

Um die Genauigkeit zu erhöhen und um die Auswertung zu erleichtern, können am Objekt deutlich erkennbare Passmarken angebracht werden. Diese Marken können mit einer graphischen Kodierung versehen sein, welche die Auswertesoftware eigenständig erkennt. Die Zuordnung identischer Punkte in verschiedenen Bildern kann dadurch automatisiert werden. Mit einer ausreichend großen Zahl von Marken lassen sich auch Objekte mit gekrümmten Oberflächen erfassen. Solche Systeme kommen vor allem in der Qualitätskontrolle großer Objekte zur Anwendung.

Ebenfalls aus dem Bereich der industriellen Produktentwicklung und Qualitätskontrolle stammt die sogenannte Streifenprojektion. Bei diesem Verfahren werden wechselnde Lichtmuster auf das Objekt projiziert und mit mindestens einer hochauflösenden Digitalkamera mit hoher Bildrate aufgenommen (Breuckmann 2009). Aus diesen Bildern kann die Geometrie von Objekten in der Größenordnung von 2x2 m mit wenigen Zehntelmillimetern Genauigkeit erfasst werden. Wegen der Größenbeschränkung und den geringen Toleranzen gegenüber den Lichtverhältnissen der Messumgebung findet dieses Verfahren jedoch bei der Bauwerkserfassung bis heute kaum Verwendung.

Eine weitere aktuelle Neuentwicklung ermöglicht die flächenhafte Erfassung von räumlichen Objekten mit photogrammetrischen Methoden ohne die Zuhilfenahme kodierter Marken oder

strukturierter Beleuchtung. Kern des Verfahrens ist der so genannte Dense Surface Model (DSM) Algorithmus, welcher in zuvor orientierte Fotos in einem regelmäßigen Raster nach ähnlichen Elementen sucht. Können in zwei Bildern übereinstimmende Punkte identifiziert werden, so lassen sich die Koordinaten des Punktes errechnen. Das Ergebnis ist eine Punktwolke, wie sie auch die Streifenprojektion und das unten beschriebene 3D-Laserscanning hervorbringen. Voraussetzung für den Einsatz des Verfahrens ist eine deutlich sichtbare Textur der Objektoberfläche, wie sie etwa Felsen, Mauerwerk oder Haut aufweisen (Eos 2009).

3.3 Tachymetrie

Das Tachymeter ist die Kombination aus einem geodätischen Winkelmessgerät (Theodolit) mit einem Laserentfernungsmesser. Der sichtbare Laserstrahl wird auf einen markanten Objektpunkt (wie z.B. Eckpunkte von Fassadenflächen oder Fensteröffnungen) gerichtet. Über die Laufzeit des Laserlichtes wird die Entfernung zwischen Tachymeter und Objektpunkt errechnet. Aus Distanz und Ausrichtung des Laserstrahls lässt sich die räumliche Lage des Objektpunktes in Bezug auf das Tachymeter ermitteln. Auf diese Weise werden diskrete Einzelpunkte des Messobjekts nacheinander abgetastet. Die Ausgabe der Punktkoordinaten erfolgt direkt in digitaler Form. In einem mit dem Tachymeter verbundenen PC kann das Ergebnis mit Hilfe spezieller Software unmittelbar in ein Kantenmodell umgesetzt werden.

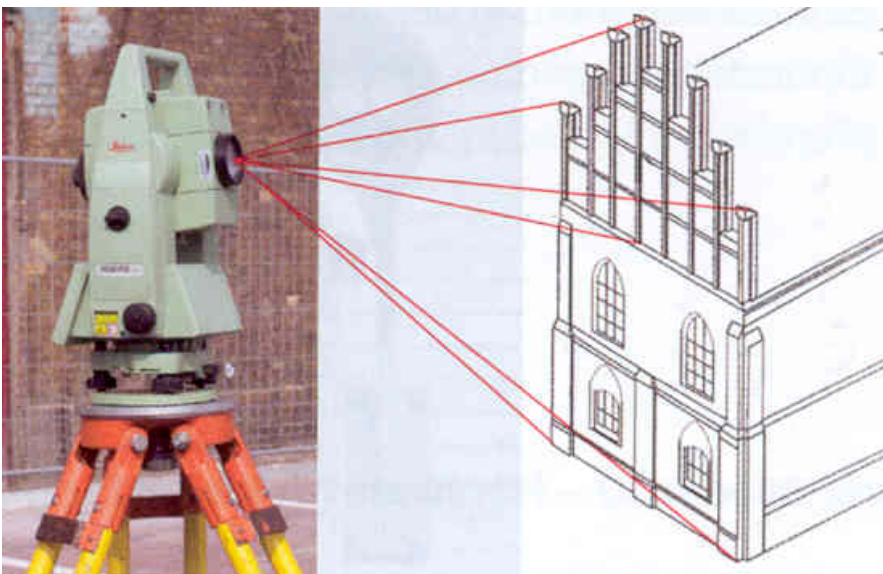


Abbildung 11: Tachymetrie (FPK 2009)

Das erste Tachymeter kam 1968 auf den Markt (Scherer 2007). Nachdem es anfangs noch notwendig war, einen Reflektor an den zu vermessenden Punkt zu halten, hat sich seit einigen Jahren die reflektorlose Messung direkt auf der natürlichen Oberfläche des Objektes durchgesetzt. Tachymeter werden heute oft auch als Totalstationen bezeichnet, die Tachymetrie als terrestrisches polares Messsystem (TPS).

Bedingt durch den Durchmesser des Laserstrahls und durch die Beschaffenheit natürlicher Oberflächen können in bestimmten Situationen Fehlmessungen entstehen. Besonders bei schleifender Messung auf rauen Oberflächen wird das Messergebnis verfälscht (Juretzko 2005). Weitere kritische Bereiche sind auch Objektkanten: Bei einer Messung auf eine Außenecke fällt das Ergebnis zu groß, bei der auf eine Innenecke hingegen zu klein aus. Ein an einer Kante geteilter Strahl trifft zum Teil weiter hinten liegende Objekte; das Ergebnis ist ein Mittelwert (Kern 2001).

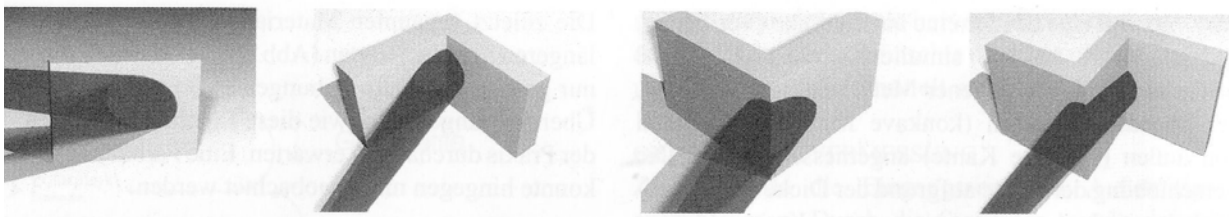


Abbildung 12: kritische Messsituationen bei der Tachymetrie - Messung auf schräge Fläche, Innenecke, Außenecke, Stufe (von links nach rechts) (Kern 2001)

Es kommen in der Praxis verschiedene Strategien zum Umgang mit den beschriebenen Messproblemen an Kanten zum Einsatz. Einmal kann die Richtungsmessung von der Streckenmessung abgekoppelt werden, d.h. die Streckenmessung wird leicht versetzt zur Kante durchgeführt und der geringfügige Fehler in Kauf genommen. Zum anderen können durch Messung mehrerer Punkte in der Nähe der Kante Ebenen modelliert und die Kante im Schnitt der Ebenen gefunden werden.

Die Tachymetrie ist ein erprobtes und robustes vermessungstechnisches Verfahren für die Erfassung diskreter Einzelpunkte. Die Gerätekosten liegen bei 5.000 bis 25.000 €. Eine Schulung am Gerät ist für die Bedienung erforderlich. Mit der Tachymetrie können einfache Bauwerksgeometrien wirtschaftlich erfasst werden. Da bereits bei der Erfassung die wesentlichen Punkte des Objektes gemessen werden, ist die Nachbearbeitungszeit im Büro sehr gering. Die Tachymetrie eignet sich auch zur Ergänzung von Photogrammetrie und 3D-Laserscanning, z.B. zum Einmessen von Passmarken für die Verknüpfung einzelner Aufnahmen.

In den letzten Jahren gab es mehrere Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Tachymetrie, die zum Teil zur Marktreife gebracht wurden. So genannte intelligente Totalstationen, die ursprünglich speziell für die Vermessung von Fassaden entwickelt wurden (Reyer e.a. 2003 und 2004), sind in der Lage, das Objekt zusätzlich zu den diskret gemessenen Punkten mit einem Raster von Messpunkten zu überziehen. Auf diesem Weg können Unebenheiten in der Fassadenfläche erkannt werden. Bei der Photo- und Videotachymetrie (Juretzko 2005, Wasmeier 2009) werden tachymetrische und photogrammetrische Verfahren miteinander kombiniert.

3.4 3D-Laserscanning

Das 3D-Laserscanning kommt seit etwa 10 Jahren (Wunderlich 2008) bei der Erfassung von Bausubstanz zum Einsatz. Einige Gerätehersteller haben mittlerweile bereits die 4. Generation terrestrischer Laserscanner (TLS) auf dem Markt (Kersten 2008). Neben dem terrestrischen Laserscanning, mit Scannerstandort auf festem Untergrund, existiert das airborne Laserscanning. Hier werden Aufnahmen mit einem Fluggerät aus der Luft gemacht. Diese Aufnahmen dienen in der Regel dem Erstellen von digitalen Geländemodellen.

Das 3D-Laserscanning basiert auf dem gleichen polaren Messprinzip wie die Tachymetrie. Anders als letztere arbeitet es aber nicht mit einzelnen ausgewählten Objektpunkten; stattdessen wird die gesamte Oberfläche des Objektes mit einer großen Zahl von Messpunkten überzogen, indem der Laserstrahl automatisch schrittweise geschwenkt bzw. geneigt wird. Das Ergebnis sind die Raumkoordinaten dieser Messpunkte, meist ergänzt durch einen Wert für die Intensität des jeweils reflektierten Laserlichtes. Mittels spezieller Software können die Punkte als sogenannte Punktwolke am Bildschirm dargestellt werden.



Abbildung 13: Phasenvergleichsscanner Z+F IMAGER 5006, links (Zoller+Fröhlich 2008) und Laufzeitscanner Leica ScanStation C10, rechts (Leica 2009)

Bezüglich der Entfernungsmessung konkurrieren bei den modernen Geräten zwei Verfahren miteinander: Phasenvergleichsverfahren und Impulslaufzeitverfahren. Ersteres ist schneller (bis zu 500kHz) bei begrenzter Reichweite (<100m), letzteres weniger schnell (ca. 10 kHz) bei größerer Reichweite (200 bis 2000 m) (Wunderlich 2008). Die mit 3D-Laserscanning erreichbare 3D-Punktgenauigkeit liegt bei bis zu ± 6 mm bei einer Messdistanz von 50 m (Mechelke 2008). Die Anschaffungskosten für einen 3D-Laserscanner incl. der für den Betrieb notwendigen Software liegen zwischen 50.000 und 170.000 € (Kern 2002). Vermessungstechnische Vorkenntnisse bzw. Schulung sind dringend erforderlich. Hierdurch und für eventuell notwendige Auswertesoftware entstehen zusätzliche Kosten.

Mit einem einzelnen Scan werden nur die Objektpunkte erfasst, welche vom jeweiligen Standpunkt des Scanners aus durch den Laserstrahl erreicht werden können. Selbst bei einfacher

Geometrie des Objekts wird es daher immer zu einer gewissen Verschattung von Objektpunkten kommen. Es ist deshalb in der Praxis meist nötig, ein Objekt von mehreren Standorten aus aufzunehmen. Die so erzeugten Punktwolken werden über Passmarken, Passkugeln oder auch natürliche Flächen zu einer Gesamtpunktwolke zusammengesetzt. Dieser Vorgang wird als Registrierung oder auch Referenzierung bezeichnet. Zur geometrischen Erfassung eines historischen Kirchendachstuhls waren z.B. 95 Scannerstandpunkte erforderlich, die durch 168 Passpunkte miteinander verknüpft wurden (Weber 2002). Auf diese Weise können Punktwolken mit mehreren Millionen Punkten und mehreren Gigabyte Datenumfang entstehen.

Die Erfassung eines baulichen Objektes mit 3D-Laserscanning nimmt je nach Schwierigkeitsgrad wenige Stunden bis einige Tage in Anspruch. Anschließend muss die Punktwolke entsprechend der beabsichtigten Verwendung ausgewertet werden (Modellierung). In den meisten Fällen wird dies die Überführung der Daten in Rissdarstellungen oder in CAD-gängige Kanten-, Flächen- oder Volumenmodelle sein. Für diese Aufgaben gibt es eine Reihe von Softwareprodukten, mit deren Hilfe es möglich ist, geometrische Primitive wie Ebenen und Zylinder weitgehend automatisch modellieren zu lassen. Freiformflächen werden mittels Dreiecksvermaschung oder durch mathematische Funktionen dargestellt. Trotz dieser technischen Möglichkeiten wird für die Auswertung im Verhältnis zur Erfassung ein Vielfaches an Zeit benötigt; Schäfer (2008) beziffert das Verhältnis mit 1:8 bis 1:16.

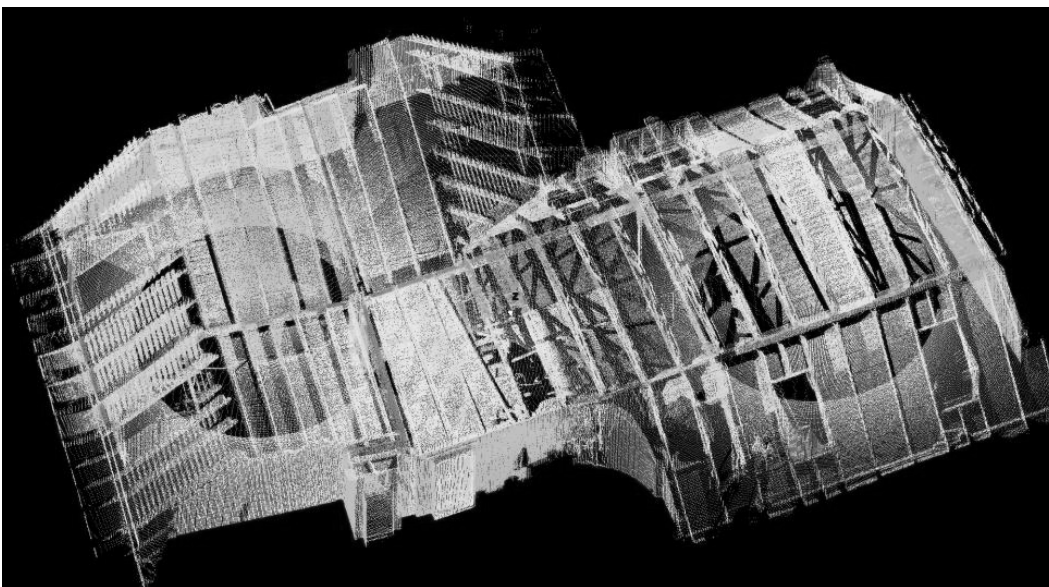


Abbildung 14: Verknüpfte Punktwolke aus 3D-Laserscanning eines Dachstuhls. Die kreisförmigen Bereiche markieren die Standorte des Scanners. (Steger 2007)

Die Geometriedaten aus 3D-Laserscanning können durch Farbinformationen aus Fotografien angereichert werden. Das Ergebnis ist eine in Objektfarben eingefärbte Punktwolke. Zu diesem Zweck wird meist eine Digitalkamera fest auf dem Scanner montiert. Faro (2009) nennt ihr System

„Farb-Laserscanner“. Aber auch separat aufgenommene Fotos können mit einer Punktwolke desselben Objektes verknüpft werden.



Abbildung 15: „Farb-Laserscanner“ Faro LS, links (Faro 2009) und eingefärbte Punktwolke, Herkulaneum, rechts (DeltaSphere 2008)

Neben den oben beschriebenen Scannern, welche die Entfernung zwischen Sensor und Objekt über die Zeit ermitteln, gibt es eine Gruppe von 3D-Laserscannern, welche die Entfernungsmessung mittels Triangulation durchführen. Die Laserquelle und ein optischer Empfänger sind in einem definierten Abstand am Gerät befestigt. Der Laserstrahl wird in einem kontrollierten Winkel zu dieser Basis ausgesandt und vom Objekt reflektiert. Der Winkel des am Empfänger eintreffenden Lichts zur Basis wird gemessen. Mit diesen Werten können die freien Seiten des Dreiecks Sender/Objektpunkt/Empfänger berechnet werden. Die heute auf dem Markt erhältlichen Geräte dieser Bauart erreichen hohe Genauigkeiten bei stark begrenzter Reichweite (bis max. 2,5m). Sie sind vergleichsweise leicht, klein und kostengünstig und können bei kleinen Objekten durchaus sinnvoll eingesetzt werden (Müller 2007).



Abbildung 16: Triangulationsscanner Konica Minolta VI-910, links (Konica Minolta 2009a) und handgeführter Laserscanner Steinbichler T-Scan 2, rechts (Steinbichler 2009)

Ebenfalls nach dem Triangulationsprinzip arbeiten die sogenannten Lichtschnittsensoren, wobei hier statt eines einzelnen Laserpunktes eine Laserlinie projiziert wird. Das Messobjekt ist somit das Profil, welches diese Projektion auf der Oberfläche des Objektes erzeugt. Wird der Sensor entlang der Objekt Oberfläche bewegt, wird eine Folge von Profilen erzeugt, welche in ihrer Summe die Geometrie der Oberfläche abbilden. Um die einzelnen Profile einander räumlich zuordnen zu können, ist es notwendig, Lage und Ausrichtung des Sensors zu jedem Zeitpunkt der Aufnahme exakt zu kennen. Für diese Aufgabe sind verschiedene Technologien im Einsatz, unter anderem auch solche, die es erlauben, den Sensor frei von Hand zu führen.

3.5 Vergleich der Messverfahren

Wie oben dargestellt, weisen die Verfahren zur geometrischen Bestandserfassung stark unterschiedliche Charakteristika auf. Dies macht es erforderlich, vor Beginn eines Vermessungsprojektes genau zu untersuchen, welche Techniken für die jeweilige Aufgabe geeignet sind. Die prinzipiellen Stärken und Schwächen der beschriebenen Messverfahren sind in untenstehender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3: Vergleich der Verfahren zur geometrischen Erfassung von Bestandsgebäuden

Verfahren	Zielgeometrie	charakteristische Vorteile	charakteristische Nachteile	typische Anwendungsbeispiele
Handaufmaß	Strecken	geringe Investitionskosten leichte Erlernbarkeit einfache Objekte leicht zu erfassen unmittelbare Arbeit am Objekt Ergebnis unmittelbar vorhanden	großer Aufwand bei großen oder komplexen Objekten	kleine und einfache Objekte rechtwinklige Objekte verformungsgetreues Aufmaß in der Denkmalpflege Ergänzungs- und Kontrollmaße
Photogrammetrie	Punkte Strecken	kurze Erfassungszeit unempfindlich gegen Klimaeinflüsse Bewegungen des Aufnahmeapparates unproblematisch zusätzliche Bildinformationen	begrenzte Genauigkeit besonders bei Messungen in die Tiefe i.d.R. nicht eigenständig ausreichendes Licht notwendig	Fassadenaufmaß Visualisierungen
Tachymetrie	Punkte	einfache Objekte leicht zu erfassen hohe Genauigkeit geringer Nachbearbeitungsaufwand	Oberflächenrelief kann nicht erfasst werden Vorkenntnisse bzw. Schulung erforderlich	einfache Objekte mit markanten Punkten und geraden Kanten Einmessen von Passpunkten
3D-Laserscanning	Flächen	komplexe, unregelmäßige Geometrien können in kurzer Zeit erfasst werden	hohe Investitionskosten Vorkenntnisse bzw. Schulung erforderlich hoher Nachbearbeitungsaufwand	komplexe, unregelmäßige Objekte jeder Größenordnung Bestandserfassung in der Anlagen- und Fabrikplanung Qualitätskontrolle bei Neubau

Die Schwächen der einzelnen Messverfahren lassen sich weitgehend kompensieren, wenn mehrere Verfahren miteinander kombiniert werden. So ist die Photogrammetrie in der Regel immer auf von Hand oder tachymetrisch genommene Einmessungen angewiesen. Das Laserscanning gewinnt durch Farbinformationen aus Fotos. Ergänzungsmessungen von Hand an schwer zugänglichen Stellen des Objektes sind wirtschaftlicher als das kategorische Einscannen

eines jeden Details. Die Verknüpfung von Einzelaufnahmen sowohl beim Laserscanning als auch bei der Photogrammetrie kann mithilfe tachymetrisch eingemessener Passpunkte besonders genau und effektiv gestaltet werden.

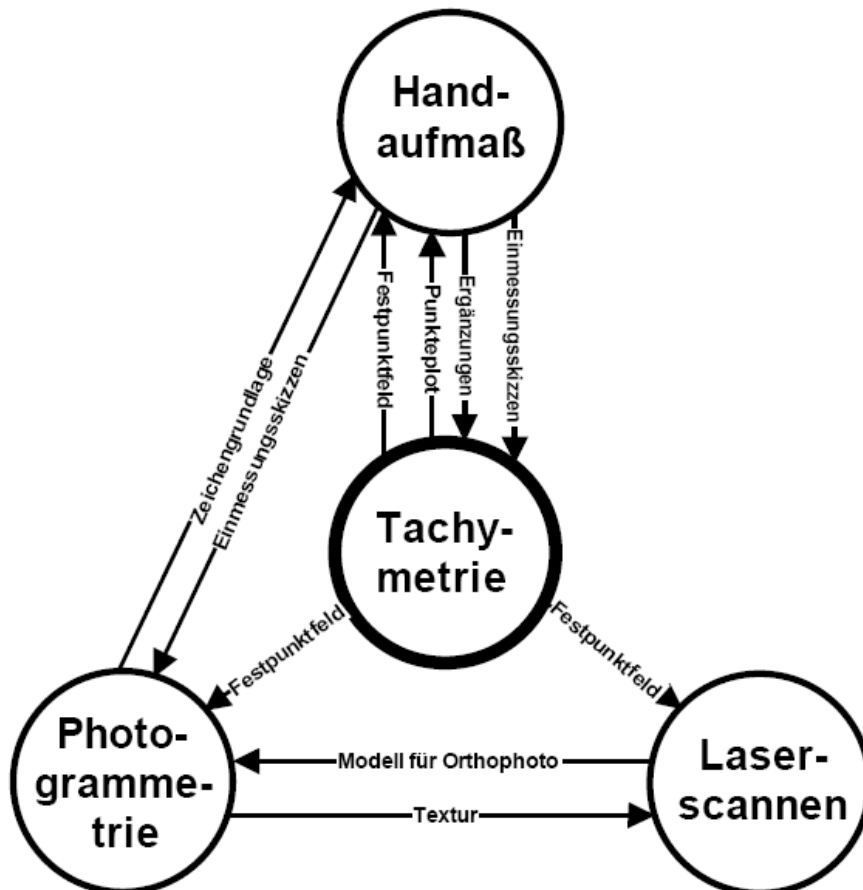


Abbildung 17: Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden (Juretzko 2005)

Die Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden hat Juretzko (2005) in obenstehender Grafik zusammengestellt. Weitere Überlegungen zu diesem Thema werden auch von Rauch (2008) skizziert. Das Wissen um diese Wechselwirkungen kommt nicht zuletzt in Neuentwicklungen wie intelligente Totalstation, Fototachymeter und Farb-Laserscanner zum Ausdruck.

4 Auswahl von Versuchsobjekten

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Abbildung eines Verfahrens zur Vorfertigung passgenauer Vakuum-Dämmelemente für konkrete, einmalige Einbausituationen im Gebäudebestand: Die Vermessung der jeweiligen Einbausituation mit einem oder mehreren der oben beschriebenen Verfahren liefert die Daten, die anschließend so aufzubereiten sind, dass auf ihrer Grundlage die Planung, Fertigung und Montage der Dämmelemente ausgeführt werden kann.

Dieses Vorgehen sollte im Rahmen des Forschungsvorhabens anhand von mehreren Versuchsobjekten exemplarisch geprüft werden. Für die Aufnahmen der verschiedenen Gebäudesituationen wurden Hersteller von Messgeräten eingeladen und außerdem Messungen durch den Lehrstuhl für Geodäsie und das Fachgebiet Photogrammetrie der Technischen Universität München durchgeführt. Zuletzt sollten für eines der Objekte Dämmelemente auf Basis der Messdaten hergestellt und am Objekt montiert werden (Kapitel 8).

4.1 Auswahlkriterien

Bei der Auswahl der Objekte waren folgende Kriterien ausschlaggebend:

Die Versuchsobjekte sollen die oben beschriebenen Anwendungsgebiete für Vakuum-Dämmelemente im Bestand möglichst gut repräsentieren. Deshalb sollen folgende Merkmale mindestens bei einem Objekt gegeben sein:

- Lage innen
- Lage außen
- großflächige Anwendung
- kleinteilige Anwendung
- stehende Montage
- liegende Montage

Des Weiteren sollen die Versuchsobjekte unterschiedliche Messsituationen widerspiegeln. Aus diesem Grund sollen bei den Objekten folgende Merkmale vertreten sein:

- komplexe Geometrien
- einfache Geometrien
- unebene Oberflächen
- weitgehend ebene Oberflächen

Folgende kritische Messsituationen sollten mindestens einmal auftauchen:

- beengte Raumverhältnisse
- große Ausdehnung des Objektes
- kleine relevante Details bei ansonsten großer Ausdehnung
- schlecht handnah zu erreichen

- Verschattungen (Laserscanning: mehrere Aufnahmen und Registrierung erforderlich)
- schlechte Lichtverhältnisse
- dem Außenklima ausgesetzt

Schließlich sollten sich die Versuchsobjekte in größtmöglicher räumlicher Nähe zueinander befinden, um die Zeit für eine Messkampagne mit einem Gerät für alle Objekte auf einen halben Tag beschränken zu können.

Dies führte schließlich zur Auswahl von drei verschiedenen Gebäudesituationen auf dem Stammgelände der Technischen Universität München in dem zentrumsnah gelegenen Münchener Stadtteil Maxvorstadt. Nachstehend werden die Versuchsobjekte im Einzelnen beschrieben.

4.2 Fassade Vorhoelzer-Bau

Das 1954 fertig gestellte Hauptgebäude der Technischen Universität München, der so genannte Vorhoelzer-Bau, benannt nach seinem Erbauer, dem Architekten und ehemaligen Wiederaufbaukommissar der damaligen Technischen Hochschule München Prof. Robert Vorhoelzer (Aicher 1990), liegt an der Arcisstraße. Das lang gestreckte Gebäude hat ein Keller- und fünf Obergeschosse. Die Fassaden des obersten Geschosses sind gegenüber den darunter liegenden Fassaden zurückgesetzt. Sie weisen an den nach Osten und Westen orientierten Längsseiten große Fensteröffnungen mit hüfthohen Mauerwerksbrüstungen aus roten Ziegeln auf. Die zwischen den Fenstern liegenden Stützen sind hell und glatt verputzt. Die Giebelseiten nach Süden und Norden zeigen mittig jeweils zwei Türöffnungen und sind ansonsten in der gleichen Art wie die Stützen der Längsseiten hell und glatt verputzt. An verschiedenen Stellen der Fassaden befinden sich kleinteilige Elemente wie Stahllaschen und Elektroboxen. Die Unterseite des umlaufenden Dachüberstands besteht aus Sichtbeton. Den Baukörper umgibt eine begehbare Terrasse mit Gehwegplatten, dem Flachdach der darunter liegenden Räume.



Abbildung 18: Versuchsobjekt Fassade Vorhoelzer-Bau, links südliche Giebelseite, rechts östliche Längsseite

Fassadensanierungen sind eines der wichtigsten Einsatzgebiete für Vakuum-Dämmelemente. Deshalb sollte sich auch mindestens eine Fassade unter den Testobjekten befinden. Die Wahl fiel nicht zuletzt deshalb auf den Vorholzer-Bau, da es seitens der Verwaltung der Technischen Universität München geplant ist, dieses unter Denkmalschutz stehende Gebäude in Kürze energetisch zu sanieren.

Für die Messungen wurden im Bereich des fünften Obergeschosses folgende im Freien liegende Oberflächen ausgewählt: die südseitige Giebelwand (ca. 4 x 16 m), die südlichen fünf Felder der östlichen Längsseite (ca. 4 x 11 m) und im Bereich dieser Fassadenabschnitte der Dachüberstand und die Terrasse bis zur Brüstung.

Mit dem Versuchsobjekt wird eine ebene Fassade mit Fenstern, Türen und zugehörigen Leibungen aufgenommen. Zugleich werden die Maße für horizontale Bauteiloberflächen (Dachüberstand und Terrasse) erfasst. Es sind Außenmessungen bei Tageslicht durchzuführen. Das Objekt ist von eher großer Ausdehnung, zeigt aber auch kleine relevante Details. Es kann nicht von einem Standpunkt aus vollständig erfasst werden.

4.3 Deckenfeld Meyer-Jens-Halle

Die Meyer-Jens-Halle liegt im Erdgeschoss des 1966 errichteten, von Prof. Franz Hart geplanten (Wienands 1980) viergeschossigen Institutsgebäudes der Maschinenbauabteilung an der Kreuzung zwischen Theresien- und Luisenstraße. Ursprünglich wurde sie für den heute in Garching ansässigen Lehrstuhl für Leichtbau gebaut, nach dessen ehemaligem Ordinarius Prof. Dr. R.-J. Meyer-Jens sie benannt wurde (Lehrstuhl für Leichtbau 2009). Seit kurzem steht sie dem Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI) der Technischen Universität München für Versuchszwecke zur Verfügung. Nach weiterer Ausstattung mit Prüfmaschinen wird der Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion und andere dem LKI angehörige Lehrstühle vermehrt Bauteilversuche in dieser Halle durchführen.

Wegen der zu erwarteten Lärmemissionen gibt es Überlegungen, die Decke zu den darüber liegenden Büroräumen mit einem verbesserten Schallschutz auszustatten. Diese Sanierungsmaßnahme ist in Hinblick auf die Mess- und Vorfertigungsthematik mit dem Verlegen von Wärmedämmelementen vergleichbar.

Ein aus einer früheren Baumaßnahme noch geöffnetes Teilstück der abgehängten Decke legt ein Feld der Geschossdecke teilweise frei. Dieser Ausschnitt wurde als Versuchsobjekt ausgewählt. Er wird begrenzt durch die Längswand auf der Innenseite der Halle, dem Beginn der abgehängten Decke und quer dazu durch zwei Unterzüge. Die Decke und die Unterzüge sind aus Stahlbeton, wobei die Stahlbetonunterzüge verputzt sind. Die Innenwand ist zwischen den Unterzügen mit roten Ziegelsteinen ausgemauert und nicht verputzt. Die abgehängte Decke besteht aus silberfarbenen Aluminiumpanelen, ihre Unterkonstruktion aus Stahlblechprofilen. Die Unterzüge weisen an jeweils zwei Stellen zylindrische Durchbrüche auf, durch die zwei Rohre verschiedenen Durchmessers geführt sind. Die Rohrleitungen sind ebenso aufzunehmen, wie die Durchbrüche.



Abbildung 19: Versuchsobjekt Deckenfeld Meyer-Jens-Halle, links Innenansicht der Halle, rechts geöffneter Deckenfeld

Das Deckenfeld ist ohne Leitern oder Gerüste nicht handnah erreichbar. Die Messungen sind vom Boden der Hallen aus durchzuführen. Rohre und Blechprofile führen zu Verschattungen.

4.4 Kellerraum Gabelsberger Straße

Als drittes Versuchsobjekt wurde ein Raum im Keller eines heute von der Technischen Universität München genutzten dreigeschossigen Altbaus an der Gabelsberger Straße 45 gewählt. Der schmale, lang gezogene Raum liegt unter einem Treppenaufgang, ist dunkel und beengt. Die Raumhöhe variiert stark. Die Mauerwerkswände sind ab Sockelhöhe grob verputzt, der Putz weist große Fehlstellen auf. An den seitlichen Wänden befinden sich Vor- und Rücksprünge und eine Wandnische, deren Rückseite mit Brettern geschlossen wurde. Die dem Zugang gegenüberliegende Schmalseite des Raumes liegt in der Außenwand des Gebäudes. Hier mündet ein zylindrischer Kanal; möglicherweise in der Vergangenheit als Fluchttunnel genutzt. Die Untersicht der Holztreppe ist nur noch zum Teil mit einfachen, manchmal losen Brettern verschalt.

Durch die Messungen ist der gesamte Raum zu erfassen. Die Grenzen des Messfeldes sind auf der einen Seite die Leibung des Zugangs, auf der gegenüberliegenden Seite das Anfangsstück des einmündenden Tunnels.



Abbildung 20: Versuchsobjekt Keller, links Außenwand mit einmündendem Kanal, Mitte Wandnische, rechts Schmalseite mit Zugang.

Der Raum repräsentiert beengte und schlecht beleuchtete Messsituationen. Durch die Versprünge und Unebenheit der Wände und der Decke ergibt sich eine komplexe Geometrie. Durch Rohre, Kabel sowie Vor- und Rücksprünge ergeben sich erhebliche Verschattungen.

4.5 Vergleichende Zusammenstellung der Versuchsobjekte

In untenstehender Tabelle ist zusammengestellt, inwiefern die in 4.1 formulierten Kriterien von den drei ausgewählten Versuchsobjekten erfüllt werden. Die Tabelle zeigt, dass die gewählten Objekte zusammengenommen die Anwendungsgebiete, Messsituationen und kritischen Situationen lückenlos repräsentieren.

Tabelle 4: Vergleich der Versuchsobjekte und Übereinstimmung mit den Auswahlkriterien

Auswahlkriterium \ Versuchsobjekt	Anwendungsgebiet					Messsituation				kritische Situationen							
	Lage innen	Lage außen	großflächige Anwendung	kleinteilige Anwendung	stehende Montage	liegende Montage	komplexe Geometrien	einfache Geometrien	unebene Oberflächen	weitgehend ebene Oberflächen	beengte Raumverhältnisse	große Ausdehnung des Objektes	kleine relevante Details	schlechte Erreichbarkeit	Verschattungen	schlechte Lichtverhältnisse	dem Außenklima ausgesetzt
Fassade Vorhoelzer-Bau		•	•		•	•		•		•	•	•		•			•
Deckenfeld Meyer-Jens-Halle	•		•	•	•	•		•		•			•	•	•		
Kellerraum Gabelsberger Straße	•			•	•	•	•		•		•		•		•	•	

5 Erfassung der Versuchsobjekte mit 3D-Laserscanning

5.1 Hardware 3D-Laserscanning

5.1.1 Allgemeines

Die beschriebenen Versuchsobjekte „Fassade Vorhoelzer-Bau“, „Deckenfeld Meyer-Jens-Halle“ und „Kellerraum Gabelsbergerstraße“ wurden mit fünf verschiedenen 3D-Laserscannern aufgenommen. Ermöglicht wurde dies durch die Unterstützung der Firmen Creaform, Faro, Topcon und Z+F, die uns auf Anfrage mit ihren Messgeräten und Mitarbeitern geholfen haben. Zudem haben wir hausinterne Hilfe in Anspruch nehmen können, da ein Leica Laserscanner am Lehrstuhl für Geodäsie vorhanden ist. Gegenüber den drei „klassischen“ terrestrischen Laserscannern von Leica, Faro und Z+F präsentierte die Firma Topcon eine intelligente Totalstation, die ein Tachymeter und die Scanfunktion eines Laserscanners vereint. Eine weitere Sonderstellung nahm der handgeführte Laserscanner von Creaform ein.






Die Auswahl der 3D-Laserscanner berücksichtigt die unterschiedlichen Gerätetypen: Phasenvergleichsverfahren/Impulslaufzeitverfahren, Laserscanner/Totalstation, terrestrisch/handgeführt. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die Herstellerangaben zu den technischen Daten der hier verwendeten Laserscanner. Die Adressen der Hersteller von 3D-Laserscanner sind im Anhang in Kapitel 14.1 verzeichnet.

Mit jedem verwendeten 3D-Laserscanner sollte, mit Ausnahme des handgeführten Scanners, dieselbe Aufgabe erledigt werden: das komplette Aufmaß der drei Versuchsobjekte als Grundlage für eine anschließende Auswertung bzw. Planerstellung. Dies bedeutete für das Dachgeschoss des Vorhoelzer-Baus die Aufnahme der Giebelseite Süd und der Längsseite Ost mit den ersten fünf Fensterelementen. Der Dachüberstand war ebenso wie der Terrassenboden mit der Brüstung als Begrenzung zu erfassen. Detailpunkte wie einzelne Metallanschlüsse, die aus dem Putz herausragen, sollten nach Möglichkeit auswertbar sein.

Das aufzunehmende Deckenfeld der Meyer-Jens-Halle wurde durch zwei parallele Unterzüge, einer aufgehenden Wand und gegenüberliegend durch den Beginn der abgehängten Decke eingegrenzt. Besonderes Augenmerk war auf das Erfassen der Versorgungsleitungen mit den zugehörigen Aussparungen in den Unterzügen zu richten, die Messungen erfolgten über Kopf.

Der beengte Kellerraum in der Gabelsbergerstraße 45, begrenzt durch seine Decke und Wände, sollte in Gänze aufgenommen werden. Durch die geringe Breite des Kellerraums von ca. 0,9 Metern scannten die Messsysteme im unteren möglichen Entfernungsbereich.

Tabelle 5: Herstellerangaben zu technischen Daten der verwendeten 3D-Laserscanner

Hersteller	creaform	Faro	Leica	Topcon	Zoller + Fröhlich
					
Typ	REVscan	LS 880	ScanStation	IS Imaging Station	IMAGER 5006
Meßverfahren	-	Phasendifferenzverfahren	Impulslaufzeit	-	Phasendifferenzverfahren
Laser					
Wellenlänge	-	785nm	532nm	-	
Strahldivergenz	-	0,25 mrad (0,014°)	-	-	0,22 mrad (0,0126°)
Auflösung					
Vertikale Auflösung	-	0,009° (40.000 3D-Pixel auf 360°)	5.000 Punkte/Spalte	-	0,0018°
Horizontale Auflösung	-	0,00076° (470.000 3D-Pixel auf 360°)	20.000 Punkte/Reihe	-	0,0018°
Meßbereich					
Gesichtsfeld	Panorama	Panorama	Panorama	Panorama	Panorama
Entfernung	max 0,3m	0,6m - 76m	1,0m - 300m	1,5m - 2.000m	max. 79m
horizontal	360°	360°	360°	360°	360°
vertikal	360°	320°	270°	-	310°
Meßgeschwindigkeit					
Meßgeschwindigkeit	18.000 Messungen/sec	120.000 Punkte/sec	4.000 Punkte/sec	20 Punkte/sec	500.000 Punkte/sec
Abmessungen Sensor					
Länge xBreite xHöhe	160mm x260mm x210mm	400mm x160mm x280mm	265mm x370mm x510mm	-	190mm x286mm x372mm
Gewicht	1,0kg	14,5kg	19,5kg	-	14kg
originäre Meßwerte	Polygonnetz	Punkte X,Y,Z	Punkte X,Y,Z	Punkte X,Y,Z	Punkte X,Y,Z
Genauigkeit					
Strecke	bis zu 50µm	3mm bei 25m	6mm bei 50m	5mm bei 250m, 10mm bei 2.000m	-
Winkel	-	-	-	0,3 mgon/1"	0,007° (horiz. + vertikal)

Die Bedienung des Laserscanners blieb in der Hand der Mitarbeiter bzw. der Mitarbeiterin der Hersteller, die nach vorheriger Abstimmung Anzahl der Standpunkte, Aufstellungsort, Gerätehöhe sowie die Auflösungsrate bestimmten. Die Art und Anzahl der gewählten Passpunkte, die zur Registrierung der einzelnen Scans notwendig sind, variierte je nach Messsystemhersteller. Meistens wurden DIN A4-Passmarken und/oder Kugeln verwendet, für die Totalstation wählte der Firmenmitarbeiter Münzen als Hilfsmittel. Für das Scannen mit dem handgeführten Scanner wurde eine Vielzahl von reflektierenden Referenzpunkten auf das Objekt aufgeklebt. Abbildung 21 zeigt die insgesamt verwendeten Hilfsmittel. Die Verknüpfung der Punktwolken mehrerer

Scannerstandpunkte zu einer Gesamtpunktwolke führte der Mitarbeiter bzw. die Mitarbeiterin mit der firmeneigenen Software ebenfalls selber durch.

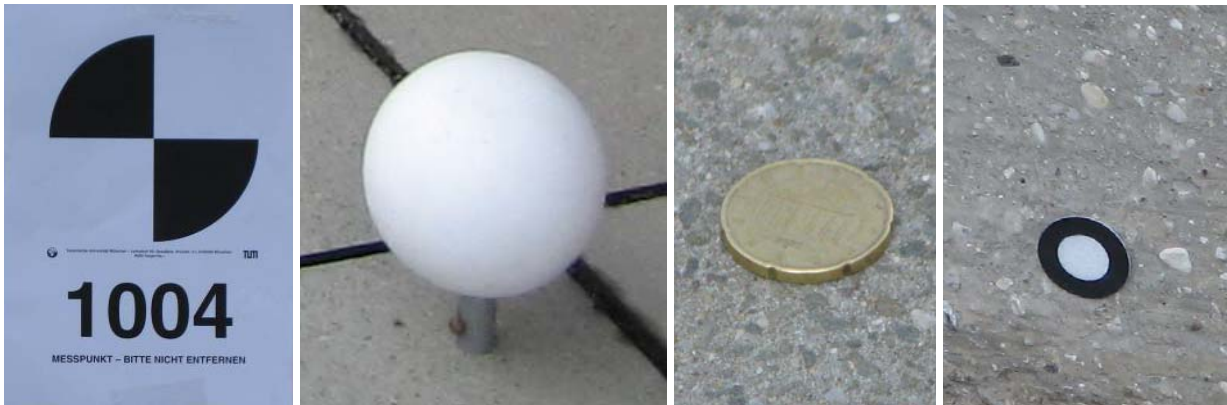


Abbildung 21: Verwendete Hilfsmittel für die Registrierung - DIN A4-Passmarke, Kugel, Münze, reflektierender Referenzpunkt (von links nach rechts)

Die Inbetriebnahme der terrestrischen Laserscanner und Totalstation am Messort unterschieden sich kaum. Nach Positionierung des Scanners auf einem Stativ und Ausrichten mit Libelle erfolgte die Feinjustierung automatisch im Gerät. Das Gewicht der getesteten terrestrischen Scanner war noch gut handhabbar. Die Bedienung erfolgte wahlweise am Gerät selbst oder über ein verbundenes Steuergerät, wie z.B. Laptop oder PDA. Grundsätzlich wurden bei den verwendeten Geräten Akkus als Stromquelle genutzt, die eine Lebensdauer von einigen Stunden haben und während einer Aufnahme wechselbar sind. Eine Sonderstellung bei Inbetriebnahme, Justierung und Bedienung nahm gerätebedingt der handgeführte Scanner ein. Dieser musste während des Scanvorgangs sowohl an einem Laptop als auch am Stromnetz angeschlossen sein.

Nach einer kurzen Vorstellung des jeweiligen Herstellers mit zugehörigem Messsystem werden die gerätespezifischen Besonderheiten bei den Aufnahmen an der TU München nachfolgend beschrieben.

5.1.2 Faro

Die Firma Faro entwickelt und vertreibt computergestützte Messmaschinen und Messsoftware für die Erstellung digitaler 3D-Modelle und 3D-Messungen. Sitz der Firmenzentrale ist Lake Mary, Florida, USA. Die europäische Zentrale von Faro befindet sich in Korntal-Münchingen bei Stuttgart, weltweit werden über 850 Mitarbeiter beschäftigt. Die Produktpalette umfasst u.a. Messarme, Lasertracker, Laserscanner sowie CAD-basierte Mess- und Reporting-Software. Zusätzlich werden verschiedene industriespezifische Softwarepakete angeboten. Laut Herstellerangabe werden die Messsysteme u.a. von international tätigen Firmen aus der Automobil-, Luftfahrt- und Elektronikindustrie im Produktions- und Qualitätssicherungsprozess eingesetzt. Die Anwendungsgebiete liegen in den Bereichen Fertigung, Fabrikplanung,

Bestandsaufnahme, Ingenieurvermessung, Unfall- und Tatortdokumentation sowie Denkmalschutz (Faro Deutschland 2009).

Abbildung 22 zeigt den für die Forschungsarbeit verwendeten Laserscanner vom Typ Faro LS 880 HE 80, dem Vorgänger des aktuellen Modells „Photon“. Mit einem Handheldcomputer (PDA) ist der Laserscanner fernsteuerbar, ein Anschluss an einen PC oder der unmittelbare Aufenthalt in der Nähe des Geräts während des Scanvorgangs ist nicht notwendig. Eine optionale Kamera, die eine reale Farbgebung der Punktwolke ermöglicht (Faro Europe 2007), war bei den Aufnahmen an der TUM nicht montiert. Das Messverfahren basiert auf dem Phasenvergleichsverfahren, die maximale Aufnahmegeschwindigkeit beträgt 120.000 Punkte/Sekunde. Der Laser ist in die Klasse 3R eingruppiert, somit ist eine direkte Bestrahlung des Auges durch den Laserstrahl unbedingt zu vermeiden. Zusammengesetzt aus den vier Modulen Lasereinheit, Spiegel, PC- und Basis-Modul lassen sich die Einzelteile des Scanners austauschen oder erneuern (Faro Deutschland 2009).



Abbildung 22: Faro LS 880 HE 80 (Quelle: linkes Bild Faro; rechtes Bild Autor)

Bei den drei an der TUM aufgenommenen Objekten wurden für eine spätere Registrierung der Punktwolken Kunststoffkugeln als Referenzmarken eingesetzt. Beim Einscannen des Dachgeschosses des Vorhoelzer-Bau wurden vier Kugeln so verteilt, dass sie von den zwei gewählten Standpunkten aus gut zu erkennen sind. Die Auflösung wurde auf ein Viertel der maximalen Auflösung eingestellt. Für die Aufnahmen im Keller der Gabelsbergerstraße 45 wurden drei Standpunkte gewählt, um bei kleinster Auflösung den vorgegebenen Raum zu erfassen. Drei im Raum verteilte Kugeln dienten der Registrierung. Das Deckenfeld in der Meyer-Jens-Halle wurde mit nur einem Standpunkt und ebenfalls einem Viertel der maximalen Auflösung gescannt. Die Aufnahmen der drei Situationen dauerte ungefähr zwei Stunden, anschließend registrierte der Mitarbeiter der Firma Faro zugehörige Dateien und entfernte unbrauchbare Punkte.

5.1.3 Leica

Den Markennamen Leica teilen sich drei unabhängige Unternehmen, wobei die Firma Leica Geosystems Lösungen und Dienstleistungen zur Erfassung von Daten in 3D anbietet.

Leica Geosystems ist ein global tätiges Unternehmen mit Sitz in der Schweiz und seit der Gründung vor fast 200 Jahren zu einem Unternehmen mit mehr als 2.400 Mitarbeitern gewachsen. Die weltweit betreuten Kunden nutzen die Produkte zur Erfassung, Modellierung, Visualisierung und Analyse räumlicher Daten. Genannte Beispielobjekte sind Dämme, Häuser, Autos, Pipelines, Präzisionswerkzeuge, Modelle und Wälder.

Die HDS-Produktfamilie (HDS, High-Definition Surveying) umfasst die Leica 3D-Laserscanner, wozu die Laufzeitmesssysteme Leica ScanStation und Leica HDS3000 gehören, aber auch ein auf dem Phasenvergleichsverfahren basierendes Gerät, der Leica HDS4500 (baugleich mit Z+F IMAGER 5006). Zusätzlich zu der Hardware werden die Softwarepakete Cyclone und CloudWorx™ angeboten, die eine Referenzierung und Auswertung der Messdaten ermöglichen (Leica Geosystems 2009).

Der in der Forschungsarbeit eingesetzte Laserscanner Leica ScanStation, siehe Abbildung 23, verfügt über einen Messbereich von 300 m (bei 90% Reflexion), die Scanrate beträgt 4.000 Punkte/Sekunde.



Abbildung 23: Leica ScanStation (Quelle: linkes Bild Leica; rechtes Bild Autor)

Dank der freundlichen Unterstützung des Lehrstuhls für Geodäsie, Univ.-Prof. Wunderlich konnten die drei zuvor beschriebenen Gebäudesituationen mit dem lehrstuhleigenen Leica-Scanner aufgenommen werden. Ein wissenschaftlicher Mitarbeiter führte das Aufmaß und die Registrierung durch. Als Referenzmarken wurden gleichzeitig DIN A4 Passmarken und Kunststoffkugeln verwendet. Um die Güte der Registrierung zu optimieren, wurden die Passmarken nach dem eigentlichen Scanvorgang mit höherer Auflösung erneut aufgenommen. Für das Registrieren des Dachgeschosses Vorhoelzer-Bau wurden drei Passmarken und drei Kugeln verwendet. Eine ausreichende Anzahl, um die Punktwolken der drei gewählten Standpunkte zu einer Fassade mit Dachüberstand und Teilen der Terrasse zusammenzufassen. Zusätzlich wurde die der Ostseite gegenüberliegende Brüstung ohne Stativ vom Fußboden aus gescannt, siehe Abbildung 24. Verschattungen durch den vorhandenen Rücksprung ließen sich so in diesem Bereich minimieren.



Abbildung 24: Aufnahme Rücksprung Brüstung

Die Messdaten des Kellers Gabelsbergerstraße basieren auf Aufnahmen von zwei Scannerstandpunkten. Das Anbringen von Referenzmarken erwies sich auf den feuchten, verdreckten Wandflächen als schwierig. Daher erfolgte die spätere Registrierung über diskrete Punkte, die in beiden Scans sichtbar sind. Mit der entsprechenden Software funktionierte die Registrierung der Punktwolken auch ohne Verwendung von Passpunkten gut. Das Deckenfeld Meyer-Jens-Halle wurde von einem Standpunkt aus aufgenommen, somit waren hier keine Passmarken erforderlich. Um die Scanzeit und Datenmenge zu verringern, wurde der Scanbereich bereits am Gerät auf das Deckenfeld begrenzt. Insgesamt war die Auflösung gegenüber den Punktwolken, die mit einem Phasenvergleichs-Scanner erzeugt wurden, geringer. Es ergab sich eine Gesamtscanzeit für die drei Objekte inklusive mehrerer Detailscans von knapp vier Stunden.

5.1.4 Zoller+Fröhlich

Zoller+Fröhlich, abgekürzt Z+F, wurde 1963 in Wangen im Allgäu gegründet, wo sich der heutige Stammsitz des mittelständischen Familienunternehmens befindet. Mit zwei Tochterfirmen in England und Nordamerika sowie mehreren Vertriebskooperationen ist Z+F international vertreten, die Firmengruppe beschäftigt insgesamt mehr als 180 Angestellte. Seit Beginn der 1990er entwickelt und vertreibt Z+F Messsysteme mit dazugehöriger Software. Zunächst wurde ein Lasersystem zur Bahn- und Tunnelvermessung entwickelt, 1996 wurde das „Visuelle 3D-Lasermesssystem zur Bestandsaufnahme von Objekten“ präsentiert (Zoller+Fröhlich 2009).

