



Masterarbeit

Deformationsanalyse von Betonschalenelementen

Hochschule Anhalt (FH)

Fachbereich Architektur, Facility Management, Geoinformation

vorgelegt von

B.Eng. Steffen Reich

7. Oktober 2013

Betreut durch:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Bannehr

Prof. Dr.-Ing. Heinz Runne

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die von mir eingereichte Masterarbeit selbstständig unter der Benutzung der in der Arbeit angegebenen Literatur, sowie der Hinweise des Betreuers angefertigt wurde.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Dessau-Roßlau, 7. Oktober 2013

Steffen Reich

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die bei der Erstellung dieser Masterarbeit beteiligt waren. Besonders geht mein Dank an die Herren B.Eng. Klaus Rieke und B.Eng. Thomas Steinbick, die mir während der Datenerfassung hilfreich zur Seite standen. Des Weiteren gebührt mein Dank Prof. Dr.-Ing. L. Bannehr, Prof. Dr.-Ing. H. Runne und Prof. Dr.-Ing. K. Off, die mir diese Masterarbeit ermöglichten.

Auch möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der HS Anhalt, besonders bei Herrn Dipl.-Ing. H. Foltin, für die Bereitstellung des Laserscanners und weiterer Gerätschaften bedanken.