Der verwendete Laserscanner Z+F IMAGER 5006, siehe Abbildung 25, liefert Messergebnisse mit einer maximalen Abtastrate von 500.000 Punkte/Sekunde, die dabei generierte Datenmenge beträgt 720 Mio. Bildpunkte je Scanvorgang. Durch das der Messtechnik zugrunde liegendem Phasendifferenzverfahren ist die Reichweite auf maximal 79 Meter begrenzt. Die Steuerung des Scanners kann aus weiter Entfernung ohne direkten Zugang zum Scanner über verschiedene Schnittstellen und einem PDA oder Notebook erfolgen. Eine Verbindung über das Internet ist möglich, so dass die Steuerung von einem beliebig entfernten Punkt in einem kabellosen Betrieb erfolgen kann. Als Anwendungsbereiche werden Architektur, Denkmalschutz, Fabrik-/Anlagenplanung, Tunnel, Brücken, Städte, Wälder (Inventur, Holzqualität), Forensik,

Unfallvermessung und Virtual Reality genannt. Die angebotenen Softwaremodule ermöglichen unter anderem die Bedienung der Hardware, Generierung von 2D-Grundrissen und Höhenschnitten, Erstellung von Gitternetzansichten und 3D-CAD-Modellen, Durchführung von Kollisionsprüfungen sowie Soll-Ist-Vergleichen (Zoller+Fröhlich 2009).



Abbildung 25: Z+F IMAGER 5006 (Quelle: linkes Bild Z+F; rechtes Bild Autor)

Mit dem Z+F Laserscanner IMAGER 5006 wurden in ca. zweieinhalb Stunden die drei Gebäudesituationen erfasst. Bei der Aufnahme der Fassade Vorhoelzer-Bau wurden insgesamt fünf Standorte, zwei für die Giebelseite und drei für die Längsseite, gewählt. Elf auf DIN A4 Papier gedruckte Messmarken dienten dem anschließenden Verknüpfen der Scans zu einer Gesamtpunktwolke. Als hilfreich erwies sich die Montage des Scanners auf einem fahrbaren Stativ mit Rollen, so dass ein Standortwechsel einfach und schnell möglich war. Für die beiden Standorte gegenüber der Giebelseite wurde die Scanauflösung „Superhigh“ (20.000 Punkte/360°, Scandauer 6 Min. 44 Sek.) gewählt, für die Standorte an der Längsseite der Fassade „High“ (10.000 Punkte/360°, Scandauer 3 Min. 22 Sek.). Zur Aufnahme des Kellerraumes in der Gabelsbergerstraße wurde in der Auflösung „High“ von zwei Standpunkten aus gescannt, fünf Messmarken wurden im Sichtfeld des Scanners verteilt. In der Meyer-Jens-Halle wurden ebenfalls zwei Standorte gewählt. Die Auflösung war auf „Superhigh“ eingestellt, zur späteren Referenzierung der Punktwolke wurden vier Messmarken verwendet.

5.1.5 Topcon

Die Europazentrale der Topcon Corporation befindet sich bei Rotterdam in den Niederlanden. Seit der Gründung im Jahre 1932 stellt das japanische Unternehmen optische Instrumente her. Das heutige Tätigkeitsfeld umfasst die Herstellung und den Vertrieb optischer und elektronischer Instrumente in den Bereichen Medizin, Vermessung und Bauwesen (Topcon Europe 2009).

Die Topcon Imaging-Station IS, siehe Abbildung 26, vereint eine Totalstation mit einem Laserscanner („intelligente Totalstation“). Zusätzlich erfassen zwei integrierte Digitalkameras Gegebenheiten mit einem Weitwinkel sowie 30-fachem optischen Zoom und erzeugen ein farbiges Livebild auf dem Touchscreen des Geräts. Nach Definition eines zu vermessenden

Objekts können Punkte automatisch gemessen oder ein regelmäßiges Punktraster aufgenommen werden. Die maximale Aufnahmegeschwindigkeit des Scanners beträgt dabei 20 Punkte/Sekunde. Für reflektorlos messbare Punkte in bis zu 2000 Meter Entfernung ist eine Feinanziehung mit dem Zoom möglich. Das Gerät kann über eine kabellose Fernsteuerung bedient werden. Mit der zugehörigen Software besteht die Möglichkeit, die aufgenommenen Daten weiter zu verarbeiten, zum Beispiel zum Erzeugen von 3D-Modellen. Für die Topcon Imaging-Station IS werden u.a. die topografische Vermessung, der Bergbau und das Bauwesen als Anwendungsgebiete genannt (Topcon Deutschland 2008).

Fast gleichzeitig mit den Aufnahmen an der TU München wurde die Totalstation Imaging-Station IS neu auf dem Markt eingeführt. Bei der Bedienung des fabrikneuen Geräts wurde zunächst ein kleines, aber relevantes Detail übersehen: zum vertikalen Messen war das Entfernen des Traggriffs notwendig. Daher wurde auf ein Aufmaß des Deckenfeldes in der Meyer-Jens-Halle verzichtet. Messungen im Kellerraum Gabelsbergerstraße wurden aufgrund der Lichtverhältnisse und Beengtheit als zu problematisch gewertet. Die Aufnahmen beschränkten sich somit auf die Fassade des Vorhoelzer-Baus. Die drei Standpunkte des Messgerätes wurden mit Münzen markiert und zueinander vermaßt. Das Objekt wurde mit diskreten Punkten an markanten Ecken und einem Punktraster vermessen, zusätzlich wurden Digitalbilder aufgenommen. Der Abstand der im Raster gescannten Punkte betrug auf dem Messobjekt ca. fünf Zentimeter. Zusätzlich wurde der Fußpunkt der Fassade im Türbereich, siehe Abbildung 26, in einem Raster von ca. einem Zentimeter detaillierter gescannt.



Abbildung 26: Topcon Imaging-Station IS, Fußpunkt Pfosten im Bereich der Türen

5.1.6 Creafom

Creafom, 2002 in Quebec, Kanada gegründet, bietet 3D-Digitallösungen an: 3D-Scannen, Reverse Engineering, Digital Manufacturing und Anwendungen in der Medizin. Das Unternehmen wuchs in 5 Jahren von 5 auf über 160 Mitarbeiter an und unterhält Niederlassungen weltweit. Die Kunden stammen aus verschiedenen Industriebereichen, wie beispielsweise Automobil, Luft- und Raumfahrt, Biomechanik, Bildungswesen, Kulturerhaltung, Architektur und Multimedia. Die angebotene Produktlinie Handyscan umfasst selbstpositionierende, handgeführte 3D-

Laserscanner. Je nach Anforderung kann zwischen drei Produkten gewählt werden: REVscan, siehe Abbildung 27, der daraus weiterentwickelte EXAscan mit besserer Auflösung und Genauigkeit und ERGOscan, der speziell für medizinische Anwendungen entwickelt wurde. Die Scanner wiegen ungefähr ein Kilogramm und sind in Laserklasse 2 bzw. 1 (ERGOscan) eingeordnet, also augensicher. Die zugehörige Software VxScan dient der Kalibrierung, Datenerfassung und dem Rendering in Echtzeit. Anschließend kann sie auch für eine Oberflächenoptimierung genutzt werden. Neben den verschiedenen Produkten bietet Creaform auch Dienstleistungen an. Hierzu gehören das 3D-Scannen mit Nachbearbeitung, CAD, Metrologie sowie Konformitätsbewertung (Creaform 2009).



Abbildung 27: Creaform REVscan (Quelle: linkes Bild Creaform; rechtes Bild Autor)

Gegenüber den vorgenannten Laserscannern nahm der handgeführte Laserscanner REVscan eine Sonderstellung ein. So war es nicht das Ziel, die Versuchsobjekte an der TU München gänzlich einzuscannen. Vielmehr war die Aufgabenstellung das Erfassen eines Detailpunktes mit hoher Genauigkeit. Diese Daten könnten ergänzend zum terrestrischen Laserscanning, zur Tachymetrie oder Photogrammetrie in ein Gesamtobjektmodell eingebunden werden. Voraussetzung dafür ist allerdings die Festlegung eines gemeinsamen Referenzsystems im Vorfeld. Bei den Aufnahmen ist zu berücksichtigen, dass der Scanner mit einem Kabel sowohl an einen Laptop als auch an das Stromnetz angeschlossen werden muss. Gegenüber den terrestrischen Scannern ist aufgrund der Selbstpositionierung des Geräts eine höhere Anzahl an Referenzpunkten notwendig, so dass die Vorbereitung des einzuscannenden Objekts zeitaufwendiger als der eigentliche Scanvorgang sein kann. Hier sind Hilfsmittel, beispielsweise Netze, gebräuchlich, die im Freien vor Bewegungen durch Wind zu schützen sind.

Erste Überlegungen zum Scannen einer Fensterbank an der Längsfassade des Vorhoelzer-Baus wurden verworfen, da ein Anbringen einer ausreichend verteilten Anzahl an Referenzpunkten ohne Hilfskonstruktion nicht möglich erschien. Als Versuchsobjekt wurde eine Stahlflasche gewählt, die auf der Giebelseite Nord des Vorhoelzer-Baus aus dem Putz herausragt. Eine Farbjustierung am Gerät verringerte den Einfluss der Oberflächenreflektanz des Stahlteils. Gegenüber den betrachteten Laserscannern ist das Ergebnis des Scanvorgangs keine Punktwolke, sondern ein trianguliertes Netz. Dieses wird während der Aufnahme am Bildschirm des Laptops dargestellt.

Eventuelle Lücken sind gleich sichtbar und sollten durch nochmaliges Scannen möglichst geschlossen werden.

5.2 Software 3D-Laserscanning

5.2.1 Allgemeines

Zum Auswerten der Daten wurden eine nicht-kommerzielle und verschiedene kommerzielle Softwarelösungen betrachtet. Im Rahmen der Forschungsarbeit stellten uns die Firmen Geomagic, Kubit und Lupos3D ihre Programme mit Testlizenzen zur Verfügung. Die Software Cyclone von Leica konnte am Lehrstuhl für Geodäsie der TU München genutzt werden und das Programm Rhino 4.0 wurde als kostenfreie Testversion im Internet herunter geladen. Im Rahmen seiner Dissertation entwickelte ein Mitarbeiter des Lehrstuhls für Bauinformatik der TU München das Programm DissNetz3D (Schleinkofer 2007).

Die auf dem Markt angebotenen Softwareprodukte (Anhang, Kapitel 14.2) lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Modellierung außerhalb von CAD und Bearbeitung der Punktwolke unmittelbar in CAD. Die hier getroffene Auswahl soll einen Überblick über die derzeit vorhandenen Auswerteverfahren ermöglichen. Da sich die Einarbeitung in die einzelne Software als zeitaufwendig und komplex erwies, konnte nicht jedes hier vorgestellte Programm im gleichen Umfang genutzt werden. Kostenintensive Schulungen waren im Rahmen der Forschungsarbeit nicht möglich, im Gegenteil: wir waren auf eine kostenfreie Nutzung der Programme angewiesen.

5.2.2 Geomagic

Für die Forschungsarbeit wurden Lizenzen für das Programm Geomagic Studio und Geomagic Qualify für eine großzügig bemessene Laufzeit zur Verfügung gestellt.

Geomagic Studio ist eine Software zur Bearbeitung von Punktwolken, die u.a. folgende Funktionen bietet: automatisierte Flächenrückführung, Erstellen von Polygon- und NURBS-Modellen, Bearbeitung komplexer Geometrien oder Freiformteile, Integration aller wichtigen 3D-Scanner und CAD/CAM- Software. Anwendung findet Geomagic Studio u.a. in den Bereichen Produktdesign, Komponentenoptimierung, individualisierte Serienfertigung, technische Analyse, automatisierte Prototypenerstellung und digitale Archivierung.

Geomagic Qualify ist eine Software für den digitalen Soll-Ist-Vergleich zur Qualitätsprüfung von Produkten. Ermöglicht werden u.a. grafische Vergleiche zwischen CAD-Modellen und produzierten Teilen für die Prüfung von Vorserienprodukten, In-Line- oder Produktionsprüfungen, Trendanalysen, 2D- und 3D-Bemaßungen und automatische Prüfberichtserstellung (Geomagic 2009).

5.2.3 Kubit

Die Kubit GmbH entwickelt Software für Vermessung und Datenerfassung. Das hier genutzte Programm PointCloud ist eine AutoCAD Applikation zur Darstellung und Auswertung von 3D-Punktwolken. Neben den speziell für das Auswerten von Punktwolken optimierten Funktionen können alle AutoCAD-Befehle und Applikationen anderer Hersteller am gescannten Objekt angewendet werden. PointCloud kann mit den in das ASCII-Format exportierten Daten von allen gängigen Scannern verwendet werden (Kubit 2009).

5.2.4 Leica

Leica Cyclone ist eine Software zur Verarbeitung von 3D-Punktwolken für die Visualisierung, Navigation, Messung und Modellierung von Laserscan-Daten. Die Client-Server-Architektur der Cyclone Objektdatenbank bietet mehreren Anwendern gleichzeitig die Möglichkeit mit denselben Scannerdaten zu arbeiten. Die Software ermöglicht es, Punktwolken direkt in Objekte für den Export in CAD (oder anderen Anwendungen) zu verarbeiten. Ebenso können Daten aus CAD oder einer anderen Anwendung importiert werden. Das Modul Cyclone-Model bietet zusätzlich Werkzeuge für die Modellierung oder Vermaschung von 3D Punktwolken. Mit der Software Leica CloudWorx kann der Anwender Scandaten in CAD-Programmen wie AutoCAD und MicroStation anzeigen und weiter verarbeiten. Mit Leica Cyclone Publisher/TruView können Punktwolken Dritten zur Betrachtung und für einfache Messungen zugänglich gemacht werden (Leica Geosystems 2009).

5.2.5 Lupos3D

Die Firma Lupos3D erarbeitet 3D-Vermessungskonzepte für Bestandsaufnahmen und ist auf die Bereiche 3D-Laserscanning, Photogrammetrie und Softwareentwicklung spezialisiert. Die angebotenen Dienstleistungen umfassen Architekturvermessung, Deformationsanalysen, 3D-Stadtmodelle, Geländemodelle, Tunnelvermessung, Industrie- & Anlagendokumentation, 3D-Baudokumentationen, Bildpläne, CAD-Pläne/Modelle sowie Softwareprodukte für die 3D-Vermessung. Die eigens entwickelte Software LupoScan dient zur Auswertung der Laserscanner-Daten. Es lassen sich 3D-Laserscans in einem übergeordneten Koordinatensystem referenzieren und 3D-Objekte, Grundrisse, Vermaschungen sowie Orthofotos aus den 3D-Punktwolken erstellen. Farbinformationen von Fotos können auf die Oberflächen projiziert werden. Verformungen können bezüglich einer Sollform (Ebene, Zylinder) bzw. zwischen Scans verschiedener Epochen bestimmt werden. Ein Weiterverarbeiten der Ergebnisse in verschiedenen CAD-Programmen ist möglich (Lupos3D 2009).

5.2.6 Rhino

Rhinoceros, kurz Rhino, ist ein CAD-Programm um NURBS-3D-Flächen- und Volumenmodelle am Windows PC zu modellieren. Rhino kann Kurven, Flächen und Volumenkörper erzeugen, bearbeiten, analysieren und konvertieren. Polygonnetze und Punktwolken werden ebenfalls

verarbeitet. Mit dem optionalen Plug-In RhinoReverse ist eine Flächenrückführung möglich, eingeleasene Punktwolken werden in formnahe NURBS-Flächen und Flächenverbände umgewandelt. Die Testversion von Rhino beinhaltet alle Funktionen der Vollversion und hat keine Zeitbeschränkung, kann aber insgesamt nur 25-mal Daten speichern (FlexiCAD 2009).

5.2.7 DissNetz3D

Das Programm DissNetz3D implementiert den für die Dissertation „Wissensbasierte Unterstützung zur Erstellung von Produktmodellen im Baubestand“ (Schleinkofer 2007) entwickelten Algorithmus zur Rekonstruktion eines Oberflächenmodells aus einer 3D-Punktwolke. Die Dissertation stellt einen Weg vor, um unter der Prämisse eines hohen Automatisierungsgrades Baubestand geometrisch zu erfassen und als planungstaugliches, digitales Gebäudemodell aufzubereiten. Dazu werden ausgedünnte Punktwolken mithilfe einer Dreiecksvernetzung in Segmente eingeteilt. Aus der Verschneidung aneinandergrenzender Segmente entsteht ein Oberflächenmodell, aus welchem sich Volumenkörper ableiten lassen. Die Doktorarbeit ist ein Beispiel für das Interesse der Forschung an der automatisierten Auswertung von Scandaten im Bereich der Bauinformatik.

5.2.8 PolyWorks

Die Duwe-3d AG vertreibt die Software PolyWorks der kanadischen Firma InnovMetric Software Inc. in Deutschland, Österreich und der Schweiz. PolyWorks ist eine universelle Softwareplattform für die optische 3D-Messtechnik und wird für zahlreiche Aufgabenstellungen eingesetzt, vorwiegend in der Automobil- und Zulieferindustrie. Die Duwe-3d AG verfügt über langjährige Erfahrung in optischer Messtechnik und Datenauswertung (Duwe-3d 2009).

Leider konnte keine kostenfreie Teststellung für die Forschungsarbeit zur Verfügung gestellt werden, aber bei einem Besuch an der TUM demonstrierte Herr Duwe, Vorstand der Duwe-3d AG die Leistungsfähigkeit der Software.

5.3 Auswertung Messdaten 3D-Laserscanning

Die eingescannten Daten lassen sich nach den folgenden Kriterien einteilen.

Objekttyp:	Fassade Vorhoelzer-Bau, Keller Gabelsbergerstraße, Deckenfeld Meyer-Jens-Halle
3D-Laserscanner (Hersteller):	Creaform, Faro, Leica, Topcon, Zoller+Fröhlich
Auswertesoftware:	DissNetz3D, Geomagic Qualify/Studio, Leica Cyclone, Kubit, LupoScan, Rhino

Wegen der Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten wurden nicht alle Aufmaße aller Objekttypen mit jedem Programm bearbeitet. Bei der Auswertung der Daten richteten wir unser Augenmerk insbesondere auf die Fassade des Vorhoelzer-Baus, da an diesem Objekt die Anbringung der

Musterfassade geplant wurde. Die Punktwolken wurden mit drei unterschiedlichen Softwareprogrammen bearbeitet.

Die Verwendung der Software Leica Cyclone bot sich an, da am Lehrstuhl für Geodäsie die Möglichkeit zur uneingeschränkten Nutzung bestand. Geomagic ermöglichte uns eine reibungslose Verlängerung der Lizenzen. Zusätzlich bot sich eine Anwendung dieser beiden Programme an, da jedes eine unterschiedliche Herangehensweise bei der Auswertung der Punktwolken vorgibt. Die Bearbeitung der Messdaten mit dem Programm Geomagic Studio beginnt üblicherweise mit dem Umwandeln der Punktwolke in ein vermaschtes Polygonnetz. Bei dem Programm Cyclone von Leica definiert man geometrische Objekte (Ebenen, Zylinder, etc.) anhand zuvor ausgewählter Punkte. Mit dem Verschneiden von Ebenen können Punkte oder Linien als Ecken oder Kanten erzeugt werden. Eine vergleichbare Vorgehensweise gibt die AutoCAD-Applikation PointCloud von Kubit vor. Bei der Auswertung wurde hier auf das Erreichen eines möglichst günstigen Verhältnisses von Scanzeit zur Nachbearbeitungszeit geachtet. Generell sollte mit dieser Arbeit weder eine Evaluierung der Software noch der Laserscanner stattfinden. Vielmehr stand das Aufzeigen der heutigen Möglichkeiten zur Auswertung von Messdaten im Vordergrund. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bearbeitung der Punktwolken durch ungelernete und ungeübte Personen erfolgte.

Die aufgenommenen Punktwolken haben zum Teil Datenmengen erreicht, mit denen die Grenzen der Leistungsfähigkeit unserer Hardware erreicht wurden. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden für die Auswertung der Laserscans zwei wie folgt ausgestattete Computer genutzt: Prozessor 2,33 GHz, Arbeitsspeicher 4 GByte bzw. Prozessor 3,0 GHz, Arbeitsspeicher 1 GByte. In einem Fall ergab sich nach dem Registrieren zusammengehörender Punktwolken eine Dateigröße von 5,3 Gigabyte; ein Bearbeiten der Datei war nicht möglich. Um akzeptable Rechenzeiten und eine zufriedenstellende Handhabung bei der Auswertung zu gewährleisten, musste die Größe der Scandateien der Phasenvergleichsscanner reduziert werden. Programme bieten die Möglichkeit, aus dem Raster systematisch Punkte zu entfernen. Nachdem vertikal und horizontal jeder zweite Punkt automatisch gelöscht wurde, hat eine Punktwolke als so genanntes „Subsample 2“ nur noch ein Viertel der ursprünglichen Punktzahl. „Subsample 4“ hat dementsprechend nur noch ein Sechzehntel der ursprünglichen Punktzahl. Abbildung 28 zeigt schematisch das Ergebnis einer solchen Punktreduzierung am Beispiel der Fassade des Dachgeschosses Vorhoelzer-Baus. Die Reduzierung der Daten wurde mit einem Programm von Z+F durchgeführt.

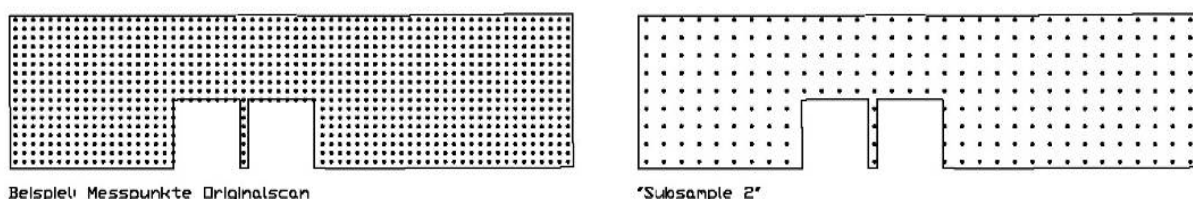


Abbildung 28: Reduzierung der Dateigröße durch Reduzierung der Punktzahl

Darüber hinaus ist eine gezielte Reduzierung der Punktwolke zweckmäßig, bei der alle Messpunkte an den maßgebenden Stellen erhalten bleiben. Hierzu bietet z.B. das Programm Geomagic Studio ein Werkzeug an. Mittels Krümmungsanalyse analysiert die Software die Lage benachbarter Punkte zueinander. Dadurch erfolgt ein Ausdünnen nur in den Bereichen, wo eine Reduzierung zu keinem bedeutenden Informationsverlust führt. Zum Beispiel könnte eine deutliche Verringerung der Punktmenge für den überwiegenden Anteil einer großflächigen Wand mit einfacher Geometrie wünschenswert sein. Im Bereich der Kanten, wo mehr Punkte zum genauen Abbilden benötigt werden, sollen aber alle Informationen erhalten bleiben. Die Krümmungsanalyse liefert dafür die notwendigen Informationen über die Geometrie.

Die aufgenommenen Objektdaten werden vom jeweiligen Laserscanner in der Regel in einem herstellereigenen Format gespeichert. Dieses ist nicht immer mit einer unternehmensfremden Software lesbar. Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit generierten Messdaten wurden mit einem Programm von Z+F in zwei gängige Dateiformate (Points File .pts, ASCII-Format .xyz) umgewandelt und anschließend ausgedünnt. Tabelle 6 stellt die Anzahl der Punkte und die zugehörige Dateigröße der Scans zusammen. Auffällig ist, dass bei gleicher Punktanzahl die Scans von Z+F und Faro im Herstellerformat wesentlich weniger Speicherplatz benötigen als in einem anderen Format. Der Grund dürfte in der Datenkomprimierung liegen, die im Herstellerformat automatisch erfolgt. Das Ausdünnen des Punktrasters reduziert nicht zwangsläufig die Dateigröße, dennoch wirkt sich das Verringern der Punktmenge positiv und deutlich spürbar auf die Handhabung der Scans aus.

Tabelle 6: Übersicht über Punktanzahl, Dateigröße der Laserscannerdateien

Objektyp	Messsystemhersteller	Standpunkt	Auflösung	Original Scan		Subsample 1 Dateiformat .pts		Subsample 2 Dateiformat .pts		Subsample 4 Dateiformat .pts	
				Anzahl Punkte	Dateigröße [kB]	Anzahl Punkte	Dateigröße [kB]	Anzahl Punkte	Dateigröße [kB]	Anzahl Punkte	Dateigröße [kB]
Vorhoelzer-Bau, Fassade	Faro	1	1/4	18.292.005	138.360	18.292.005	932.715	4.574.472	233.252	1.144.121	58.339
		2	1/4	21.117.826	128.959	21.117.826	1.125.774	5.280.796	281.514	1.320.972	70.421
	Leica	1		145.649							
		2		175.147							
		3		234.731							
		4		65.072							
	Z + F	1	superhigh	70.097.697	767.494	70.097.697	1.844.222	18.696.517	461.059	4.710.039	115.267
		2	superhigh	72.592.367	765.162	72.592.367	1.862.048	19.148.126	465.513	4.825.455	116.377
		3	high	22.263.213	191.170	22.263.213	562.457	5.727.812	140.611	1.434.451	35.157
		4	high	25.510.006	184.909	25.510.006	647.901	6.552.781	161.970	1.643.847	40.495
5		high	25.856.794	185.147	25.856.794	659.596	6.635.919	164.903	1.663.806	41.219	
Gabelsbergerstraße, Kellerraum	Faro	1	minimal	6.561.910	17.489	6.561.910	329.179	1.641.126	82.298	411.039	20.610
		2	minimal	6.588.006	21.830	6.588.006	327.446	1.647.632	81.863	412.438	20.490
		3	minimal	6.579.470	21.768	6.579.470	331.901	1.645.520	82.987	412.045	20.778
	Leica	1		308.740							
		2		288.629							
	Z + F	1	high	27.783.893	144.451	27.783.893	1.053.469	9.640.954	263.395	2.609.833	65.871
		2	high	30.225.783	140.531	30.225.783	1.067.669	9.903.864	266.949	2.639.919	66.756
	Meyer-Jens-Halle, Deckenfeld	Faro	1	1/4	40.163.136	105.612	40.163.136	2.026.998	1.552.946	78.197	384.218
Leica		1		453.847							
Z + F		1	superhigh	14.860.429	624.507	14.860.429	4.080.309	4.097.082	101.885	1.066.673	25.496
	2	superhigh	25.798.804	629.690	25.798.804	720.522	7.124.228	180.204	1.850.189	45.089	

Anmerkung: Die Dateien Meyer-Jens-Halle, Deckenfeld, Messsystemhersteller Faro, "Subsample 2" und "Subsample 4" bilden einen ausgeschnittenen Bereich ab.

Die Auswertung der Messdaten zeigte die Unterschiede der mit verschiedenen Laserscannern aufgenommenen Punktwolken. Diese ergaben sich in erster Linie durch die Anzahl der

Laserscanner-Standorte und die Punktdichte, die vom Messprinzip, Impulslaufzeit- oder Phasendifferenzverfahren, und der gewählten Auflösungsrate abhängig war. Tabelle 7 gibt eine Übersicht über die mit den Laserscannern durchgeführten Aufnahmen.

Tabelle 7: Übersicht Aufnahmen mit Laserscanner

Objekt	Laserscanner	Anzahl Standpunkte	Passmarken	Anzahl Passmarken	gerätespez. Auflösung	Dauer
Fassade Vorhoelzer-Bau	Faro LS880	2	Kugeln	4	Viertel	1 h
	Leica Scan Station	4	Messmarken DIN A4/Kugeln	3/3	484x283, 523x578, 622x259, 855x912	2,5 h
	Z + F Imager 5006	5	Messmarken DIN A4	11	High, Superhigh	1,5 h
	Creaform REVscan	-	Klebepunkte	> 20		
	Topcon Imaging Station IS	3	Münzen	3	Punktraster 5 cm (1 cm)	6 h
Kellerraum Gabelsbergerstraße	Faro LS880	3	Kugeln	3	Minimum	0,5 h
	Leica Scan Station	1	-	-	1088x233	0,5 h
	Z + F Imager 5006	2	Messmarken DIN A4	5	High	0,5 h
Deckenfeld Meyer-Jens-Halle	Faro LS880	1	-	-	Viertel	0,5 h
	Leica Scan Station	2	-	-	942x353	1 h
	Z + F Imager 5006	2	Messmarken DIN A4	4	Super High	0,5 h

Eine hohe Anzahl an Standpunkten hilft Verschattungen zu vermeiden und ermöglicht ein Objekt mit allen Ecken, Kanten, Vor- und Rücksprüngen gänzlich zu erfassen. Die Forderung nach einer großen Anzahl an Standpunkten steht allerdings im Gegensatz zu dem Wunsch nach einer geringen Datenmenge und einer kurzer Dauer des Aufmaßes. Eine Reduzierung der Scannerauflösung verringert vor allem die Datenmenge. Aber insbesondere Kleinteile und filigrane Bauteile erfordern eine hinreichende Anzahl an Messpunkten für eine verlässliche Auswertung. Um eine optimale Balance zwischen der Anzahl der Standpunkte, Auflösung und Datenmenge zu erhalten, ist die Erfahrung und Routine des Vermessungsingenieurs hilfreich.

Folgende Vorgehensweisen werden vorgeschlagen, um den Widerspruch zwischen hohem Detaillierungsgrad und vertretbarer Dateigröße zu begegnen. Nach dem Scannen des Gesamtobjekts in geringer Auflösung werden einzelne Situationen in höherer Auflösung aufgenommen und in die Gesamtpunktwolke eingebunden. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, zunächst das gesamte Objekt in hoher Auflösung aufzunehmen und anschließend die Punktwolke auszudünnen. Wichtige Details werden zuvor aus den einzelnen Scans kopiert, die sich in die

ausgedünnte Gesamtpunktwolke einbinden lassen. Das Ergebnis ist in beiden Fällen eine Punktwolke mit einer hohen Dichte in nur ausgewählten Bereichen.

5.4 Auswertung Fassade Vorhoelzer-Bau

5.4.1 Allgemeines

Ein wesentlicher Bestandteil der Forschungsarbeit ist die Herstellung von Vakuum-Dämmelementen mit anschließender Montage einer Musterfläche am Versuchsobjekt Vorhoelzer-Bau. Diese Messdaten wurden daher mit besonderer Aufmerksamkeit ausgewertet. Die Zielvorgabe lautet somit, aus den Messergebnissen ein Modell zu generieren, auf dessen Basis die Dämmelemente bei unserem Industriepartner Firma Variotec gefertigt und anschließend vor Ort als Muster montiert werden können.

Folgende Bereiche des Dachgeschosses des Vorhoelzer-Baus wurden ausgewertet: die Fassade Giebelseite Süd mit den beiden Türen, ein Teilstück der Fassade Längsseite Ost mit den ersten fünf Fenstern und die Unterseite des Vordachs. Die Weiterbearbeitung der registrierten Punktwolke begann zunächst mit einem Zuschneiden auf den genannten Bereich. Ein Entfernen von Streupunkten und nicht benötigten Messpunkten, beispielsweise hinter den Glasscheiben der Fenster und Türen, folgte.

Je nach Anzahl an Standpunkten zeigten die Laserscans unterschiedlich ausgeprägte Bereiche mit Verschattungen. Die fehlenden Messpunkte führten bei der Auswertung zu Problemen. Es ergaben sich Löcher im erstellten Modell, die durch Interpretation vorhandener Daten zum Teil geschlossen wurden. Dabei besteht zweifellos die Gefahr, Ungenauigkeiten zu erzeugen. Am Beispiel einer Tür- und einer Fensterleibung zeigt Abbildung 29 die bereichsweise fehlenden Messdaten einer Punktwolke. Weitere Ursachen für Verschattungen waren u.a. eine Regenrinne und eine fest montierte Leiter.

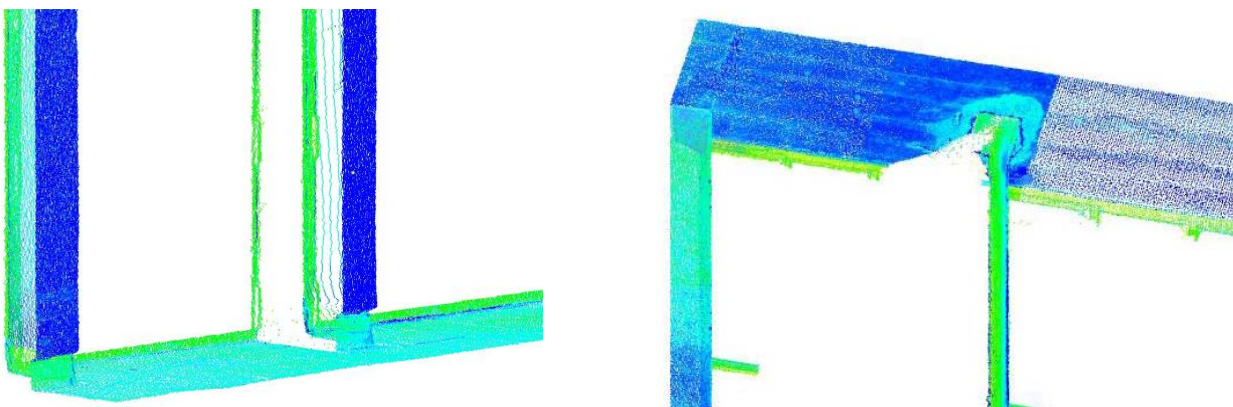


Abbildung 29: Fassade Vorhoelzer-Bau, Verschattungen - links Fußpunkt Tür, rechts Fensterecke

Die Sockelleiste am Fußpunkt der Fassade verdeutlicht ebenfalls die Problematik der Verschattungen. Wie in Abbildung 30 ersichtlich, wurde der horizontale Versatz des Rücksprungs

wegen des erhöhten Standpunkts des Lasers nicht ausreichend erfasst. Für eine Auswertung standen nur ungenaue Messdaten zur Verfügung, eine Interpretation ist schwer möglich. Das Ergebnis im Modell ist ein schräger Verlauf der tatsächlich horizontalen Rücksprungkante.

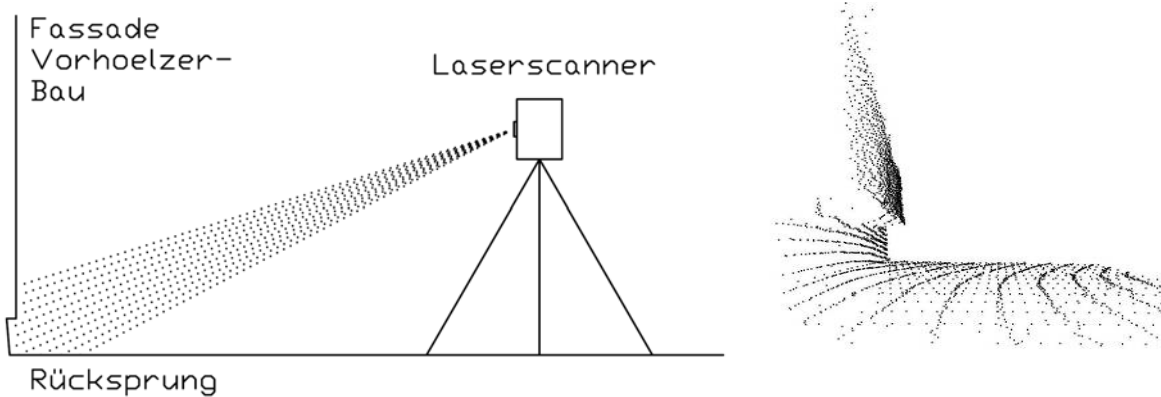


Abbildung 30: links Aufnahme Fassadenrücksprung, rechts Punktwolke

Scannen aus unterschiedlichen Höhen half diesen Verschattungen zu entgehen. Exemplarisch wurde einmal ein zusätzlicher Standpunkt ohne Stativ direkt am Boden gewählt, siehe auch Abbildung 24.

5.4.2 Leica Cyclone

Ziel der Auswertung war das Erstellen eines Fassaden-Kantenmodells als Grundlage für die Fertigung und Montage der Vakuum-Dämmelemente. Dazu werden alle markanten Punkte des Gebäudes benötigt. Um diese auf Basis der Punktwolke zu konstruieren, wurden Hilfsebenen verwendet. Durch ein Verschneiden von zwei bzw. drei Ebenen lassen sich Linien bzw. Punkte erzeugen, siehe Abbildung 31. Hierfür sind grundlegende Fähigkeiten des Anwenders gefragt, die die verwendete Software noch nicht zu leisten vermag: das Erkennen von Flächen und Objekten aus der Lage der Punkte zueinander. Dank seiner kognitiven Fähigkeiten kann der menschliche Wahrnehmungsapparat einzelne Bauteile, wie Wand, Ecke, Fenster, etc. in der Punktwolke als Objekte auffassen.

Bei der Verschneidung von Wandflächen, Leibungen etc. zu einem Gebäudeeckpunkt, werden zusammengehörige Punkte gewählt. Die Leica Software errechnet die Lage der Ebene, die bestmöglich an die Punktmenge angeglichen ist. Bei Definition einer maximal zulässigen Streuung erscheint bei einer Überschreitung eine Warnmeldung. Dieses Feature hilft grobe Ungenauigkeiten zu vermeiden.

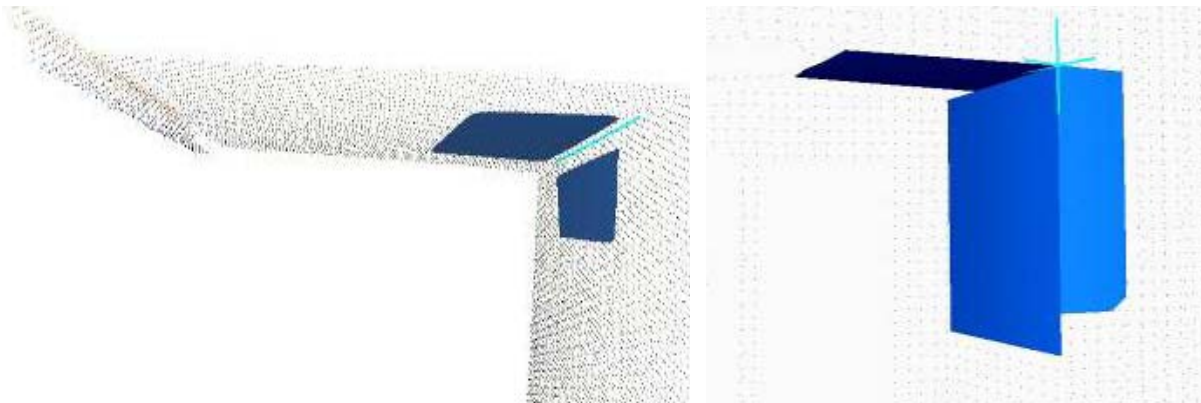


Abbildung 31: Modellieren von Kanten (links) und Ecken (rechts) durch Verschneiden von Ebenen, Leica Cyclone

Mit der Auswahl der Punkte, die das Programm für das Bilden einer Ebene verwendet, greift der Anwender in den Auswerteprozess ein und bestimmt dessen Genauigkeit. Wird ein großer Punktbereich gewählt, so werden möglicherweise zu berücksichtigende Geometrieabweichungen innerhalb der Fläche verschmiert. Wird ein sehr kleiner Bereich gewählt, so besteht die Gefahr eine Verschneidungsfläche zu verwenden, die für das zu entwickelnde Kantenmodell irrelevant ist. Eine weitere Fehlerursache ist in Abbildung 32 dargestellt. Würden zur Abbildung der Silhouette nur die großen Flächen berücksichtigt und der Versprung in der oberen Ecke nicht, so passten die zu planenden Dämmelemente nicht in die Fensterleibung.

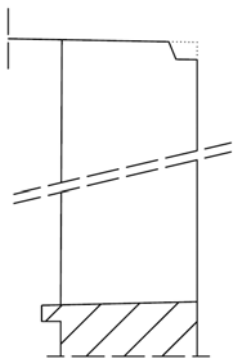


Abbildung 32: Schematischer Schnitt durch Fenster, Fehlermöglichkeit bei der Auswertung

Um den unregelmäßigen Verlauf einer Gebäudekante zwischen zwei Eckpunkten anzunähern, wurden größere Strecken eingeteilt und durch einen Polygonzug abgebildet. Abschnittsweise wurden aus den Punkten aneinander grenzender Gebäudeteile Ebenen gebildet, siehe Abbildung 33, und zu einer Geraden verschritten. Beim anschließenden Zeichnen des Kantenmodells entstand durch das Verbinden der Mittelpunkte der Schnittlinien ein Polygonzug, der den ungleichmäßigen Verlauf einer Gebäudekante annäherte. Je mehr Stützstellen konstruiert wurden, desto besser passte sich das Kantenmodell dem tatsächlichen Verlauf an.

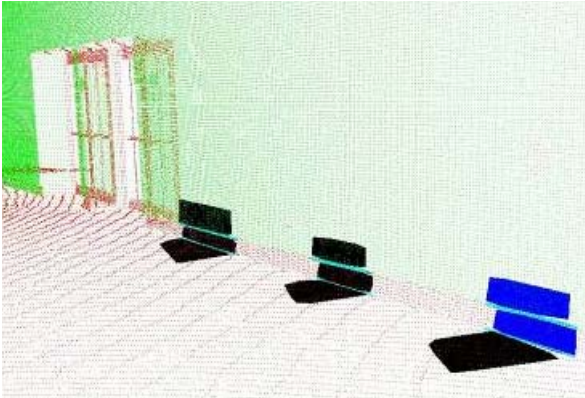


Abbildung 33: Abschnittsweises Modellieren einer Gebäudekante

Für die Modellierung der Details, wie z.B. Metallaschen und Elektroboxen, waren leider allgemein nur wenige Punkte vorhanden. Im Vorfeld der Modellierung war zu beachten, dass die wenigen Punkte nicht als Streupunkte fehl gedeutet und gelöscht wurden. Eine wirklichkeitstreue Abbildung der Objekte gelang nur sehr bedingt, die interpretierten Ebenen gaben die tatsächliche Form nur grob wieder. Ein automatisches Anpassen weniger Punkte an ein geometrisches Objekt, wie z.B. die Metallaschen an einen Quader, scheiterte. Im Gegensatz dazu ließen sich die Regenrinne und die Rohre zur Befestigung der Leiter nach Auswahl zugehöriger Punkte problemlos als Zylinder automatisch abbilden, siehe Abbildung 34.

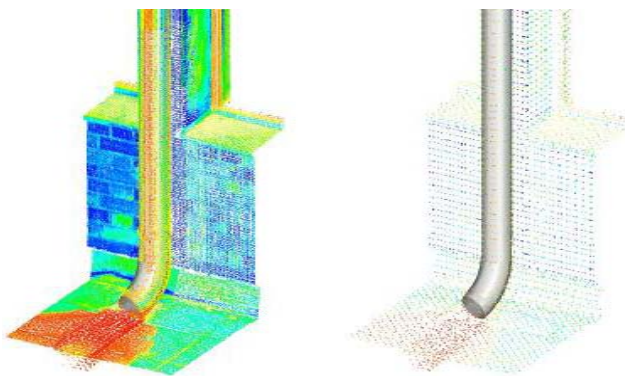


Abbildung 34: Anpassen eines Zylinders an die Regenrinne

Nach dem Konstruieren der benötigten Punkte und Linien mit Leica Cyclone wurden diese in AutoCAD exportiert und ein Kantenmodell gezeichnet. Zwischen den Kanten aufgespannte Flächen vervollständigen das räumliche Modell, siehe Abbildung 35.

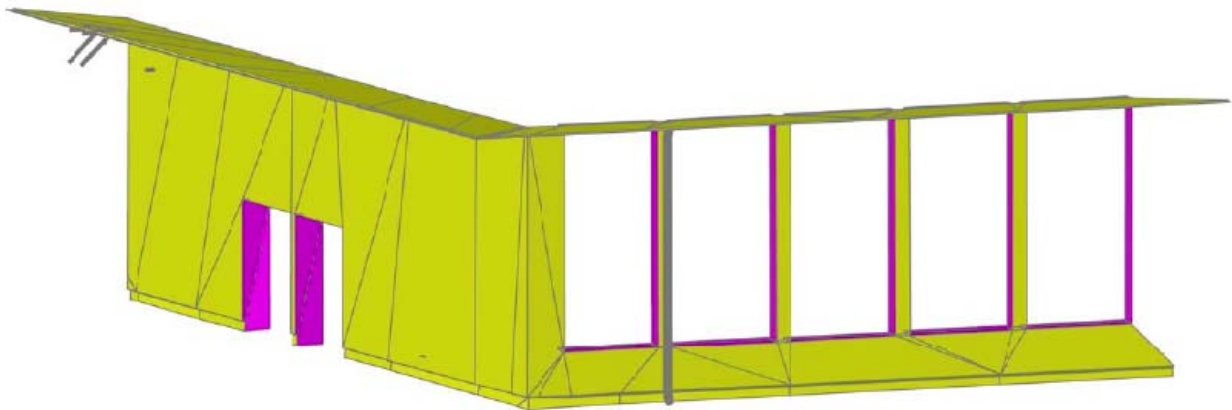


Abbildung 35: Kanten bzw. Flächenmodell des Vorhoelzer-Baus

5.4.3 Geomagic Studio

Die Vorgehensweise bei der Auswertung der Messdaten unterschied sich gegenüber dem Vorgehen mit dem Programm von Leica im Wesentlichen dadurch, dass, anstatt der Verschneidung von zuvor gebildeten Ebenen, ein vermaschtes Polygonnetz aus der Punktwolke generiert wurde. Mit dem Netzmodell entstand ein Abbild des Gebäudes aus Flächen, welches als geometrisches Objekt weiterverwendet werden kann. Ein Kantenmodell wurde nach vorheriger Bearbeitung des Netzmodells vom Programm gebildet.

Nach dem Einlesen der Daten folgte zunächst die Bearbeitung der Punktwolke, indem Ausreißerpunkte und weitere, störende Punkte entfernt wurden. Im Bereich der Fenster wurden beispielsweise die Sprossen entfernt, um die Weiterverarbeitung zu vereinfachen. Durch die Vermaschung der Punktwolke zu einem trianguliertem Netz entstand das Flächenmodell des Vorhoelzer-Baus, wie Abbildung 36 zeigt. Aus der Punktwolke, deren einzelnen Punkte ohne Beziehung zueinander stehen, wurde eine zusammenhängende Geometrie erstellt. Die Löcher im Bereich der Türen und Fenster wurden nachträglich geschlossen, um eine anschließende Kantenfindung zu vereinfachen.

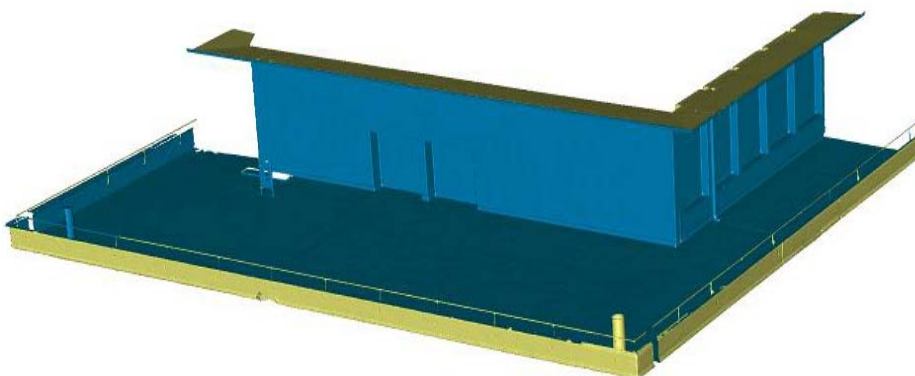


Abbildung 36: Darstellung Polygonnetz Dachgeschoss Vorhoelzer-Bau, Geomagic Studio

Verschattungen waren der Grund für eine ungenügende Vernetzung. Insbesondere bei der Aufnahme der Fassade mit nur zwei Standpunkten zeigte sich die Problematik deutlich. Abbildung 37 stellt die groben Fehlstellen im Bereich der Fensterleibungen und der Verschattungen hinter Regenrinne oder Leiter dar.



Abbildung 37: Fehlstellen im Bereich von Verschattungen

Für die Abbildung von Detailpunkten und komplexen Geometrien zeigte sich die Notwendigkeit einer hohen Punktdichte. Ausschlaggebend für die Qualität des vermaschten Netzes ist die zugrunde liegende Punktwolke. Eine zu geringe Punktzahl führte zu unbefriedigenden Ergebnissen. Abbildung 38 vergleicht Fotos der abzubildenden Objekte mit dem vermaschten Netz.



Abbildung 38: Vergleich Foto mit Netzmodell - ungenügend vermaschte Detailpunkte

Die Aufgabe, aus dem Polygonnetz ein Kantenmodell zur Übergabe an ein CAD-System zu erstellen, sollte von der Software automatisiert erledigt werden. Mittels Krümmungsanalyse kann das Programm die Begrenzungslinien miteinander verbundener Flächen finden. Gegenüber dem Verschneiden von Ebenen entstehen statt Geraden gekrümmte Linien, die den unregelmäßigen Verlauf der Gebäudekanten möglichst genau wiedergeben sollten.

Im Rahmen der Forschungsarbeit konnten von den drei vorhandenen Netzmodellen zwei nicht genutzt werden, weil diese zu viele Löcher aufwiesen oder eine zu geringe Punktdichte hatten. Bei dem verwendeten Netzmodell entstand trotz aufwendiger Nachbearbeitung in der Umgebung der Kanten ein sehr „welliges“ Modell, das den wirklichen Verlauf der Gebäudekanten nur bedingt wiedergibt. Zudem wurde zum Beispiel im Bereich des Sockels der Rücksprung nur durch eine statt durch zwei Kanten wiedergegeben. In Abbildung 39 ist links der Türbereich mit den generierten Kanten dargestellt, rechts ein Vergleich zu dem Kantenmodell (grün) aus der Verschneidung von Ebenen (siehe 5.4.2). Muss die unregelmäßige Geometrie eines Objektes (z.B. verformungsgerechtes Aufmaß) wirklichkeitsgetreu wiedergegeben werden, so ist eine hochwertige Punktwolke eine zwingende Voraussetzung. Dies gilt umso mehr, wenn das Eingreifen des Anwenders gering sein soll.

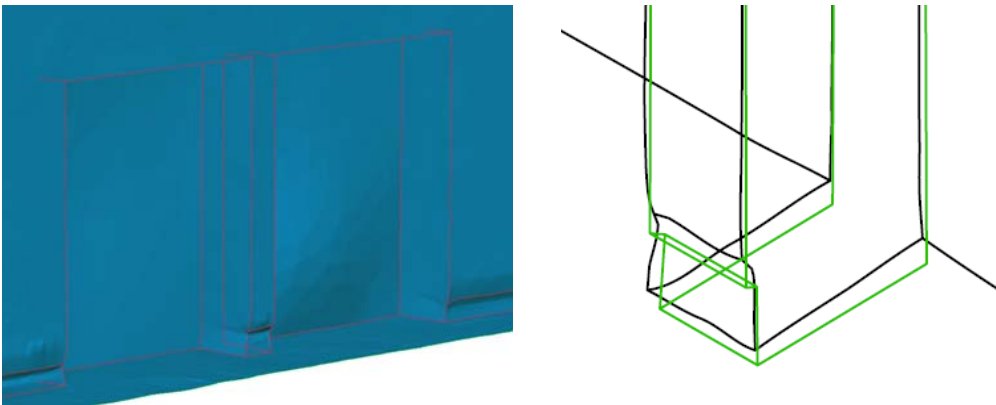


Abbildung 39: „welliger“ Verlauf der Kanten im Netzmodell (links), Vergleich verschiedener Modelle (rechts)

Zum Erkennen der Objektstruktur ist eine farbige Punktwolke von großem Vorteil. Beim Export der Daten in ein allgemein übliches Format sollte daher darauf geachtet werden, dass die Intensitäts- bzw. Farbwerte nicht verloren gehen. Gerade bei kleinen Detailpunkten ist es für das menschliche Auge wichtig, ein kontrastreiches Abbild zu haben. Mit der Option, Fotos auf die Punktwolke zu projizieren, werden die Informationen der Messdaten noch deutlicher. Passende Bilder können von der Software entzerrt und auf die Punktwolke projiziert werden, siehe Abbildung 40.



Abbildung 40: Fototextur auf Punktwolke

5.4.4 Kubit PointCloud

Die Punktwolkenbearbeitung mit dem Programm PointCloud von Kubit ähnelt der in Kapitel 5.4.2 beschriebenen Vorgehensweise mit Leica Cyclone. Unterschiedliche Zielsetzungen führten aber zu unterschiedlichen Ergebnissen. Mit dem Programm PointCloud wurde versucht, ein möglichst günstiges Verhältnis von Scanzeit zu Bearbeitungszeit zu erreichen. Anschließend wurde die Auswirkung auf die Genauigkeit betrachtet. Der Grund für diese Herangehensweise liegt in der häufig genannten Kritik, dass die arbeitsintensive Nachbearbeitung der Messdaten den Vorteil der kurzen Objektaufnahme zunichte macht.

Für das Arbeiten mit PointCloud wurden die Punktwolken in das programmspezifische *.ptc-Format umgewandelt. Der Vorteil dieses Formates liegt in dem kompakt geordneten Abspeichern der Daten. Dies führte zu einem beschleunigten Ladevorgang und einer schnellen Darstellung in AutoCAD. Zur Organisation der importierten Punktwolken stand mit dem Programmaufsatz PointCloud ein Bereichsmanager zur Verfügung, in dem Teile der Punktwolken einzeln editiert sowie temporär ein- und ausgeblendet werden konnten. Um ein schnelles und effizientes Bearbeiten zu gewährleisten, besteht die Möglichkeit, nur den sichtbaren Bereich der Punktwolke darstellen zu lassen. Für die Auswertung der Punktwolke sind verschiedene Befehle verfügbar. Die wichtigsten Funktionen sind das Erstellen und Verschneiden von Ebenen, aus welchen Schnittlinien bzw. Schnittpunkte gewonnen werden können. Eine weitere Funktion ermöglicht das Anpassen von Zylindern.

5.4.5 Vergleich der Modelle

Auf Basis der Punktwolken entstanden Modelle, die einen Bereich der Fassade des Vorhoelzer-Baus abbilden. Für die im Rahmen dieser Arbeit zu erstellende Musterfassade soll ein Modell als Grundlage für die Vorfertigung der Vakuum-Dämmelemente dienen. Um die Qualität der generierten Modelle beurteilen zu können, wurden die verarbeiteten Punktwolken miteinander verglichen.

Die Evaluierung der Messergebnisse erfolgte über die Darstellung vorhandener Abweichungen der Modelle voneinander. Zeigen die auf unterschiedliche Art und Weise gewonnenen Modelle nahezu gleiche Abmessungen und Form, so ist anzunehmen, dass das Objekt gut abgebildet ist. Variieren die Ergebnisse, so ist nach den möglichen Fehlerquellen zu fragen. Das Messsystem, die Auswertesoftware und/oder der Anwender sind als solche in Erwägung zu ziehen. Vom Anwender verursachte Ungenauigkeiten sind sowohl bei der Bedienung der Messgeräte als auch der Software möglich. Die Genauigkeit eines generierten Modells lässt sich allerdings nie ganz exakt feststellen, weil es von Messungenauigkeiten freie Vergleichswerte nicht geben kann.

Die Betrachtung der Güte der entstandenen Modelle geschah auf zwei unterschiedliche Weisen. Zunächst wurden die Modelle als ganzes Objekt untereinander und mit der Punktwolke verglichen. Punktabweichungen wurden grafisch dargestellt und statistisch ausgewertet.

Anschließend wurden die in den Modellen gemessenen Strecken einander und einem Handaufmaß gegenübergestellt.

5.4.6 Vergleich der Objekte mittels Punktabweichungen

Die Software von Geomagic bietet die Möglichkeit, die Abstände zweier Modelle zueinander auszuwerten und grafisch darzustellen. In der Qualitätskontrolle eines gefertigten Produkts lassen sich auf diese Weise Abweichungen zu einer Referenzform mittels Soll-Ist-Abgleich finden. Diese Arbeit vergleicht Punktwolken und die daraus entstandenen Netz- und Kantenmodelle miteinander. Die Anzahl der Modelle und die Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten ist nachstehender Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Zusammenstellung Modellkombinationen, Fassade Vorholzer-Bau

Faro	Punkt- wolke												
	Netz- modell	x											
	Kanten- modell 1	x	x										
	Kanten- modell 2	x	x	x									
Leica	Punkt- wolke	x	x	x	x								
	Netz- modell	x	x	x	x	x							
	Kanten- modell 1	x	x	x	x	x	x						
	Kanten- modell 2	x	x	x	x	x	x	x					
Z + F	Punkt- wolke	x	x	x	x	x	x	x	x				
	Netz- modell	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
	Kanten- modell 1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
	Kanten- modell 2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Modell	Punkt- wolke	Netz- modell	Kanten- modell 1	Kanten- modell 2	Punkt- wolke	Netz- modell	Kanten- modell 1	Kanten- modell 2	Punkt- wolke	Netz- modell	Kanten- modell 1	Kanten- modell 2
Laser- scanner		Faro				Leica				Z + F			

Beim Vergleich der Punktwolken mit den daraus entwickelten Modellen verdeutlichten sich die Unterschiede der Modellbildung und der Auswertung. Eine Beurteilung der Genauigkeit erfolgte anhand der Abweichungen der Modelle verschiedener Laserscanner zueinander. Das Programm Geomagic Qualify gibt sowohl eine farbige Darstellung der Abweichungen als auch eine zugehörige Statistik aus, siehe Abbildung 41. Diese wurde ausgewertet und in einer gemeinsamen Tabelle für alle betrachteten Modelle zusammengefasst.

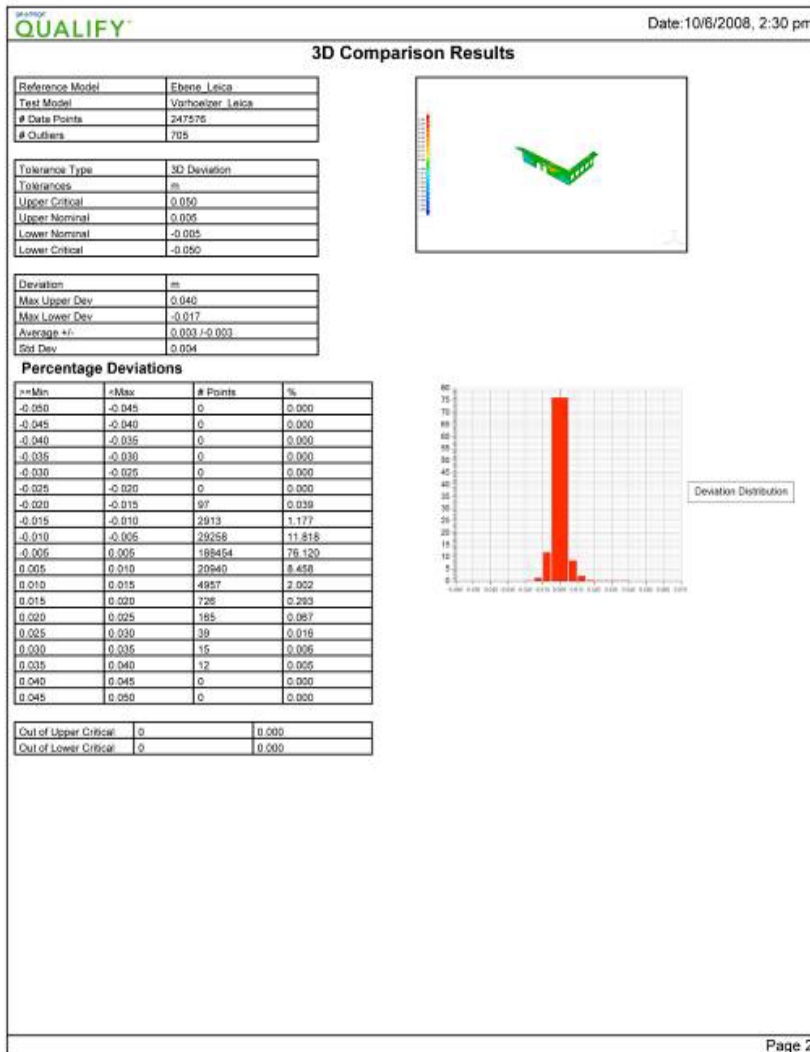


Abbildung 41: statistische Auswertung, Geomagic Qualify

Da es eine fehlerfreie Referenz nicht geben kann, ist mit den Zahlenangaben zur Genauigkeit sehr vorsichtig umzugehen. Die Werte dürfen nicht als tatsächliche Abweichungen oder Messungenauigkeiten missverstanden werden. Bei der Aufnahme der Objekte mit den unterschiedlichen Laserscannern wurde kein gemeinsames Koordinatensystem verwendet. Dadurch liegen die Punktwolken der einzelnen Scanner zueinander gedreht und verschoben im Raum. Durch einen im Programm Geomagic Qualify implementierten Best-Fit-Algorithmus wurden die Modelle rechnerisch optimal übereinander gelegt, was allerdings nicht zwangsläufig der tatsächlichen Lage entspricht. Damit ist eine quantitative Beurteilung der Modellabweichungen nur sehr begrenzt möglich. Vielmehr war die qualitative Beurteilung der Ergebnisse von Interesse. Keine bzw. geringfügige Unterschiede in Form und Abmessung der Punktwolken und Modelle zeigen tendenziell eine hohe Güte der Messungen. Aus großen Abweichungen lässt sich auf geringe Messgenauigkeiten schließen.

Außer in Abbildung 42 werden die Hersteller der Laserscanner nachfolgend namentlich nicht genannt, sondern durch die Buchstaben A, B und C unterschieden. Punktwolken werden mit PW, Netzmodelle mit NM und Kantenmodelle mit KM abgekürzt. Die Kantenmodelle werden je nach Auswertesoftware zusätzlich in KMa und KMb unterteilt. Unterschiedliche Zahlen hinter den verglichenen Modellen zeigen, dass Modelle, die auf verschiedenen Laserscannern basieren, betrachtet werden.

In Abbildung 42 wird für die drei verwendeten Laserscanner die Anzahl der gewerteten Messpunkte mit zugehöriger Anzahl an Ausreißern dargestellt. Grundlage ist der Vergleich der Punktwolken mit dem daraus generiertem Netzmodell. Die Unterschiede in der Punktdichte sind neben der gewählten Auflösung und der Anzahl der Scannerstandorte den einzelnen Messverfahren geschuldet.

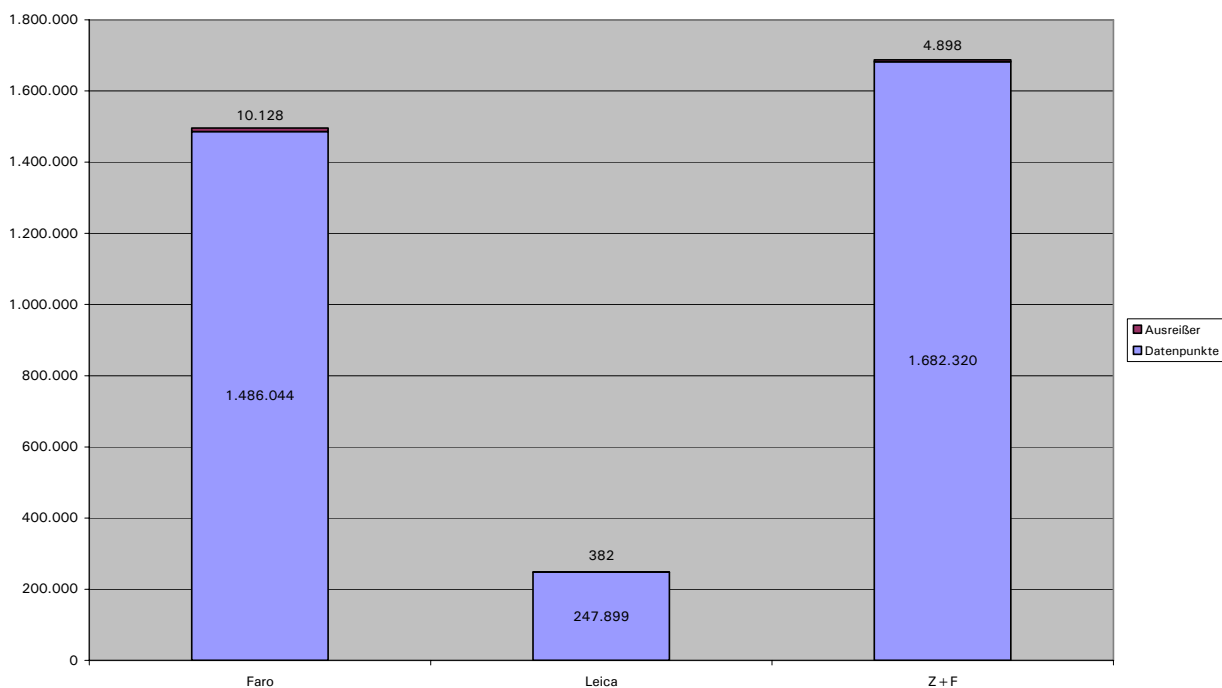


Abbildung 42: Punktzahl Punktwolke/Netzmodell

Bei Betrachtung des Verhältnisses der Punktzahl zu den Ausreißerpunkten in Abbildung 43 zeigt sich der hohe Anteil an Ausreißerpunkten bei den Vergleichen zwischen Netz-/Kantenmodell mit einem Kantenmodell. Durch die Reduzierung des Messergebnisses auf vergleichsweise einfache geometrische Formen wurden mehr Messpunkte als Ausreißer gewertet.

Ausreißerpunkte sind solche Punkte, die das Programm Geomagic aufgrund ihrer Lage nicht in die statistische Auswertung einbezieht. In Abbildung 43 ist das Verhältnis Ausreißer- zu Datenpunkte normiert dargestellt, die Gesamtpunktzahl eines Vergleiches wird also zu 100 Prozent gesetzt. Die einzelnen Balken geben den Mittelwert zusammengehöriger Datensätze der drei Laserscanner wieder.

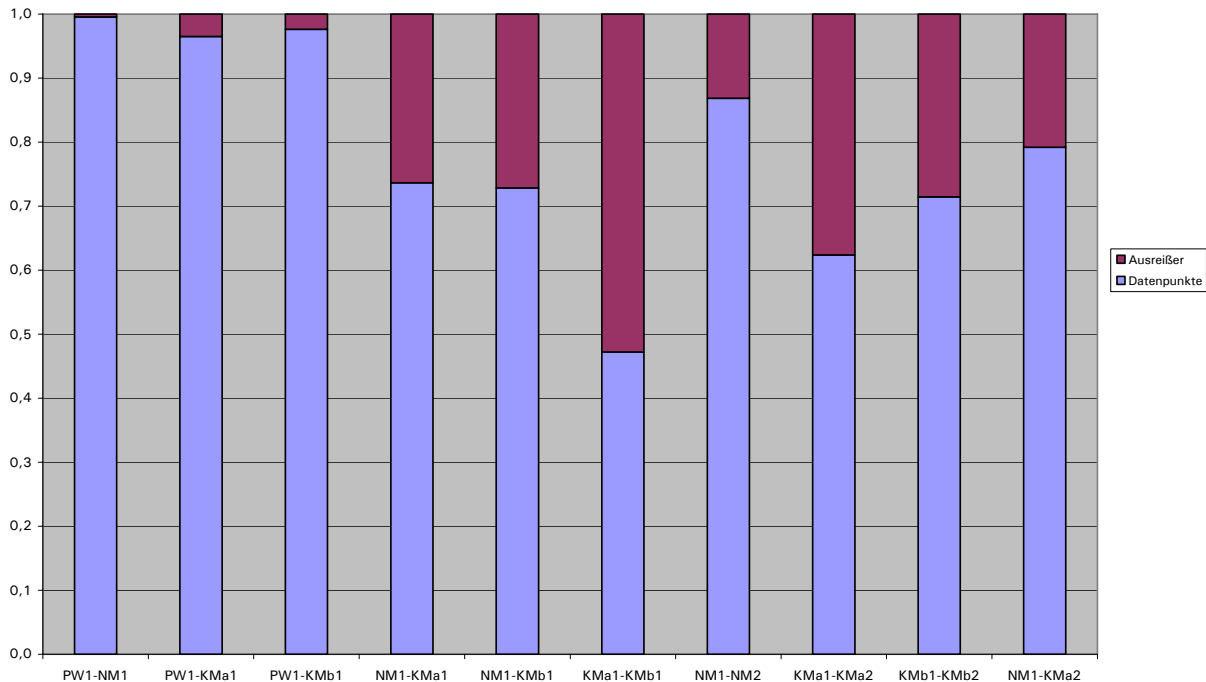


Abbildung 43: Punktzahl Punktwolke/Kanten-/Netzmodell

- Vergleich Punktwolke mit Netzmodell auf Grundlage desselben Laserscanners

Zur Beurteilung der Güte der Modelle wurde zunächst das Netzmodell mit der als Basis dienenden Punktwolke verglichen. Abweichungen werden durch unterschiedliche Farben dargestellt, kritische Bereiche sind dadurch leicht erkennbar. Bei der Vermaschung der Punktwolke zu einem Netzmodell entstanden, wie in Abbildung 44 erkennbar, nur sehr geringe Abweichungen. Diese traten dort auf, wo die Güte der Punktwolke unzureichend war. Bei der Fassade Vorhoelzer-Bau waren dies Detailbereiche mit zu geringer Punktdichte, beispielsweise ein lose hängendes Kabel, eine Leiter oder Stahllaschen. Hier unterschieden sich die drei Modelle. Wurden diese kritischen Bereiche wegen zu geringer Punktzahl und –genauigkeit schon im Vorfeld als Ausreißer gelöscht, zeigte die Auswertung eine vermeintlich gute Übereinstimmung zwischen Punktwolke und Netzmodell. Die Unterschiede zwischen den Modellen ließen hier deshalb keinen direkten Schluss auf ihre Qualität zu. Insgesamt zeigten die Ergebnisse die sehr gute Übereinstimmung zwischen Netzmodell und Punktwolke auf nahezu 100 Prozent der Fläche.

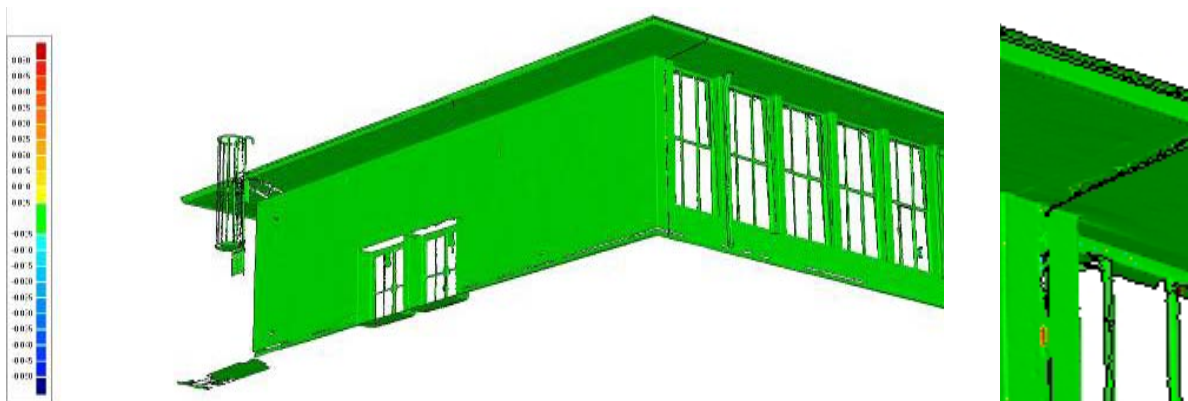


Abbildung 44: grafischer Abgleich Punktwolke/Netzmodell

- Vergleich Punktwolke mit Kantenmodell auf Grundlage desselben Laserscanners

Größere Abweichungen ergaben sich beim Vergleich der Punktwolke mit dem Kantenmodell. Dabei wurden Flächen zwischen den einzelnen Kanten aufgespannt. Durch die Überlagerung des Modells mit der Punktwolke wurden die Unebenheiten der Fassade sichtbar. Die grafische Auswertung in Abbildung 45 zeigt die Bereiche, die beim Anbringen einer Musterfassade gegebenenfalls anzugleichen sind.

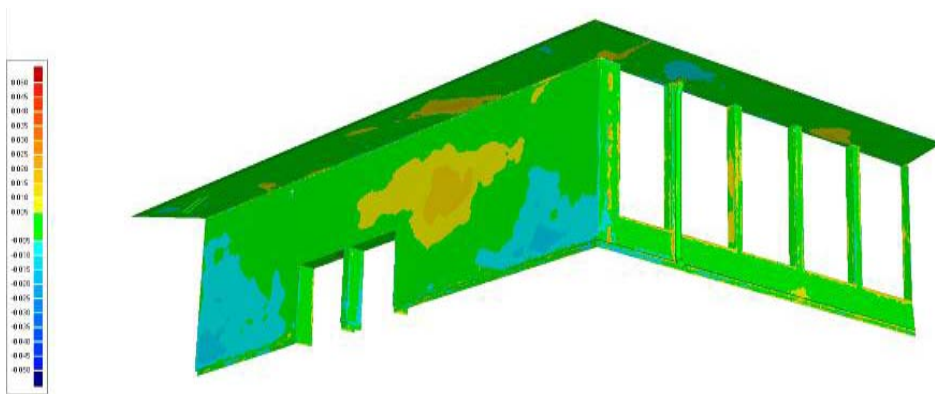


Abbildung 45: grafischer Abgleich Punktwolke/Kantenmodell

Die Genauigkeit eines Kantenmodells ist in einem großen Maße vom Anwender abhängig, der den Detaillierungsgrad für jeden Bereich festlegen muss. Am Beispiel der Verblechung der Fensterbank, siehe Abbildung 46, lässt sich die Problematik weiter erläutern. In einer hochaufgelösten Punktwolke sind die Kanten des Bleches und Einkerbungen im Putz leicht erkennbar und können im Kantenmodell nachgebildet werden. Ist die Auflösung des Scan zu grob oder soll der Aufwand gering gehalten werden, wird ein abstrakteres Modell erstellt. Die grafische Auswertung zeigt dann größere Ungenauigkeiten. In dieser Forschungsarbeit wurde mit beiden Varianten gearbeitet. Am Beispiel der Fensterbank sei noch auf folgende Problematik hingewiesen. Sollte die vorhandene Blechverkleidung im Zuge der Sanierung entfernt werden,

würde sich die Geometrie der Fensterbank durch den Rückbau ändern. Dies ist bei der Modellierung zu berücksichtigen.

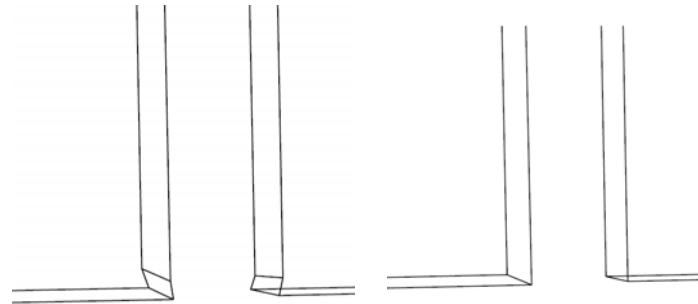


Abbildung 46: unterschiedliche Modellierung der Aufkantung eines Fensterbleches

Im Bereich von Verschattungen war die Modellgenauigkeit oft nicht zufriedenstellend. Aufgrund fehlender Punkte mussten bei der Modellierung Annahmen getroffen werden, die zu Ungenauigkeiten führten. Dies spiegelt sich in Abbildung 47 wieder, in der an den Rändern ein erheblicher Anteil an Punktabweichungen größer 50 Millimeter sichtbar ist. Weitere Ursachen für große Abweichungen waren die schwer modellierbaren Knicke der Regenrinne und die Anschlusspunkte der Dachleiter. Hier zeigten sich Unterschiede in den Punktwolken unterschiedlicher Scanner. Bei einer automatischen Erkennung der Objekte als Zylinder führten Punktwolken mit hoher Punktdichte zu Abweichungen kleiner als ± 5 Millimeter, die bei einem anderen Scan mehr als 50 Millimeter betragen. Insgesamt lag der Großteil der Punktabweichungen in einem Genauigkeitsbereich von ± 15 Millimetern, was als gute Übereinstimmung zwischen Kantenmodell und Punktwolke gewertet wurde.

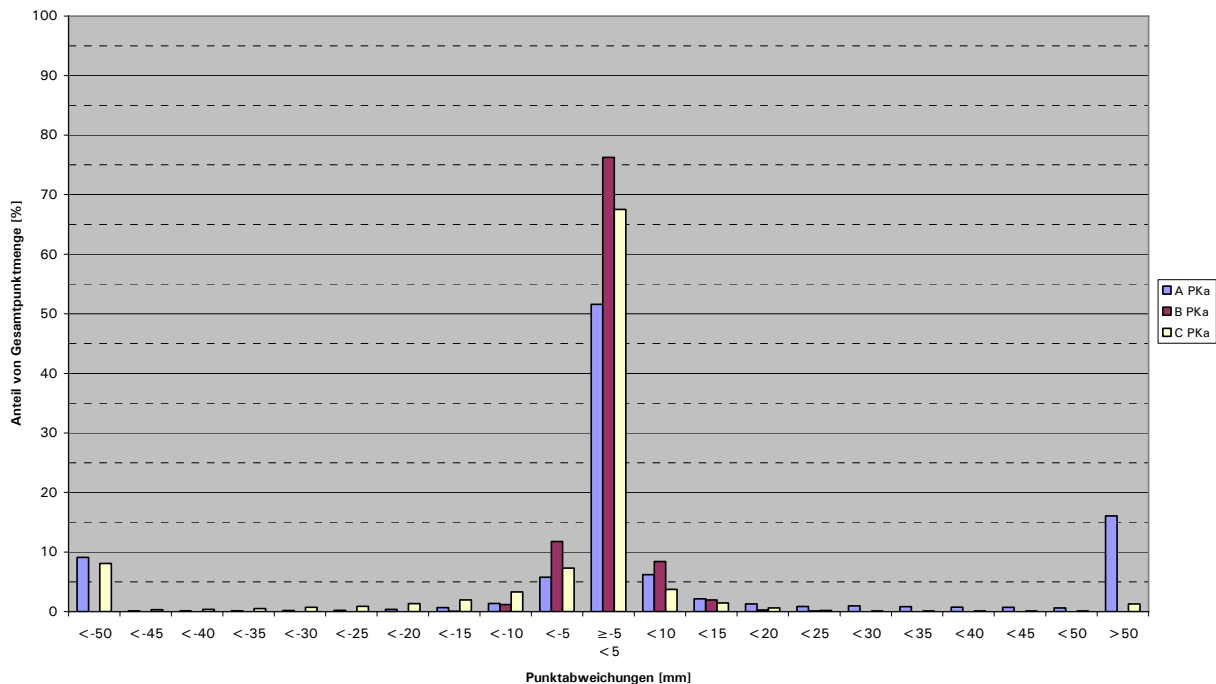


Abbildung 47: Punktgenauigkeit Punktwolke/Kantenmodell

Die Modelle, die unter dem Aspekt der raschen Auswertung erstellt wurden, zeigten deutlich größere Abweichungen. Hier lagen, abhängig von der Güte Punktwolke, nur zwischen 25 und 50 Prozent der Abweichungen in einem Bereich kleiner als ± 5 Millimeter.

- Vergleich Netzmodell mit Kantenmodell auf Grundlage desselben Laserscanners

Zusätzlich zum Vergleich Punktwolke/Kantenmodell wurde auch das Netzmodell mit dem Kantenmodell verglichen. Erwartungsgemäß ähnelten sich die grafischen Auswertungen sehr, deutlich waren die Unebenheiten des Netzmodells gegenüber den ebenen Flächen des Kantenmodells zu erkennen. Durch die Vermaschung der Punktwolke veränderte sich allerdings die Häufigkeitsverteilung der Punktabweichungen, wie Abbildung 48 zeigt. Ein Grund sind die Kanten, die durch die Vernetzung abgerundet werden und dadurch stärker von dem scharfkantigen Modell abweichen. Mit dem Glätten der Punktwolke bei der Vernetzung nahmen aber die Abweichungen größer 50 Millimeter deutlich ab.

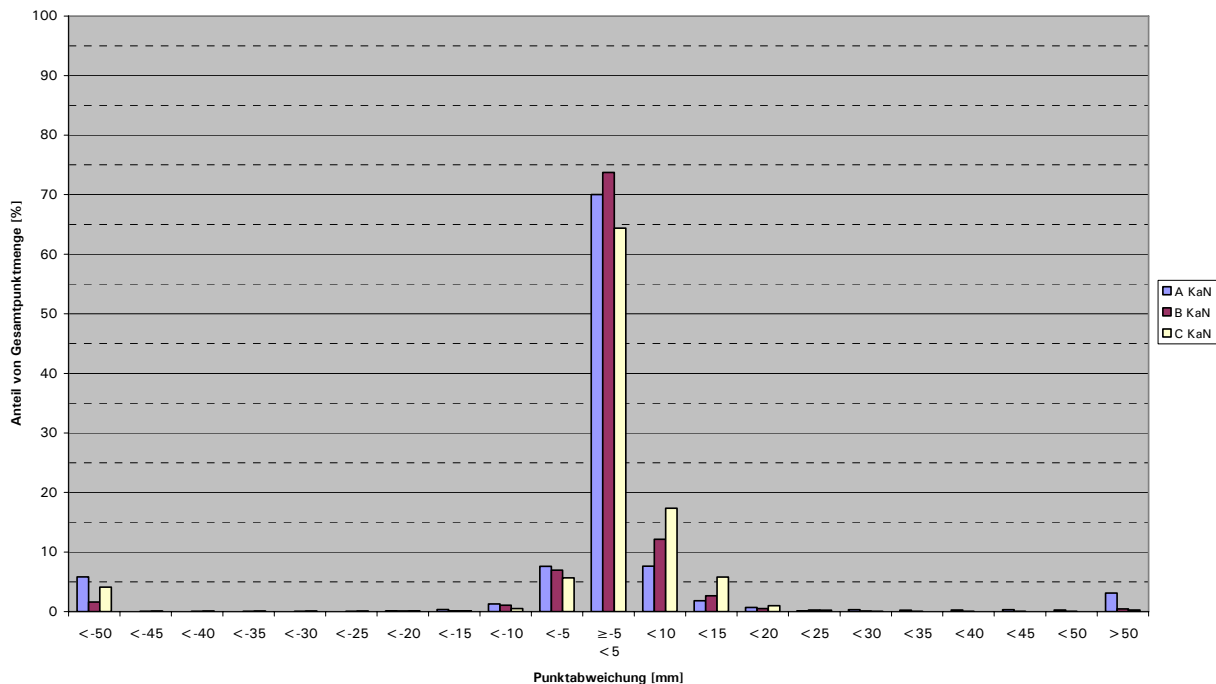


Abbildung 48: Punktgenauigkeit Netzmodell/Kantenmodell

Abbildung 49 fasst die Punktgenauigkeit nach jeweiligem Modellvergleich zusammen. Dabei beinhaltet der Balken „Punkte -5 – 5“ alle Punkte mit einer betragsmäßigen Abweichungen kleiner als 5 Millimeter. Die „Punkte -10/10“ sind solche, deren Abweichungen zwischen ± 5 Millimeter und ± 10 Millimeter liegen. Analoges gilt für „Punkte -15/15“. Abweichungen größer ± 15 Millimeter werden in dieser Darstellung nicht betrachtet, ergeben sich aber aus dem verbleibenden Rest zur Gesamtpunktmenge. Nahezu 100 Prozent der Punktabweichungen waren beim Vergleich Punktwolke/Netzmodell kleiner als ± 10 Millimeter. Die Kantenmodelle zeigten einen größeren prozentualen Anteil an Abweichungen größer 5 Millimeter. Aufgrund der Modellierung der Außenwände als glatte Ebenen wurden die Fassadenunebenheiten sichtbar und als Abweichung dargestellt. Diese Informationen sind für eine Ebenheitsanalyse von Bedeutung und sollten nicht als Modellgenauigkeit aufgefasst werden. Analoges gilt für den Vergleich Netz-/Kantenmodell, wobei das Glätten der Punktwolke und Eliminieren der Ausreißer bei der Dreiecksvermaschung zu etwas geringeren Abweichungen führte.

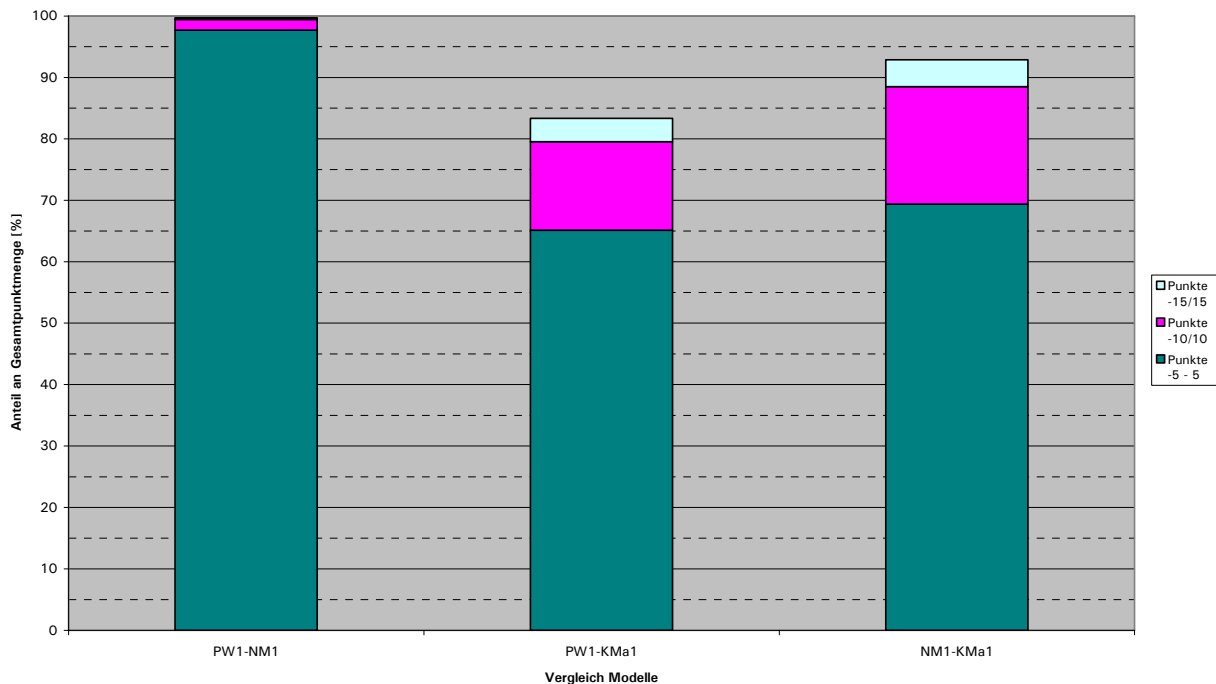


Abbildung 49: Punktgenauigkeit Punktwolke/Netz-/Kantenmodell

- Vergleich der Netzmodelle auf Grundlage verschiedener Laserscanner

Der Vergleich der Netzmodelle verschiedener Scanner sollte Aufschluss über die Güte der Modelle und ihrer Genauigkeit geben. Abbildung 50 zeigt stellvertretend die großflächige Übereinstimmung.



Abbildung 50: grafischer Abgleich Netzmodelle verschiedener Laserscanner

Ein Netzmodell offenbarte stirnseitig größere Abweichungen im Bereich der Pfosten auf der Längsseite, ein anderes verdeutlichte Ungenauigkeiten bei der Abbildung der Kanten Vordach/Wand und Wand/Rücksprung. Immerhin lagen über 75 Prozent der Punktabweichungen unter 5 Millimeter, 90 Prozent wichen weniger als 15 Millimeter vom Referenzmodell ab, wie Abbildung 51 zeigt.

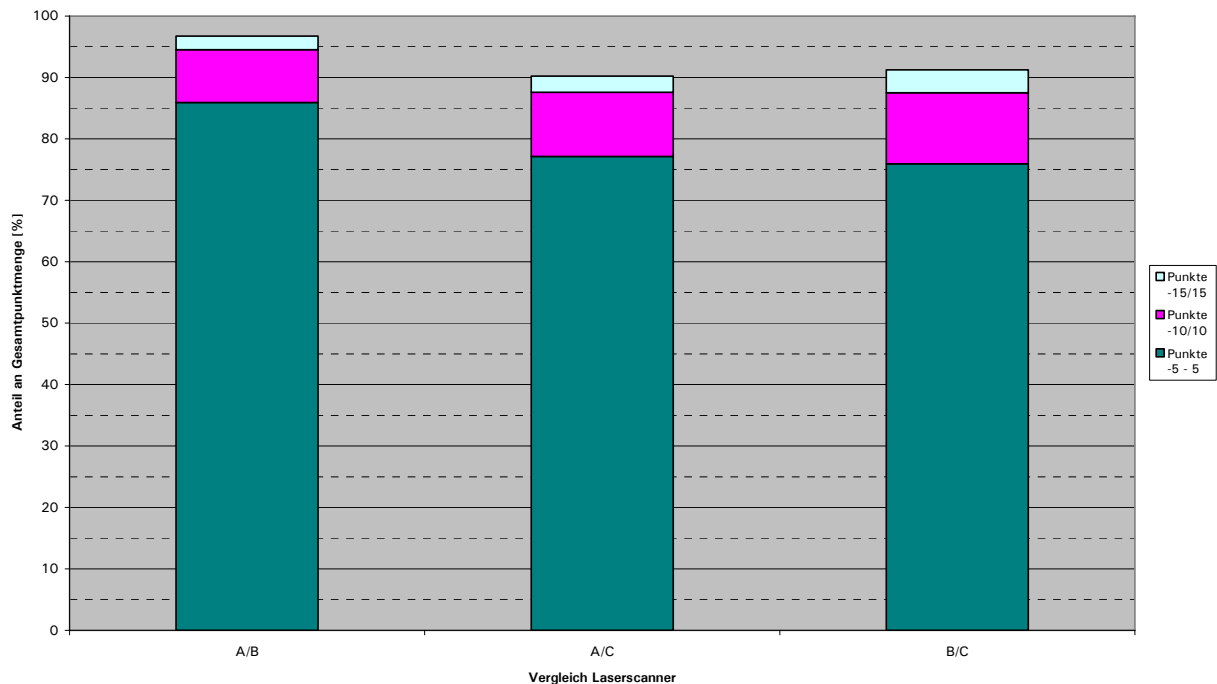


Abbildung 51: Punktgenauigkeit Netz-/Netzmodell

- Vergleich der Kantenmodelle auf Grundlage verschiedener Laserscanner

Die Kantenmodelle wurden über drei vorgegebene Punkte zueinander ausgerichtet. Der gewählte, gemeinsame Ursprung war der unterste Schnittpunkt der Giebel- und Längsseite. Die Unterschiede zwischen den Modellen sind in Abbildung 52 zu erkennen.

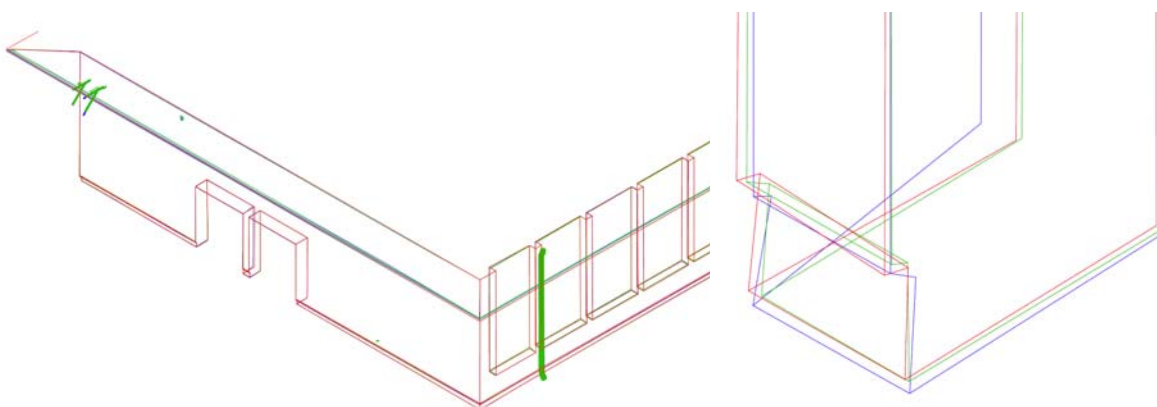


Abbildung 52: Überlagerung Kantenmodelle, Fußpunkt Türpfosten Giebelseite

Besonders deutlich waren die Abweichungen dort, wo aufgrund von Verschattungen das Modellieren erschwert wurde. Beispielhaft ist dies am Eck eines Fußpunktes am Türpfosten dargestellt. Hier ergab sich der größte Abstand zwischen zwei zugehörigen Punkten von ca. 8 Zentimeter, ansonsten lagen die Abweichungen in diesem Bereich zwischen 0,5 und 2 Zentimeter.

- Vergleich äquivalenter Modelle unterschiedlicher Scanner

Der Vergleich äquivalenter Modelle unterschiedlicher Scanner zeigt in Abbildung 53 deutliche Abweichungen. Die unterschiedlichen Ziffern, z.B. beim Vergleich „NM1 – NM2“, geben an, dass Laserscanner von verschiedenen Herstellern die Grundlage für das jeweilige Modell bildeten. Wie groß die Anteile des Scanners, der Software oder der auswertenden Person an den Ungenauigkeiten sind, kann den Daten leider nicht entnommen werden.

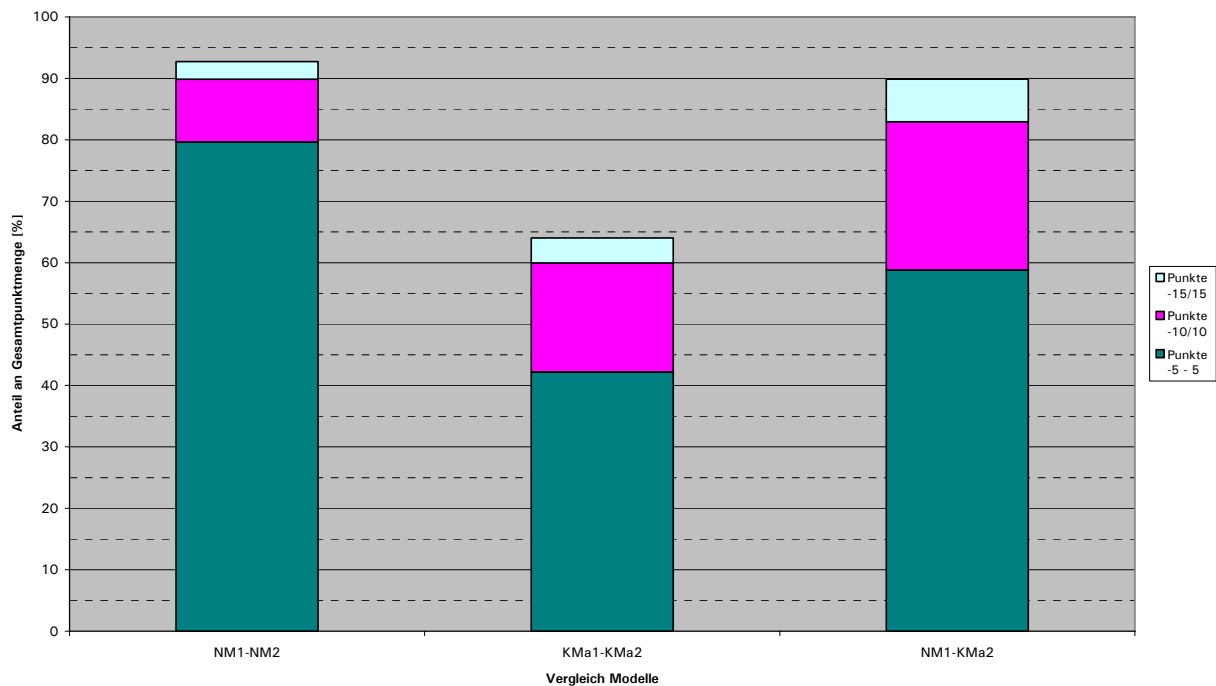


Abbildung 53: Punktgenauigkeit Netzmodelle und Kantenmodelle verschiedener Laserscanner

5.4.7 Vergleich diskreter Messstrecken

Ein quantitativer Vergleich der Modelle ergab sich aus der Messung diskreter Strecken. Einzelne Längen zwischen markanten Gebäudepunkten wurden in den erstellten Modellen gemessen und ausgewertet. Eine Normierung der Streckenlängen erschien nicht notwendig, da die Messungenauigkeit bei den Computermodellen mit der Streckenlänge nicht zunimmt. Eher spielt der Abstand des Laserscanners zum Objekt, die Reflektanz der Oberfläche, etc. für Messungenauigkeiten eine Rolle, aber nicht der Abstand der erzeugten Punkte zueinander.

Die Messergebnisse wurden mit dem zugehörigen Mittelwert MW der Messdaten gleicher Strecken verglichen. Zusätzlich wurden die Ergebnisse eines Handaufmaßes als Referenzwerte HA betrachtet. Als Werkzeuge für das Aufmaß dienten ein 30 m Bandmaß, ein 8 m Bandmaß, ein 5 m Teleskopmaßstab, ein 2 m Gliedermmaßstab, ein Bosch Handlaser und ein 150 mm Messschieber. Abbildung 54 zeigt die ausgewerteten Strecken.

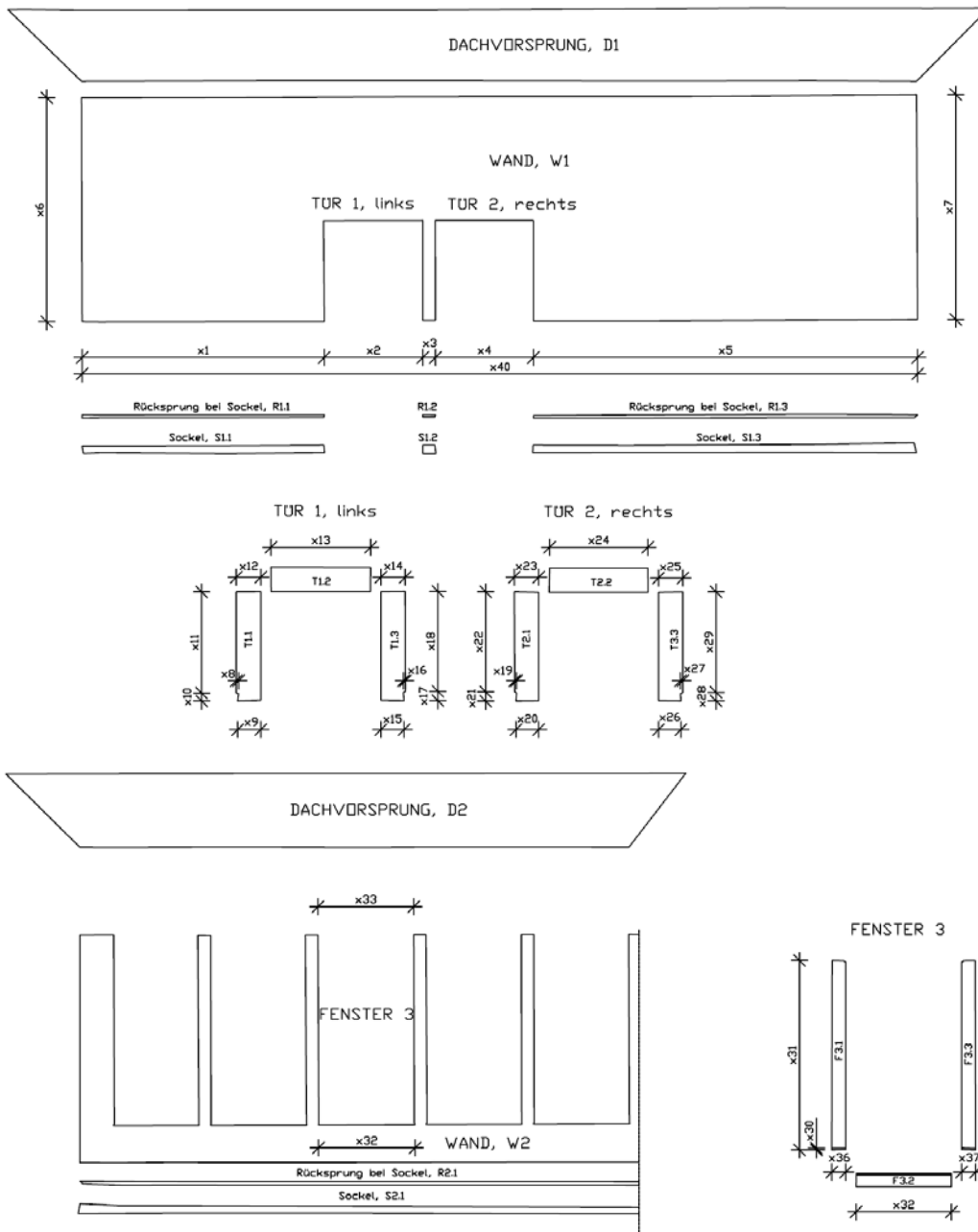


Abbildung 54: Abwicklung Giebelseite Süd, Längsseite Ost – Vorhoelzer-Bau

Wie bereits angemerkt, gibt kein Aufmaß die Realität fehlerfrei wieder. Mit dem Erfassen der Abweichungen der Messergebnisse zueinander kann dennoch eine Aussage über die Güte der Messungen und Auswertungen getroffen werden. Abbildung 55 zeigt die Abweichung der gemessenen Längen vom Mittelwert gleicher Strecken MW und vom Handaufmaß HA. Die Auswertung berücksichtigt die Daten der Kantenmodelle KMa, die nicht unter dem Aspekt der raschen Auswertung erstellt wurden, und der Netzmodelle NM. Festzustellen war, dass nahezu 90 Prozent der Messdaten weniger als 10 Millimeter vom Mittelwert MW abweichen. 2 Prozent zeigten eine Abweichung von über 20 Millimetern. Beim Betrachten des Referenzwertes

Handaufmaß HA fielen die Abweichungen etwas größer aus. Im Mittel betrug diese bei 65 Prozent der gemessenen Strecken weniger als 10 Millimeter und bei 12 Prozent mehr als 20 Millimeter. Berücksichtigt man die Problematik einer stellenweise verschatteten Punktwolke ist das erreichte Ergebnis als durchaus positiv zu werten.

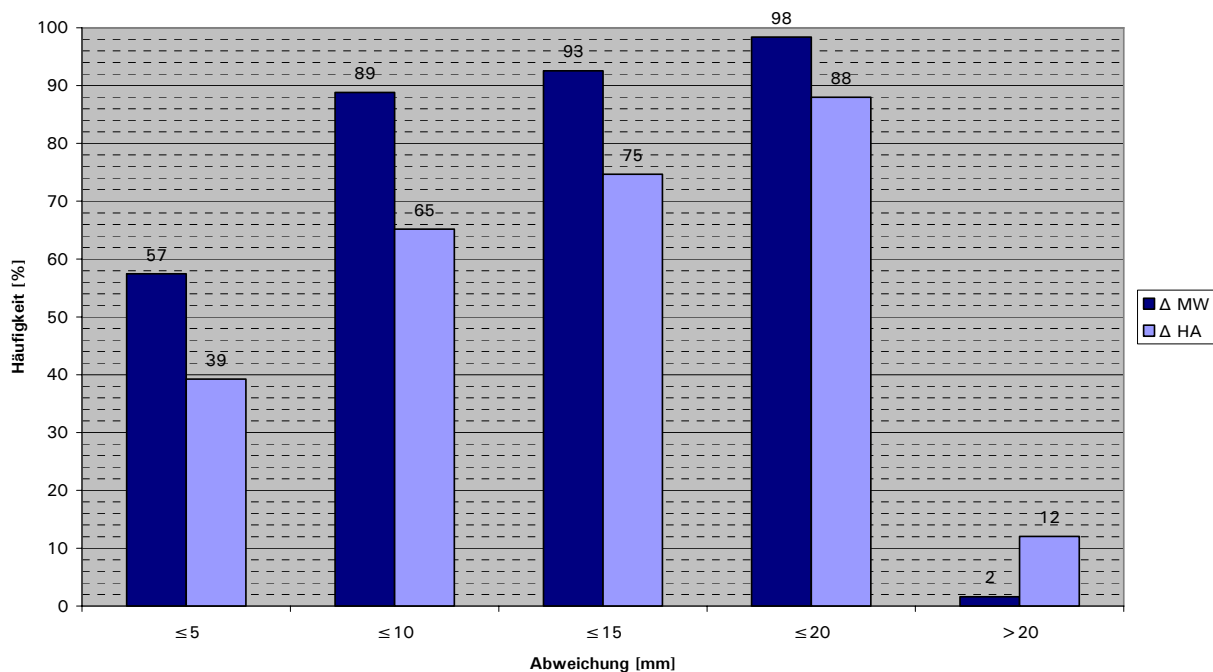


Abbildung 55: Abweichung Streckenmessung vom Mittelwert und Handaufmaß

Nachfolgend wurde untersucht, ob der verwendete Laserscanner einen Einfluss auf die Genauigkeit hat. Abbildung 56 zeigt die Unterschiede, die vor allem in einem Genauigkeitsbereich unter 5 Millimeter auftreten, bezogen auf den Mittelwert MW. Ein vergleichbares Bild ergab sich beim Zugrundelegen des Handaufmaßes als Referenzwert.

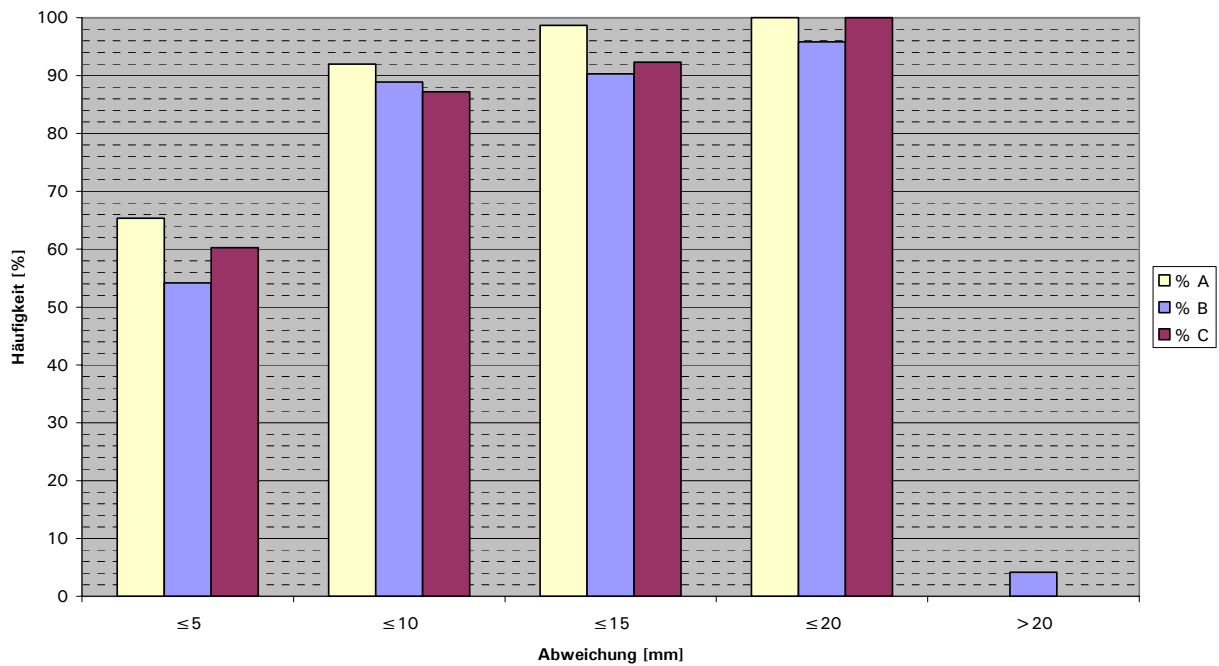


Abbildung 56: Häufigkeitsverteilung Laserscanner, Abweichung vom Mittelwert

Beim Vergleich der erstellten Modelle in Abbildung 57 waren die Abweichungen zum Handaufmaß beim Kantenmodell geringer als beim Netzmodell. Die Ergebnisse des Vergleichs zum Mittelwert MW waren in der Tendenz ähnlich.

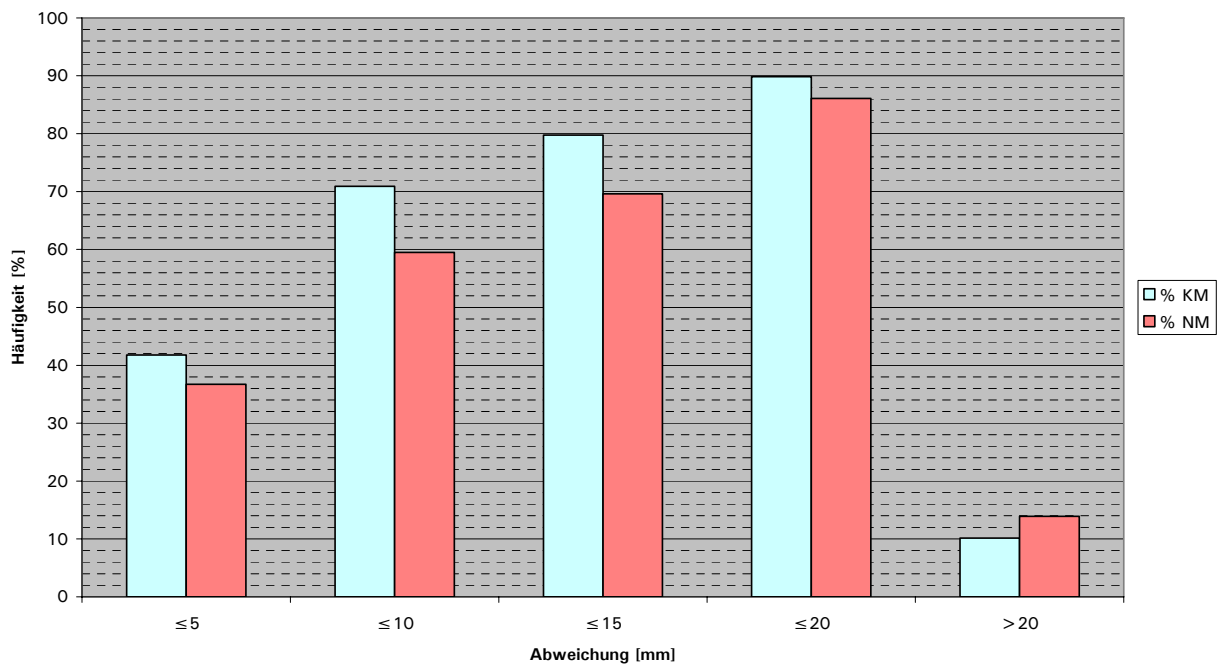


Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung Modelle, Abweichung vom Handaufmaß

Abschließend wurde noch der Frage nachgegangen, ob einzelne Messstrecken signifikante Unterschiede zeigen. Abbildung 58 bestätigt, dass höhere Standardabweichungen an den Stellen auftreten, die aufgrund der Verschattungen bei der Modellierung problematisch waren. Das sind zum Beispiel die Türleibung, Strecke x09 und die Fensterleibung, Strecke x37.

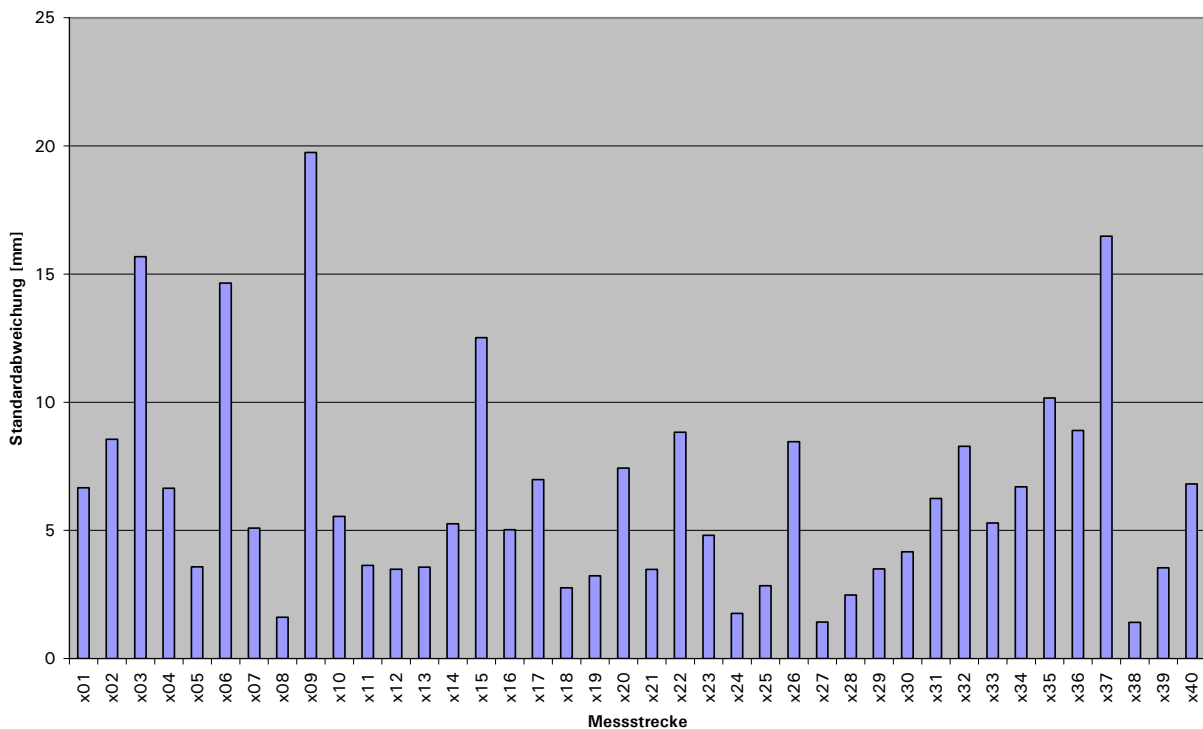


Abbildung 58: Standardabweichungen der Messstrecken

5.5 Auswertung Deckenfeld Meyer-Jens-Halle

5.5.1 Allgemeines

Bei Betrachtung der aufgenommenen Punktwolken wurde deutlich, dass aufgrund der vielen Rohre und Leitungen einige verschattete Bereiche aufgetreten sind. Um die für eine optimale Auswertung störenden Verschattungen zu vermeiden, sollten mehrere Standpunkte gewählt werden. Abbildung 59 zeigt eine Punktwolke des Deckenfeldes mit Intensitätswerten. Für die Auswertung interessante Bereiche, wie z.B. die beiden Rohre mit den Durchbrüchen im Unterzug, wurden durch die abgehängte Decke teilweise verdeckt. Die Aufnahmen der Laserscanner zeigten auch, dass Messungen über Kopf generell problemlos möglich sind.

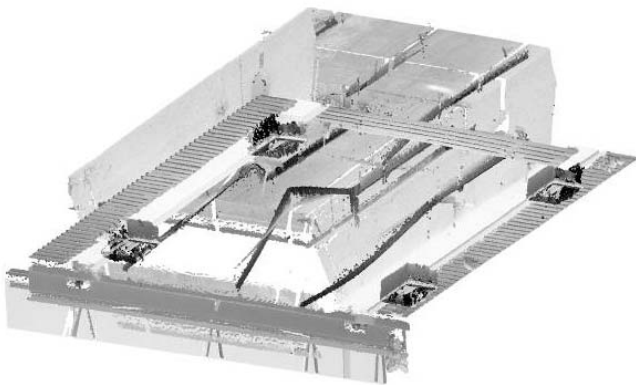


Abbildung 59: Punktwolke Deckenfeld Meyer-Jens-Halle

5.5.2 Leica Cyclone

Für die Auswertung wurde die Punktwolke gewählt, die auf zwei Standorten des Laserscanners basiert. Die einfache, von Decke, Unterzug und abgehängter Decke begrenzte Geometrie ermöglichte die schnelle Modellbildung eines Ebenen- bzw. Kantenmodells, siehe Abbildung 60. Hauptaugenmerk lag auf der Darstellung der Rohre und zugehörigen Öffnungen im Unterzug. Die Messpunkte der Rohre ließen sich problemlos in ein Objekt Zylinder umwandeln.

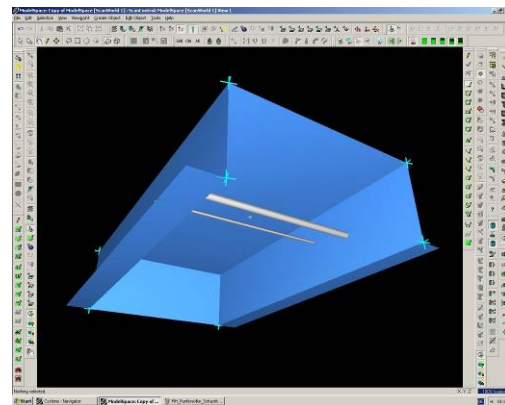
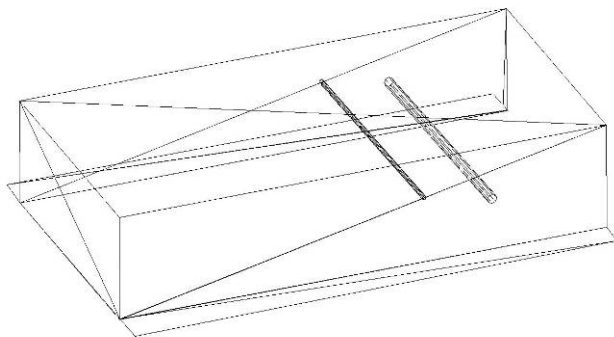


Abbildung 60: Kantenmodell Deckenfeld Meyer-Jens-Halle, Leica Cyclone

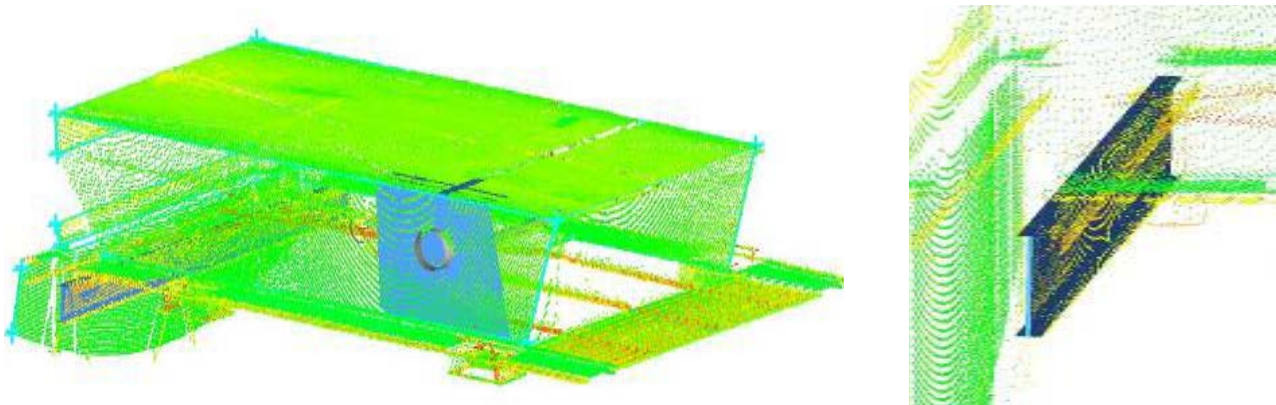


Abbildung 61: Durchbruch Unterzug als Zylinder modelliert (links), Kranbahnträger (rechts)

Abbildung 61 zeigt links eine kreisförmige Öffnung im Unterzug, die bei der Modellierung der Unterzüge vom Programm nicht als solche erkannt wurde; bei der Ebenenbildung entstand eine geschlossene Fläche. Vom Anwender wurde deshalb ein Zylinder aus den Randpunkten der Öffnung gebildet. Der Kranbahnträger, der nicht einem typisierten Stahlträger entspricht, ließ sich mit der automatisierten Auswertung des Programms nur schematisch darstellen.

5.5.3 Geomagic Studio

Die nachstehende Abbildung 62 zeigt beispielhaft das Ergebnis der Vermaschung einer Punktwolke zu einem Dreiecksnetz. Trotz der deutlichen Verschattungen wird das Deckenfeld der Halle sehr plastisch dargestellt. Die vielen Fehlstellen innerhalb der Punktwolke erschwerten aber eine genaue Auswertung der Daten und eine detailgetreue Abbildung.

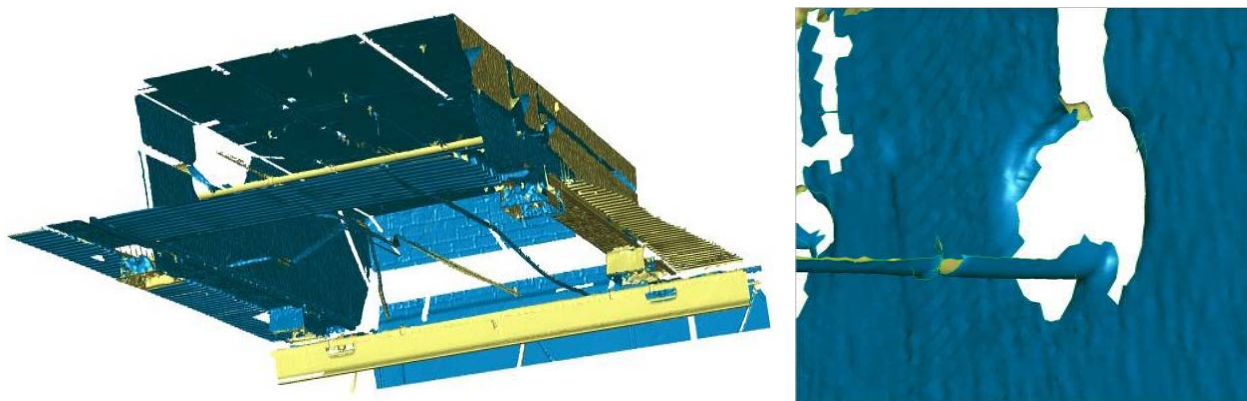


Abbildung 62: Netzmodell Deckenfeld Meyer-Jens-Halle, Gesamtansicht und Detail, Geomagic Studio

5.5.4 Kubit PointCloud

Durch das Verschneiden von gebildeten Ebenen wurde ein Kantenmodell erzeugt, siehe Abbildung 63. Mit den üblichen AutoCAD-Funktionen wurden die aus drei angelegten Ebenen

erstellten Eckpunkte mit Linien verbunden. Die Versorgungsleitungen, die das Deckenfeld durchdringen, konnten durch Zylinder angenähert werden. Das so genannte „Fitting“ erfolgte an isoliert betrachteten Punkten und führte zu Zylindern als AutoCAD-Objekte.

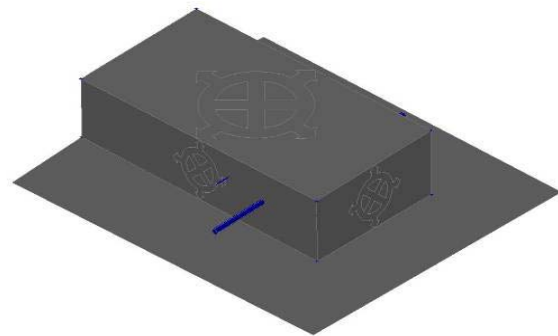
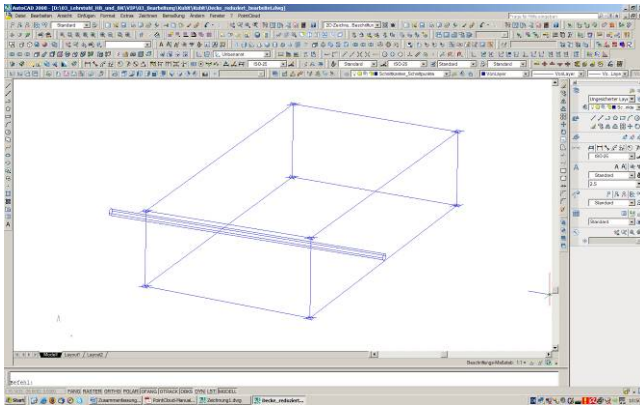


Abbildung 63: Kantenmodell Deckenfeld Meyer-Jens-Halle, Kubit PointCloud

5.6 Auswertung Kellerraum Gabelsbergerstraße

5.6.1 Allgemeines

Trotz der räumlichen Beengtheit zeigten die Laserscans eine gute Qualität. Die Abbildung der Wände ist detailliert, obwohl der vom Hersteller angegebene Mindestabstand zum Teil deutlich unterschritten wurde. Abbildung 65 zeigt, dass die Oberflächenrauheit der Wände und die Fugen zwischen den Mauerwerkssteinen bei einer Darstellung der Punktwolke mit einer Graustufung der Intensitätswerte sichtbar sind. Durch das Messsystem bedingt, spielte die Dunkelheit des Raumes keine Rolle. Angaben zur Genauigkeit der Messdaten durch einen Vergleich mit einem Handaufmaß erwiesen sich als nicht sinnvoll. Abgeschlagene Steine, Versprünge und diverse Unebenheiten erschweren das Aufmaß erheblich.



Abbildung 64: Punktwolke Kellerraum Gabelsbergerstraße als Abwicklung

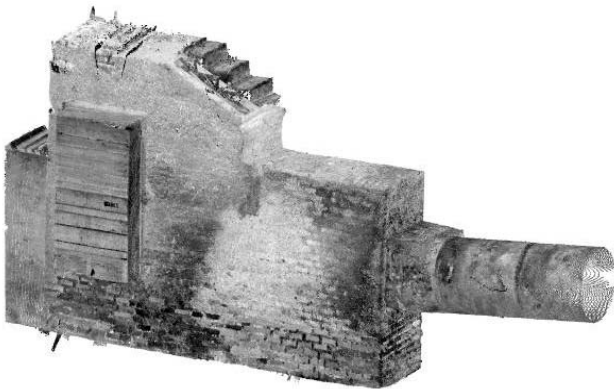


Abbildung 65: Punktwolke Kellerraum Gabelsbergerstraße als Axonometrie

5.6.2 Leica Cyclone

Das Beispiel der Fensternische im Kellerraum soll auf mögliche Fehler bei der Auswertung hinweisen. Innerhalb der Punktwolke war eine Unebenheit unten rechts in der Nische erkennbar, siehe Abbildung 66. Zunächst nicht zuordenbar, wurde anhand von Fotos erkannt, dass es sich um einen Lappen handelt. Diese Information war für das Bilden einer glatten, repräsentativen Ebene notwendig. Die Messpunkte des Lappens blieben unberücksichtigt. Hätte es sich beispielsweise um eine nicht zu entfernende Erhebung im Mauerwerk gehandelt, wäre diese in der Geometrie der Nische zu berücksichtigen. Fotos helfen bei der Interpretation der Messdaten, so dass potentielle Fehler vermieden werden.

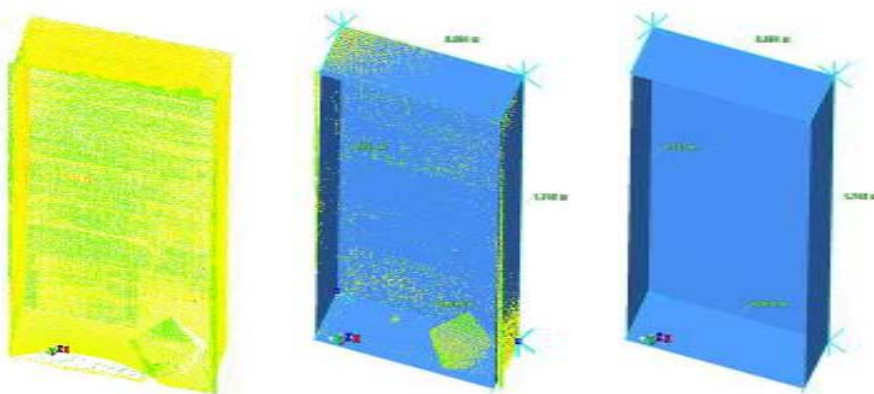


Abbildung 66: Modellierung Nische Kellerraum Gabelsbergerstraße, Leica Cyclone

Zielsetzung bei der Auswertung des Kellerraums war es, in kurzer Zeit Raumabmessungen näherungsweise zu erhalten. Gedacht wurde zum Beispiel an ein erstes Aufmaß für eine Machbarkeitsprüfung einer Nutzungsänderung. Eckpunkte und Kanten wurden durch händisches Einfügen gewonnen. Mit dieser Methode ließen sich die grundlegenden Raumabmessungen rasch ermitteln, dargestellt in Abbildung 67.

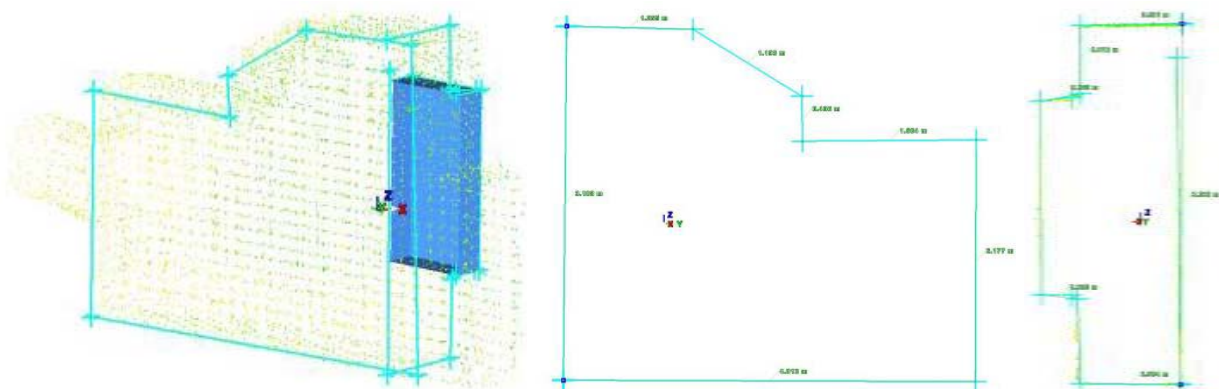


Abbildung 67: Bemaßung Eckpunkte Kellerraum Gabelsbergerstraße, Axonometrie, Längs- und Querschnitt

5.6.3 Geomagic Studio

Die Punktwolken des Kellerraums wurden ohne Nachbearbeitung in ein vermaschtes Netzmodell umgewandelt. Ein räumliches Abbild der Kellersituation konnte schnell visualisiert werden. In Abbildung 68 ist auch die Rauigkeit der Wandoberfläche und die Fugen zwischen den Mauerwerkssteinen als Ergebnis zu erkennen.

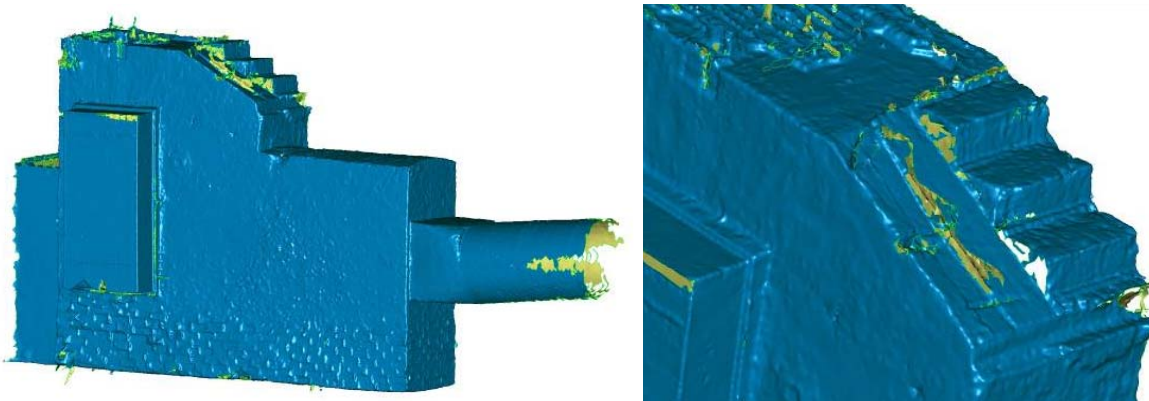


Abbildung 68: Vermaschtes Netzmodell Kellerraum Gabelsbergerstraße, Geomagic Studio

5.6.4 Kubit PointCloud

Ein Aufmaß des Kellerraumes mit den grundlegenden Abmessungen wurde mit dem Programm PointCloud auf einfache Weise erstellt. Dazu wurden horizontale Schichten mit einer Stärke von 10 bis 20 Millimetern definiert. An Stellen mit geringer Punktdichte erwies sich eine größere Schichtdicke als vorteilhaft. Automatisiert konnte die Kontur einer Schicht als Linien abgebildet werden. Anschließend wurden die erzeugten Schnitte in AutoCAD bemaßt, wie Abbildung 69 zeigt.

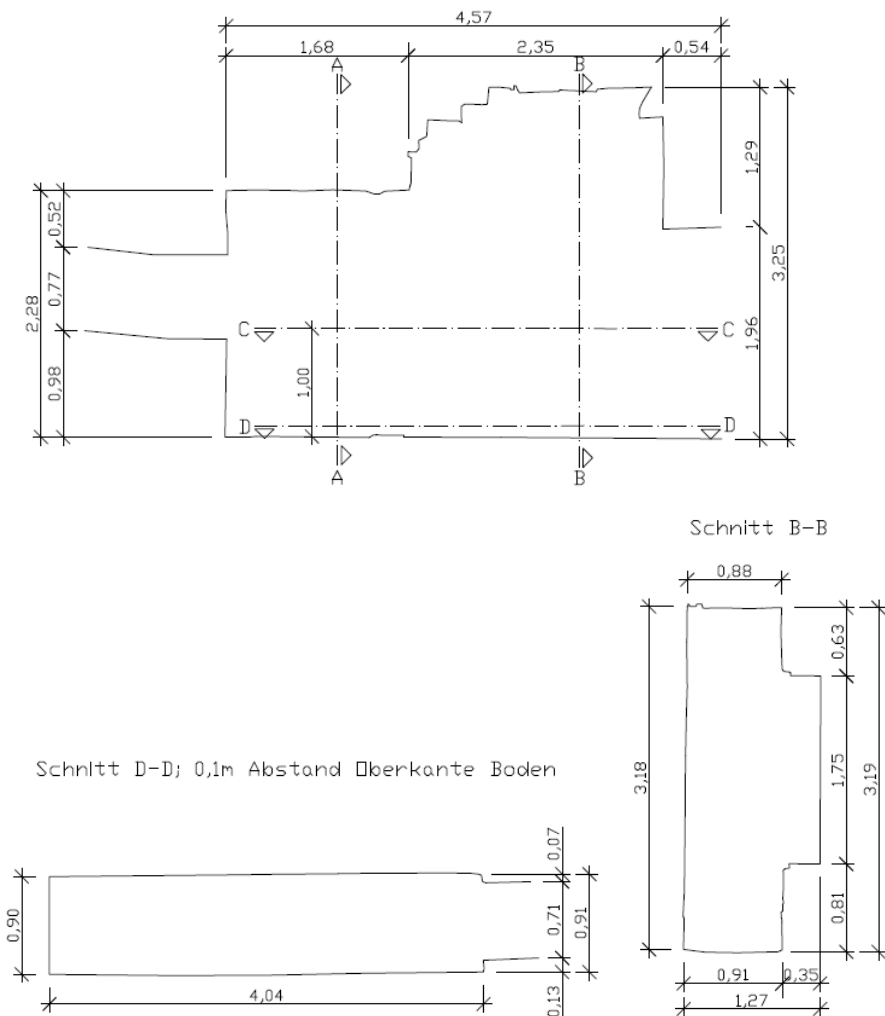


Abbildung 69: Bemaßte Schnitte Kellerraum Gabelsbergerstraße, Kubit PointCloud

5.7 Auswertung der Messdaten der Totalstation

Verglichen mit den in dieser Arbeit verwendeten, „klassischen“ Laserscannern war das Scannen mit der intelligenten Totalstation zeitaufwendiger und das Punktraster gröber. Kleinteilige Strukturen wurden nicht erfasst, aber für großformatige, einfache Messobjekte ist die Auflösung ausreichend. Wie Abbildung 70 verdeutlicht, erhält man zusätzlich zum Aufmaß eine bildliche Darstellung des Objekts.



Abbildung 70: Fotos der Totalstation beim Aufmaß der Fassade Vorhoelzer-Bau

Aufgrund eines technischen Problems konnten die Messdaten nicht in ein Modell zusammengeführt werden. Eine weitergehende Auswertung erfolgte deshalb nicht.

5.8 Auswertung der Messdaten des handgeführten Laserscanners

Im Gegensatz zu den bisherigen Aufnahmen sollte mit dem handgeführten Laserscanner nicht die ganze Fassade gescannt werden, sondern ergänzend ein Detailpunkt mit hoher Auflösung. Als Versuchsobjekt wurde eine Stahlflasche gewählt, die aus dem Putz der Fassade des Vorhoelzer-Baus herausragt. Die Auswertung bzw. Darstellung des Messergebnisses wurde mit dem Programm Rhino durchgeführt.

Um die Lage des Scanners relativ zum Objekt im Raum ermitteln zu können, ist eine hinreichende Anzahl an sichtbaren Referenzmarken notwendig. Außerdem kann beim Scanvorgang die Oberflächenreflektanz des Objektes zu Schwierigkeiten führen. Dies zeigt sich an den Fehlstellen in Abbildung 71. Diese Defizite können unter Umständen mit zusätzlichen Hilfskonstruktionen zur Befestigung von Referenzmarken und Modifikationen der Oberfläche behoben werden.

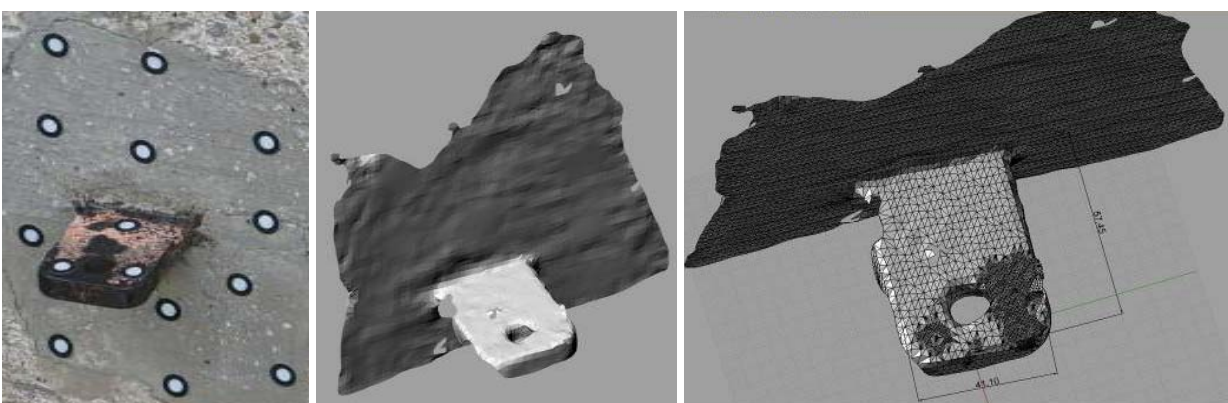


Abbildung 71: Auswerteobjekt Stahlflasche Fassade Vorhoelzer-Bau und Messergebnis

5.9 Zusammenfassung Auswertung Messdaten 3D-Laserscanning

Mit der Überprüfung der Maßgenauigkeiten am Beispiel der Fassade des Vorhoelzer-Baus wurde allgemein die Güte der aufgenommenen Punktwolken und der daraus generierten Modelle evaluiert. Erwartungsgemäß stimmten die Netzmodelle mit den Punktwolken nahezu hundertprozentig überein. Lediglich in den kritischen Bereichen einer unzureichenden Punktwolke sind Abweichungen zum Netzmodell sichtbar. Um die Kantenmodelle mit den Punktwolken zu vergleichen, wurden Ebenen zwischen den Kanten aufgespannt. Unebenheiten in der Fassade konnten auf diese Weise dargestellt werden. Darüber hinaus zeigte sich, dass sich der Zeitaufwand bei der Modellierung in der Abbildungsgenauigkeit deutlich widerspiegelt.

Für den Vergleich diskreter Messstrecken wurde zum einen der Mittelwert und zum anderen ein Handaufmaß als Referenzwert gewählt. Während 90 Prozent der Messdaten weniger als 10 Millimeter von dem gemeinsamen Mittelwert abweichen, sind es nur 65 Prozent beim Vergleich zum Handaufmaß. 98 Prozent der Daten weichen weniger als 20 Millimeter vom Mittelwert ab, 88 Prozent sind es beim Handaufmaß. Bei den Kantenmodellen ist der Maximalwert der Abweichung zum Handaufmaß 33 Millimeter, bei den Netzmodellen 38 Millimeter. Lediglich bei den Modellen, die unter dem Aspekt einer möglichst hohen Geschwindigkeit erzeugt wurden, waren die Abweichungen größer. Allgemein zeigten die Daten insbesondere dort hohe Abweichungen von den Referenzwerten, wo Verschattungen in der Punktwolke das Modellieren erschwerten.

Im Kellerraum Gabelsbergerstraße waren die Laserscans trotz der räumlichen Beengtheit von hoher Qualität. Die für eine Vorplanung notwendigen Raumdaten konnten ohne hohen Nachbearbeitungsaufwand sehr schnell innerhalb der Punktwolke ermittelt werden. Beim Auswerten der Messdaten des Deckenfeldes Meyer-Jens-Halle gelang das automatische Modellieren von Trägern, Öffnungen und Rohrleitungen noch nicht problemlos. Hierbei waren die Verschattungen innerhalb der Punktwolke besonders störend.

6 Erfassung der Versuchsobjekte mit Photogrammetrie

Die Erfassung der Versuchsobjekte mit Photogrammetrie wurde im Rahmen einer fachübergreifenden Diplomarbeit von Schneider (2009) am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion und am Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München durchgeführt.

6.1 Hardware für die photogrammetrische Erfassung der Versuchsobjekte

Die Bilder für die photogrammetrische Auswertung wurden mit einer kalibrierten digitalen Spiegelreflexkamera des Fachgebiets für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München aufgenommen.

Bei der Kamera handelt es sich um eine Nikon D3 mit einem CMOS-Sensor der Größe 36,0 x 23,9 mm und einer effektiven Auflösung von 12,1 Millionen Pixel. Sie ist mit einem Weitwinkelobjektiv Nikkor AF 24/2,8D ausgestattet (vgl. Abbildung 72). Die Kalibrierung des Aufnahmesystems wurde von der Firma RolleiMetric durchgeführt. Die so ermittelten Parameter des Aufnahmesystems aus Kamera und Objektiv wurden, sofern das Auswertesystem es zuließ, bei der Auswertung der Messbilder berücksichtigt.



Abbildung 72: Nikon D3 Gehäuse (links, Nikon 2009a) und Objektiv AF NIKKOR 24 mm 1:2,8D (rechts, Nikon 2009b)

Außerdem wurden auf weißes Papier gedruckte Passmarken mit einem Fadenkreuz (Kreisdurchmesser 6,0 cm) eingesetzt. Referenzmaße wurden mithilfe von Nivelliergerät, Schnurlot und Bandmaß von Hand eingemessen.

6.2 Software für die photogrammetrische Einzelbildauswertung

Software für die photogrammetrische Einzelbildauswertung dient in erster Linie dem Messen in entzerrten Bildern und bietet zu diesem Zweck verschiedene Entzerrungsverfahren an. Darüber hinaus können weitere Funktionen für eine komfortable Weiterverarbeitung der Daten und für Spezialanwendungen beinhaltet sein. Entsprechend breit gefächert ist das Angebot von Einzelbildauswertesystemen (Herstellerverzeichnis siehe Anhang). Die Hersteller werben dabei vor allem mit einer einfachen Handhabung und vielfältigen Einsatzmöglichkeiten. In Tabelle 9 sind auf

dem Markt verfügbare Programme zusammengestellt. Sie werden dort anhand der folgenden Auswahlkriterien verglichen.

- Applikation: Handelt es sich um eine Applikation für ein anderes Programm, wie zum Beispiel ein CAD-System?
- anwendungsspezifisch: Ist die Nutzung der Software auf spezielle Anwendungsgebiete ausgelegt, wie zum Beispiel für die Farbgestaltung von Fassaden, die Ermittlung energetischer Gebäudepässe oder die Planung von Solaranlagen?
- mehrbildfähig: Ist es möglich, mehrere Bilder gleichzeitig zu auswerten?
- Verzeichnungskorrektur: Kann die Verzeichnung der Messbilder durch eine implementierte Korrekturfunktion beseitigt werden und können dafür auch Kalibrierungsdaten der Kamera übernommen werden?
- Messen im Bild: Ist das direkte Messen im Bild möglich (oder wird für die Auswertung ein Zusatzmodul benötigt)?
- CAD-Zeichnungen: Ist es möglich, anhand der entzerrten Messbilder im Programm eine CAD-Zeichnung anzufertigen?
- Ergebnislisten: Ist es möglich, die Ergebnisse im Programm in Listen zusammenzufassen oder ein Tabellenkalkulationsprogramm in die Auswertung zu integrieren?
- Mosaikierungsfunktion: Hat der Anwender die Möglichkeit, mehrere Teilbilder automatisch oder manuell zu einem Bildplan zusammenzustellen?
- Anschaffungskosten: Nettoanschaffungskosten der Software.

Die Einstufung erfolgte anhand der Herstellerangaben. Jedes Kriterium wurde entweder mit „ja“ für „ist vorhanden“ oder „nein“ für „ist nicht vorhanden“ oder mit „k.A.“ für „der Hersteller hat für dieses Kriterium keine Angaben gemacht“ bewertet.

Tabelle 9: Vergleich Einzelbildentzerrungssoftware (Stand: März 2009).

Firma	Programmname	Applikation?	anwendungsspezifisch?	mehrbildfähig?	Verzeichnungskorrektur?	Messen im Bild?	CAD-Zeichnungen?	Ergebnislisten?	Mosaikierungsfunktion?	Anschaffungskosten (ohne MWSt.)
BKI	BKI-Fotoaufmass 1	nein	nein	k.A.	nein	ja	ja	ja	nein	179,00 €
BMZ Software GmbH	Fotoaufmaß	nein	nein	nein	nein	ja	nein	ja	nein	95,00 €
Bonk Computersysteme	Colorfix, incl. Fotoaufmaß	nein	ja	nein	ja	ja	nein	ja	nein	735,00 €
	Fotoaufmaß	nein	ja	nein	ja	ja	nein	ja	nein	585,00 €
Braasch & Jäschke Computertechnik	Curamess	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	495,00 €
	Foto-Aufmaß	nein	ja	nein	ja	ja	ja	nein	nein	149,00 €
CAI Computerdesign	Imago	nein	nein	ja	k.A.	ja	ja	k.A.	ja	690,00 €
DevCon Software GmbH	4 Master Fotoaufmass	nein	ja	nein	nein	ja	nein	ja	nein	250,00 €
dtc.Software	Foto Aufmass	nein	ja	nein	nein	ja	ja	ja	nein	95,00 €
Fokus GmbH Leipzig	metigo 2D	nein	nein	ja	ja	nein	nein	ja	ja	2.000,00 €
Graebert GmbH	Site Master Elevation	nein	nein	k.A.	k.A.	ja	ja	k.A.	k.A.	595,00 €
Hottgenroth Software	Foto-Aufmaß	nein	ja	nein	ja	ja	ja	k.A.	nein	149,00 €
	Foto-Aufmaß Pro.	nein	ja	ja	ja	ja	ja	k.A.	nein	200,00 €
IDC EDV GmbH	Monobild EASY	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	350,00 €
	Monobild Pro	nein	nein	ja	ja	ja	nein	nein	ja	550,00 €
Kubit GmbH	PhoToPlan	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	1.800,00 €
Moser GmbH	MOSaik Aufmass	ja	ja	k.A.	k.A.	ja	ja	ja	nein	k.A.
Nemetschek	On-Site Photo	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	k.A.	595,00 €
PMS AG	Elcovision 10 ELSP	nein	nein	ja	ja	ja	ja	nein	ja	k.A.
	Elcovision 10 ELSP Light	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	400,00 €
Rollei Metric GmbH	MSR	nein	nein	ja	ja	ja	ja	nein	ja	1.500,00 €
	MSR light	nein	nein	ja	ja	ja	ja	nein	ja	k.A.
Sander & Doll AG	Fotoaufmass	nein	nein	nein	ja	ja	ja	ja	nein	590,00 €
Sander + Partner GmbH	WINWorker - Fotoaufmaß	ja	nein	nein	ja	ja	ja	nein	nein	k.A.
Softtech	SPIRIT archmess	ja	nein	k.A.	k.A.	ja	ja	k.A.	k.A.	k.A.

Die für das Projekt ausgewählten Programme sind markiert.

Es wurden vier Programme für das Projekt aus den folgenden Gründen ausgewählt:

Bonk Computersysteme – Colorfix mit Zusatzmodul Fotoaufmaß:

Die Software Colorfix ist ein Beispiel für eine zweckgebundene Anwendung und zählt zu den günstigeren Programmen im Bereich der Einzelbildauswertung.

Fokus GmbH Leipzig – metigo2D:

metigo2D verfügt über eine Vielzahl von Entzerrungsmethoden und ist eine Auskopplung aus einem Programmsystem, das vom Hersteller für die eigenen Dienstleistungen verwendet wird.

Kubit GmbH – PhoToPlan:

PhoToPlan ist eine Applikation für das weit verbreitete CAD-Programm AutoCAD von Autodesk.

RolleiMetric – MSR:

RolleiMetric MSR ist ein Einzelbildauswertesystem, das aber auch in Kombination mit dem Mehrbildauswertesystem RolleiMetric CDW angewendet werden kann. Die hier verwendete Kamera wurde von RolleiMetric kalibriert.

Im Folgenden werden die vier ausgewählten Einzelbildauswertesysteme genauer vorgestellt.

6.2.1 Bonk Computersysteme – Colorfix 2.24 mit Zusatzmodul Fotoaufmaß

Colorfix ist für den Gebrauch von Malerbetrieben konzipiert worden und dient der Farbgestaltung in digitalen Bildern und Plänen. Einzelne Bildbereiche lassen sich mit Strukturen belegen und farbig einfärben.

Das Zusatzmodul Fotoaufmaß erlaubt es, perspektivische Bilder automatisch zu entzerren und in den entzerrten Bildern zu messen. Eine Messung im nicht entzerrten Bild ist ebenfalls möglich. Aus den gewonnenen Messdaten kann der Nutzer ein tabellarisches Aufmass erstellen. Ein Export der ermittelten Daten als TXT-Datei ist möglich. Fotoaufmaß ist auch als eigenständiges Programm ohne die Farbgestaltungsfunktionen von Colorfix erhältlich.

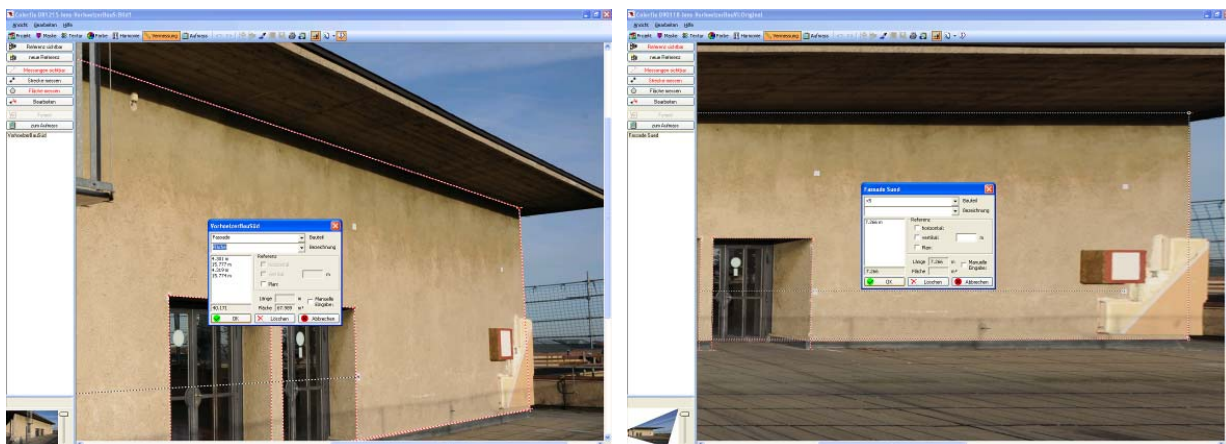


Abbildung 73: Colorfix Fotoaufmaß - Messung im nicht-entzerrten (links) und im entzerrten (rechts) Bild

Bilder in den gängigen Formaten BMP, TIFF und JPG, sowie Vektordaten im DXF Format können eingelesen werden. Es können mehrere Bilder geladen, aber nicht gleichzeitig bearbeitet werden. Die Übernahme von Kalibrierungsdaten ist nicht möglich, eine Korrektur von Verzeichnungen ist nur manuell durch Anpassung des Bildes an verschiebbare Hilfslinien ausführbar. Bildhelligkeit und Kontrast können über eine integrierte Funktion manuell beeinflusst werden. Die Software verfügt über neun Zoomstufen. Dadurch ist ein ausreichend genaues Ansteuern von Punkten und Kanten im Bild möglich.

Um Messungen im Bild vornehmen zu können, müssen ein Referenzrechteck definiert und zwei am Objekt genommene Referenzmaße, ein horizontales und ein vertikales, eingegeben werden.

Anschließend können die gewünschten Maße (Strecken, Polygonzüge, Flächen) genommen werden. Eine automatische perspektivische Entzerrung ist möglich. Die Ergebnisse der Vermessung werden in einer separaten TXT-Datei abgespeichert. Das Messbild und die Ergebnisse der Messung können in ein Aufmassprotokoll übertragen werden.

Die Benutzeroberfläche ist übersichtlich gestaltet. Die Einarbeitung in die Software mit Hilfe der Beispiele und des Handbuchs ist einfach. Zusätzlich können Schulungsvideos über einzelne Bedienungsfunktionen der Software angesehen werden. Die Einarbeitungszeit beträgt nur wenige Stunden.

6.2.2 Fokus GmbH Leipzig – metigo2D 3.0

Die Fokus GmbH Leipzig ist ein Ingenieurbüro, das Dienstleistungen in den Bereichen Architekturphotogrammetrie, verformungsgerechtes Bauaufmaß, digitale Bildverarbeitung und Softwareentwicklung anbietet. Ihre Software metigo2D ist eine Auskopplung aus dem Programmsystem metigo, das von Fokus für die eigenen Dienstleistungen entwickelt wurde.

Bilder in den Formaten TIFF, BMP und JGP können von metigo2D verarbeitet werden. Die Anzahl der Bilder ist durch die Software nicht begrenzt. Kameradaten können übernommen, bearbeitet und verwaltet werden. Die Verzeichnungsparameter können auch programmintern mit der integrierten Parameterermittlung über mindestens drei Bilder bestimmt werden. Eine Bildbearbeitung (partielle Anpassung von Helligkeit und Kontrast) innerhalb des Programms ist nicht möglich. Das Programm verfügt über eine stufenlose Zoomfunktion kombiniert mit einem Lupenfenster für die exakte Bestimmung von Bildpunkten.

Es ist möglich, eine subpixelgenaue Bildkoordinatenmessung durch automatische Passpunkterkennung für kodierte Passpunkte durchzuführen.

metigo2D stellt vier Varianten der digitalen Bildentzerrung zur Verfügung. Für jede Variante werden unterschiedliche Referenzinformationen benötigt. So ist es möglich, abhängig von Objekt und verfügbarer messtechnischer Ausrüstung, die optimale Entzerrungsvariante zu wählen. Die Entzerrungsarten können innerhalb eines Projekts kombiniert werden.

Bei *Entzerrung Passpunkte* werden die Koordinaten von Objektpunkten oder Passmarken, die beispielsweise mit einem Tachymeter aufgenommen wurden, in das Programm automatisch importiert oder von Hand eingegeben. Für die Entzerrung des perspektivischen Bildes müssen die Koordinaten von mindestens vier Punkten vorliegen. Bei fünf oder mehr Punkten wird aufgrund der Überbestimmung eine ausgleichende Berechnung mit Fehleranalyse durchgeführt. Der Hersteller empfiehlt, sechs bis acht Punkte pro Entzerrungsrechnung zu verwenden.

Bei *Entzerrung Rechteck* werden am Objekt die Höhe und Breite eines Rechtecks als Referenz gemessen. Die beiden Referenzmaße sollten so groß wie möglich gewählt werden, so dass sie den Entzerrungsbereich möglichst vollständig abdecken.

Für *Entzerrung Parallelen* werden als Referenzinformationen ein vertikales und ein horizontales Referenzmaß und zusätzlich zwei parallele vertikale und zwei parallele horizontale Linien in der Entzerrungsebene benötigt. Die Lage der beiden Referenzstrecken zu den parallelen Linien ist beliebig.

Für *Entzerrung Streckennetz* werden am Objekt mindestens vier signalisierte oder natürliche Passpunkte benötigt, die ein allgemeines Viereck aufspannen. Am Objekt müssen die vier Seitenlängen und die beiden Diagonalen des Vierecks gemessen werden. Für die Ausrichtung des Bildes muss zusätzlich eine horizontale Bezugsstrecke angegeben werden. Werden mehr als vier Punkte gemessen, erfolgt eine ausgleichende Berechnung mit Fehleranalyse.

Mit metigo2D können auch Panoramabilder ausgewertet werden. Zunächst werden die Panoramaaufnahmen in eine ebene Zentralprojektion umgerechnet. Anschließend kann eine Bildverzerrung mit einem der vier oben genannten Verfahren durchgeführt werden.

Nach der Entzerrungsrechnung können die Bilder ausgewertet werden. Um Speicherplatz zu sparen, kann der Auswertebereich für die Entzerrungsrechnung in den Fotos begrenzt werden. Alle zu messenden Punkte müssen benannt werden. Die Koordinaten werden in einem Koordinatenverzeichnis gespeichert. Dieser Datensatz kann über eine Import-Funktion in ein CAD-System geladen werden.

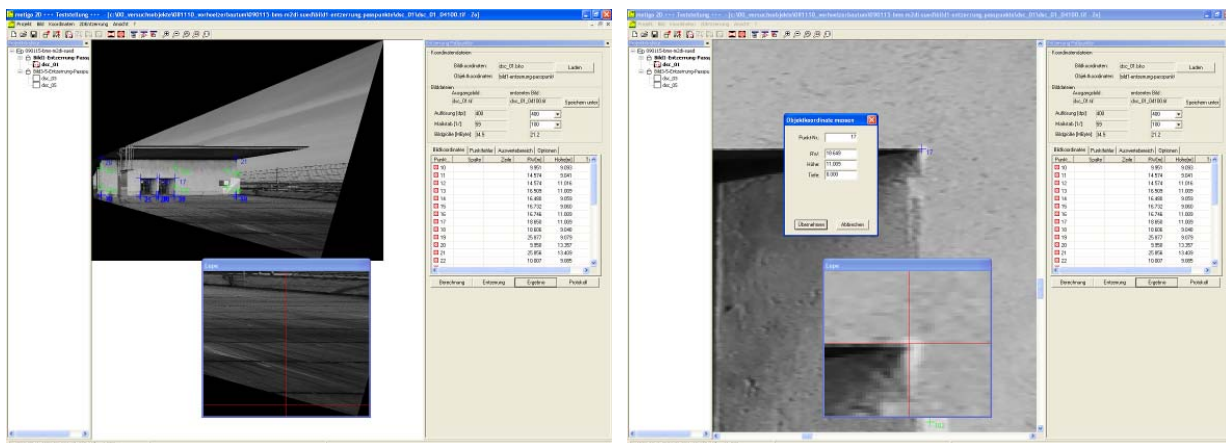


Abbildung 74: metigo2D - Auswertung eines entzerrten Bildes (links) und detaillierte Messung eines Objektpunktes (rechts)

Das Messen von Strecken und das Einfügen von Bemaßungen und Beschriftungen sind in metigo2D nicht möglich. Auch können mit dem Basisprogramm keine Bilder mosaikiert werden. Diese Funktionen enthält das Zusatzprogramm metigoMON. Es bietet auch verschiedene Bildbearbeitungsfunktionen sowie eine direkte Schnittstelle zu Adobe Photoshop.

Der kostenlose Viewer metigoVIEW unterstützt die Weitergabe Bildpläne (entzerrte, maßstäbliche Bilder, evtl. mit Zusatzinformationen wie Bemaßungen, Zeichnungen, etc.) an Dritte. In metigoView können aus den entzerrten Bildern Maße abgegriffen werden. Diese können aber

nicht gespeichert werden. Bildpläne können mit metigoVIEW maßstabsgerecht ausgegeben werden.

Durch den übersichtlichen Aufbau der Arbeitsoberfläche und vor allem der Projektverwaltung ist eine effiziente Projektbearbeitung auch größerer Projekte möglich. Dank der einfachen Menüführung durch eine Art Baumschema kann man sich schnell im Programm zurechtfinden. Die Einarbeitung wird durch das informative Handbuch und das beigefügte Projektbeispiel erleichtert. Für die Einarbeitung werden ungefähr zwei Arbeitstage benötigt.

Bei der Ermittlung der Maße wurde in dieser Arbeit auf eine kombinierte Auswertemethode mit dem Programm AutoCAD zurückgegriffen. Dabei wurden alle relevanten Objektpunkte für die Planerzeugung in metigo2D ermittelt und in einer separaten Datei im ASCII-Format gespeichert. Ein direkter Import von Objektkoordinaten in AutoCAD ist nicht möglich, daher wurden die Koordinaten der Punkte mit einer LISP-Schleife in einen Block überführt und in das CAD-System geladen.

6.2.3 Kubit GmbH – PhoToPlan 4.2.0.8

PhoToPlan von der Firma Kubit GmbH ist ein photogrammetrisches Einzelbildentzerrungsprogramm für die maßstabsgerechte Entzerrung von digitalen Fotos, Karten und Plänen. Die Software wird als Applikation direkt in das CAD-Zeichenprogramm AutoCAD bzw. AutoCAD LT der Firma Autodesk implementiert. Dadurch hat der Anwender die Möglichkeit, alle AutoCAD Funktionen, wie beispielsweise die Zoom-Funktionen, zu nutzen.

PhoToPlan erkennt die Bildformate BMP, JPG, PNG und TIFF. Eine Bildbearbeitungsfunktion ist direkt im Programm verfügbar. Es können beliebig viele Bilder in einem Projekt eingesetzt werden. Mehrere entzerrte Messbilder können zu einem Bildplan zusammengesetzt werden. Hierbei lassen sich auch eine automatische Helligkeitsanpassung und eine Überblendung der Bildübergänge durchführen.

Die Kalibrierungsdaten des Aufnahmesystems können in PhoToPlan im TXT-Format importiert werden. Alternativ können die Verzeichnungsparameter durch eine direkte Parameterbestimmung in geeigneten Bildern ermittelt werden. Nachdem die Verzeichnungskorrektur für ein Messbild durchgeführt wurde, erscheint das korrigierte Bild neben seinem Original. Mit dem verzeichnungsfreien Bild kann nun eine Entzerrung vorgenommen werden.

Je nach Art der eingesetzten Referenzinformationen bietet PhoToPlan zwei Entzerrungsverfahren: Entzerrung über Passpunkte und Entzerrung nach Geometrie.

Für die Entzerrung über Passpunkte sind mindestens vier Passpunkte erforderlich. Werden mehr als vier Punkte verwendet, ist das Entzerrungsproblem überbestimmt und die Software führt einen automatischen Fehlerausgleich mit Bestimmung der Fehlerwerte durch. Die Passpunkte müssen am Objekt z.B. geodätisch aufgenommen worden und im Messbild klar erkennbar sein. Dies

können markante natürliche Punkte oder am Objekt angebrachte Messmarken sein. Die Koordinaten der Passpunkte werden als Datei in das CAD importiert oder von Hand eingetragen. Nachdem außerdem die zu entzerrenden Bilder geladen wurden, werden die Passpunkte in CAD dem jeweils zugehörigen Bild des identischen Punktes im Foto zugeordnet (siehe Abbildung 75). Als Ergebnis erscheint das in die Passpunktkoordinaten eingepasste, entzerrte Bild.

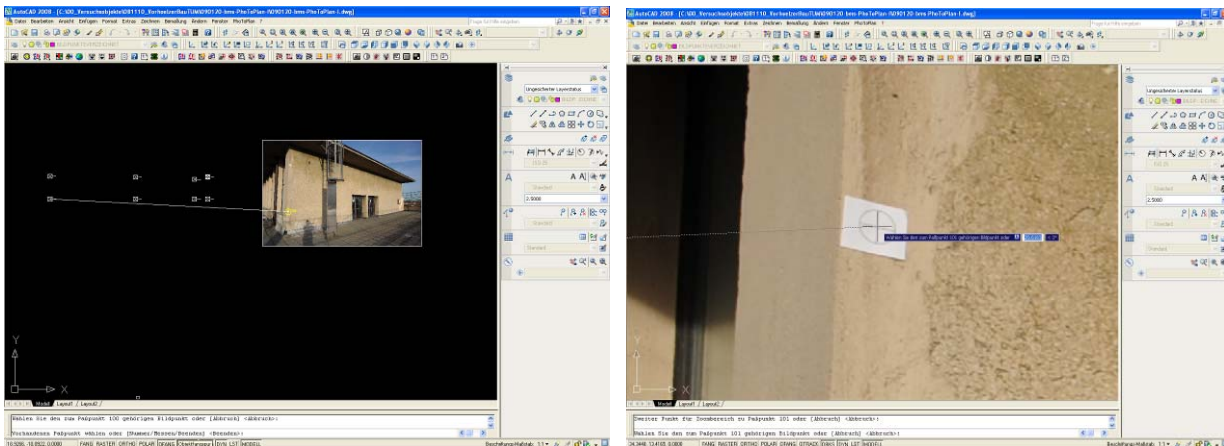


Abbildung 75: PhoToPlan - Zuordnung von Passmarke und zugehöriger Bildkoordinate

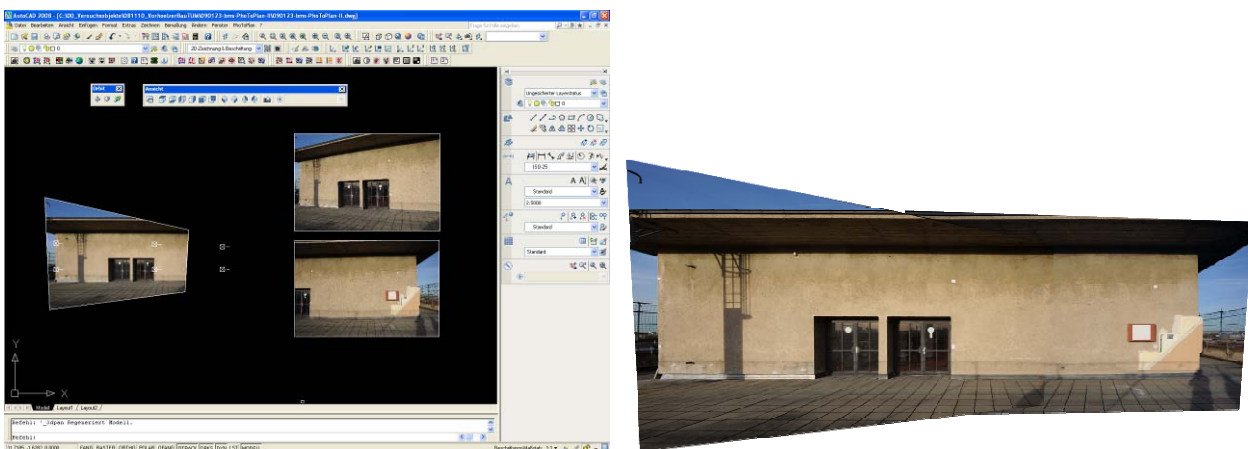


Abbildung 76: PhoToPlan - über Passpunkte entzerrtes Messbild, das durch weitere Bilder ergänzt werden soll (links) und mosaikiertes Orthofoto (rechts)

Die Entzerrung nach Geometrie kann bei Objekten angewandt werden, bei denen gerade, senkrecht aufeinander stehende Linienscharen in der Entzerrungsebene gegeben sind. In PhoToPlan wird ein verschiebbares Gitternetz im perspektivischen Bild eingeblendet und durch Verschieben der Gitterlinien den Linien im Bild angepasst. Um die Entzerrung durchführen zu können, sind zusätzlich mindestens zwei Referenzstrecken in Richtung der Gitterlinien erforderlich. Das Ergebnis der Entzerrung ist ein maßstabsgerechter Bildplan.

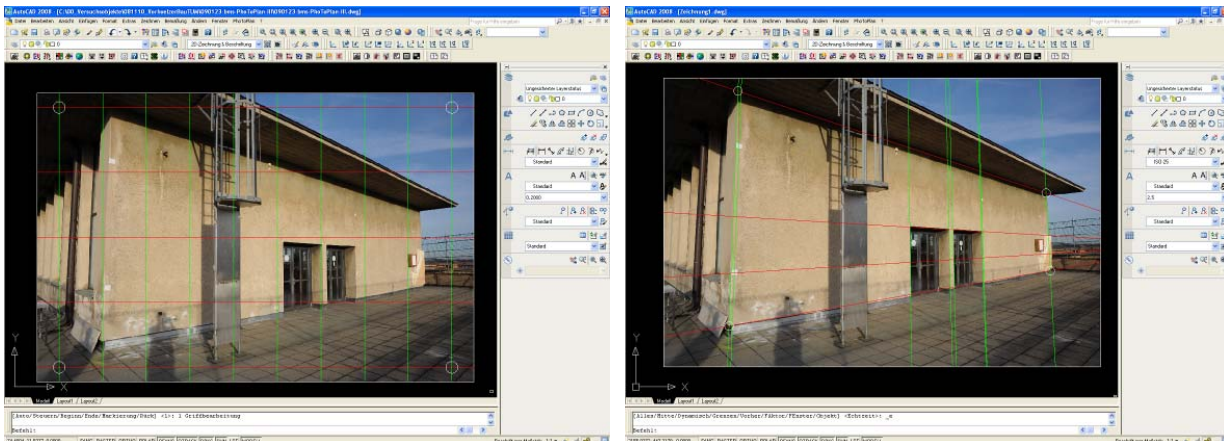


Abbildung 77: PhoToPlan - Bild mit Gitternetz (links) und Bild mit angepasstem Gitternetz (rechts)

Bei beiden Verfahren wird im Projektordner ein Protokoll der Entzerrungsrechnung hinterlegt. Um unnötig große Datenmengen zu vermeiden, kann der Entzerrungsbereich mit Hilfe der Polylinien-Funktion von AutoCAD eingeschränkt werden. Beide Methoden können im gleichen Projekt gemeinsam angewendet werden.



Abbildung 78: PhoToPlan - bemaßter Bildplan

Ist das Bild entzerrt und evtl. der Bildplan erstellt, kann mit der Auswertung der Fotos begonnen werden. Hierfür werden ausschließlich die Funktionen von AutoCAD genutzt. Mit den Linienfunktionen kann über die entzerrten Bilder gezeichnet und so alle relevanten Bildbereiche in eine Zeichnung überführt werden. Bemaßungen, Beschriftungen, Ausdrucke etc. werden über die entsprechenden Befehle des CAD-Programms ausgeführt.

Für eine Georeferenzierung können mit PhoToPlan Bildpositionsdateien erzeugt werden.

PhoToPlan ist eine leistungsstarke Software für die photogrammetrische Einzelbildauswertung. Die Entzerrung von Bildern mit starker Perspektive und Projekte mit vielen Bildern erfordern einen ausreichend großen Arbeitsspeicher. Die Menüführung von PhoToPlan entspricht der von AutoCAD. Insofern ist das System, Grundkenntnisse in AutoCAD vorausgesetzt, dem Anwender schnell vertraut. Das Handbuch ist klar verständlich aufgebaut. Es wird durch zwei mitgelieferte Übungsbeispiele unterstützt. Die Einarbeitung in das Programm ist innerhalb eines Arbeitstages möglich.

6.2.4 RolleiMetric – Metric Single Rectification (MSR) Version 4.2

RolleiMetric MSR ist eine eigenständige und anwendungsneutrale Software zur Erstellung digitaler, maßstabgerechter Darstellungen durch Entzerrung von Fotos. Das Programm ist in zwei verschiedenen Versionen erhältlich, die sich hinsichtlich ihres Funktionsumfangs unterscheiden. Die für diese Arbeit verwendete Version MSRv4.2 ist die Vollversion.

RolleiMetric MSR liest die Formate BMP, JPG und TIFF sowie das RolleiMetric eigene Format RDC, das neben den Bildinformationen auch Informationen über das Aufnahmesystem speichert. Außerdem können CAD-Daten im Format DXF eingelesen werden. Es können beliebig viele Bilder in einem Projekt verarbeitet werden. Die Montage von entzerrten Bildern zu einem Bildplan ist möglich, eine radiometrische Mosaikierung (Ausgleich von Farb-, Helligkeits- und Kontrastunterschieden) jedoch nicht. Die Kameradaten kalibrierter Kameras können eingegeben werden. Die einmal eingegebenen Daten eines Aufnahmesystems können projektübergreifend verwendet werden. Eine Auswertung von Messbildern nicht-kalibrierter Kameras ist nicht möglich. Bei der Verwendung von Bildern im RDC-Format ist die Durchführung eines Weißabgleichs und einer Farbanpassung möglich. Bilder mit diesem Bildformat können auch mit einer integrierten Bildbearbeitungsfunktion nachbearbeitet werden. RolleiMetric MSR besitzt drei feste Zoomstufen, stufenloses Zoomen ist nicht möglich.

In MSR können die Parameter für die Entzerrung mit vier verschiedenen Verfahren eingegeben werden.

Für eine *Entzerrungsberechnung über die Koordinaten von Objektpunkten* sind die Koordinaten von mindestens vier Objektpunkten erforderlich. Die Koordinaten werden am Objekt von Hand oder geodätisch ermittelt. Die Eingabe der Werte kann manuell oder über eine ASCII konforme Datei erfolgen. Nach der Eingabe der Koordinatendaten müssen diese den zugehörigen Bildpunkten zugeordnet werden.

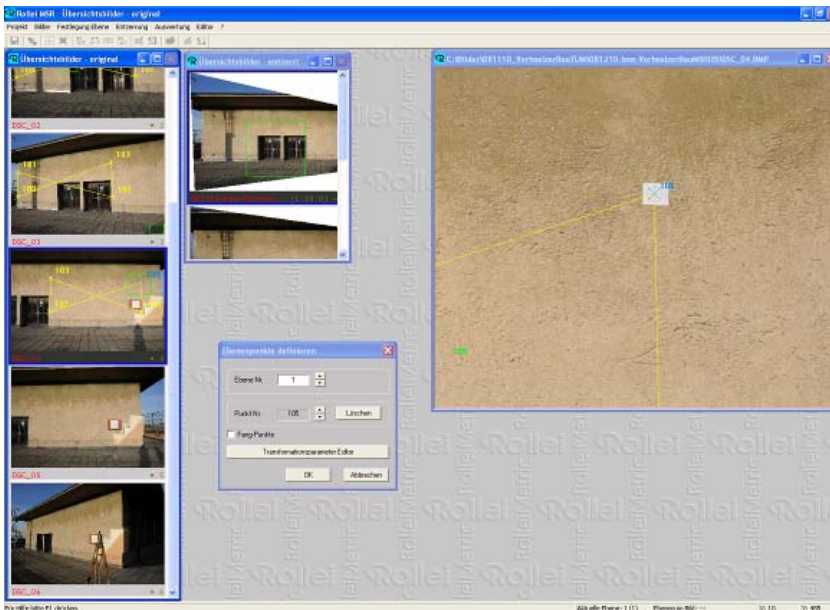


Abbildung 79: MSR - Entzerrung über Koordinaten von Objektpunkten

Entzerrung über Orientierungsdaten aus RolleiMetric CDW: Bilder, die bereits über das Mehrbildphotogrammetriesystem RolleiMetric CDW orientiert wurden, können in RolleiMetric MSR entzerrt und montiert werden.

Bei der Entzerrung über parallele Linienpaare werden am Objekt jeweils zwei parallele Referenzlinien in vertikaler und horizontaler Richtung benötigt. Der Maßstab wird über die Eingabe eines horizontalen und eines vertikalen Referenzmaßes bestimmt.

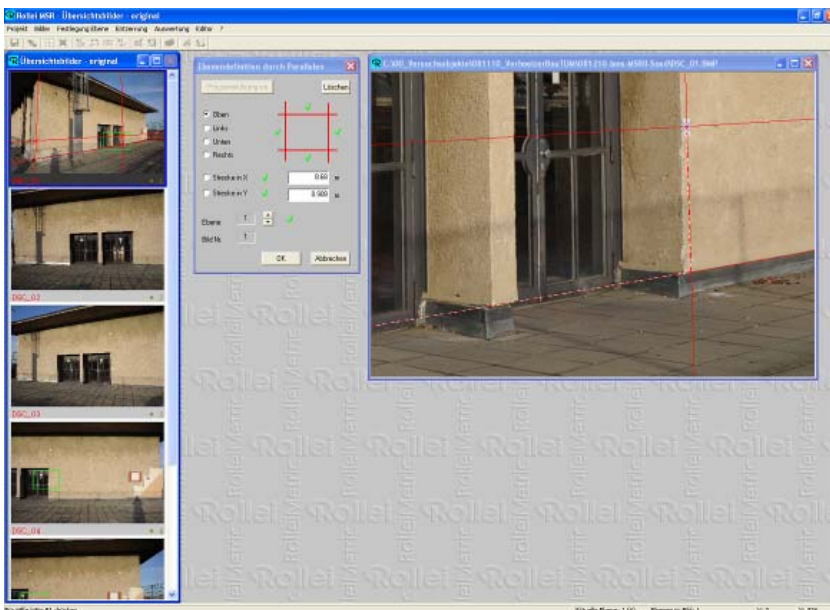


Abbildung 80: MSR - Entzerrung über parallele Linienpaare

Bei der *Entzerrung mittels überbestimmter Streckenmessungen* erfolgt die Eingabe über so genannte Netzmaschen. Das sind sechs Strecken, die durch vier Punkte bestimmt sind. Für eine Entzerrung können mehrere Maschen verwendet werden. Die bei der Berechnung auftretenden Fehler werden angezeigt. Dieses Auswerteverfahren wird vor allem bei der Verkehrsunfalldokumentation eingesetzt.

Nachdem alle notwendigen Eingaben für das jeweilige Entzerrungsverfahren getätigt wurden, muss der zu entzerrende Bereich im Bild festgelegt werden. Sollen mehrere Bilder automatisch zu einem Bildplan montiert werden, so ist die Bildreihenfolge festzulegen. Anschließend wird die Entzerrungsberechnung gestartet.

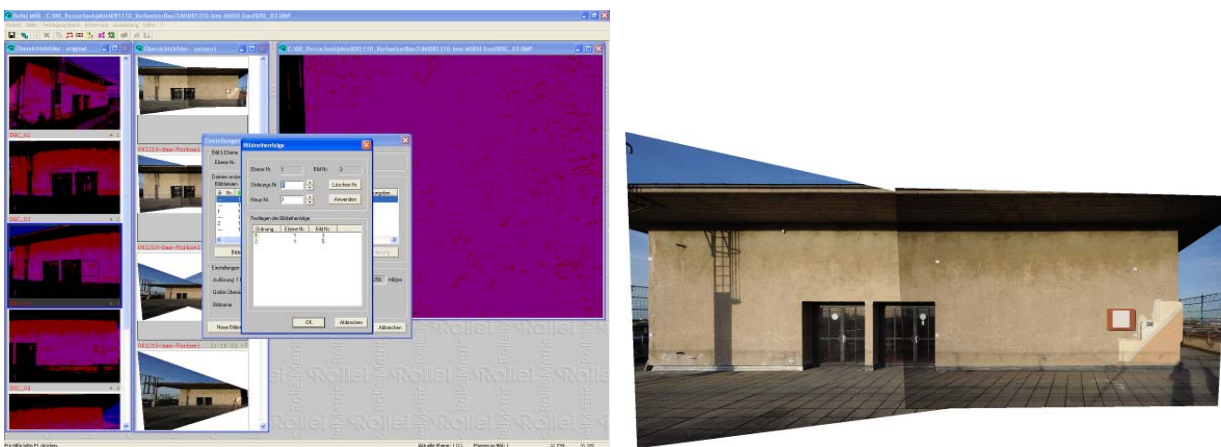


Abbildung 81: MSR - Bestimmung der Bildreihenfolge bei Bildern mit festgelegten Entzerrungsbereichen (links) und automatisch montierter Bildplan (rechts)

Eine automatische Mosaikierung während der Entzerrungsrechnung ist nur bei den Entzerrungsvarianten „Objektkoordinaten“ und „RolleiMetric CDW“ möglich. Bei der Entzerrung über parallele Linien können die Bilder nur nach der Entzerrung manuell verknüpft werden.

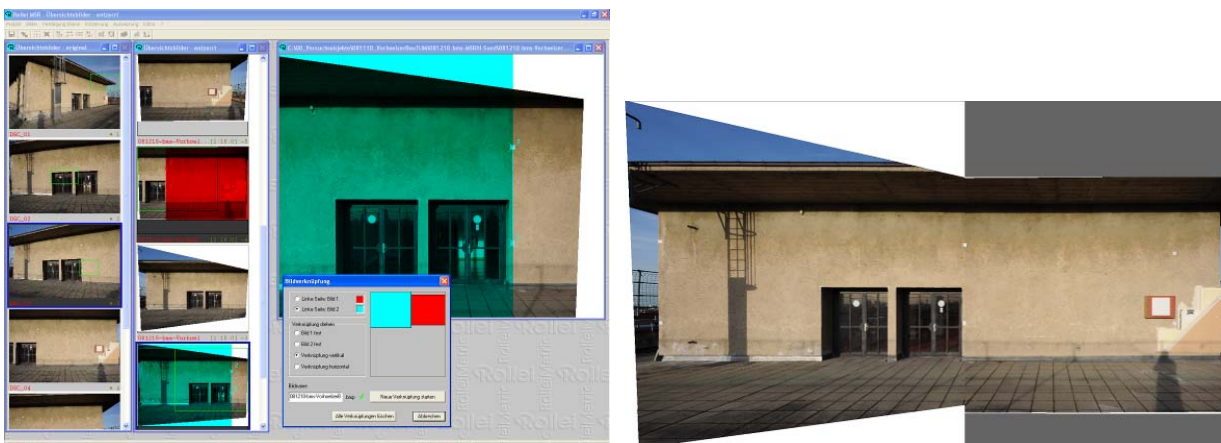


Abbildung 82: MSR - manuelle Verknüpfung von zwei entzerrten Bildern

MSR verfügt über umfangreiche CAD Funktionalitäten wie Punkt, Linie, Polylinie, Rechteck, Kreis, Kreisbogen, Text und Bemaßung mithilfe derer auf der Grundlage der entzerrten Bilder Zeichnungen angefertigt werden können. Änderungsbefehle wie Verschieben, Kopieren oder Löschen stehen ebenso zur Verfügung wie Messfunktionen, Layer und ein Objektfang. Das Ergebnis der Auswertung kann in Form einer DXF-Datei abgespeichert und in einem CAD-Programm weiterbearbeitet werden.

Für eine bessere Lesbarkeit der Zeichnung ist es möglich, die entzerrten Bilder einzeln auszublenden, so dass nur die Vektordaten sichtbar sind.

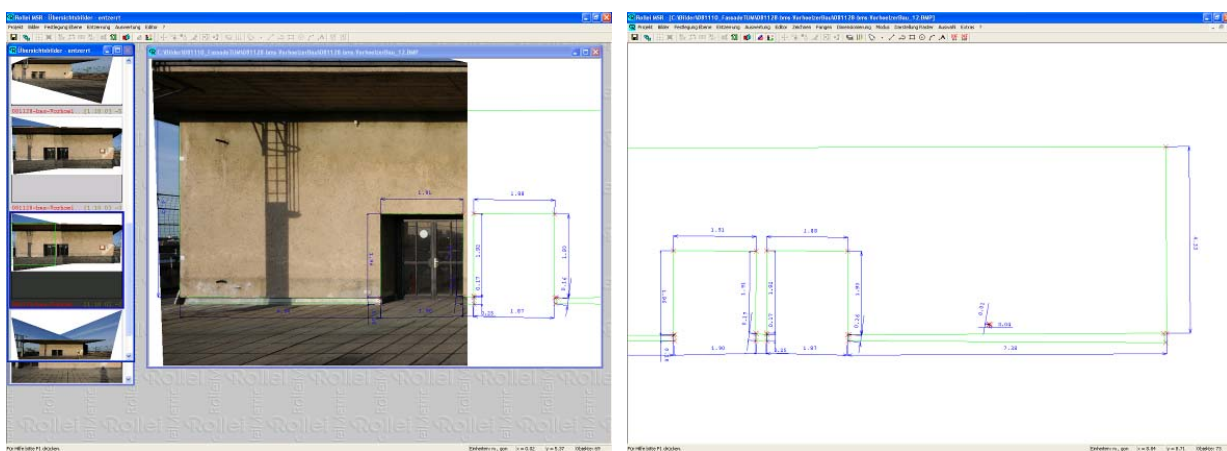


Abbildung 83: MSR - Auswertung entzerrter Bilder

Für die Arbeit mit RolleiMetric MSR ist ein Computer mit ausreichend großem Arbeitsspeicher erforderlich. Menüführung und Aufbau des Programms sind übersichtlich gestaltet. Die Hauptfunktionen werden in einer Symbolleiste dargestellt und können so direkt aufgerufen werden. Für die Einarbeitung in MSR werden Beispielprojekte und ein Handbuch zur Verfügung gestellt, das die Programmführungen der Software genau erklärt und zusätzlich theoretisches Hintergrundwissen vermittelt. Für die Einarbeitung ist mit ungefähr zwei Arbeitstagen zu rechnen.

Bei der Auswertung im Rahmen dieser Forschungsarbeit erwies es sich als sinnvoll, die DXF-Exportfunktion von MSR zu nutzen. Die für die Planerzeugung relevanten Objektpunkte wurden gespeichert, anschließend in AutoCAD importiert und weiterverarbeitet. Aus den Koordinaten wurde ein Ansichtsplan erzeugt, aus dem die festgelegten Maße gewonnen wurden.

6.2.5 Vergleich der Software für Einzelbildauswertung

Im Folgenden werden die wesentlichen Eigenschaften der ausgewählten Programme in einer Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 10: Vergleich der ausgewählten Einzelbildentzerrungssoftware (Stand: März 2009)

	Bonk Colorfix	Fokus metigo2D	Kubit PhoToPlan	RolleiMetric MSR	
Preis (ohne MWSt.)	735,00 €	2.000,00 €	1.800,00 €	1.500,00 €	
Systemvoraussetzungen erforderlich (Applikation?)	nein	nein	ja	nein	
wenn "ja", welche			AutoCAD		
Software anwendungsspezifisch	ja	nein	nein	nein	
Eingabe von Kalibrierungsdaten des Aufnahmesystems möglich	nein	ja	ja	ja	
wenn "ja", welche					
	Brennweite	-	ja	indirekt	ja
	Hauptpunktlage	-	ja	ja	ja
	Verzeichnung	-	ja	ja	ja
Funktion zur Kalibrierung von Aufnahmesystemen	nein	ja	ja	nein	
Importierbare digitale Bildformate:					
	BMP	ja	ja	ja	ja
	JPG	ja	ja	ja	ja
	PNG	nein	nein	ja	nein
	RDC	nein	nein	nein	ja
	TIFF	ja	ja	ja	ja
Import von Panoramabildern	nein	ja	nein	nein	
Import von Réseaubildern	nein	nein	nein	ja	
System mehrbildfähig	nein	ja	ja	ja	
importierbare Bildanzahl begrenzt	ja	nein	nein	nein	
Bildbearbeitung (Helligkeit / Kontrast) während der Auswertung	ja	nein	ja	nein	
automatischer Import von Referenzdaten	nein	ja	ja	ja	
Verzeichnungskorrektur möglich	ja	ja	ja	ja	
wenn "ja", wie					
	manuell	ja	ja	ja	nein
	automatisch	nein	ja	ja	ja
Entzerrung über Passpunkte / Objektkoordinaten	nein	ja	ja	ja	
Entzerrung über parallele Linien / Rechteck	ja	ja	ja	ja	
Entzerrung über Netze	nein	ja	nein	ja	
Entzerrung über Orientierungsdaten	nein	nein	nein	ja	
Ausgabe eines Entzerrungsprotokolls	ja	ja	ja	ja	
Entzerrung mehrerer Ebenen im Bild	nein	nein	ja	ja	
Begrenzung des Entzerrungsbereiches im Bild	nein	ja	ja	ja	
direkte Auswertung im Entzerrungsprogramm	ja	nein	ja	ja	
Bestimmung von Objektkoordinaten im Programm	nein	ja	ja	ja	
Anfertigung von CAD-Zeichnungen im Programm	nein	nein	ja	ja	
Bemaßung der Messbilder im Programm	ja	nein	ja	ja	
Überlagerung von Vektorzeichnung und Messbild	nein	nein	ja	ja	
Ausblenden des Messbildes in der Vektordarstellung	nein	nein	ja	ja	
Export von Vektorzeichnungen im DWG- / DXF-Format	nein	nein	ja	ja	
Import von Vektorzeichnungen im DWG- / DXF-Format	ja	nein	ja	ja	
Montage der Messbilder möglich (Mosaikierung)	nein	ja	ja	ja	
wenn "ja", wie					
	manuell	nein	nein	ja	ja
	automatisch	nein	ja	ja	ja
Ausgabe von maßstäblichen Orthophotos	nein	ja	ja	ja	
Auswertung von Panoramabildern	nein	ja	nein	nein	
Erstellung eines Auswertungsprotokolls	ja	ja	ja	nein	
Export der Messergebnisse in ein tabellarisches System	nein	nein	nein	nein	
stufenlose Zoomfunktion	nein	ja	ja	nein	
individuelle Defintion des Zoomfaktors	nein	ja	nein	nein	
Erzeugung von VRML-Dateien	nein	nein	ja	nein	
Erzeugung von ESRI Word Files	nein	nein	ja	nein	

6.3 Software für die photogrammetrische Mehrbildauswertung

Systeme für die photogrammetrische Mehrbildauswertung sind auf die verschiedensten Anwendungsmöglichkeiten, meist außerhalb des Bauwesens, ausgerichtet. Hier sind insbesondere die Luftbildauswertung, die Industriephotogrammetrie und die forensische Photogrammetrie zu nennen. Auf dem Markt verfügbare Programme sind in Tabelle 11 zusammengestellt, ein Herstellerverzeichnis ist im Anhang zu finden.

Tabelle 11: Vergleich Programme Mehrbildphotogrammetrie.

Firma	Produkt/ -e	Mehrbildauswertesystem		Verwendungszweck	Voraussetzung
		terrestrisch	aero		
Aicon 3D Systems	DPA Pro	ja	nein	beliebig	keine
	DPA Inspect	ja	nein	industriell	keine
Bea Systems	Socet Set	nein	ja	k.A.	keine
CGI Systems	Geomatica 10	nein	ja	k.A.	keine
Gesellschaft für optische Messtechnik (GOM)	Tritop	ja	nein	industriell	keine
Invers	PHAUST	ja	nein	beliebig	AutoCad
iWitness	iWitness	ja	nein	forensisch	keine
	iWitness Pro	ja	nein	forensisch	keine
K ² Photogrammetry	PATB	nein	ja	k.A.	keine
	PATM	nein	ja	k.A.	keine
Geosystems GmbH	LPS	ja	ja	beliebig	keine
Menci Software	Z-Map Photo	ja	ja	beliebig	keine
Phocad Ingenieurgesellschaft mbH	Phidias	ja	nein	beliebig	Microstation
PMS AG	Elcovision 10	ja	nein	beliebig	keine
Rollei Metric GmbH	CDW	ja	ja	beliebig	keine
	CDW Graphics	ja	nein	beliebig	AutoCad
RSI GmbH	PhotoModeler	ja	nein	beliebig	keine
Technet GmbH	Pictran	ja	nein	beliebig	keine
	e-foto	ja	ja	beliebig	keine

Die für das Projekt ausgewählten Programme sind markiert.

Für die vorliegende Forschungsarbeit wurden zwei Programme aus den folgenden Gründen gewählt:

Geosystems GmbH – LPS

LPS wird am Fachgebiet für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München eingesetzt.

RolleiMetric – CDW

Das Mehrbildauswertesystem CDW kann in Kombination mit dem Einzelbildauswertesystem Rolleimetric MSR angewendet werden. Die bei diesem Projekt eingesetzte Kamera wurde bei Rolleimetric kalibriert.

6.3.1 Geosystems GmbH – Leica Photogrammetry Suite (LPS) Version 9.1

Leica Photogrammetry Suite ist ein photogrammetrisches Mehrbildauswertesystem, das überwiegend für die Auswertung von Luftbildern konzipiert ist. Das Programm eignet sich aber ebenfalls für terrestrische Aufgabenstellungen. Die Auswertesoftware besitzt eine modulare Software-Architektur und ist wie folgt (siehe Abbildung 84) aufgebaut.

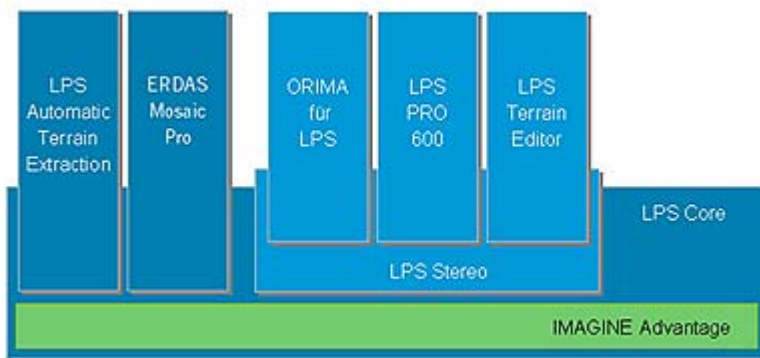


Abbildung 84: modularer Aufbau von LPS (Geosystems 2009)

LPS Core bildet die Basis des Systems und beinhaltet alle Grundfunktionen für die Mehrbildauswertung. Zusatzmodule bieten Funktionen wie der Mosaikierung großer Bildmengen (ERDAS MosaicPro) oder der automatischen Generierung von digitalen Geländemodellen (LPS Automatic Terrain Extraction). Aufbauend auf LPS Core bildet LPS Stereo wiederum die Grundlage für alle Module, die sich der stereoskopischen Auswertung bedienen. Diese Module selbst sind Spezialapplikationen z.B. für digitale Geländemodelle (LPS Terrain Editor) oder für die Anbindung von LPS an das CAD-System MicroStation (LPS PRO 600).

LPS erkennt u.a. die Bildformate BMP, GIF, JPG, RAW und TIFF. Die Daten des Aufnahmesystems (Kalibrierungsdaten) können eingegeben und gespeichert werden. Die Anzahl der Messbilder, die in einem Projekt verarbeitet werden können, ist unbegrenzt. Die Koordinaten der Passpunkte können in verschiedenen Formaten importiert oder von Hand eingegeben werden.

Für das Identifizieren von Punkten in den Messbildern können zwei Bilder gleichzeitig in drei stufenlos wählbaren Zoomstufen dargestellt werden (siehe Abbildung 85). Für die geladenen Bilder können Helligkeit und Kontrast individuell eingestellt werden. Die Bildkoordinaten der gemessenen Punkte können in tabellarischer Form abgerufen werden. Es besteht auch die Möglichkeit, Verknüpfungspunkte in den Projektbildern automatisch generieren zu lassen.

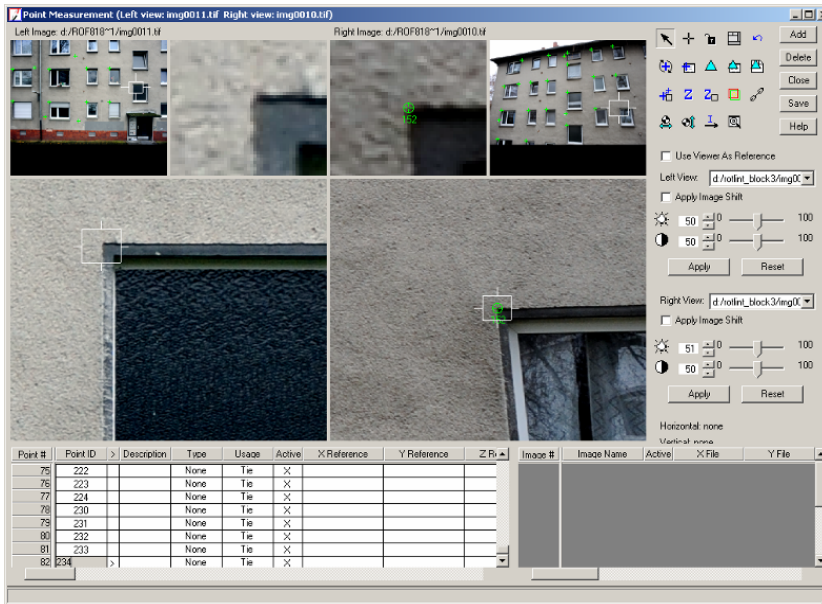


Abbildung 85: Markieren von Verknüpfungspunkten in zwei Bildern mit LPS

Nachdem eine ausreichend große Zahl von Verknüpfungspunkten in den Bildern identifiziert worden ist, kann die Bündeltriangulationsrechnung gestartet werden. Eine manuelle Eingabe und Wichtung zusätzlicher Informationen und von Näherungswerten für die Berechnung ist möglich. Das Ergebnis wird graphisch und als Orientierungsprotokoll mit den Punktkoordinaten dargestellt. Die orientierten Messbilder können zu Orthofotos zusammengefasst werden.

Sollen nach der Orientierungsrechnung die Koordinaten weiterer Punkte erfasst werden, so kann dies in LPS nur mit Hilfe einer stereoskopischen Darstellung geschehen. Diese Darstellungsweise erfordert spezielle Hardware. Die Koordinaten aller Objektpunkte, die im Orientierungsprotokoll aufgelistet sind, können als ASCII-Datenfile gespeichert, in ein CAD-Zeichenprogramm geladen und dort weiterbearbeitet werden.

Die Oberfläche von LPS ist sehr übersichtlich gestaltet. Das Handbuch ist umfangreich und ausführlich. Für die Einarbeitung in das komplexe System müssen mehrere Tage angesetzt werden. Vom Hersteller werden hierfür Schulungen angeboten.

Da bei diesem Projekt die stereoskopische Darstellung bei der Auswertung nicht eingesetzt werden sollte, mussten alle erforderlichen Punkte für die Modellerzeugung vor der Orientierungsrechnung im Messbild definiert werden. So war auch eine Auswertung ohne Stereodarstellung möglich. Mit Hilfe des Orientierungsprotokolls wurden die Koordinaten der Objektpunkte über eine ASCII-Datei in das CAD-System AutoCAD importiert und dort in ein Kantenmodell überführt, dem die gesuchten Maße entnommen wurden.

6.3.2 RolleiMetric – Close-Range Digital Workstation (CDW) Version 2.1

RolleiMetric CDW ist ein anwendungsneutrales photogrammetrisches Mehrbildauswertesystem, das in drei Versionen erhältlich ist. CDW Graphics ist eine AutoCAD-Applikation, bei der die Auswertung der Daten in der CAD-Umgebung stattfindet. CDW 2.1 ist ein eigenständiges Programm, welches in zwei Ausführungen erhältlich ist. Bei der günstigeren Variante ist die Anzahl der Bilder begrenzt. Im Folgenden wird die Version CDW 2.1 Extended beschrieben, die auch bei dem hier behandelten Projekt eingesetzt wurde.

CDW arbeitet ausschließlich mit Bildern im BMP-Format. Deshalb ist es unter Umständen erforderlich, Bilder anderer Formate, wie GIF, JPG und TIF mit dem integrierten Konverter in das BMP-Format umzuwandeln. Damit Bilder mit CDW ausgewertet werden können, müssen zwingend die Kalibrierungsparameter des verwendeten Aufnahmesystems eingegeben werden. CDW kann in der Vollversion beliebig viele Bilder verarbeiten. Passpunktkoordinaten werden entweder manuell eingegeben oder können mit Hilfe der Importfunktion geladen werden. Um Koordinaten in das Programm laden zu können, müssen diese in einer Datei mit einem RolleiMetric eigenen Format hinterlegt sein. Allgemeine Datenformate wie das ASCII-Format werden vom Programm nicht erkannt.

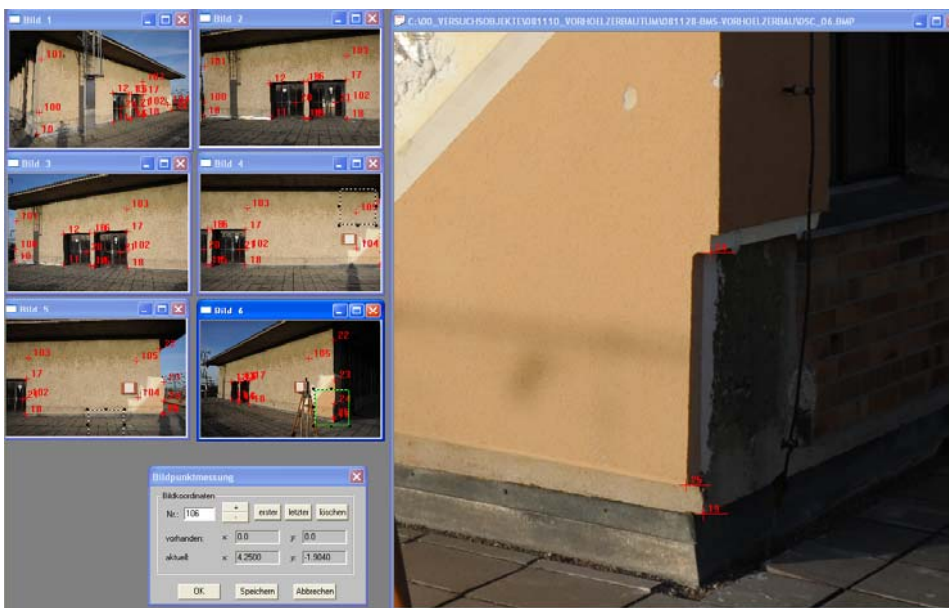


Abbildung 86: Markieren von Verknüpfungspunkten in CDW

Für die Identifikation von Punkten in den Messbildern kann in CDW jeweils nur der Ausschnitt eines Bildes vergrößert dargestellt werden (siehe Abbildung 86). Es stehen nur drei feste Zoomstufen zur Verfügung. Ausgewählte Verknüpfungspunkte werden in allen Bildern mit Nummern gekennzeichnet. Bilder im RolleiMetric eigenen Bildformat RDC können während der Auswertung zur besseren Punktidentifikation bearbeitet werden.

Die Eingabe von zusätzlichen Informationen und Näherungswerten ist möglich, diese können aber nicht gewichtet werden. Nach erfolgreicher Orientierung und anschließender Bündelausgleichsrechnung werden die Objektkoordinaten in einer separaten Datei gespeichert und in einem eigenen Fenster am Bildschirm angezeigt.

Mit den orientierten Bildern können die Koordinaten von Neupunkten direkt gemessen und anschließend gespeichert werden. Sobald ein Punkt in einem Bild ausgewählt wurde, wird in den anderen Bildern eine so genannte epipolare Linie angezeigt, auf der der Punkt rechnerisch liegen müsste. Jede weitere Punktbestimmung im nächsten Bild erzeugt eine weitere Linie. Durch die Darstellung epipolarer Linien kann das Auffinden von Punkten unterstützt werden. In CDW können auch Kantenmodelle erzeugt werden. Die Ergebnisse können über eine Datenumwandlung in das DXF-Format in CAD übertragen werden.

CDW hat eine übersichtliche Benutzeroberfläche. Das Handbuch ist sehr detailliert und vermittelt zusätzlich theoretisches Hintergrundwissen. Mit Hilfe von Beispielprojekten soll die Einarbeitung in die Software erleichtert werden. Für die Einarbeitung in das Programm ist mit mehreren Tagen zu rechnen.

Die Möglichkeit in CDW ein Kantenmodell zu erstellen, wurde in diesem Projekt nicht genutzt. Stattdessen wurden die Objektpunkte in einer DXF-Datei gespeichert und in das CAD-System AutoCAD geladen. In AutoCAD wurde schließlich ein Kantenmodell erzeugt, dem alle geforderten Maße entnommen wurden.

6.3.3 Vergleich der Software für die Mehrbildauswertung

In der nachstehenden Tabelle werden die wesentlichen Eigenschaften von LPS und CDW vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 12: Vergleich der ausgewählten Mehrbildauswertesoftware (Stand: März 2009)

	Geosystems, LPS	Rollei Metric, CDW
Preis (ohne MwSt.)	6.000,00 €	9.980,00 €
Systemvoraussetzungen erforderlich	nein	nein
Software zweckgebunden	nein	nein
Eingabe von Kalibrierungsdaten möglich	ja	ja
wenn "ja", welche		
Brennweite	ja	ja
Hauptpunktlage	ja	ja
Verzeichnung	ja	ja
importierbare digitale Bildformate		
BMP	ja	ja
GIF	ja	ja
JPG	ja	ja
PNG	ja	nein
RDG	nein	ja
TIF	ja	ja
Import von Panoramabildern	nein	nein
Bildanzahl begrenzt	nein	nein
integrierte Bildbearbeitung während der Auswertung	ja	nur bedingt
wenn "ja", welche		
Helligkeit	ja	nur bedingt
Kontrast	ja	nur bedingt
stufenlose Zoomfunktion	ja	nein
existierende Importfunktion für Referenzdaten	ja	ja
können mehrere Bilder für die Bildmessung geladen werden	ja	nein
wenn "ja", wie viele	2	-
automatisch Generierung von Verknüpfungspunkten	ja	nein
Gewichtung der Bildkoordinaten mit einer a priori Genauigkeit	ja	nein
sind Näherungswerte für die Orientierungsparameter erforderlich	nein	nein
Import von Orientierungsparametern möglich	ja	ja
Export von Orientierungsparametern möglich	ja	ja
Festhalten von einzelner Orientierungsparameter möglich	ja	ja
wenn "ja", welche		
Kamerastandpunkte	ja	nein
Objektpunkte	ja	ja
Gewichtung der Passpunkte möglich	ja	ja
robuste Ausgleichung / automatische Fehlerbeseitigung implementiert	ja	ja
Einberechnung bereits gemessene Bildpunkte ins Nachbarbild	ja	ja
kommt das Programm mit großen Bildrotationen zurecht	ja	ja
Berechnung der Genauigkeitseigenschaften der Objektpunkte	ja	ja
Berechnung der Ori-Genauigkeit	ja	ja
Simultankalibrierung während der Orientierung	ja	ja
Darstellung der Genauigkeitseigenschaften von Objektpunkten	ja	ja
Darstellung der Ori-Genauigkeit	ja	ja
Protokollierung der Fehlersuche	ja	ja
Protokollierung der Fehlerbeseitigung	ja	ja
Auswertung einzelner Objektpunkte möglich	ja	ja
Stereoauswertung möglich	ja	nein
können die Punkte aus der Orientierung übernommen werden	ja	ja
Überlagerung von Vektoren und Modell	ja	ja
kann Foto für die Vektordarstellung ausgeblendet werden	ja	nein
Anlegen von Layern möglich	ja	ja
Realisierung einer komfortablen CAD Anbindung	ja	ja
Export von Objektkoordinaten	ja	ja
Bildmontage (Mosaikierung) möglich	ja	nein
Bildanzahl für Mosaikierung begrenzt	nein	-
automatische Retuschierung der Montagekanten möglich	ja	-
radiometrische Anpassung (smoothing) möglich	ja	-

6.4 Aufnahme Fassade Vorhoelzer-Bau

Als Versuchsobjekt wurde die Südfassade der Laterne des Vorhoelzer-Baus gewählt. Für die Objektsignalisierung wurden Messmarken mit einem Fadenkreuz und einem Durchmesser von 6,0 cm gedruckt und mit doppelseitigem Klebeband an der Fassade befestigt. Zunächst wurden drei Marken mit einem Nivelliergerät auf eine festgelegte Bezugshöhe eingemessen und fixiert. Weitere drei Marken wurden anschließend mit Hilfe eines Schnurlots jeweils lotrecht über den bereits geklebten Marken an der Fassade angebracht. Schließlich wurden die Distanzen zwischen den Marken mit Hilfe eines Bandmaßes ermittelt und die Ergebnisse in eine Handskizze eingetragen. Dabei wurden die Messmarken von 100 bis 105 durchnummeriert (siehe Abbildung 87). Für die Auswertung wurde die Annahme getroffen, dass sich die Passmarken auf der Hauptfassade in einer lotrecht stehenden Ebene befinden.



Abbildung 87: Messmarken an der Südfassade Vorhoelzer-Bau, Detail (links) und Gesamtansicht mit Nummerierung der Marken (rechts)

Anschließend wurde die Fassade mit der oben erwähnten kalibrierten digitalen Spiegelreflexkamera vom Typ Nikon D3 des Fachgebiets für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München abfotografiert. Von vier Kamerastandpunkten aus wurden sechs leicht konvergente Aufnahmen im Querformat angefertigt: zwei Gesamtansichten und vier sich überlappende Teilansichten. Die Entfernung zwischen Kamera und Objekt wurde hierbei bei allen Aufnahmen annähernd gleich gehalten. Objektsignalisierung und Aufnahmen konnten in ca. einer Stunde ausgeführt werden.

Alle photogrammetrischen Messbilder wurden im TIFF-Bildformat gespeichert. Die Messbilder wurden ohne vorherige Bearbeitung mit Bildbearbeitungsprogrammen in die Auswertung übernommen.

6.5 Auswertung Fassade Vorhoelzer-Bau

Bei der photogrammetrischen Auswertung der Messbilder der Fassade kamen vier Verfahren zur Anwendung: Entzerrung über Passpunkte, Entzerrung über parallele Linien, Entzerrung über Orientierungsdaten aus Mehrbildphotogrammetrie und die Mehrbildphotogrammetrie selbst. Im Folgenden werden die Programme für die Einzelbildphotogrammetrie mit E-1 bis E-4 und die für die Mehrbildphotogrammetrie mit M-1 und M-2 bezeichnet.

Bei der Entzerrung über Passpunkte werden die Koordinaten definierter Punkte am Objekt, die während der Objekterfassung mit aufgenommen wurden, entweder manuell oder automatisch in das Auswertesystem geladen. Im Falle der Fassade des Vorhoelzer Baus waren dies die Koordinaten der oben erwähnten sechs Messmarken. Anhand dieser definierten Passpunkte wurden die Projektbilder entzerrt, ggf. montiert und ausgewertet. Mit einem Auswertesystem ist diese Methode der Auswertung nicht möglich, deshalb wurden in diesem Abschnitt nur drei Systeme untersucht.

Bei der Entzerrung über parallele Linien werden am Objekt parallel verlaufende Linien im Bild identifiziert. Im Falle von Fassaden können dies z.B. die Kanten von Fensterfluchten oder die Außenkanten der Fassade sein. Die Identifikation der Parallelen erfolgt anhand von Linienscharen (E-2, E-3, E-4) oder mithilfe eines Rechtecks (E-1). Außerdem werden zwei senkrecht zueinander stehende Referenzstrecken für die Skalierung des entzerrten Bildes benötigt.

Bei den Verfahren Entzerrung über Passpunkte und Entzerrung über parallele Linien wurden die Auswertung eines einzelnen Bildes der Gesamtfassade und die Auswertung zweier mosaikierter Bilder untersucht.

Bei der Auswertung eines Einzelbildes kam Bild 1 (Abbildung 88) der Objekterfassung zum Einsatz. Die ca. 16 m breite und 4,5 m hohe Fassade wurde hier aus ca. 5 m Entfernung mit einem Betrachtungswinkel von ungefähr 45° Grad zur Fassadenebene aufgenommen. Daraus ergibt sich eine beträchtliche perspektivische Verzerrung, wie sie für Aufnahmen in beengten räumlichen Verhältnissen charakteristisch ist. Außerdem müssen solche Aufnahmen bei denjenigen Auswertesystemen verwendet werden, die nicht mehrbildfähig sind.



Abbildung 88: Bild 1 der Objekterfassung

Bei der Auswertung zweier mosaikierter Bilder kamen die Bilder 3 und 5 (Abbildung 89) der Objekterfassung zum Einsatz. Der Überlappungsbereich der beiden Aufnahmen ist am Objekt etwa 5 m breit. Die Aufnahmeentfernung betrug bei beiden Bildern ca. 5 m. Diese Variante der Auswertung steht nur bei den mehrbildfähigen Systemen zur Verfügung.



Abbildung 89: Bild 3 und 5 der Objekterfassung

Wo dies möglich war, wurden die Daten der Kalibrierung bei der Auswertung berücksichtigt.

Zur Überprüfung der Ergebnisse der photogrammetrischen Vermessung wurden sechs ausgewählte Referenzmaße in der Fassade von Hand genommen. Als Werkzeuge für das Aufmaß dienten ein 30 m Bandmaß, ein 8 m Bandmaß, ein 5 m Teleskopmaßstab, ein 2 m Gliedermaßstab, ein Bosch Handlaser und ein 150 mm Messschieber. Folgenden Strecken wurden ausgewählt (siehe Abbildung 90):

- x03 = 0,245 m Breite der Putzunterkante zwischen den beiden Türen
- x05 = 7,376 m Breite der östlichen Seite der Südfassade von der rechten Kante der Tür 2 bis zur rechten Fassadenkante
- x06 = 4,310 m Höhe der linken Fassadenseite von der Putzunterkante bis zum Dachvorsprung
- x07 = 4,330 m Höhe der rechten Fassadenseite von der Putzunterkante bis zum Dachvorsprung
- x13 = 1,910 m Breite der Sturzkante der Tür 1
- x40 = 16,050 m gesamte Breite der Südfassade im Bereich Putzunterkante

Die Ergebnisse der verschiedenen photogrammetrischen Auswerteverfahren („Ist-Maß“) werden im Folgenden den Ergebnissen des Handaufmaßes („Soll-Maß“) in Tabellen und Diagrammen gegenübergestellt. Ist die absolute Abweichung zwischen Soll- und Ist-Maß negativ, bedeutet dies, dass die Strecke in der jeweiligen Auswertung zu kurz gemessen wurde. Umgekehrt bedeutet eine positive Abweichung, dass das Ist-Maß in der photogrammetrischen Auswertung zu lang gemessen wurde. Neben den absoluten Abweichungen in cm werden außerdem die prozentualen Abweichungen des Ist-Maßes vom Soll-Maß angegeben.

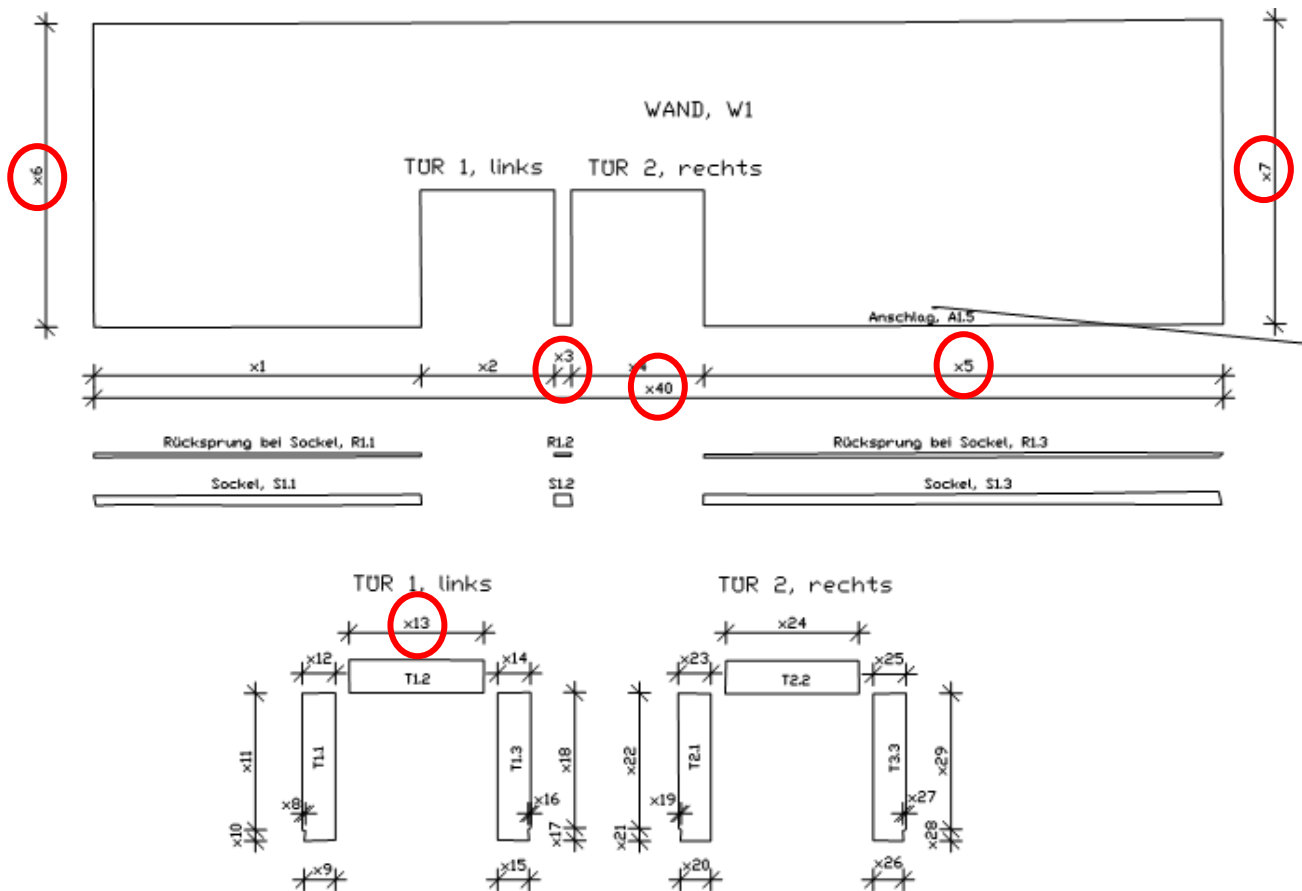


Abbildung 90: Südfassade Vorhoelzer Bau - Referenzmaße

6.5.1 Entzerrung über Passpunkte, Einzelbild

Für die Passpunktentzerrung eines einzelnen Bildes (Bild 1) wurden die Passmarken 100 bis 103 verwendet, da diese in allen Systemen klar identifiziert und genau anvisiert werden konnten. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 13 und in den Abbildung 91 und Abbildung 92 dargestellt.

Tabelle 13: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, Einzelbild

Strecke	Soll-Maß [m]	Ist-Maß [m]	E-2		Ist-Maß [m]	E-3		Ist-Maß [m]	E-4	
			Abweichung [cm]	Abweichung [%]		Abweichung [cm]	Abweichung [%]		Abweichung [cm]	Abweichung [%]
x03	0,245	0,252	0,7	2,86%	0,250	0,5	2,04%	0,253	0,8	3,27%
x05	7,376	7,271	-10,5	1,42%	7,378	0,2	0,03%	7,330	-4,6	0,62%
x06	4,310	4,264	-4,6	1,07%	4,300	-1,0	0,23%	4,303	-0,7	0,16%
x07	4,330	4,330	0,0	0,00%	4,306	-2,4	0,55%	4,289	-4,1	0,95%
x13	1,910	1,935	2,5	1,31%	1,912	0,2	0,10%	1,903	-0,7	0,37%
x40	16,050	15,926	-12,4	0,77%	16,044	-0,6	0,04%	15,993	-5,7	0,36%

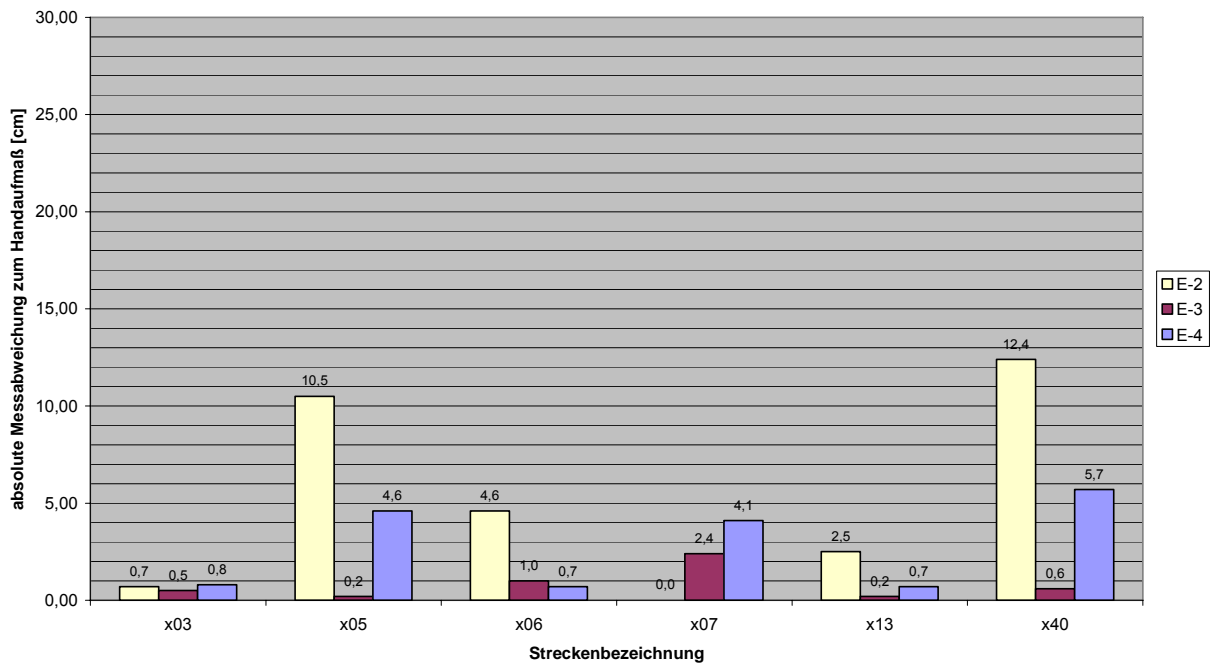


Abbildung 91: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, Einzelbild - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß

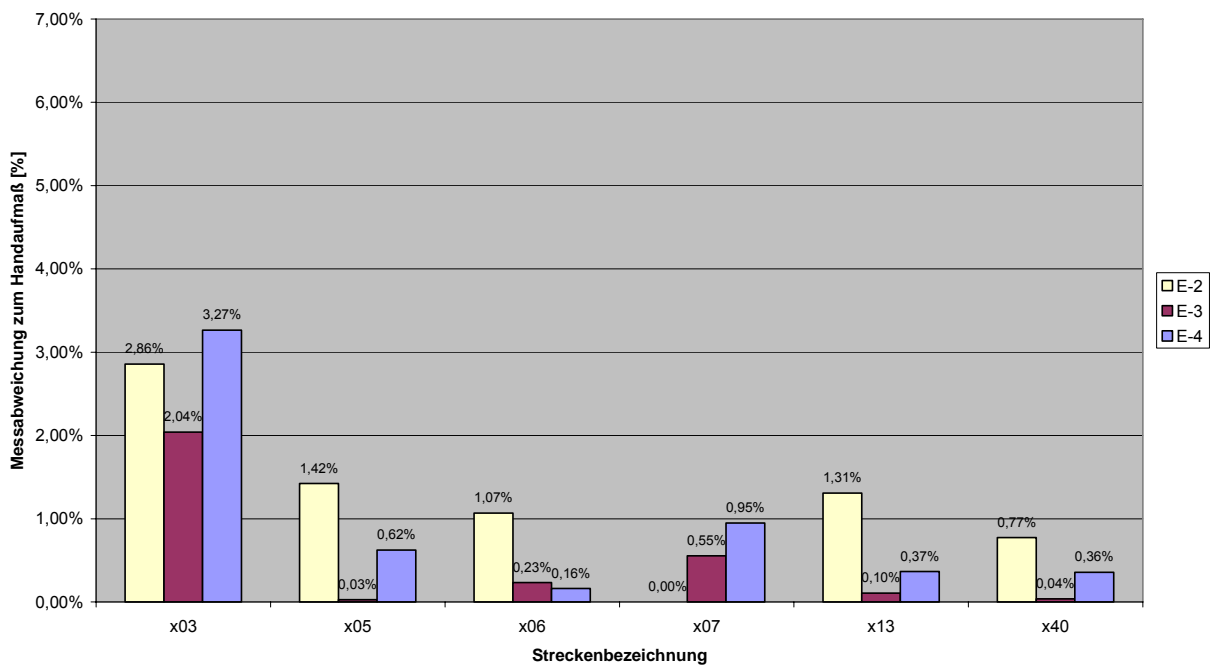


Abbildung 92: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, Einzelbild - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß

Die größten absoluten Abweichungen sind beim Maß x40, dem größten Maß, zu erkennen. Die größten relativen Abweichungen finden sich beim Maß x03, dem kleinsten Maß.

Die besten Ergebnisse lieferte das System E-3. Dies ist das einzige System, welches innerhalb der gleichen Systemumgebung eine Bildbearbeitung und die Bildauswertung des entzerrten Messbildes erlaubt. Eine vergleichsweise große absolute Abweichung ist jedoch beim Maß x07 zu verzeichnen. Hierbei handelt es sich um die rechte vertikale Fassadenkante, welche im nicht entzerrten Originalbild aufgrund der Perspektive sehr klein abgebildet ist.

6.5.2 Entzerrung über Passpunkte, mosaikierte Bilder

Bei dieser Variante wurden die beiden Messbilder Bild 3 und Bild 5 einzeln nacheinander über Passpunkte entzerrt und anschließend mosaikiert. Für die Entzerrung des linken Bildes (Bild 3) wurden die vier Passpunkte 100, 101, 102 und 103 verwendet. Die Entzerrung des rechten Bildes (Bild 5) wurde anhand der vier Passpunkte 102, 103, 104 und 105 durchgeführt. Anschließend wurden die beiden entzerrten Einzelbilder über die im Auswertesystem implementierte Montagefunktion zu einem Orthofoto zusammengefasst und ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 14 und in den Abbildung 93 und Abbildung 94 dargestellt.

Tabelle 14: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, zwei mosaikierte Bilder

Strecke	Soll-Maß [m]	Ist-Maß [m]	E-2		Ist-Maß [m]	E-3		Ist-Maß [m]	E-4	
			Abweichung [cm]	Abweichung [%]		Abweichung [cm]	Abweichung [%]		Abweichung [cm]	Abweichung [%]
x03	0,245	0,244	-0,1	0,41%	0,246	0,1	0,41%	0,253	0,8	3,27%
x05	7,376	7,303	-7,3	0,99%	7,300	-7,6	1,03%	7,362	-1,4	0,19%
x06	4,310	4,278	-3,2	0,74%	4,307	-0,3	0,07%	4,318	0,8	0,19%
x07	4,330	4,237	-9,3	2,15%	4,245	-8,5	1,96%	4,318	-1,2	0,28%
x13	1,910	1,936	2,6	1,36%	1,921	1,1	0,58%	1,918	0,8	0,42%
x40	16,050	15,975	-7,5	0,47%	15,971	-7,9	0,49%	16,022	-2,8	0,17%

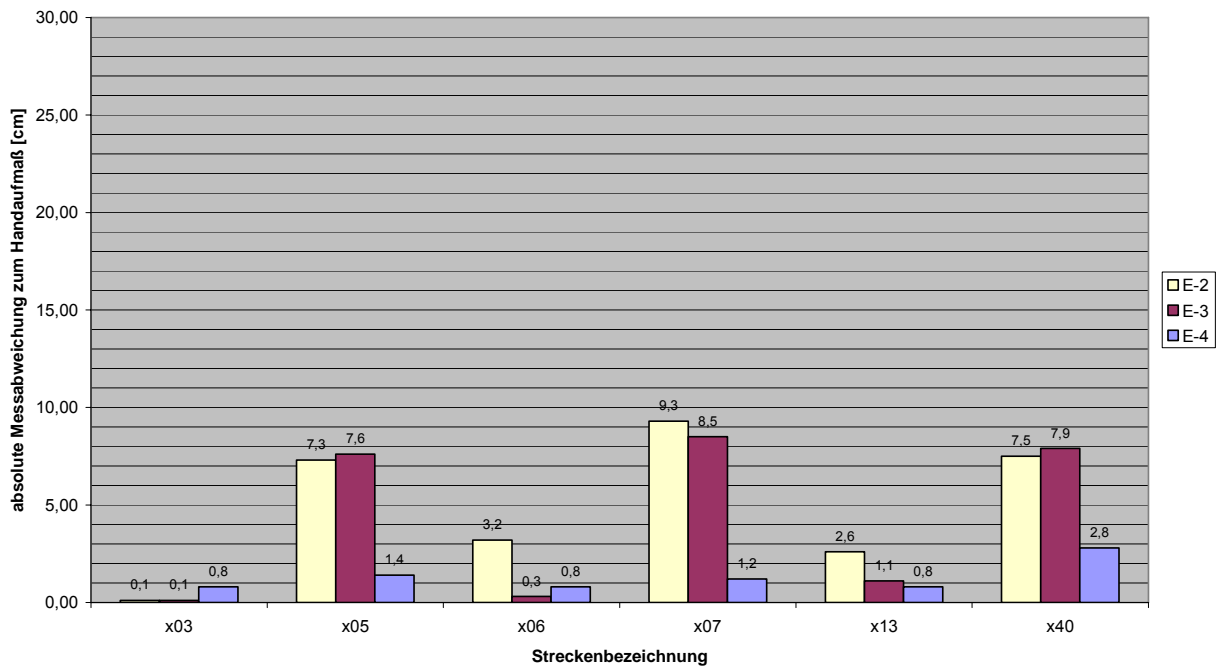


Abbildung 93: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, zwei mosaikierte Bilder - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß

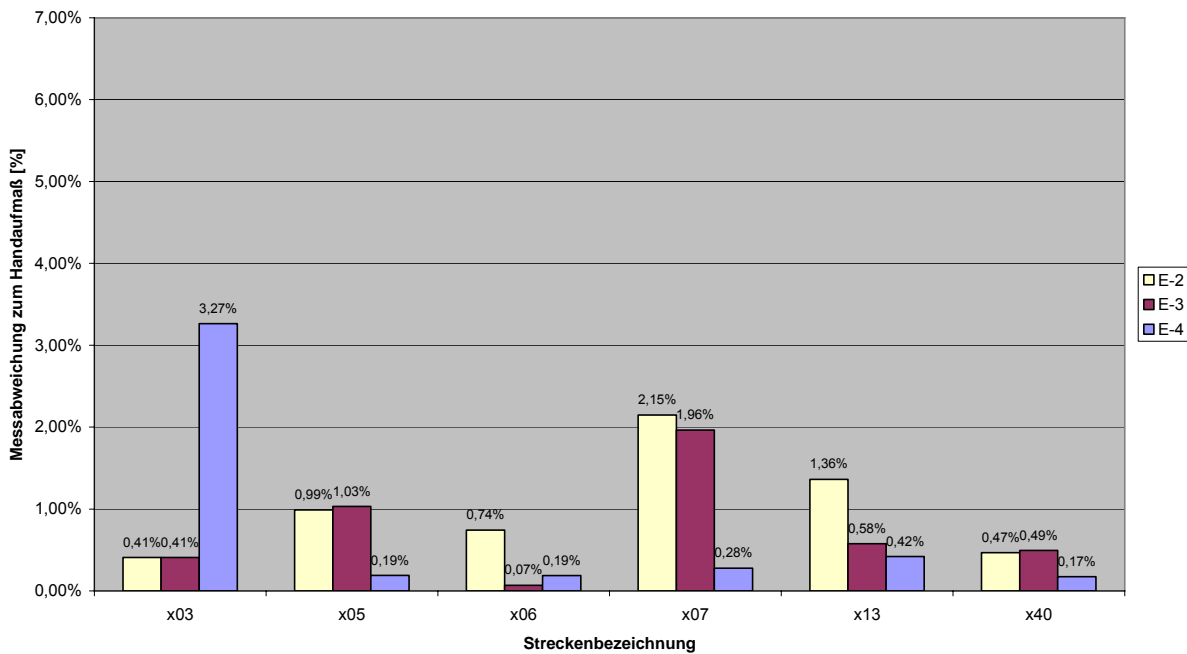


Abbildung 94: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, zwei mosaikierte Bilder - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß

Die größten absoluten Abweichungen von bis zu 9,3 cm sind beim Maß x07 zu finden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Messbild aufgrund des Schattenwurfs im rechten oberen Eck des Versuchsobjektes eine klare Identifikation des oberen Endes der Gebäudekante nicht möglich war. Große Abweichungen vom Ist-Maß zeigen auch die Messungen der beiden größten Maße x05 und x40.

Die besten Ergebnisse lieferte bei dieser Vorgehensweise das System E-4.

6.5.3 Entzerrung über parallele Linien, Einzelbild

Diese Methode der Bildentzerrung kann mit allen vier betrachteten Programmen durchgeführt werden.

In E-1 werden die Parallelen und die Entzerrungsebene durch einen Rahmen definiert. Dieser wurde an den Rahmenecken auf die Ecken der Fassade gezogen.

Bei E-2, E-3 und E-4 wird die Ebene über parallel verlaufende Linien definiert. Diese wurden an den Passpunkten sowie an markanten Fassadenkanten (Sturzkante der beiden Türen, untere Fassadenkante etc.) ausgerichtet.

Für die Entzerrungsrechnung sind zudem ein horizontales und ein vertikales Maß erforderlich. Als horizontale Referenzstrecke wurde die Strecke zwischen den beiden Marken 100 und 104 mit einer Länge von 14,664 m gewählt, als vertikale Referenzstrecke die zwischen den Marken 100 und 101 mit der Höhe 2,310 m. (Eine vergleichende Auswertung mit einer kürzeren horizontalen Referenzstrecke führte erwartungsgemäß zu geringfügig schlechteren Ergebnissen.)

Die Ergebnisse der Auswertung sind in untenstehender Tabelle 15 und in den Abbildung 95 und Abbildung 96 zusammengestellt.

Tabelle 15: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, Einzelbild

Strecke	Soll-Maß [m]	E-1		E-2			E-3			E-4			
		Ist-Maß [m]	Abweichung [cm]	Abweichung [%]	Ist-Maß [m]	Abweichung [cm]	Abweichung [%]	Ist-Maß [m]	Abweichung [cm]	Abweichung [%]	Ist-Maß [m]	Abweichung [cm]	Abweichung [%]
x03	0,245	0,251	0,6	2,45%	0,260	1,5	6,12%	0,250	-0,5	2,04%	0,248	0,3	1,22%
x05	7,376	7,25	-12,6	1,71%	7,319	-5,7	0,77%	7,332	-4,4	0,60%	7,306	-7,0	0,95%
x06	4,310	4,307	-0,3	0,07%	4,304	-0,6	0,14%	4,307	-0,3	0,07%	4,327	1,7	0,39%
x07	4,330	4,315	-1,5	0,35%	4,359	2,9	0,67%	4,301	-2,9	0,67%	4,199	-13,1	3,03%
x13	1,910	1,941	3,1	1,62%	1,935	2,5	1,31%	1,904	-0,6	0,31%	1,958	4,8	2,51%
x40	16,050	15,948	-10,2	0,64%	15,983	-6,7	0,42%	15,971	-7,9	0,49%	16,190	14,0	0,87%

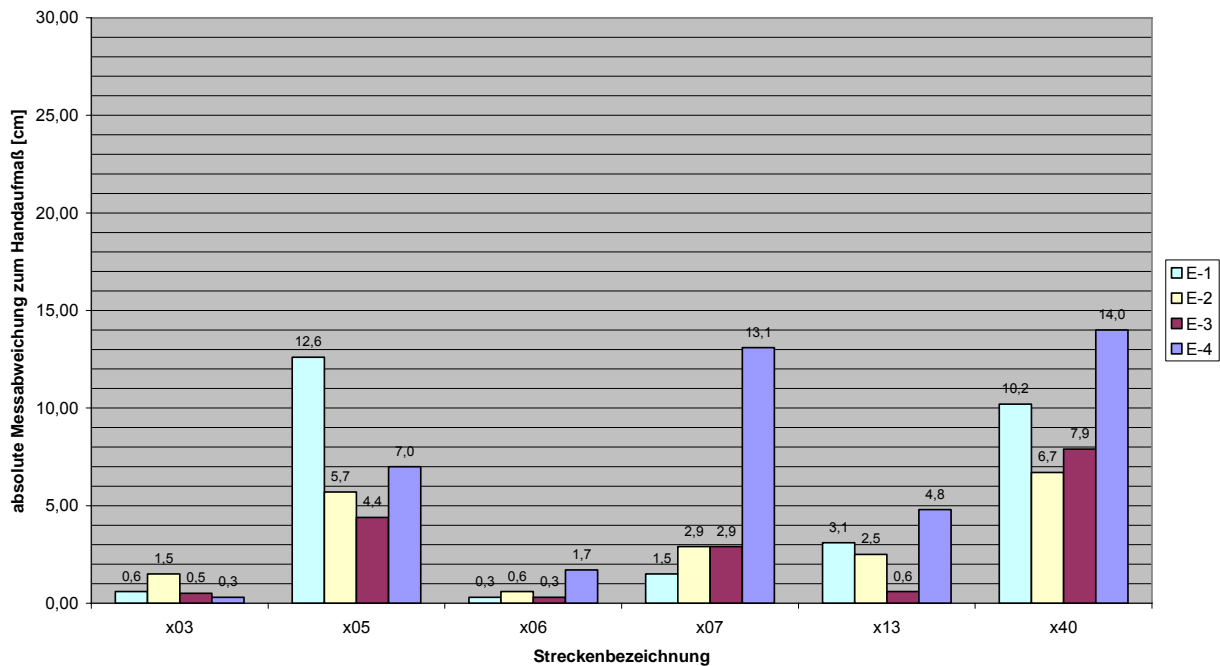


Abbildung 95: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, Einzelbild - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß

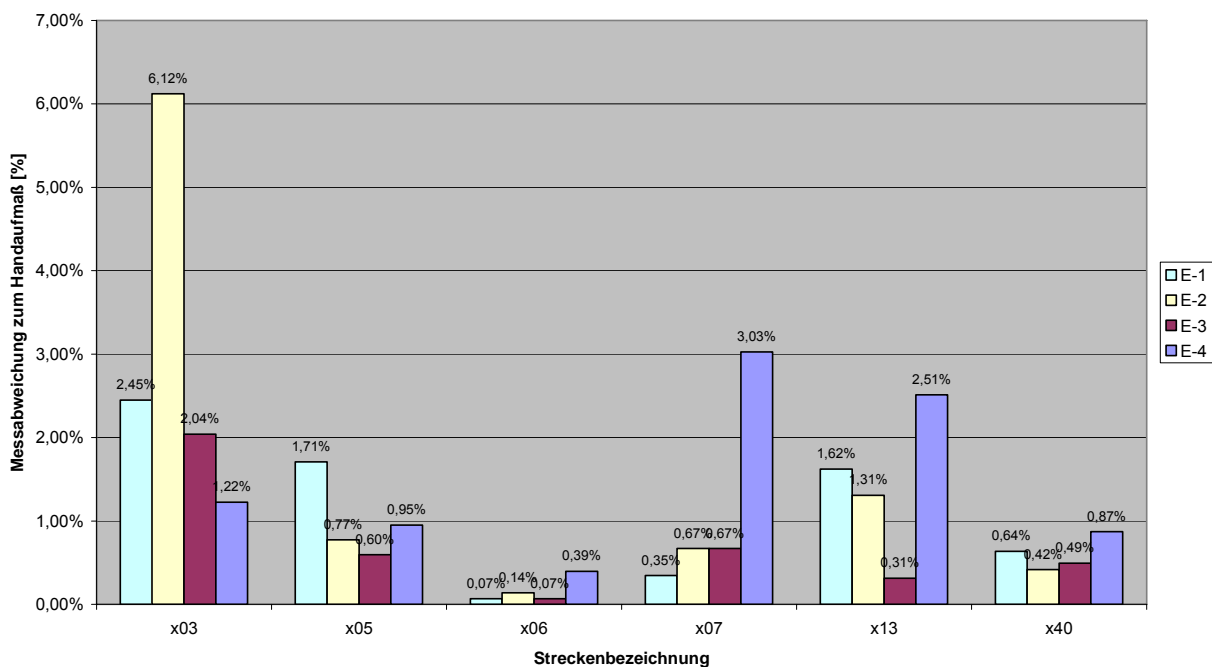


Abbildung 96: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, Einzelbild - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß

6.5.4 Entzerrung über parallele Linien, mosaikierte Bilder

Bei der Entzerrung über parallele Linien mit den beiden Messbildern Bild 3 und Bild 5 wurden diese zunächst separat entzerrt und anschließend manuell zu einem Orthofoto montiert. Die automatische Montage ist bei dieser Entzerrungsvariante generell nicht durchführbar, weil die entzerrten Messbilder kein gemeinsames Objektkoordinatensystem besitzen, in das die Bilder durch die Mosaikierungsfunktion der Auswertesysteme eingepasst werden könnten.

Im Bild 3 wurde für als vertikales Referenzmaß der Abstand zwischen den Passpunkten 100, 101 und als horizontales Referenzmaß der Abstand zwischen den Punkten 100 und 102 verwendet. In Bild 5 wurde in vertikaler Richtung der Abstand zwischen den Messpunkten 102 und 103 und in horizontaler Richtung der Abstand zwischen den Marken 102 und 104 als Referenzmaß herangezogen. Diese Parallelen wurden wieder an Passpunkten und markanten Fassadenkanten ausgerichtet.

Die Systeme E-1 und E-2 werden hier nicht untersucht, weil sie entweder nicht mehrbildfähig sind oder keine manuelle Mosaikierung durchgeführt werden kann.

Auch für dieses Verfahren werden die Messergebnisse tabellarisch (Tabelle 16) und in zwei Diagrammen (Abbildung 97 und Abbildung 98) dargestellt.

Tabelle 16: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, zwei mosaikierte Bilder

Strecke	Soll-Maß [m]	E-3		E-4			
		Ist-Maß [m]	Abweichung [cm]	Abweichung [%]	Ist-Maß [m]	Abweichung [cm]	Abweichung [%]
x03	0,245	0,236	-0,9	3,67%	0,246	0,1	0,41%
x05	7,376	7,301	-7,5	1,02%	7,372	-0,4	0,05%
x06	4,310	4,318	0,8	0,19%	4,363	5,3	1,23%
x07	4,330	4,268	-6,2	1,43%	4,326	-0,4	0,09%
x13	1,910	1,925	1,5	0,79%	1,908	-0,2	0,10%
x40	16,050	16,007	-4,3	0,27%	16,022	-2,8	0,17%

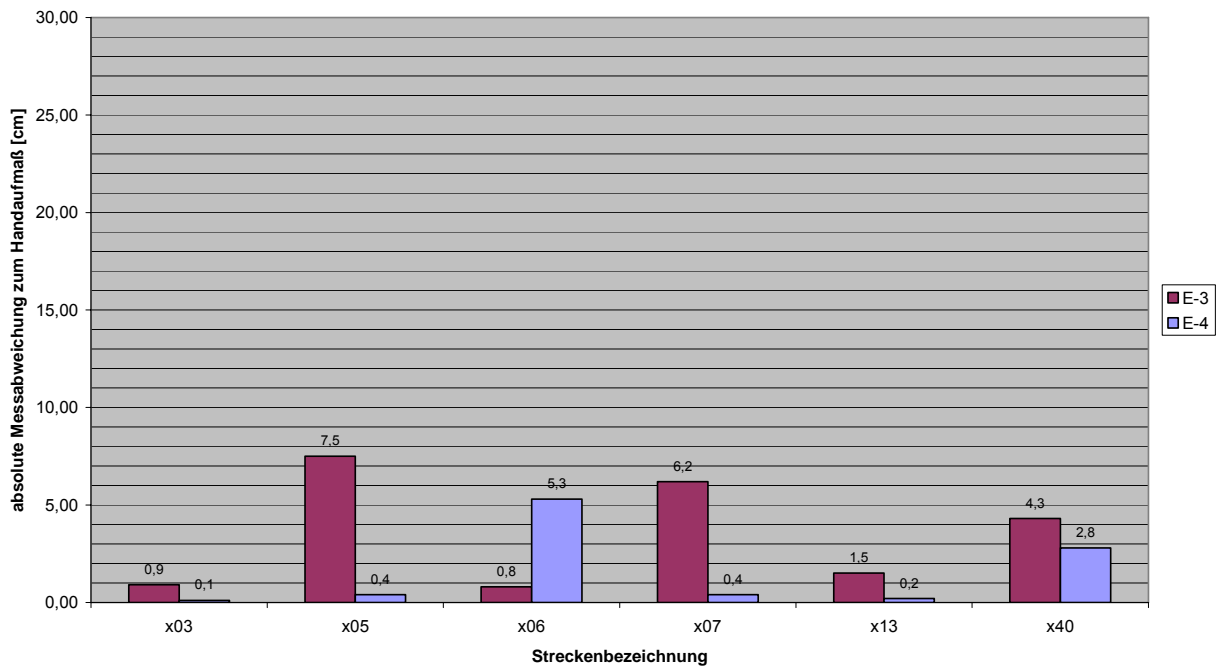


Abbildung 97: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, zwei mosaikierte Bilder - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß

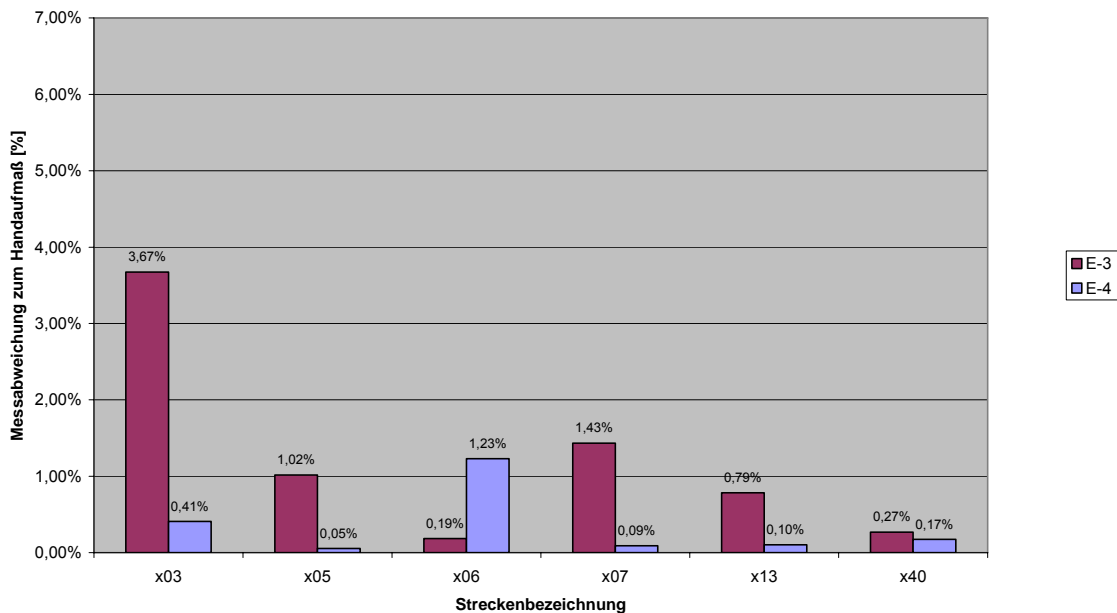


Abbildung 98: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, zwei mosaikierte Bilder - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß

Das System E-3 zeigt große Abweichungen bei den Maßen x05, x07 und x40. Bei den Maßen x05 und x40 wurde über die Montagekante hinweggemessen, daher könnte das schlechte Ergebnis auf eine ungenaue Bildmontage zurückzuführen sein. Bei dem Maß x07 macht sich erneut die schlechte Erkennbarkeit von Detail im Bereich des Schattenwurfs im rechten oberen Eck des Versuchsobjektes bemerkbar. Die besseren Ergebnisse liefert bei dieser Entzerrungsvariante das System E-4.

6.5.5 Entzerrung über Orientierungsdaten aus Mehrbildphotogrammetrie

Eine Besonderheit eines Programms besteht in der Möglichkeit, eine Entzerrung aus den Orientierungsdaten eines Mehrbildsystems des gleichen Herstellers zu berechnen. Auf der Basis des orientierten Bilddatensatz wurden das Bild 1 als Einzelbild und die beiden Bilder 3 und 5 als montiertes Bild ausgewertet.

Die Ergebnisse dieser Einzelbildauswertung sowohl aus dem Einzelbild als auch für das montierte Orthofoto ergaben sich wie in Tabelle 17 sowie in Abbildung 99 und Abbildung 100 dargestellt:

Tabelle 17: Ergebnisse Entzerrung über Orientierungsdaten, Einzelbild und montierte Bilder

Strecke	Soll-Maß [m]	Einzelbild			montiertes Bild		
		Ist-Maß [m]	Abweichung [cm]	Abweichung [%]	Ist-Maß [m]	Abweichung [cm]	Abweichung [%]
x03	0,245	0,260	1,5	6,12%	0,248	0,3	1,22%
x05	7,376	7,317	-5,9	0,80%	7,378	0,2	0,03%
x06	4,310	4,290	-2,0	0,46%	4,300	-1,0	0,23%
x07	4,330	4,407	7,7	1,78%	4,306	-2,4	0,55%
x13	1,910	1,900	-1,0	0,52%	1,912	0,2	0,10%
x40	16,050	15,997	-5,3	0,33%	16,044	-0,6	0,04%

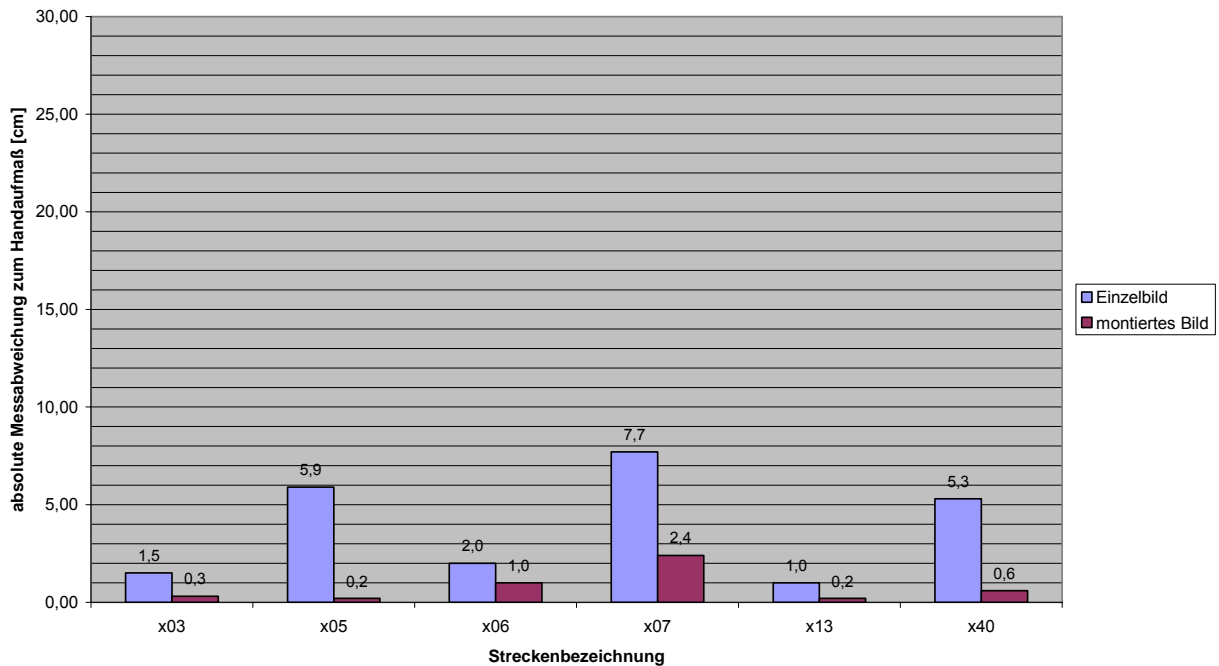


Abbildung 99: Ergebnisse Entzerrung über Orientierungsdaten, Einzelbild und montierte Bilder - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß

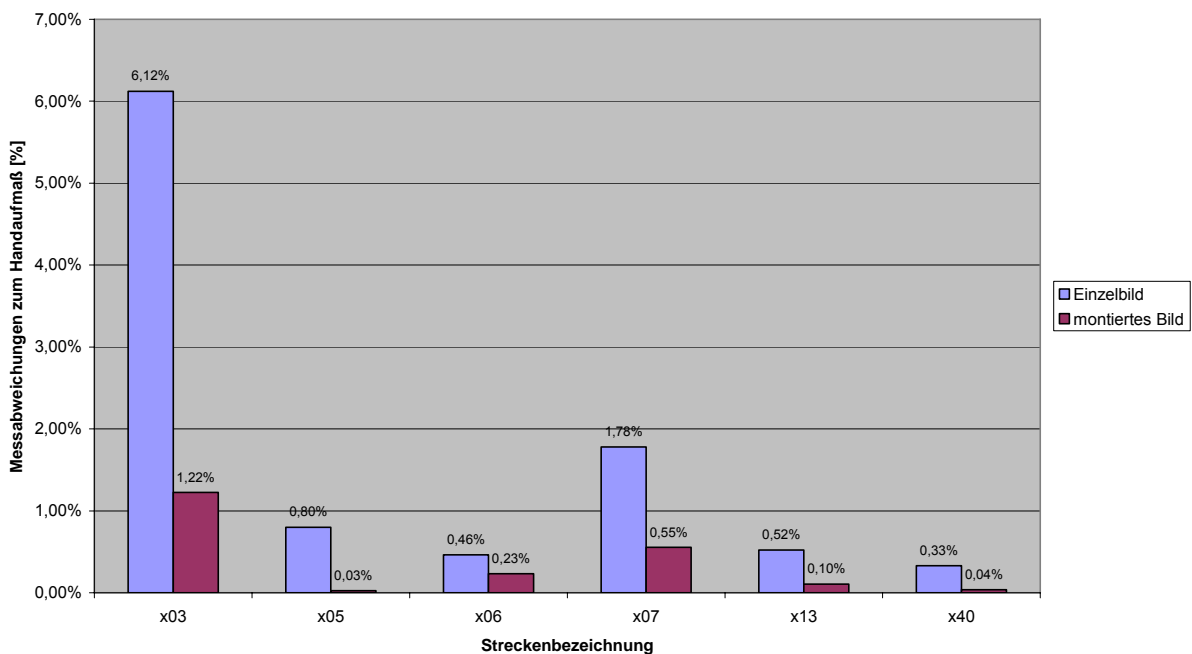


Abbildung 100: Ergebnisse Entzerrung über Orientierungsdaten, Einzelbild und montierte Bilder - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß

Auffällig sind die geringen Abweichungen von Soll- und Ist-Maßen bei der Verwendung von montierten Bildern. Dies ist auf die hohe Präzision von Entzerrung und Montage bei diesem Verfahren im Zusammenspiel mit dem höheren Detaillierungsgrad und der geringeren Verzerrung der Bilder 3 und 5 gegenüber dem Einzelbild 1 zurückzuführen. Die größten Abweichungen von 2,4 cm treten erneut bei dem Maß x07 auf, dessen oberes Ende wegen der Verschattung durch das auskragende Dach schwer im Bild auszumachen ist.

6.5.6 Auswertung mit Mehrbildphotogrammetrie

Bei der Auswertung mit Mehrbildphotogrammetrie kamen alle sechs Bilder der Objekterfassung zum Einsatz. Im ersten Messbild (Bild 1) der untersuchten Aufnahmeserie sind alle sechs Marken deutlich erkennbar. Diese Aufnahme diente als Startmodell für die Orientierungsrechnung. Auf den übrigen fünf Messbildern sind jeweils vier Passmarken erkennbar. Für die Verknüpfung der Messbilder wurden weitere, natürliche Punkte in den Messbildern mit herangezogen. Pro Bild wurden durchschnittlich zehn Verknüpfungspunkte gesetzt. Die Punkte wurden so gewählt, dass sie gleichzeitig für die später folgende Auswertung verwendet werden konnten. Bei beiden Auswertesystemen wurden die gleichen Verknüpfungspunkte verwendet. Die Orientierungsrechnung wurde in beiden Systemen ohne Vorgabe von Näherungswerten durchgeführt. Die anschließende Bündeltriangulation konnte in beiden Systemen nach der zweiten Iteration erfolgreich beendet werden.

Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 18 sowie in Abbildung 101 und Abbildung 102 dargestellt.

Tabelle 18: Ergebnisse Auswertung mit Mehrbildphotogrammetrie

Strecke	Soll-Maß [m]	Ist-Maß [m]	M-1		Ist-Maß [m]	M-2	
			Abweichung [cm]	Abweichung [%]		Abweichung [cm]	Abweichung [%]
x03	0,245	0,247	0,2	0,82%	0,246	0,10	0,41%
x05	7,376	7,377	0,1	0,01%	7,378	0,20	0,03%
x06	4,310	4,303	-0,7	0,16%	4,319	0,90	0,21%
x07	4,330	4,311	-1,9	0,44%	4,314	-1,60	0,37%
x13	1,910	1,911	0,1	0,05%	1,912	0,20	0,10%
x40	16,050	16,023	-2,7	0,17%	16,051	0,13	0,01%

Die Abweichungen der Ist-Maße von den Soll-Maßen sind bei dieser Methode mit maximal 2,7 cm bei x40, dem größten Maß, und 0,82 % beim x03, dem kleinsten Maß, sehr gering.

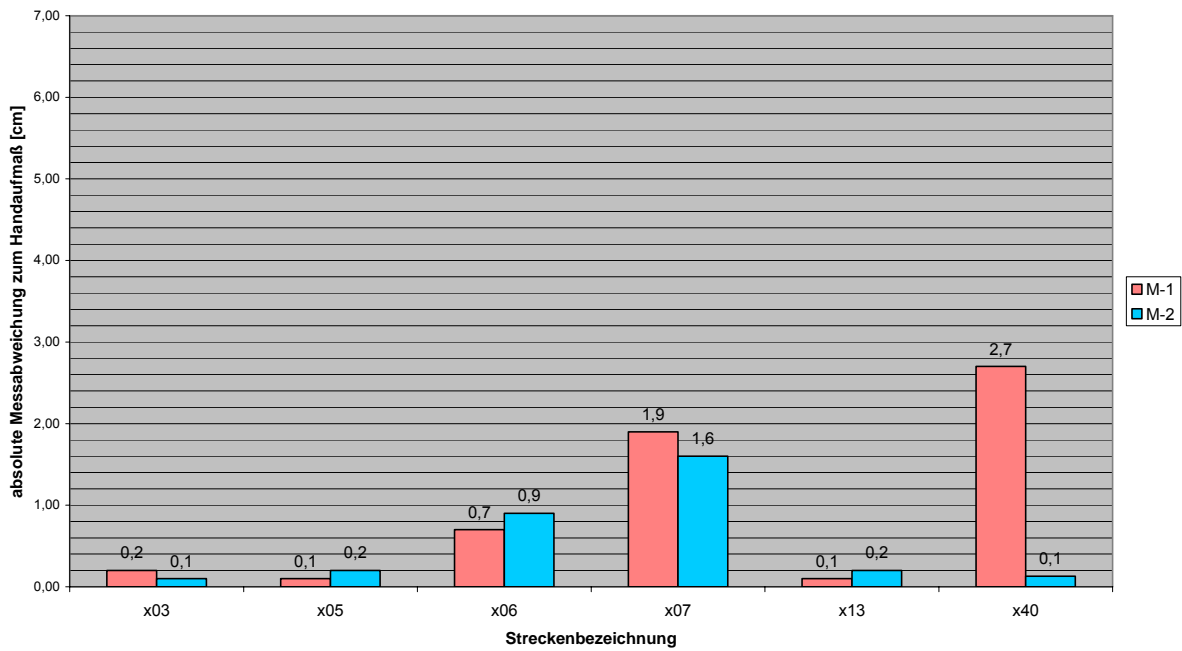


Abbildung 101: Ergebnisse der Auswertung mit Mehrbildphotogrammetrie - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß

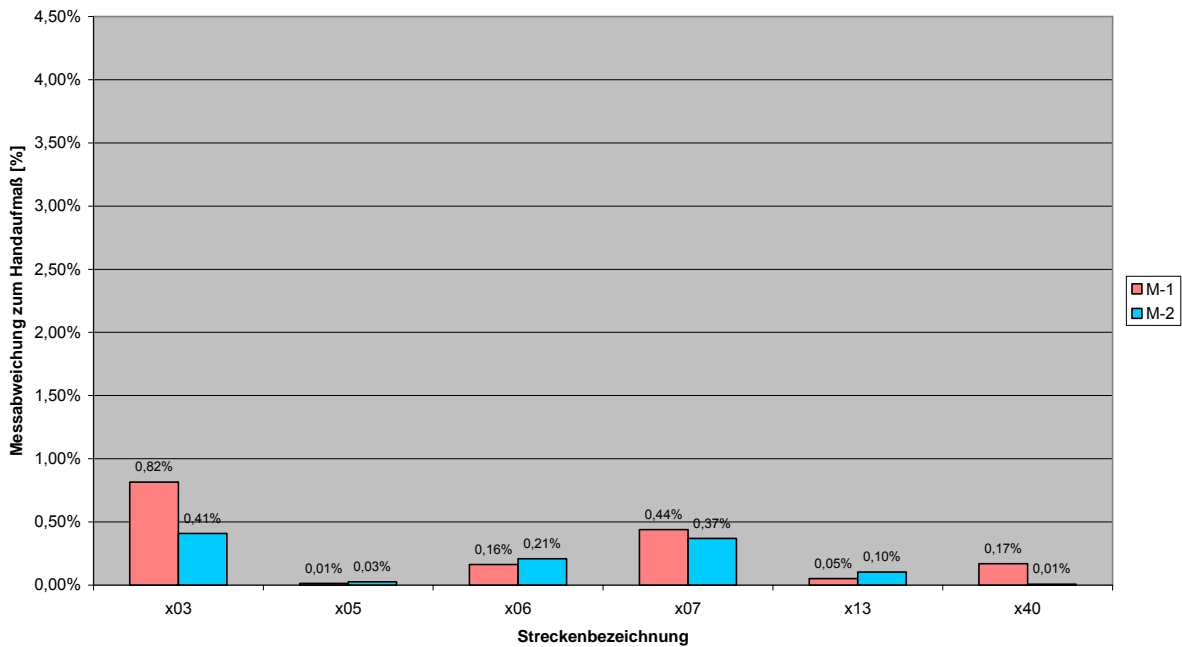


Abbildung 102: Ergebnisse der Auswertung mit Mehrbildphotogrammetrie - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß

6.5.7 Vergleich der Auswertemethoden

In Abbildung 103 und Abbildung 104 sind die mittleren Messabweichungen der Ist-Maße von den Soll-Maßen für die verschiedenen untersuchten Auswertemethoden grafisch dargestellt.

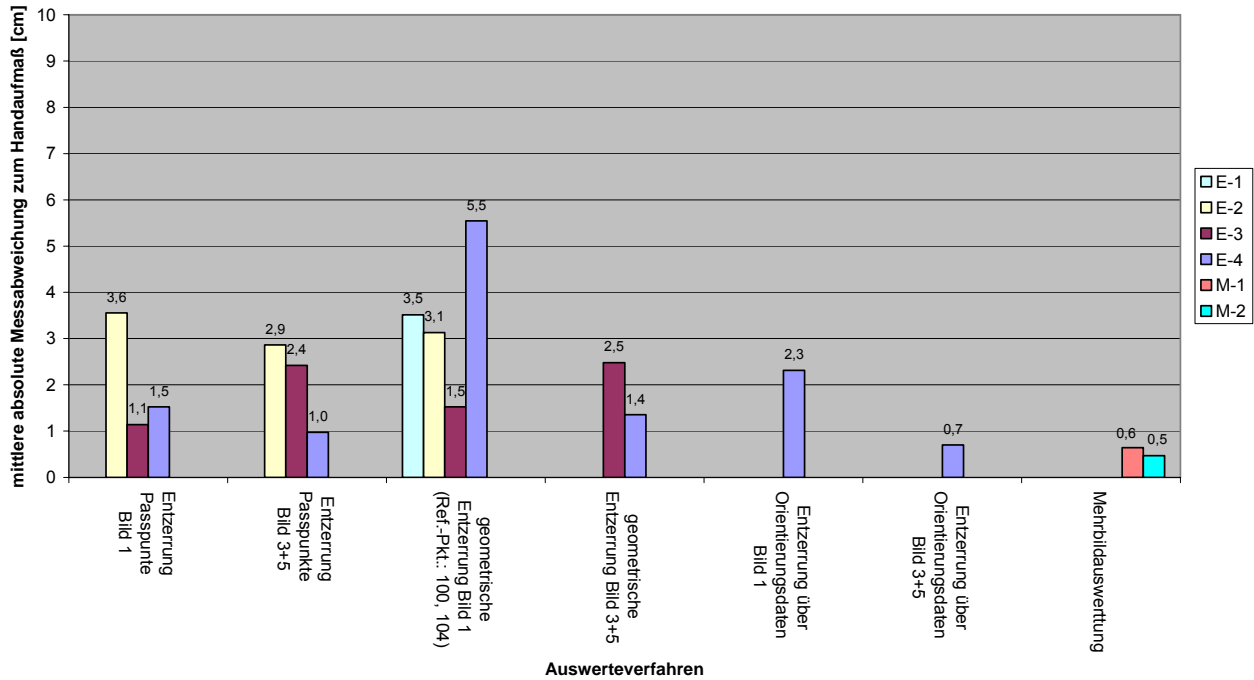


Abbildung 103: Vergleich der Auswertemethoden - graphische Darstellung der absoluten mittleren Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß

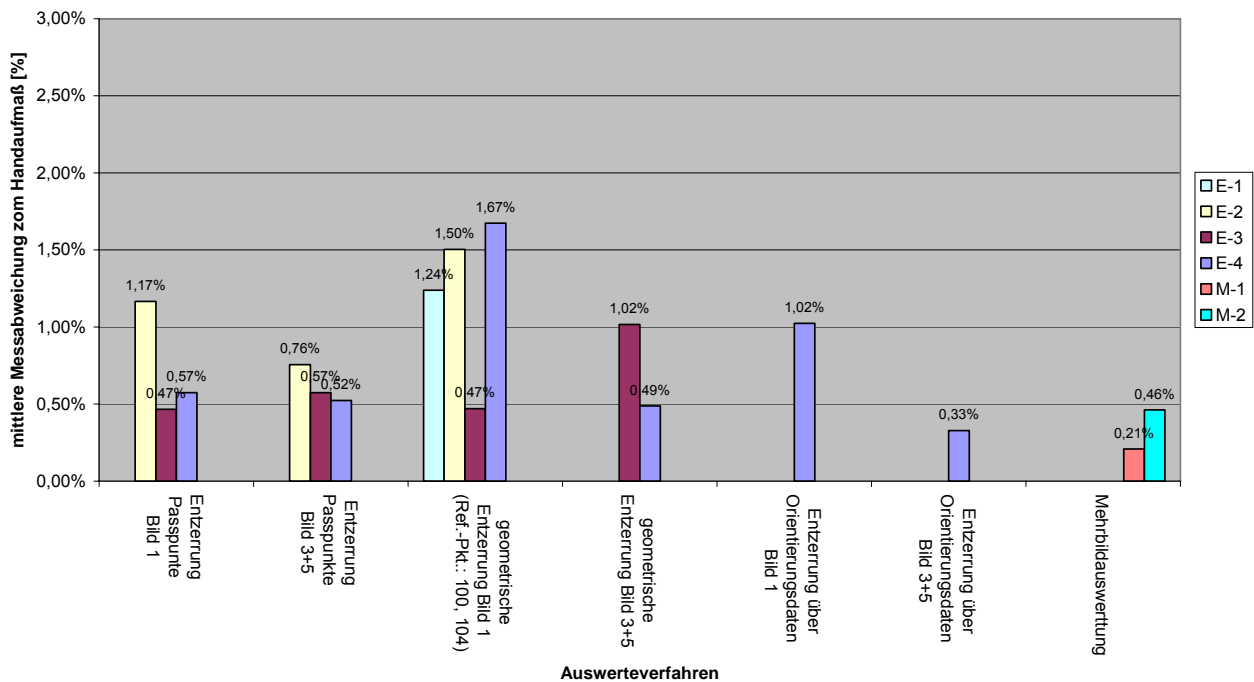


Abbildung 104: Vergleich der Auswertemethoden - graphische Darstellung der mittleren Messabweichungen relativ zum Handaufmaß

Die geringsten Abweichungen der Messergebnisse von den Soll-Maßen konnten mit der Mehrbildphotogrammetrie erzielt werden.

Sehr gute Ergebnisse lieferte auch die Entzerrung über Orientierungsdaten. Hierbei handelt es sich aber um ein Mischverfahren aus Einzel- und Mehrbildphotogrammetrie. Dies bedeutet einen erhöhten Auswerteaufwand und setzt die Verfügbarkeit zweier verschiedener Programme voraus.

Bei den reinen Einzelbildentzerrungsmethoden konnten die besten Ergebnisse mit der Entzerrung über Passpunkte mit mehreren mosaikierten Bildern erzielt werden. Hier machen sich die präzise Erfassung der Referenzdaten und die gute Identifizierbarkeit der Referenzobjekte (Passmarken) im Bild bemerkbar. Mehrere Bilder lassen sich mit hoher Genauigkeit montieren und bringen ein Mehr an Detail.

Die größten Abweichungen ergaben sich bei der Entzerrung über parallele Linien („geometrische Entzerrung“). Dieses Verfahren fußt auf der meist ungeprüften Annahme der Parallelität und Rechtwinkligkeit von Kanten und Linien am Objekt. Im Bild sind lineare Objekte, oft natürliche Objektkanten, zu identifizieren. Eine Bildmontage ist nur manuell möglich.

6.5.8 Bewertung der Auswertesysteme

Grundsätzlich wurden mit Systemen für die Mehrbildauswertung bessere Ergebnisse erzielt als mit solchen für die Einzelbildentzerrung.

Bei der Einzelbildentzerrung konnten folgende Ursachen für große Abweichungen der Ist-Maße von den Soll-Maßen ausgemacht werden:

- fehlende Verzeichniskorrektur
- starke perspektivische Verzerrungen
- mangelhafte Identifikation von Objektpunkten im Bild aufgrund schlechter Erkennbarkeit
- ungenaue manuelle Montage von Bildern bei der Entzerrung über parallele Linien
- verschiedene Systeme für Entzerrung und Auswertung erforderlich

Bei den Einzelbildentzerrungssystemen sind die genaueren Messergebnisse deshalb von solchen Programmen zu erwarten, die über folgende Funktionalitäten verfügen:

- Möglichkeit der Verarbeitung von Kalibrierungsdaten
- integrierte Bildbearbeitung
- stufenlose und unbegrenzte Zoomfunktion
- mehrbildfähig
- Entzerrung über Passpunkte
- Entzerrung und Auswertung in der gleichen Systemumgebung

Abschließend sei angemerkt, dass bei der Photogrammetrie, einer stark visuell ausgerichteten Messmethode, die Erfahrung und das Geschick des Anwenders einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses haben. Grobe Abweichungen der Ist- von den Soll-Maßen von bis zu 14 cm auf 16 m sind gewiss auch auf diesen Umstand zurückzuführen und ließen sich noch deutlich reduzieren. (Die oben dargestellten Untersuchungen wurden durch eine Person ohne photogrammetrische Vorkenntnisse durchgeführt.) Andererseits wurden mit verschiedenen Systemen bei den gleichen Verfahren und demselben Anwender teils ganz unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Hier zeigt sich, wie die Unterstützung des Anwenders durch eine handliche Benutzeroberfläche und sinnvolle Funktionen bei den untersuchten Programmen mehr oder weniger erfolgreich realisiert wurde.

7 Vergleich der Messergebnisse 3D-Laserscanning und Photogrammetrie

Die Messverfahren 3D-Laserscanning und Photogrammetrie werden anhand der sechs ausgewählten Referenzmaße (siehe Kapitel 6.4) der Fassade Vorhoelzer-Bau verglichen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nicht alle in dieser Arbeit angewendeten Auswertemethoden dargestellt. Die verwendeten Messergebnisse spiegeln nach Ansicht der Autoren jedoch die Genauigkeit in der Praxis am Besten wieder.

Die Auswertung der Daten der drei verwendeten Laserscanner (A, B, C) erfolgte anhand von Netz- und Kantenmodellen (NM, KM). Beim Erstellen der Netzmodelle wurden zwei Programme verwendet, wobei einmal die Auswertegeschwindigkeit im Vordergrund stand. Die Netzmodelle aus zuletzt genannter Untersuchung werden hier nicht betrachtet.

Hinsichtlich der photogrammetrischen Auswertung werden die Verfahren „Entzerrung über Passpunkte, mosaikierte Bilder“ und „Mehrbildauswertung“ berücksichtigt. Beide Verfahren sind empfehlenswert und sollten daher bevorzugt Verwendung finden.

Tabelle 19: Vergleich Ergebnisse 3D-Laserscanning und Photogrammetrie

Strecke	Laserscanner						Photogrammetrie					Hand- aufmaß [m]
	Kantenmodell			Netzmodell			Entzerrung E2 [m]	Passpunkte (Bild 3 + 5)		Mehrbildauswertung		
	A_KM [m]	B_KM [m]	C_KM [m]	A_NM [m]	B_NM [m]	C_NM [m]		E3 [m]	E4 [m]	M1 [m]	M2 [m]	
x03	0,230	0,252	0,243	0,235	0,210	0,251	0,244	0,246	0,253	0,247	0,246	0,245
x05	7,376	7,378	7,374	7,369	7,374	7,369	7,303	7,300	7,362	7,377	7,378	7,376
x06	4,306	4,333	4,306	4,302	4,331	4,302	4,278	4,307	4,318	4,303	4,319	4,310
x07	4,323	4,333	4,324	4,328	4,332	4,321	4,237	4,245	4,318	4,311	4,314	4,330
x13	1,914	1,906	1,906	1,911	1,909	1,905	1,936	1,921	1,918	1,911	1,912	1,910
x40	16,035	16,041	16,035	16,029	16,026	16,023	15,975	15,971	16,022	16,023	16,051	16,050

Tabelle 19 gibt die ermittelten Streckenlängen für die gewählten Modelle und Auswertemethoden wieder. Als Referenz wird das Handaufmaß abgebildet. Ein Vergleich der Abweichungen zum Handaufmaß in Tabelle 20 verdeutlicht einen Unterschied in den Ergebnissen der Messverfahren. Beim 3D-Laserscanning sind die Abweichungen unabhängig von der Streckenlänge im Mittel deutlich geringer als bei der photogrammetrischen Auswertung der über Passpunkte entzerrten Bilder. Dort treten maximale Abweichungen bis nahezu 10 Zentimeter auf, siehe Abbildung 105.

Tabelle 20: Abweichung der Ergebnisse 3D-Laserscanning/Photogrammetrie zum Handaufmaß

Strecke	Laserscanner						Photogrammetrie				
	Kantenmodell			Netzmodell			Entzerrung E2 [m]	Passpunkte (Bild 3 + 5)		Mehrbildauswertung	
	A KM [m]	B KM [m]	C KM [m]	A NM [m]	B NM [m]	C NM [m]		E3 [m]	E4 [m]	M1 [m]	M2 [m]
x03	0,015	0,007	0,002	0,010	0,035	0,006	0,001	0,001	0,008	0,002	0,001
x05	0,000	0,002	0,002	0,007	0,002	0,007	0,073	0,076	0,014	0,001	0,002
x06	0,004	0,023	0,004	0,008	0,021	0,008	0,032	0,003	0,008	0,007	0,009
x07	0,007	0,003	0,006	0,002	0,002	0,009	0,093	0,085	0,012	0,019	0,016
x13	0,004	0,004	0,004	0,001	0,001	0,005	0,026	0,011	0,008	0,001	0,002
x40	0,015	0,009	0,015	0,021	0,024	0,027	0,075	0,079	0,028	0,027	0,001

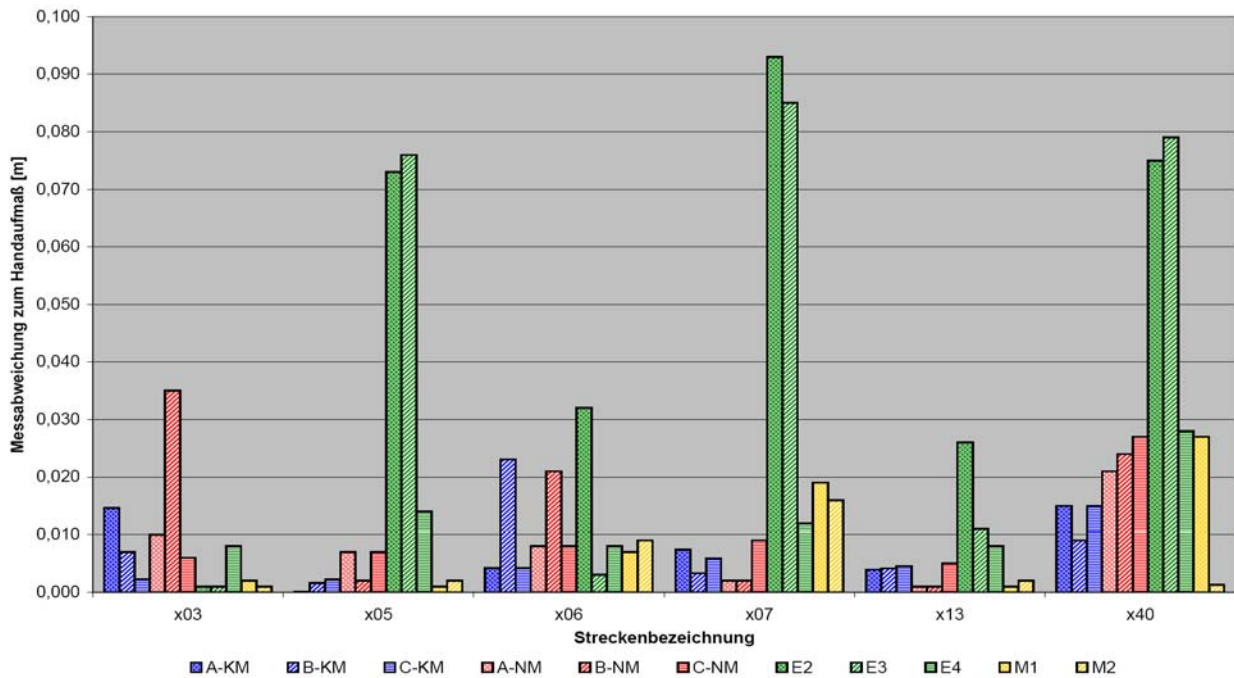


Abbildung 105: Vergleich Photogrammetrie/3D-Laserscanning - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen relativ zum Handaufmaß (Kantenmodelle blau, Netzmodelle rot, Einzelbildphotogrammetrie grün, Mehrbildphotogrammetrie gelb)

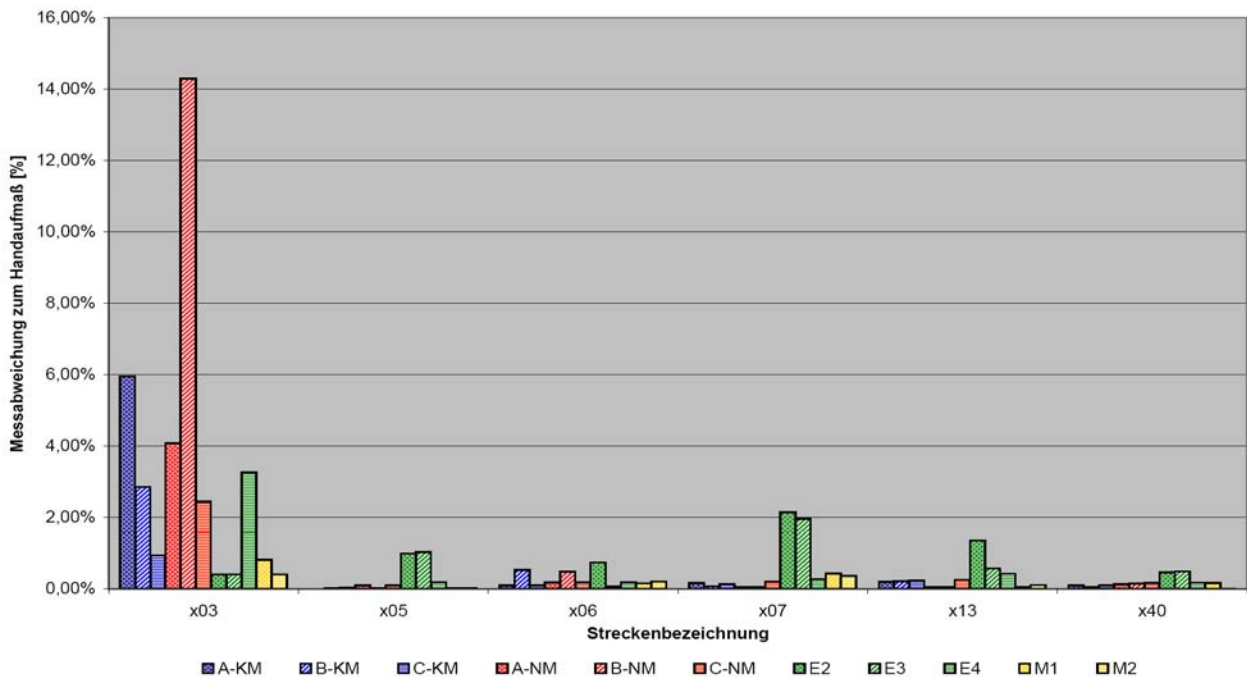


Abbildung 106: Vergleich Photogrammetrie/3D-Laserscanning - graphische Darstellung der prozentualen Messabweichungen relativ zum Handaufmaß (Kantenmodelle blau, Netzmodelle rot, Einzelbildphotogrammetrie grün, Mehrbildphotogrammetrie gelb)

Dennoch zeigt Abbildung 106, dass bei Strecke x03 das 3D-Laserscanning prozentual besonders große Abweichungen gegenüber dem Referenzmaß aufweist. Das Maß x03 gibt die Breite der Putzkante zwischen den beiden Türen wieder und konnte teilweise nur durch eine Interpretation der Daten durch den Anwender ermittelt werden. Aufgrund von Verschattungen in der Punktwolke fehlten notwendige Messpunkte.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass vor allem mit der Mehrbildphotogrammetrie und dem 3D-Laserscanning vergleichbar gute Ergebnisse erzielt wurden.

Sowohl bei der Photogrammetrie als auch beim 3D-Laserscanning wurde die zum Teil recht komplexe Auswertesoftware von ungelernten Anwendern bedient. Es ist davon auszugehen, dass ein geübter Experte genauere Modelle erzeugt. Daher sollten die Angaben zu den Abweichungen nicht als notwendigerweise auftretende Messungenauigkeiten missverstanden werden. Zudem wäre eine größere Stichprobe erforderlich, um eine allgemeingültige Aussagen über die Messgenauigkeit treffen zu können. Die hier dargestellten Ergebnisse geben allerdings in ihrer Tendenz die Unterschiede und Möglichkeiten sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Messverfahren gut wieder.

8 Montage vorgefertigter Dämmelemente am Versuchsobjekt Fassade Vorhoelzer-Bau

Den Abschluss der Forschungsarbeit bildete die Montage einer auf der Grundlage digitaler Bestandsdaten passgenau vorgefertigten Musterfläche aus Dämmelementen.

Die Randbedingungen für die Montage der Musterfläche wurden am 30.10.2008 bei einer Besprechung am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion gemeinsam mit Vertretern der Firma Variotec, des Staatlichen Bauamtes und der zentralen Verwaltung der TUM festgelegt.

Die Musterfläche wurde an der Südseite der Laterne (5. OG) des Vorhoelzer-Baus der Technischen Universität München an der Arcisstraße angebracht und ist wie folgt begrenzt: links durch die Kante der Fassade, rechts durch die Mittelachse der rechten Tür; oben durch die Kante zwischen Fassade und Dachüberstand und unten durch eine gedachte horizontale Linie 100 cm oberhalb des Plattenbelages (s. Abbildung 107). Sie hat eine Fläche von ca. 23 m².

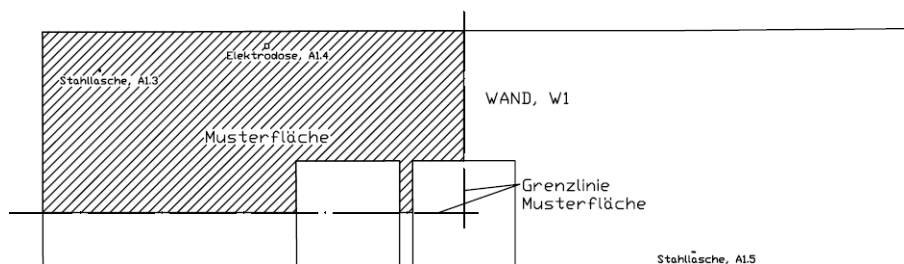


Abbildung 107: Darstellung der Musterfläche, Ansicht Giebelseite Süd, Vorhoelzer-Bau

Die Musterfläche besteht aus QASAmax-Elementen und Elementen aus Polystyrolschaum mit dem Standardformat 1040 mm x 670 mm. Die Dämmelemente wurden liegend mit durchgehenden horizontalen und versetzten vertikalen Fugen verlegt. An der vertikalen Fassadenkante endet jede zweite Lage bündig mit der Kante; die übrigen Lagen enden mit einem Überstand, so dass eine Verzahnung mit den später zu verlegenden Elementen auf der Westfassade erreicht wird. Die Verlegung der Elemente der Musterfassade wurde mit dem linken unteren Element begonnen. Die Befestigung der Elemente erfolgte durch Verkleben und Verdübeln. Nach dem Verlegen bleiben die Elemente zunächst unverputzt. Da an den Türen und Türöffnungen im Rahmen der bereits begonnenen energetischen Sanierung des gesamten Gebäudes noch bauliche Veränderungen vorgenommen werden sollen, müssen die Elemente in diesem Bereich nach Abschluss des Forschungsprojektes wieder entfernt werden. Hier kamen deshalb keine QASAmax-Elemente sondern die kostengünstigeren Polystyrolschaum-Elemente ohne Vakuum-Kern zur Anwendung.

Als Grundlage für die Anfertigung eines Verlegeplans (siehe Abbildung 108) wurde der Firma Variotec am 31.10.2008 eine AutoCAD-Datei zur Verfügung gestellt. Die Datei beinhaltet die Abwicklung der Fassade des Vorhoelzer-Baus als 2D-Modell. Als Basis diente ein 3D-Modell aus

den Daten einer Laserscanner-Aufnahme, das durch Verschneiden von Ebenen in ein Kantenmodell überführt worden war. Abbildung 107 zeigt einen Ausschnitt der AutoCAD-Datei. Auf eine Bemaßung wurde bewusst verzichtet.

Zusätzlich zum Verlegeplan wurden von der Firma Variotec noch Elementpläne angefertigt, die jedes Element einzeln abbilden (siehe Abbildung 109). Die Standardelementgröße beträgt 1040 mm x 670 mm, die Randelemente haben die Abmessung 590 mm x 670 mm. Ein umlaufender Randstreifen von 20 mm und einen horizontalen Mittelsteg von 30 mm aus EPS ermöglichen die Verdübelung ohne eine Beschädigung des Vakuum-Kerns. Die Platten der obersten Reihe wurden versehentlich mit einem überstehenden oberer Randstreifen mit einer Breite von 64 mm geplant und gefertigt. Sie mussten deshalb vor Ort angepasst werden, was dem Grundgedanken des Projekts (kein Zuschnitt vor Ort!) im Grunde widersprach. Es zeigte sich jedoch, dass das vor Ort ermittelte Maß der Überbreite, um das das Element gekürzt werden musste, genau dem im Verlegeplan vorgesehenen Maß der Überbreite von 40 mm entsprach.

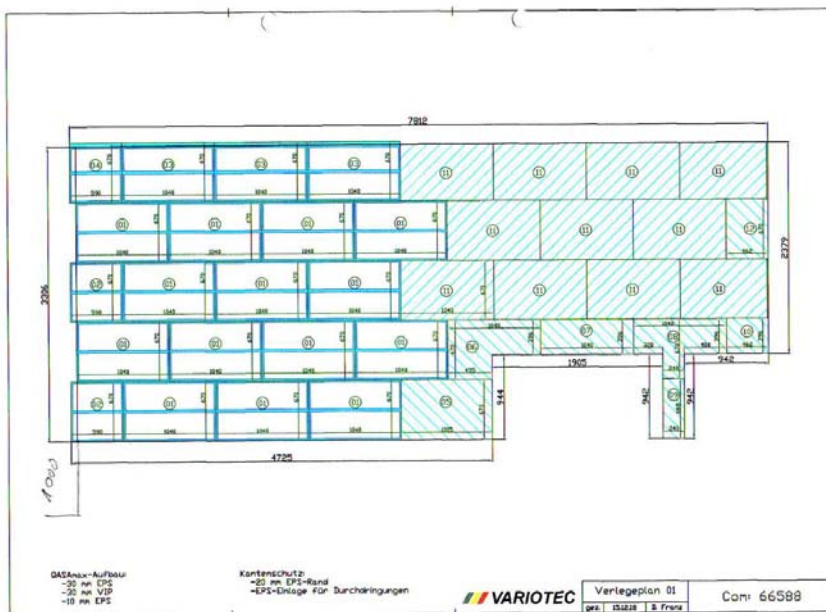


Abbildung 108: Verlegeplan, Firma Variotec

Der ursprünglich für die Montage vorgesehene Termin in der 49. KW 2008 konnte witterungsbedingt nicht eingehalten werden. Damit musste die Montage auf die frostfreie Zeit nach dem Winter 2008/2009 verschoben werden.

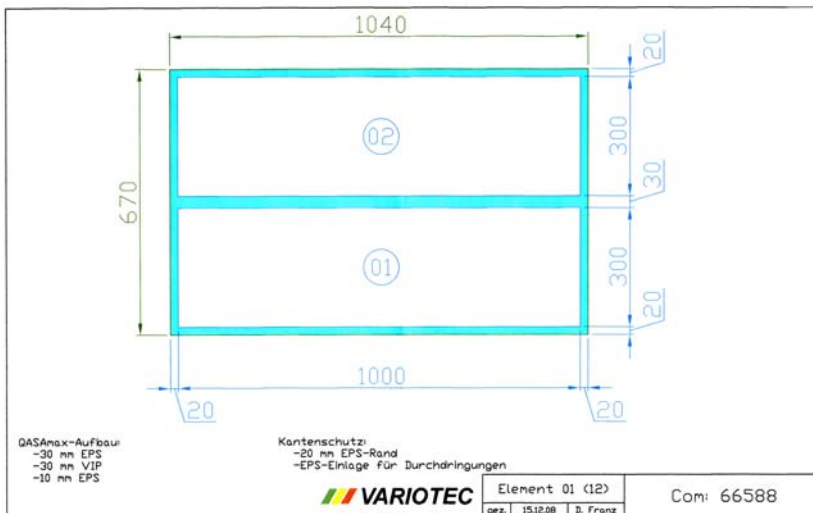


Abbildung 109: Elementplan, Firma Variotec

Die Dämmelemente wurden am 20.1.2009 an die TU München geliefert. Für die Montage musste das Ende der Frostperiode abgewartet werden. Die Musterfassade im 5. Obergeschoss des Vorhoelzer-Baus wurde am 26.5.2009 innerhalb eines Tages ausgeführt. In der Zeit von 8:00 Uhr bis 10:00 Uhr wurden Material und Gerät auf die Baustelle transportiert. Die eigentlichen Montagearbeiten dauerten von 10:00 Uhr bis 15:00 Uhr, unterbrochen durch eine Mittagspause von 30 Minuten. Um 16:00 Uhr war die Baustelle wieder geräumt. Die Firma Maxit arbeitete mit 2 Personen, die die Elemente durch Verkleben und Verdübeln mit Tellerdübeln an allen T-Stößen an der Fassade befestigten. Bei den Randplatten wurden zusätzliche Dübel in der Nähe des Randes platziert.



Abbildung 110: Anbringen der Dämmelemente (links), Auftragen des Klebemörtels (Mitte), Verdübelung (rechts)

Die Stärke des Dämmpaketes (ohne Putz) ergibt sich aus der Stärke der Dämmplatten (70 mm) und der Stärke des Mörtelbettes (\varnothing 10 mm). Um dieses Maß von 80 mm wurden die betreffenden ECKELEMENTE korrekt über die Gebäudekante hinaus überstehend ausgeführt, damit sie bündig mit den später zu verlegenden Platten der angrenzenden Westseite abschließen. Im Verlegeplan blieb

das Mörtelbett allerdings unberücksichtigt und es wurde ein Überstand von nur 70 mm geplant. Hierdurch ergab sich Fehler von 10 mm, der durch eine breite, ausgeschäumte Stoßfuge ausgeglichen werden musste (siehe Abbildung 111).



Abbildung 111: Passgenaue Elemente am Türeck (links), Berücksichtigung des Ecküberstandes (Mitte), offene Fuge aufgrund eines Planfehlers (rechts)

Alles in Allem zeigte sich die angewandte Methodik als sehr erfolgreich. Die maximalen Abweichungen sind mit ca. 10 mm gering. Anhand der Eckelemente im Türbereich lässt sich die Passgenauigkeit gut illustrieren (siehe Abbildung 111 und Abbildung 112).



Abbildung 112: Ergebnis der Montage

In einem anschließenden Gespräch wurde die hier angewandte neue Methodik mit den bei der Montage anwesenden und beteiligten Vertretern der Firmen Variotec und Maxit diskutiert und mit der bisherigen Vorgehensweise verglichen. Bislang wurden Standardelemente ohne Plan verlegt und die verbleibenden, offenen Bereiche vermessen. Erst dann wurden die fehlenden Passstücke gefertigt. Dass nun durch die ausführende Firma nicht mehr vor Ort aufgemessen werden muss, wird als eindeutig positiv gewertet. Mit Hilfe des Verlegeplans auf der Grundlage digitaler Bestandsdaten ist eine wirtschaftlichere und schnellere Arbeitsweise möglich. Diese birgt jedoch noch weiteres Verbesserungspotential. Folgende Vorschläge wurden gemacht: Startpunkt der Montage im Verlegeplan deutlich kennzeichnen und bemaßen, Überstände bei den Leibungen von vornherein berücksichtigen, systematischer Zuschlag für Anpassung an angrenzende Bauteile

(Vorschlag: 40 mm Randstreifen). Es wurde angeregt, eine leichtere Zuordnung der Dämmelemente zu den Positionen im Verlegeplan zu ermöglichen. Dies könnte durch eine Begrenzung der Anzahl unterschiedlicher Positionen und durch größere Positionsnummern auf den Elementen erreicht werden (siehe Abbildung 113).

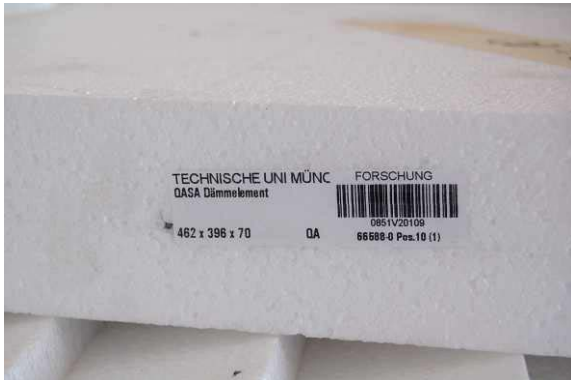


Abbildung 113: Kennzeichnung der einzelnen Elemente mit Positionsnummer und Barcode wurde als zu klein kritisiert.

Als sehr positiv und hilfreich wurde die Möglichkeit einer Unebenheitsanalyse der Fassade bewertet. Dadurch kann der Materialverbrauch besser kalkuliert werden. Möglicherweise notwendige Vorarbeiten (Beseitigen zu großer Unebenheiten durch Entfernen oder Hinzufügen von Putz) können erkannt und geplant werden.

9 Vorschlag für eine Vorgehensweise bei zukünftigen Projekten in der Praxis

Auf der Grundlage der im Rahmen des Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse wird im Folgenden eine Vorgehensweise für Projekte mit vorgefertigten Elementen für das Bauen im Bestand vorgeschlagen. Sie bezieht sich auf das Wärmedämmverbundsystem (WDVS) QASAMax (Kapitel 2.5), lässt sich aber grundsätzlich auch auf andere vorzufertigende Produkte übertragen.

In Abbildung 114 werden die Strukturen bei der wärmetechnischen Sanierung eines Gebäudes dargestellt. Der Bauherr bzw. sein Vertreter holt Angebote von ausführenden Firmen ein, die ihrerseits Preise für die Komponenten des WDVS von den Herstellern anfragen. Die ausführende Firma haftet bei Beauftragung für die fachgerechte Ausführung ihrer Arbeiten. Bei Verwendung von QASAMax Elementen bestellt die ausführende Firma die Dämmelemente bei Variotec und die Befestigungs- und Putzkomponenten bei Maxit. Variotec und Maxit haften der ausführenden Firma gegenüber für die Qualität der von ihnen gelieferten Baustoffe.

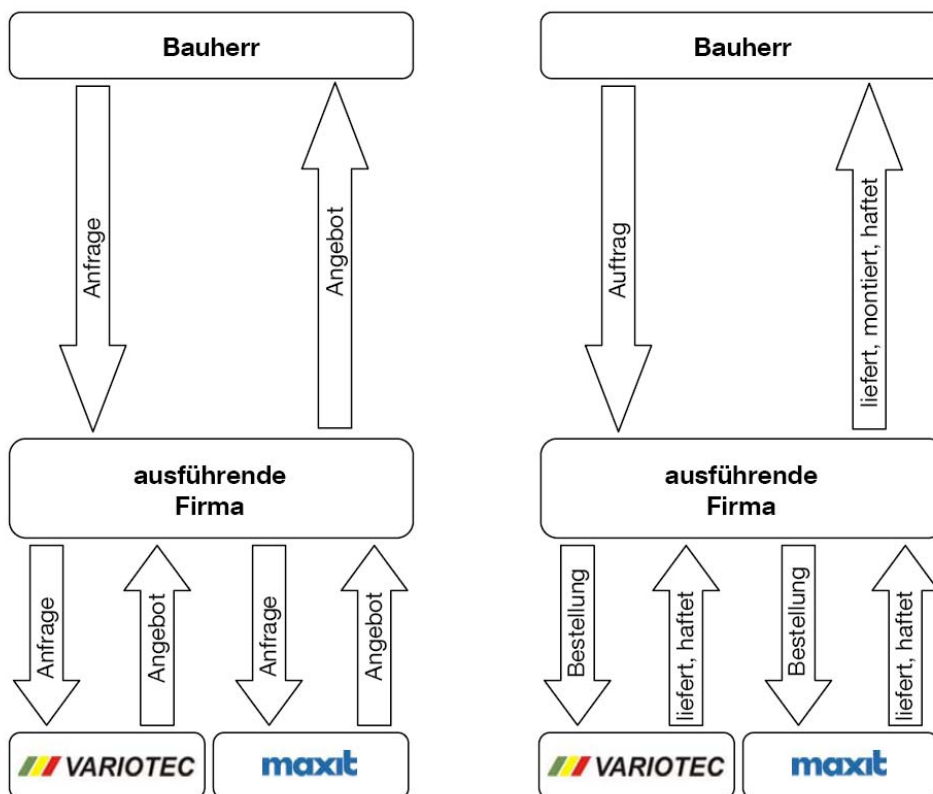


Abbildung 114: QASAMax: Strukturen bei Angebotserstellung (links) und Auftragsabwicklung (rechts)

Sowohl in der Phase der Angebotserstellung als auch im Rahmen der Auftragsabwicklung sind Massenermittlungen (Putz, Dämmung, Dübel, Armierungsgewebe etc.) erforderlich, die entweder auf vorhandenen oder neu zu erstellenden Bestandsunterlagen basieren. Während für ein

herkömmliches WDVS Mengenangaben von der ausführenden Firma einfach erstellt werden können, stellen sich hinsichtlich der Vakuum-Dämmelemente diese Zusammenhänge aus zwei Gründen deutlich komplexer dar: Erstens muss zur Ermittlung von Anzahl und Geometrie der benötigten Dämmelemente ein Verlegeplan angefertigt werden. Zweitens ist eine wesentlich höhere Genauigkeit der Bestandsunterlagen erforderlich, damit die angestrebte Passgenauigkeit erreicht wird. Vor Anfertigung des dafür erforderlichen Aufmaßes sind die folgenden Fragen zu beantworten:

- Wer fertigt das Aufmaß an und haftet für dessen Richtigkeit?
- Welcher Gebäudebereich ist aufzumessen?
- Welche Genauigkeit ist erforderlich?
- Welche Gebäudedetails sind besonders zu beachten?
- Welche Messmethoden kommen zur Anwendung?
- Welcher Zeitpunkt ist für das Aufmaß am besten geeignet?
- Wie werden die Messergebnisse kommuniziert?
- Wer erstellt den Verlegeplan?
- Wer trägt die Kosten?

Es wird vorgeschlagen, zweistufig vorzugehen und nach Angebots- und Ausführungsphase zu unterscheiden. Die oben gestellten Fragen sind dabei in den beiden Phasen unterschiedlich zu beantworten.

Phase 1: Angebotserstellung

Das Aufmaß dient der Massenermittlung für eine Angebotserstellung. Es wird erstellt durch und auf Risiko und Kosten der ausführenden Firma. Die Anforderungen an die Genauigkeit des Aufmaßes sind mittel bis gering (ca. ± 5 cm), die Kosten können gering gehalten werden. Zur Anwendung kommt vor allem das Handaufmaß, beispielsweise mittels Handlaserdistanzmessgerät. Aber auch einfache photogrammetrische Bildentzerrungssysteme sind in dieser Phase sinnvoll einsetzbar. Die Software sollte folgende Anforderungen erfüllen: einfache Erlernbarkeit ohne Schulungsaufwand, Möglichkeit zur Eingabe von Kalibrierungsdaten, CAD-Schnittstelle, Möglichkeit der Montage mehrerer Einzelbilder.

Die Informationen aus dem Aufmaß können in Form von bemaßten Handskizzen, als CAD-Datei oder in Form von entzerrten Fotos weitergegeben werden. Auch Kombinationen verschiedener Darstellungsarten können gewählt werden, um Geometriedaten zu kommunizieren. Zum Beispiel das entzerrte Foto einer Fassade mit Eintrag der Maße in Fassadenebene, ergänzt durch Skizzen mit den Maßen von Leibungen und anderen in die Tiefe gehenden Elementen.

Phase 2: Auftragsabwicklung

Für die eigentliche Fertigung passgenauer Dämmelemente bedarf es einer deutlich größeren Genauigkeit bei der Erfassung der Gebäudegeometrie als dies in der Angebotsphase der Fall ist.

Hier müssen Genauigkeiten von bis zu ± 1 cm erreicht werden. Nur bei Objekten geringer Größe und Komplexität wird es dem ausführenden Betrieb möglich sein, diese Genauigkeiten mit einem selbst erstellten Aufmaß zu erreichen. In allen anderen Fällen wird es nötig sein, für diese Aufgabe einen Vermessungsdienstleister zu beauftragen, wodurch zusätzliche Kosten entstehen. Wer diese Kosten zu tragen hat, ist zwischen Bauherr und Projektanten bzw. ausführenden Firmen abzustimmen. Es ist davon auszugehen, dass bei jeder Baumaßnahme im Bestand ein belastbares Aufmaß für eine ganze Reihe von planerischen und baulichen Handlungen erforderlich ist. Dieses in den Händen eines Spezialisten zu bündeln, dürfte letztendlich wirtschaftlicher sein, als jedes Gewerk sein eigenes Aufmaß anfertigen zu lassen.

Im Anhang ist eine Zusammenstellung von Ingenieurbüros für Vermessung abgedruckt. Neben den vorgewiesenen Referenzen sollte die Geräteausstattung bei der Auswahl eines Vermessungsdienstleisters herangezogen werden. Ist eine Ebenheitsanalyse der Gebäudeoberfläche gewünscht, ist ein Aufmaß mit einem 3D-Laserscanner unerlässlich. Andernfalls sind die zuvor beschriebenen Aufmaßmethoden wie Photogrammetrie, Tachymetrie, ebenfalls einsetzbar. Aufgrund von Aufgabenstellung, Geräteausstattung und Erfahrungsschatz werden die angefragten Vermessungsbüros eine Methode vorschlagen. Häufig ist eine Kombination mehrerer Methoden sinnvoll.

Um die Kosten für das Aufmaß möglichst gering zu halten und um ein Ergebnis in der erforderlichen Genauigkeit und Aussagefähigkeit zu erhalten, sind die geforderten Leistungen möglichst präzise zu beschreiben. In einer Leistungsbeschreibung ist mindestens folgendes festzulegen:

- Welche Gebäudeflächen sind zu vermessen?
- Welche diskreten Punkte und Kanten sind zu erfassen?
- Welche Flächen sind auf Ebenheit zu überprüfen? In welcher Punktdichte?
- Welche Genauigkeiten sind an welchen Stellen gefordert?
- Sind Bild- und Farbinformationen gewünscht?
- In welcher Form (Ausdruck, digitales 2D/3D-Modell) soll das Ergebnis vorliegen?
- Welche Datenaustauschformate sind zu liefern?

Bei der Formulierung der Anforderungen kann ein Grobaufmaß, wie es aus der Phase 1 (Angebot) möglicherweise ohnehin schon vorliegt, verwendet werden. Auch Fotos, eventuell entzerrt, eignen sich, um Bereiche unterschiedlicher Anforderungen zu markieren. In der einfachsten Form geschieht dies per Handeintrag in einem Ausdruck. Der Aufgabenstellung besonders angemessen ist eine farbkodierte Darstellung mit Hilfe von Bildbearbeitungs- oder Kartierungssoftware.

Auf der Basis der gelieferten Geometriedaten wird von der Fa. Variotec ein Verlegeplan für die Vakuum-Dämmelemente angefertigt. Es wird empfohlen, für diese Aufgabe eine Optimierungssoftware einzusetzen, die den Konstrukteur bei der Findung einer günstigen Anordnung der Elemente unterstützt.

10 Fazit, Ausblick

Mit der Forschungsarbeit „Maßgefertigte Vakuum-Dämmelemente für das Bauen im Bestand“ wurde gezeigt, dass mit der bereits verfügbaren Messtechnik digitale Bestandsdaten auf hohem Genauigkeitsniveau für die Vorfertigung von passgenauen Bauteilen erhoben werden können. Schon heute wird diese Technik vereinzelt, etwa in Pilotprojekten, erfolgreich angewendet; es ist davon auszugehen, dass in Zukunft in zunehmendem Maße Vorfertigung auf der Basis digitaler Bestandsdaten eingesetzt wird. Hiervon sind neue Impulse für die Weiterentwicklung dieser Technologie von einer Ausnahmererscheinung hin zur Standardlösung zu erwarten.

Bei der Wahl des jeweils am besten geeigneten Verfahrens sind dessen Besonderheiten zu berücksichtigen. So ist z.B. das 3D-Laserscanning das Verfahren, welches das Oberflächenrelief des Objektes am besten abbilden kann, und somit prädestiniert, wenn eine Untersuchung der Ebenheit benötigt wird. Die Photogrammetrie liefert mit vergleichsweise geringem Aufwand Maße und Bildinformationen ebener Objekte. Für Laserscanning schlecht zu erfassende Bereiche (z.B. Fensternischen in oberen Geschossen) können mit Photogrammetrie zusammen mit UAVs (unmanned aerial vehicle) erfasst werden. Sehr häufig kommt eine Kombination mehrere Verfahren auch unter Einsatz von Tachymetrie und Handaufmaß zur Anwendung.

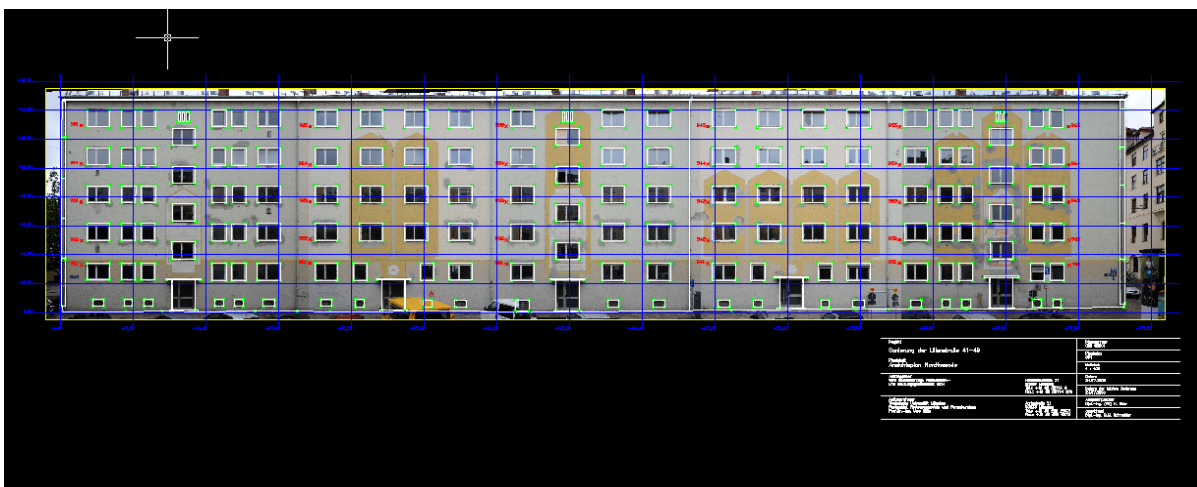


Abbildung 115: Wohnanlage Lilienstraße Nord, Bildplan der Straßenfassade, erster Bauabschnitt (Bild: Fachgebiet für Photogrammetrie und Fernerkundung, TUM)

Die Erkenntnisse aus der Forschungsarbeit werden seit Juni 2009 in einem Pilotprojekt in der Lilienstraße in München in der Praxis angewendet und vertieft. Im Rahmen des Forschungsprojektes „CO₂-neutrale Energieversorgung der Wohnanlage Lilienstraße Nord in München“ innerhalb der BMWi-Forschungsinitiative „EnEff:Stadt“ (EnEff:Stadt 2009) beabsichtigt die GWG Gemeinnützige Wohnstätten- und Siedlungsgesellschaft mbH eine Fassade mit einer Fläche von über 2000 m² mit Vakuumdämmung zu versehen. Das hierfür erforderliche Fassadenaufmaß wurde vom Fachgebiet für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München in enger Abstimmung mit dem Lehrstuhl für Holzbau und

Baukonstruktion erstellt. Für den ersten Bauabschnitt wurden 30 Passmarken aus Kunststoff an der Fassade angebracht und durch den Lehrstuhl für Geodäsie tachymetrisch vermessen. Anschließend wurde die Fassade mit der in Kapitel 6.1 beschriebenen Kamera in 17 Aufnahmen abgebildet und mit Mehrbildphotogrammetrie ausgewertet. Zweidimensionale Punktkoordinaten und ein montiertes Orthofoto wurden in CAD exportiert und dort zu einem Bildplan weiterverarbeitet (siehe Abbildung 115). Dieser wurde der GWG in Form einer CAD-Datei als Grundlage für die Herstellung maßgefertigter Vakuumdämmelemente übergeben. Nach Analyse der tachymetrisch gemessenen Punkte konnte davon ausgegangen werden, dass in der Fassade nur geringe Unebenheiten vorhanden sind. Auf eine Aufnahme mit 3D-Laserscanning wurde deshalb verzichtet.

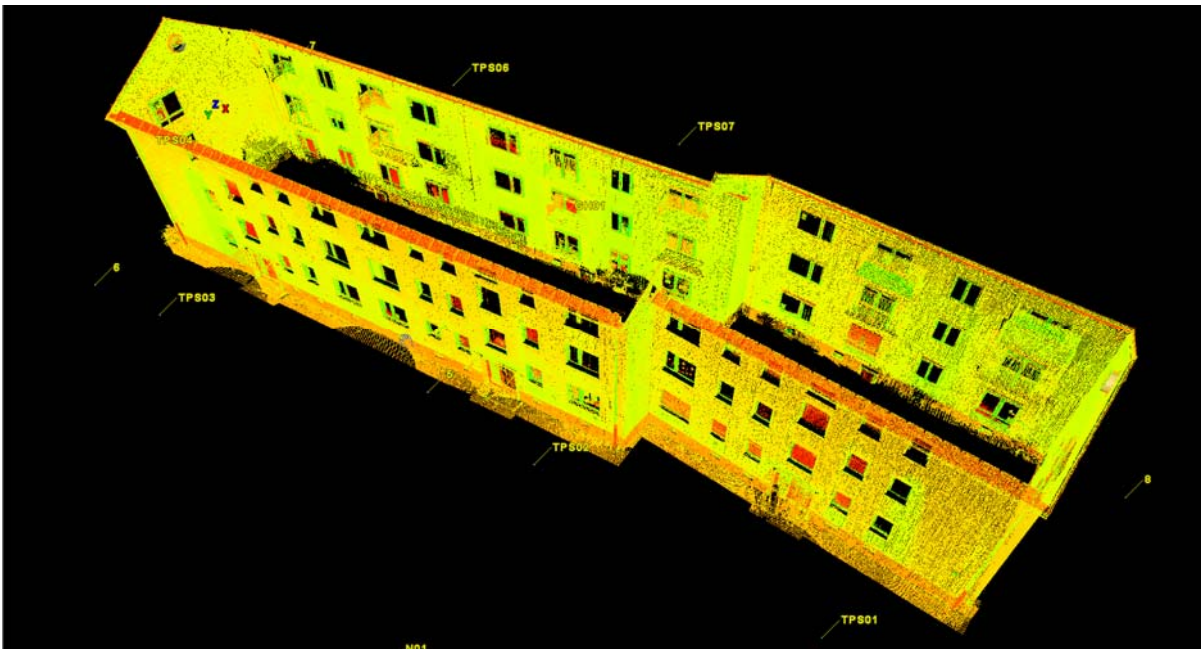


Abbildung 116: Wohnanlage Rotlintstraße, zusammengesetzte Punktwolke der Fassaden (Schäfer 2008)

Die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden sind selbstverständlich nicht nur auf das Anwendungsgebiet Vakuum-Dämmelemente beschränkt. So fließen die Ergebnisse auch in das Forschungsvorhaben „TES energyFacade – Timberbased element systems for improving the energy efficiency of the building envelope“ ein (TES EnergyFacade 2009), ein internationales Forschungsprojekt im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms WoodWisdom-Net, an dem der Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion beteiligt ist. Für dieses Projekt wurden die Fassaden einer Wohnanlage in der Rotlintstraße in Frankfurt am Main (siehe Abbildung 116) durch den Lehrstuhl für Geodäsie und das Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München vermessen. Die Daten sollen zur Vorfertigung großformatiger Fassadenelemente aus Holz eingesetzt werden. Es kamen Mehrbildphotogrammetrie, 3D-Laserscanning und zusätzlich Tachymetrie zum Einsatz. Die Ergebnisse sind in Schäfer (2008) und Rauch (2008, 2009) dargestellt.

Besonders effektiv lassen sich die optoelektronischen Messmethoden im Rahmen einer lückenlosen digitalen Prozesskette von der Aufnahme vor Ort bis hin zur computergestützten Fertigung (CAM) und Montage einsetzen. Zwischenschritte in der Kette sollten künftig weiter automatisiert werden. So ist etwa ein automatischer Abgleich neu einzubauender Teile als CAD-Modell mit den Bestandsdaten in Form einer Punktwolke denkbar. Neue Fertigungsverfahren, die die automatische Herstellung von Unikaten erlauben (Rapid Manufacturing), werden auch im Bauwesen Einzug halten. Im Zusammenspiel mit moderner Messtechnik können sie dem Bauen im Bestand mit vorgefertigten Elementen ganz neue Perspektiven eröffnen.

11 Literaturverzeichnis

Aicher, F.; Drepper, U. (1990): Robert Vorhoelzer – Ein Architektenleben. Ausstellungskatalog, Münchner Stadtmuseum und Deutsches Postmuseum, Frankfurt am Main. München: Callwey, 1990

Breuckmann GmbH (2009): Breuckmann 3D-Scanner.
<http://www.breuckmann.com/index.php?id=productdescription> (Abruf vom 8.1.2009)

Cramer, J. (1984): Handbuch der Bauaufnahme: Aufmaß und Befund. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1984

Creaform Québec City Area Zentrale (2009):
<http://www.creaform3d.com/de/company/default.aspx> (Abruf vom 9.7.2009)

Cremers, J. (2005): Vakuum-Dämmsysteme - Einsatzmöglichkeiten und planerische Hinweise. In: Detail, 2005/5, S. 522-525. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2005

Cremers, J. (2006): Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmelementen im Bereich der Gebäudehülle – technologische, bauphysikalische und architektonische Aspekte. Dissertation, Technische Universität München, 2006

DeltaSphere Inc. (2008): Capture, Preserve and Present Archaeological Sites and Antiquities.
http://www.deltasphere.com/deltasphere_archaeology.htm (Abruf vom 25.11.2008)

Duwe-3d AG: www.duwe-3d.de (Abruf vom 9.7.2009)

Eberhardt, H.-F. (2005): Vom Pulver zur Paneele – Wie entsteht ein VIP. 2. Fachtagung VIP-BAU in Wismar, 16.-17. Juni 2005. http://www.vip-bau.de/d_pages/tagungen/2_vip_bau.htm (Abruf vom 27.11.2008)

EnEff:Stadt (2009): EnEff:Stadt. <http://www.eneff-stadt.info/de/pilotprojekte/projekt/details/sanierung-und-co2-neutrale-waermeversorgung-einer-50er-jahre-wohnanlage/> (Abruf vom 25.8.2009)

Eos GmbH (2009a): Ziel: Kunststoffteile - DirectPart. <http://www.eos.info/anwendungen/ziel-kunststoffteile.html> (Abruf vom 7.1.2009)

Eos GmbH (2009b): DirectPart Beispiele. <http://www.eos.info/anwendungen/ziel-metallteile/directpart-beispiele.html> (Abruf vom 7.1.2009)

Eos Systems Inc. (2008): PhotoModeler. http://www.photomodeler.com/applications/architecture_and_preservation/examples.htm (Abruf vom 17.11.2008)

- Eos Systems Inc. (2009): PhotoModeler Scanner - How it Works.
http://www.photodeler.com/products/scanner/how_it_works.htm (Abruf vom 22.1.2009)
- Faro Deutschland GmbH & Co. KG (2009): Faro stellt den neuen Farb-Laserscanner vor.
<http://www.faro.com/coloroption/de/index.html> (Abruf vom 22.1.2009)
- Faro Europe GmbH & Co.KG (2007): Faro LS News, 17.9.2007
- FlexiCAD e.K. (2009): <http://www.flexicad.com/produkte/rhinoceros/beschreibung/uebersicht.htm>
(Abruf vom 9.7.2009)
- Fokus GmbH (2004): metigo BASIC. http://www.fokus-gmbh-leipzig.de/metigo_basic.php (Abruf vom 14.11.2004)
- FPK-Ingenieurgesellschaft GmbH (2009): Dokumentation mit Archimedes 3D-Funktionsumfang.
<http://www.archimedes3d.de/docs/start.php?enter=Haupteingang> (Abruf vom 22.1.2009)
- Geomagic GmbH (2009): <http://www.geomagic.com/de/products/studio/index.shtml> (Abruf vom 9.7.2009)
- Geosystems (2009): <http://www.geosystems.de/> (Abruf vom 3.1.2009)
- Human Solutions GmbH (2009): Bodyscanning - und die Zukunft der Maßbekleidung hat begonnen. http://www.human-solutions.com/apparel_industry/bodyscanning_de.php (Abruf vom 7.1.2009)
- Hunger, B. (2004): Potential für zukünftige Bauaufgaben, Modernisierung des Wohnungsbestandes – größtes Betätigungsfeld für Architekten. In: Deutsches Architektenblatt 2/2004, S. 10
- Jacobsen, S. (2003): Hochbarrierefolien für Vakuum-Isolationspaneel. 1. Fachtagung VIP-BAU in Rostock-Warnemünde, 10.-11.Juli 2003. http://www.vip-bau.de/d_pages/tagungen/1_vip_bau.htm (Abruf vom 27.11.2008)
- Juretzko, M. (2005): Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Deutsche Geodätische Kommission (DGK) Reihe C 588. München, 2005
- Kern, F. (2001): Bauaufnahme der Synagoge in Wörlitz mittels reflektorloser Polaraufnahme. In: Weferling, U.; Heine, K.; Wulf, U. (Hrsg.): Von Handaufmaß bis High Tech, interdisziplinäres Kolloquium vom 23. – 26.2.2000 an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus. Mainz: von Zabern, 2001

- Kern, F. (2002): Marktübersicht – Version 3 – Auswahl an kommerziellen Laserscannern, die sich aufgrund ihres Messbereichs und der Messgeschwindigkeit für das Bauaufmaß eignen. (Stand Oktober 2002) http://www.xdesy.de/scanner/marktuebersicht_v3.pdf (Abruf vom 22.1.2009)
- Kern, F. (2003): Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscannerdaten. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig Heft Nr. 19, 2003
- Kersten, Th.; Sternberg, H.; Mechelke, K.; Lindstaedt, M. (2008): Datenfluss im terrestrischen Laserscanning – Von der Datenerfassung bis zur Visualisierung. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008) – Beiträge zum 79. DVW-Seminar am 6. und 7.11.2008 in Fulda. Schriftenreihe des DVW, Band 54. Augsburg: Wißmer, 2008
- Kleinhempel, A.-K. (2005): Innovative Dämmstoffe im Bauwesen – Forschungsstand und Marktübersicht. Bericht, Bremer Energie Institut, März 2005. Bremer Energie Konsens: http://www.energiekonsens.de/Downloads/Aktuelles/Innovative_Daemmstoffe_Bauwesen.pdf (Abruf vom 27.11.2008)
- Konica Minolta Sensing Europe B.V. (2009a): VIVID 910. <http://www.konicaminolta.eu/measuring-instruments/products/for-3d-measurement/non-contact-3d-digitizer/vivid-910/introduction.html> (Abruf vom 5.1.2009)
- Konica Minolta Sensing Europe B.V. (2009b): 3D Digitization – KONICA MINOLTA Non-Contact 3D Digitizer: For art and cultural heritage. http://www.konicaminolta.eu/fileadmin/CONTENT/Measurement_Instruments/Solution/VIVID_User_Reports/heritage.pdf (Abruf vom 7.1.2009)
- Kraus, K. (2004): Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Berlin: Walter de Gruyter, 2004
- Krötz, R. (2004): Bodyscanner von Windsor (Foto von Rafael Krötz). In: Süddeutsche Zeitung Magazin vom 22.10.2004. München: Süddeutscher Verlag, 2004
- Kubit GmbH: www.kubit.de (Abruf vom 9.7.2009)
- Lehrstuhl für Leichtbau (2009): Lehrstuhl Geschichte. http://www.llb.mw.tum.de/index.php?option=com_content&task=view&id=10&Itemid=7 (Abruf vom 2.1.2009)
- Leica Geosystems (2009): Leica ScanStation C10. <http://www.leica-geosystems.com/de/79411.htm> (Abruf vom 24.11.2009)
- Leica Geosystems GmbH Vertrieb: http://www.leica-geosystems.com/corporate/de/Software-HDS-Software_3490.htm (Abruf vom 9.7.2009)

- Luhmann, Th. (2003): Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Heidelberg: Wichmann, 2003
- Lupos3D GbR (2009): <http://www.lupos3d.de/profil.html>; <http://www.lupos3d.de/software.html> (Abruf vom 9.7.2009)
- Mader, G. Th. (1991): Angewandte Bauforschung als Planungshilfe in der Denkmalinstandsetzung. In: Schriftenreihe des Deutschen Nationalkomitees für Denkmalschutz, Band 16 - Erfassen und Dokumentieren im Denkmalschutz – Dokumentation des Colloquiums des Deutschen Nationalkomitees für Denkmalschutz in Zusammenarbeit mit dem Landesdenkmalamt Baden-Württemberg 4. und 5. März 1982 in der Liederhalle Stuttgart. Nachdruck 1991
- Mechelke, K.; Kersten, Th.; Lindstaedt, M. (2008): Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen neuester terrestrischer Laserscannersysteme – Leica ScanStation 2 und Z+F IMAGER 5006. In: Luhmann, Th.; Müller, Ch. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008. Heidelberg: Wichmann, 2008
- Microtherm nv (2009): Microtherm Super Mintherm chimney Insulation. <http://www.microtherm.uk.com/EXEN/site/products-detail.aspx?vPK=18&k=6&l=1&page=0> (Abruf vom 15.1.2009)
- Müller, T. (2007): Triangulationsscanner und ihre Anwendungen. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2007) – Beiträge zum 74. DVW-Seminar am 5. und 6. Dezember 2007 in Fulda. Schriftenreihe des DVW, Band 53. Augsburg: Wißmer, 2007
- Nikon GmbH (2009a): D3 Produktbilder. http://www.nikon.de/product/de_DE/products/broad/1435/views.html (Abruf vom 10.7.2009)
- Nikon GmbH (2009b): AF NIKKOR 24 mm 1:2,8D http://www.nikon.de/product/de_DE/products/broad/387/overview.html (Abruf vom 27.7.2009)
- Pfundstein, M.; Gellert, R.; Spitzner, M. H.; Rudolphi A. (2007): Dämmstoffe Grundlagen Materialien Anwendungen. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co.KG. München: Detail Praxis, 2007
- Porextherm Dämmstoffe GmbH (2007): Willkommen bei der Porextherm Dämmstoffe GmbH in Kempten. <http://www.porextherm.de/web/de/anwendungen> (Abruf vom 8.3.2007)
- Rauch, S. (2008): TES EnergyFacade – Fassadendokumentation der Rotlintstraße 116-120, Frankfurt am Main. Technische Berichte des Lehrstuhls für Geodäsie der TU München. München, 2008

- Rauch, S. (2009): Ansätze und Potential der automatisierten Auswertung von Laserscanningdaten zur Fassadendokumentation. Diplomarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Geodäsie. Oktober, 2009
- Reyer, E.; Scherer, M.; Bamberger, C.; Juretzko, M.; Schild, K.; Sieder, M.; Völkner, S. (2003): Energiegerechte Außenwandsanierung mit industriellen Vorfertigungstechniken. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2003
- Reyer, E.; Sieder, M.; Bamberger, C.; Schild, K.; Völkner, S. (2004): Grobelement-Dämmtechnik (GeDt) zur energetischen Fassadensanierung. In: Bautechnik 81 (2004), Heft 3, S. 189-200
- Schäfer, Th. (2008): „Malen nach Zahlen“ – Das Zusammenspiel von Punktwolke und CAD. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008) – Beiträge zum 79. DVW-Seminar am 6. und 7. November 2008 in Fulda. Schriftenreihe des DVW, Band 54. Augsburg: Wißmer, 2008
- Schäfer, Th.; Eder, C. (2008): Hybride Fassadenaufnahme - Datenübergabe Rotlintsstraße. Vortrag, Technische Universität München, Lehrstuhl für Geodäsie, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung. 2008
- Scherer, M. (2007): Nahe Verwandte des Laserscanners: Intelligente Totalstation und 3D-Kamera. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2007) – Beiträge zum 74. DVW-Seminar am 5. und 6. Dezember 2007 in Fulda. Schriftenreihe des DVW, Band 53. Augsburg: Wißmer, 2007
- Schleinkofer, M. (2007): Wissensbasierte Unterstützung zur Erstellung von Produktmodellen im Baubestand. München, Technische Universität, Lehrstuhl für Bauinformatik, Diss., 2007
- Schneider, B. (2009): Reverse Engineering im Bauwesen – Photogrammetrische Methoden der Bauwerkserfassung. Diplomarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, März 2009
- Schulze Darup, B. (Hrsg.) (2004): Energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10. Mit einem Grußwort von F. Brickwedde. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2004
- Steger, P. (2007): Reverse Engineering im Bauwesen – Die Möglichkeiten optischer 3D-Messtechniken bei der Bauwerksaufnahme. Diplomarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, August 2007
- Steinbichler Optotechnik (2009): T-Scan 2: Der neue handgeführte Laserscanner.
http://www.steinbichler.de/de/main/neu_t-scan_2.htm (Abruf vom 5.1.2009)
- TES EnergyFacade (2009): TES EnergyFacade.
http://www.tesenergyfacade.com/index.php?id=13_tes (Abruf vom 25.8.2009)
- Topcon Deutschland GmbH (2008): Topcon PRESS - RELEASE PR – 03; Broschüre Topcon T250DE 02/08

- Topcon Europe B.V. (2009): <http://www.topcon-positioning.eu/de/index.asp?pageid=ebc9c3774ed249a182b4a6bf57293aab> (Abruf vom 9.7.2009)
- va-Q-tec AG (2008): Anwendungsbeispiele. http://www.va-q-tec.com/anwendungsbeispiele_de,739.html (Abruf vom 14.11.2008)
- Variotec GmbH & Co. KG (2008): QASAmix das Vakuum-Wärmedämm-Verbundsystem für Neubau – und Sanierung. Broschüre Nr. 470, Stand: April 2008
- Variotec GmbH & Co. KG (2009a): Dämmung – Abgespeckt aufs Dach. In: Bauen mit Holz, 1/2009, S. 11. Köln: Bruderverlag
- Variotec GmbH & Co. KG (2009b): QASA-Bauteile. <http://innendaemmung-vip.de/hp1064/QASA-Bauteile.htm> (Abruf vom 20.3.2009)
- Variotec GmbH & Co. KG (o.J.): veni – vici – vip – Planen – bauen – sanieren mit VIP + Quasa, den hocheffizienten und raumsparenden Wärmebrückenkillern, Firmenprospekt, ohne Jahresangabe
- Wangerin, G. (1992): Bauaufnahme: Grundlagen, Methoden, Darstellung. Wiesbaden: Vieweg, 1992
- Wasmeier, P. (2009): Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter. Dissertation, Technische Universität München, 2009
- Weber, Th. (2002): Laser-Scanning zur Erfassung, Modellierung und intelligenten Visualisierung eines historischen Kirchendachstuhl. In: Luhmann, Th. (Hrsg.): Photogrammetrie und Laserscanning 2002. Heidelberg: Wichmann, 2002
- Wiedemann, A. (2004): Handbuch Bauwerksvermessung – Geodäsie, Photogrammetrie, Laserscanning. Basel: Birkhäuser Verlag, 2004
- Wienands, R. u.a. (1980): Franz Hart – Bauten, Projekte, Schriften. Ausstellungskatalog, Lehrstuhl für Grundlagen der Gestaltung und Darstellung, Technische Universität München. Eigenverlag, 1980
- Wunderlich, Th.; Staiger, R. (2008): „Schneller, weiter, effizienter, ...“ – Aktuelle Entwicklungen der Sensortechnik. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008) – Beiträge zum 79. DVW-Seminar am 6. und 7.11.2008 in Fulda. Schriftenreihe des DVW, Band 54. Augsburg: Wißmer, 2008
- ZAE Bayern (Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.) (2008): VIP Aufbau. http://www.vip-bau.de/d_pages/technik/vip/aufbau.htm (Abruf vom 1.12.2008)

ZAE Bayern (Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.) (2009):
Vakuumisolierglas (VIG). http://www.vip-bau.de/d_pages/technik/vig/vig.htm (Abruf vom
23.1.2009)

Zoller+Fröhlich (2008): Die neue Art zu scannen. http://www.zf-laser.com/d_imager5006.html
(Abruf vom 25.11.2008)

Zoller+Fröhlich GmbH (2009): http://www.zf-laser.com/d_z_f.html; http://www.zf-laser.com/d_imager5006.html (Abruf vom 9.7.2009)

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: links Bodyscanner - Maßnahmen für einen Maßanzug (Krötz 2004); rechts Transportverpackung aus Schaumstoff für ein Kunstobjekt - Modellierung der Negativform (Konica Minolta 2009b)	8
Abbildung 2: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen (Werte nach Pfundstein 2007).....	10
Abbildung 3: Aufbau eines Vakuum-Dämmelementes mit Stützkörper (ZAE Bayern 2008).....	12
Abbildung 4: Wärmeleitfähigkeit von Vakuum-Dämmelementen mit verschiedenen Kernmaterialien in Abhängigkeit vom Gasdruck (Kleinhempel 2005).....	14
Abbildung 5: mikroporöse Kieselsäure, links Rohmaterial (Microtherm 2009), rechts gepresste Platten (Cremers 2006).....	14
Abbildung 6: Herstellung von Vakuum-Dämmelementen bei Variotec (von links oben nach rechts unten): 1. Zugeschnittene Platten aus pyrogener Kieselsäure, 2. mit Flies ummantelte Stützkörper, 3. dreiseitig geschlossener Beutel aus Hochbarrierefolie, 4. Vakuumkammer und 5. maßgefertigte Vakuum-Dämmelemente.....	16
Abbildung 7: QASAmx-Element (Variotec 2008).....	19
Abbildung 8: Verformungsgetreue Bauaufnahme mit Schadensdarstellung, Querschnitt des sog. ‚Westpalas‘ der Burg Rothenfels (Mader 1991).....	20
Abbildung 9: photogrammetrische Einzelbildentzerrung (Fokus 2004)	22
Abbildung 10: Mehrbild-Photogrammetrie - Kanten- und Flächenmodell (linkes Bild) und texturiertes Flächenmodell (rechtes Bild) (Eos 2008)	23
Abbildung 11: Tachymetrie (FPK 2009)	25
Abbildung 12: kritische Messsituationen bei der Tachymetrie - Messung auf schräge Fläche, Innenecke, Außenecke, Stufe (von links nach rechts) (Kern 2001).....	26
Abbildung 13: Phasenvergleichsscanner Z+F IMAGER 5006, links (Zoller+Fröhlich 2008) und Laufzeitsscanner Leica ScanStation C10, rechts (Leica 2009)	27
Abbildung 14: Verknüpfte Punktwolke aus 3D-Laserscanning eines Dachstuhls. Die kreisförmigen Bereiche markieren die Standorte des Scanners. (Steger 2007).....	28
Abbildung 15: „Farb-Laserscanner“ Faro LS, links (Faro 2009) und eingefärbte Punktwolke, Herkulaneum, rechts (DeltaSphere 2008).....	29

Abbildung 16: Triangulationsscanner Konica Minolta VI-910, links (Konica Minolta 2009a) und handgeführter Laserscanner Steinbichler T-Scan 2, rechts (Steinbichler 2009)	29
Abbildung 17: Verbindungen zwischen den Vermessungsmethoden (Juretzko 2005).....	31
Abbildung 18: Versuchsobjekt Fassade Vorhoelzer-Bau, links südliche Giebelseite, rechts östliche Längsseite	33
Abbildung 19: Versuchsobjekt Deckenfeld Meyer-Jens-Halle, links Innenansicht der Halle, rechts geöffnetes Deckenfeld.....	35
Abbildung 20: Versuchsobjekt Keller, links Außenwand mit einmündendem Kanal, Mitte Wandnische, rechts Schmalseite mit Zugang.	36
Abbildung 21: Verwendete Hilfsmittel für die Registrierung - DIN A4-Passmarke, Kugel, Münze, reflektierender Referenzpunkt (von links nach rechts).....	39
Abbildung 22: Faro LS 880 HE 80 (Quelle: linkes Bild Faro; rechtes Bild Autor).....	40
Abbildung 23: Leica ScanStation (Quelle: linkes Bild Leica; rechtes Bild Autor).....	41
Abbildung 24: Aufnahme Rücksprung Brüstung	42
Abbildung 25: Z+F IMAGER 5006 (Quelle: linkes Bild Z+F; rechtes Bild Autor).....	43
Abbildung 26: Topcon Imaging-Station IS, Fußpunkt Pfosten im Bereich der Türen	44
Abbildung 27: Creaform REVscan (Quelle: linkes Bild Creaform; rechtes Bild Autor).....	45
Abbildung 28: Reduzierung der Dateigröße durch Reduzierung der Punktzahl	49
Abbildung 29: Fassade Vorhoelzer-Bau, Verschattungen - links Fusspunkt Tür, rechts Fensterecke	52
Abbildung 30: links Aufnahme Fassadenrücksprung, rechts Punktwolke.....	53
Abbildung 31: Modellieren von Kanten (links) und Ecken (rechts) durch Verschneiden von Ebenen, Leica Cyclone.....	54
Abbildung 32: Schematischer Schnitt durch Fenster, Fehlermöglichkeit bei der Auswertung	54
Abbildung 33: Abschnittsweises Modellieren einer Gebäudekante	55
Abbildung 34: Anpassen eines Zylinders an die Regenrinne.....	55
Abbildung 35: Kanten bzw. Flächenmodell des Vorhoelzer-Baus.....	56

Abbildung 36: Darstellung Polygonnetz Dachgeschoss Vorhoelzer-Bau, Geomagic Studio	56
Abbildung 37: Fehlstellen im Bereich von Verschattungen	57
Abbildung 38: Vergleich Foto mit Netzmodell - ungenügend vermaschte Detailpunkte.....	57
Abbildung 39: „welliger“ Verlauf der Kanten im Netzmodell (links), Vergleich verschiedener Modelle (rechts)	58
Abbildung 40: Fototextur auf Punktwolke	58
Abbildung 41: statistische Auswertung, Geomagic Qualify.....	61
Abbildung 42: Punktzahl Punktwolke/Netzmodell.....	62
Abbildung 43: Punktzahl Punktwolke/Kanten-/Netzmodell.....	63
Abbildung 44: grafischer Abgleich Punktwolke/Netzmodell.....	64
Abbildung 45: grafischer Abgleich Punktwolke/Kantenmodell.....	64
Abbildung 46: unterschiedliche Modellierung der Aufkantung eines Fensterbleches.....	65
Abbildung 47: Punktgenauigkeit Punktwolke/Kantenmodell.....	66
Abbildung 48: Punktgenauigkeit Netzmodell/Kantenmodell	67
Abbildung 49: Punktgenauigkeit Punktwolke/Netz-/Kantenmodell.....	68
Abbildung 50: grafischer Abgleich Netzmodelle verschiedener Laserscanner	68
Abbildung 51: Punktgenauigkeit Netz-/Netzmodell.....	69
Abbildung 52: Überlagerung Kantenmodelle, Fußpunkt Türpfosten Giebelseite	69
Abbildung 53: Punktgenauigkeit Netzmodelle und Kantenmodelle verschiedener Laserscanner	70
Abbildung 54: Abwicklung Giebelseite Süd, Längsseite Ost – Vorhoelzer-Bau.....	71
Abbildung 55: Abweichung Streckenmessung vom Mittelwert und Handaufmaß	72
Abbildung 56: Häufigkeitsverteilung Laserscanner, Abweichung vom Mittelwert.....	73
Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung Modelle, Abweichung vom Handaufmaß.....	73
Abbildung 58: Standardabweichungen der Messstrecken.....	74

Abbildung 59: Punktwolke Deckenfeld Meyer-Jens-Halle	75
Abbildung 60: Kantenmodell Deckenfeld Meyer-Jens-Halle, Leica Cyclone	75
Abbildung 61: Durchbruch Unterzug als Zylinder modelliert (links), Kranbahnträger (rechts).....	76
Abbildung 62: Netzmodell Deckenfeld Meyer-Jens-Halle, Gesamtansicht und Detail, Geomagic Studio.....	76
Abbildung 63: Kantenmodell Deckenfeld Meyer-Jens-Halle, Kubit PointCloud.....	77
Abbildung 64: Punktwolke Kellerraum Gabelsbergerstraße als Abwicklung	77
Abbildung 65: Punktwolke Kellerraum Gabelsbergerstraße als Axonometrie	78
Abbildung 66: Modellierung Nische Kellerraum Gabelsbergerstraße, Leica Cyclone	78
Abbildung 67: Bemaßung Eckpunkte Kellerraum Gabelsbergerstraße, Axonometrie, Längs- und Querschnitt	79
Abbildung 68: Vermaschtes Netzmodell Kellerraum Gabelsbergerstraße, Geomagic Studio.....	79
Abbildung 69: Bemaßte Schnitte Kellerraum Gabelsbergerstraße, Kubit PointCloud.....	80
Abbildung 70: Fotos der Totalstation beim Aufmaß der Fassade Vorhoelzer-Bau	81
Abbildung 71: Auswerteobjekt Stahllasche Fassade Vorhoelzer-Bau und Messergebnis.....	81
Abbildung 72: Nikon D3 Gehäuse (links, Nikon 2009a) und Objektiv AF NIKKOR 24 mm 1:2,8D (rechts, Nikon 2009b).....	83
Abbildung 73: Colorfix Fotoaufmaß - Messung im nicht-entzerrten (links) und im entzerrten (rechts) Bild.....	86
Abbildung 74: metigo2D - Auswertung eines entzerrten Bildes (links) und detaillierte Messung eines Objektpunktes (rechts).....	88
Abbildung 75: PhoToPlan - Zuordnung von Passmarke und zugehöriger Bildkoordinate	90
Abbildung 76: PhoToPlan - über Passpunkte entzerrtes Messbild, das durch weitere Bilder ergänzt werden soll (links) und mosaikiertes Orthofoto (rechts).....	90
Abbildung 77: PhoToPlan - Bild mit Gitternetz (links) und Bild mit angepasstem Gitternetz (rechts).....	91
Abbildung 78: PhoToPlan - bemaßter Bildplan	91

Abbildung 79: MSR - Entzerrung über Koordinaten von Objektpunkten	93
Abbildung 80: MSR - Entzerrung über parallele Linienpaare.....	93
Abbildung 81: MSR - Bestimmung der Bildreihenfolge bei Bildern mit festgelegten Entzerrungsbereichen (links) und automatisch montierter Bildplan (rechts)	94
Abbildung 82: MSR - manuelle Verknüpfung von zwei entzerrten Bildern.....	94
Abbildung 83: MSR - Auswertung entzerrter Bilder	95
Abbildung 84: modularer Aufbau von LPS (Geosystems 2009)	98
Abbildung 85: Markieren von Verknüpfungspunkten in zwei Bildern mit LPS.....	99
Abbildung 86: Markieren von Verknüpfungspunkten in CDW	100
Abbildung 87: Messmarken an der Südfassade Vorhoelzer-Bau, Detail (links) und Gesamtansicht mit Nummerierung der Marken (rechts).....	103
Abbildung 88: Bild 1 der Objekterfassung.....	104
Abbildung 89: Bild 3 und 5 der Objekterfassung.....	105
Abbildung 90: Südfassade Vorhoelzer Bau - Referenzmaße.....	106
Abbildung 91: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, Einzelbild - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß	107
Abbildung 92: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, Einzelbild - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß	107
Abbildung 93: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, zwei mosaikierte Bilder - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß	109
Abbildung 94: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, zwei mosaikierte Bilder - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß	109
Abbildung 95: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, Einzelbild - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß	111
Abbildung 96: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, Einzelbild - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß	111
Abbildung 97: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, zwei mosaikierte Bilder - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß	113

Abbildung 98: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, zwei mosaikierte Bilder - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß	113
Abbildung 99: Ergebnisse Entzerrung über Orientierungsdaten, Einzelbild und montierte Bilder - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß	115
Abbildung 100: Ergebnisse Entzerrung über Orientierungsdaten, Einzelbild und montierte Bilder - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß	115
Abbildung 101: Ergebnisse der Auswertung mit Mehrbildphotogrammetrie - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß	117
Abbildung 102: Ergebnisse der Auswertung mit Mehrbildphotogrammetrie - graphische Darstellung der Messabweichungen relativ zum Handaufmaß	117
Abbildung 103: Vergleich der Auswertemethoden - graphische Darstellung der absoluten mittleren Messabweichungen bezogen auf das Handaufmaß	118
Abbildung 104: Vergleich der Auswertemethoden - graphische Darstellung der mittleren Messabweichungen relativ zum Handaufmaß	118
Abbildung 105: Vergleich Photogrammetrie/3D-Laserscanning - graphische Darstellung der absoluten Messabweichungen relativ zum Handaufmaß (Kantenmodelle blau, Netzmodelle rot, Einzelbildphotogrammetrie grün, Mehrbildphotogrammetrie gelb)	122
Abbildung 106: Vergleich Photogrammetrie/3D-Laserscanning - graphische Darstellung der prozentualen Messabweichungen relativ zum Handaufmaß (Kantenmodelle blau, Netzmodelle rot, Einzelbildphotogrammetrie grün, Mehrbildphotogrammetrie gelb)	122
Abbildung 107: Darstellung der Musterfläche, Ansicht Giebelseite Süd, Vorhoelzer-Bau	124
Abbildung 108: Verlegeplan, Firma Variotec	125
Abbildung 109: Elementplan, Firma Variotec	126
Abbildung 110: Anbringen der Dämmelemente (links), Auftragen des Klebemörtels (Mitte), Verdübelung (rechts)	126
Abbildung 111: Passgenaue Elemente am Türeck (links), Berücksichtigung des Ecküberstandes (Mitte), offene Fuge aufgrund eines Planfehlers (rechts)	127
Abbildung 112: Ergebnis der Montage	127

Abbildung 113: Kennzeichnung der einzelnen Elemente mit Positionsnummer und Barcode wurde als zu klein kritisiert.....	128
Abbildung 114: QASAMax: Strukturen bei Angebotserstellung (links) und Auftragsabwicklung (rechts).....	129
Abbildung 115: Wohnanlage Lilienstraße Nord, Bildplan der Straßenfassade, erster Bauabschnitt (Bild: Fachgebiet für Photogrammetrie und Fernerkundung, TUM)	132
Abbildung 116: Wohnanlage Rotlintstraße, zusammengesetzte Punktwolke der Fassaden (Schäfer 2008).....	133

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anwendungsgebiete von Vakuum-Dämmelementen im Bestand.....	18
Tabelle 2: QASAmx - Plattenstärken (Variotec 2008)	19
Tabelle 3: Vergleich der Verfahren zur geometrischen Erfassung von Bestandsgebäuden.....	30
Tabelle 4: Vergleich der Versuchsobjekte und Übereinstimmung mit den Auswahlkriterien.....	36
Tabelle 5: Herstellerangaben zu technischen Daten der verwendeten 3D-Laserscanner	38
Tabelle 6: Übersicht über Punktzahl, Dateigröße der Laserscannerdateien.....	50
Tabelle 7: Übersicht Aufnahmen mit Laserscanner	51
Tabelle 8: Zusammenstellung Modellkombinationen, Fassade Vorholzer-Bau.....	60
Tabelle 9: Vergleich Einzelbildentzerrungssoftware (Stand: März 2009).	85
Tabelle 10: Vergleich der ausgewählten Einzelbildentzerrungssoftware (Stand: März 2009).....	96
Tabelle 11: Vergleich Programme Mehrbildphotogrammetrie.	97
Tabelle 12: Vergleich der ausgewählten Mehrbildauswertesoftware (Stand: März 2009)	102
Tabelle 13: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, Einzelbild.....	106
Tabelle 14: Ergebnisse Entzerrung über Passpunkte, zwei mosaikierte Bilder	108
Tabelle 15: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, Einzelbild.....	110
Tabelle 16: Ergebnisse Entzerrung über parallele Linien, zwei mosaikierte Bilder	112
Tabelle 17: Ergebnisse Entzerrung über Orientierungsdaten, Einzelbild und montierte Bilder	114
Tabelle 18: Ergebnisse Auswertung mit Mehrbildphotogrammetrie.....	116
Tabelle 19: Vergleich Ergebnisse 3D-Laserscanning und Photogrammetrie	121
Tabelle 20: Abweichung der Ergebnisse 3D-Laserscanning/Photogrammetrie zum Handaufmaß	121

14 Herstellerverzeichnis

Trotz sorgfältiger Recherche kann für die nachfolgenden Tabellen keine Gewähr für Vollständigkeit übernommen werden.

14.1 Hersteller von 3D-Laserscannern (Impulslaufzeit und Phasendifferenz)

Name der Firma	Standort	Internetadresse
3rdTech, Inc.	4142 Münchenstein / BL (Schweiz)	www.deltasphere.com
Callidus precision systems GmbH	06120 Halle/Saale	www.callidus.de
Faro Europe GmbH & Co. KG	70825 Korntal-Münchingen	www.faro.com
Leica Geosystems GmbH Vertrieb	80993 München	www.leica-geosystems.de
Maptek / Krja Systems Ltd Edinburgh	Edinburgh (United Kingdom)	www.maptek.com
Optech Incorporated	Vaughan, Ontario (Kanada)	www.optech.ca
Riegl Laser Measurement Systems GmbH	3580 Horn (Österreich)	www.riegl.com
Topcon Deutschland GmbH	47877 Willich	www.topcon-positioning.eu
Trimble GmbH	65479 Raunheim	www.trimble.com
Zoller+Fröhlich GmbH Elektrotechnik	88239 Wangen i.A.	www.zf-laser.com

14.2 Software zur Auswertung von 3D-Punktwolken

Name der Firma	Standort	Internetadresse
3D Concepts Computer-Aided-Design & Manufacturing Systeme Vertriebs Gesellschaft mit Beschränkter Haftung	72186 Empfingen	www.3dconcepts.de
ArcTron Ausgrabungen & Computerdokumentationen GmbH	93177 Altenthann	www.arctron.de
Brescia	Brescia (Italien)	www.gexcel.it
C-Technik Software GmbH	74861 Neudenu	www.c-technik.de
Duwe-3d AG	88131 Lindau	www.duwe-3d.de
Geomagic GmbH	70193 Stuttgart	www.geomagic.com
Kubit GmbH	01307 Dresden	www.kubit.de
Leica Geosystems GmbH Vertrieb	80993 München	www.leica-geosystems.de
Lupos3D GbR	13355 Berlin	www.lupos3d.de
McNeel Europe	Barcelona (Spanien)	www.de.rhino3d.com
Metris Germany	63755 Alzenau	www.metris.com
ObjektScan GmbH	14482 Potsdam	www.objektscan.de
Objektscan GmbH - EasyPoint	14482 Potsdam	www.easy-point.eu
Phocad Ingenieurgesellschaft mbH	52070 Aachen	www.phocad.de
Revxperts GmbH	85748 München	www.revxperts.de
Software-Service John	98693 Ilmenau	www.john-software.de
SolidWorks Deutschland GmbH	85540 Haar	www.solidworks.de
Zoller+Fröhlich GmbH	88239 Wangen i.A.	www.zf-laser.com

14.3 Photogrammetriesoftware für Einzelbildauswertung

Name der Firma	Standort	Internetadresse
ArcTron Ausgrabungen & Computerdokumentationen GmbH	93177 Altenthann	www.arctron.de
Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH	70372 Stuttgart	www.baukosten.de
Bmz Technisch-Wissenschaftliche Software GmbH	72070 Tübingen	www.bmz-software.com
Bonk Computersysteme	60528 Frankfurt a.M.	www.farbepius.de
Bonk Computersysteme	60528 Frankfurt a.M.	www.farbepius.de
Braasch und Jäschke Computertechnik	38855 Wernigerode	www.curamess.de
Cai Computerdesign	65183 Wiesbaden	www.cai-wiesbaden.de
DevCon Software GmbH	13187 Berlin	www.4master.de
Dtc Software	84478 Waldkraiburg	www.dtcfotoaufmass.de
Fokus GmbH Leipzig	04229 Leipzig	www.fokus-gmbh-leipzig.de
Fokus GmbH Leipzig	04229 Leipzig	www.fokus-gmbh-leipzig.de
Graebert GmbH	10709 Berlin	www.givemepower.de
Hottgenroth Software GmbH & Co. KG	50829 Köln	www.hottgenroth.de
Idc edv GmbH	6460 Imst	www.idc-edv.at
Kubit GmbH	01307 Dresden	www.kubit.de
Moser GmbH & Co.KG	52139 Würselen	www.moser.de
Nemetschek AG	81829 München	www.massfix.de

Pms Photo Mess Systeme AG	9430 St. Margrethen (Schweiz)	www.elcovision.com
Rundblick digital GmbH	48231 Warendorf - Milte	www.rundblick-digital.com
Sander und Doll AG	42853 Remscheid	www.sander-doll.com
Sander und Partner GmbH	47574 Goch	www.winworker.de
Softtech	67433 Neustadt/Weinstraße	www.softtech.de
Technet GmbH	10777 Berlin	www.technet-gmbh.de
Trimble Holdings GmbH	38126 Braunschweig	www.rollei-metric.com

14.4 Photogrammetriesoftware für Mehrbildauswertung

Name der Firma	Standort	Internetadresse
Aicon 3D Systems GmbH	38114 Braunschweig	www.aicon.de
Axios 3D [®] Services GmbH	26121 Oldenburg	www.axios3d.de
Bae Systems plc	London (United Kingdom)	www.baesystems.com
Cgi Systems GmbH	82402 Seeshaupt	www.cgisystems.de
Gom GmbH	38106 Braunschweig	www.gom.com
Innotech Holztechnologien GmbH	12589 Berlin-Rahnsdorf	www.innotech-ht.com
Inpho GmbH	70174 Stuttgart	www.inpho.de
Invers - Industrievermessung & Systeme	45329 Essen	www.phaust.de
iWitness	Bellevue (USA)	www.iwitnessphoto.com
K ² - Photogrammetry	53225 Bonn	www.k2-photogrammetry.de
Leica Geosystems GmbH	80993 München	www.leica-geosystems.de
Limes Messtechnik & Software GmbH	75180 Pforzheim	www.limes.com

Menci Software	85111 Adelschlag	www.menci.com
Messbildstelle Gesellschaft für Photogrammetrie und Architekturvermessung mbH	01187 Dresden	www.messbildstelle.de
Phocad Ingenieurgesellschaft mbH	52070 Aachen	www.phocad.de
Pms Photo Mess Systeme AG	9430 St. Margrethen (Schweiz)	www.elcovision.com
Rsi GmbH	61440 Oberursel	www.rsi-gmbh.de
Rundblick Digital GmbH	48231 Warendorf - Milte	www.rundblick-digital.com
Solving3D GmbH	30827 Garbsen	www.solving3d.de
Technet GmbH	10777 Berlin	www.technet-gmbh.de

14.5 Dienstleister für Potogrammetrie und 3D-Laserscanning

PG: Anbieter für Photogrammetrie

3DL: Anbieter für 3D-Laserscanning

Name der Firma	Standort	Internetadresse	PG	3DL
Messbildstelle Gesellschaft für Photogrammetrie und Architekturvermessung mbH	01187 Dresden	www.messbildstelle.de	X	
Vermessungsbüro Dipl.-Ing. (FH) Andreas Schlegel	02906 Niesky	www.vermessung- schlegel.de	X	
Aphos Leipzig AG	04103 Leipzig	www.aphos.de	X	
Kaz Bildmess GmbH	04105 Leipzig	www.kaz.de	X	
Vermessungs- und Ingenieurbüro Andreas Jope	04288 Leipzig	www.messbuero.de		X
Vermessungsbüro Jope	04288 Leipzig	www.vermessungsbue ro-jope.de		X

Gonometrics	06114 Halle (Saale)	www.gonometrics.de	X	X
Geo-Metrik AG	06193 Gutenberg	www.geo-metrik.de	X	
FPK-Ingenieurgesellschaft GmbH	10827 Berlin	www.fpk.de	X	
Laserscan Berlin Biermann, Lucke und Partner Vermessungsingenieure	10827 Berlin	www.laserscan-berlin.de		X
Matthias Grote Planungsbüro	10829 Berlin	www.matthiasgrote.de		X
Scan3D Dienstleistungsgesellschaft GmbH	13347 Berlin	www.scan-3d.com		X
Lupos3D GbR	13355 Berlin	www.lupos3d.de	X	X
ObjektScan GmbH	14482 Potsdam	www.objektscan.de		X
ObjektScan GmbH - EasyPoint	14482 Potsdam	www.easy-point.eu		X
Illustrated architecture	16727 Oberkrämer	www.illustrated-architecture.de	X	X
Vermessungsbüro Weigt	18119 Rostock- Warnemünde	www.vermessung- weigt.de		X
Dr. Hesse und Partner Ingenieure	21079 Hamburg	www.dhpi.de		X
Vermessungsbüro Hesse	21614 Buxtehude	www.hesse- buxtehude.de	X	
Vermessungsbüro Mittelstädt und Schröder	27383 Scheeßel	www.mittelstaedt- schroeder.de		X
Vermessungsbüro Haase & Bette	30159 Hannover	www.ahb- vermessung.de		X
Trimetric 3D Service GmbH	30823 Garbsen	www.trimetric.de	X	X
3D Laser Systeme GmbH	31515 Wunstorf	www.3dls.de		X

Inmetris3D Partnerschaftsgesellschaft	38106 Braunschweig	www.inmetris3d.de		X
GeoContent GmbH	39108 Magdeburg	www.geocontent.de	X	
Geocart Herten GmbH	45699 Herten	www.geocart.de	X	
Phocad Ingenieurgesellschaft mbH	52070 Aachen	www.phocad.de	X	
Bau-Aufmas-Büro Anette Köhler	54298 Igel	www.aufmass- buero.de	X	
Ludwig und Schwefer Ingenieurgesellschaft für Graphische Datenverarbeitung mbH	59494 Soest	www.ls-soest.de	X	
Vermessungsbüro Riemenschneider GbR	63110 Rodgau	www.riemenschneider. net		X
Objektiv Geoconsult	63401 Hanau am Main	www.objektiv- geoconsult.de		X
Ingenieurgesellschaft Werny und Partner	66583 Spiesen- Elversberg	www.werny- ingenieure.de		X
Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Georg Dillinger	66606 St. Wendel	www.oebvi-dillinger.de		X
Vermessung Hils GbR	70180 Stuttgart	www.hils.net		X
Windhager 3D-real GmbH	70499 Stuttgart	www.3dreal.de	X	X
Gerst - Vermessung	75417 Mühlacker	www.gerst- vermessung.de		X
Artmann - Vermessungstechnik	76227 Karlsruhe	www.artmann- consult.de		X
Geosys°/ IB Eber	80687 München	www.geosys-eber.de	X	X
Karner Ingenieure GmbH	80807 München	www.entwurfs- vermessung.de		X

LaserPlan	82319 Berg	www.laserplan.de	X	X
Geo-konzept GmbH	85111 Adelschlag	www.geo-konzept.de		
Aadiplan München	85241 Schloss Unterweilbach	www.aadiplan.de	X	X
Intergraph Holding Deutschland GmbH	85737 Ismaning	www.intergraph.com	X	
Ingenieurbüro Christofori und Partner	90574 Roßtal	www.christofori.de		X
Phometric GmbH	91052 Erlangen	www.phometric.de	X	
Galileo-ip Ingenieure GmbH	92665 Altenstadt a.d.Waldnaab	www.galileo-ip.de	X	X
ArcTron Ausgrabungen & Computerdokumentationen GmbH	93177 Altmühl	www.arctron.de	X	X
Angermeier Ingenieure GmbH	97232 Giebelstadt	www.angermeier.de	X	X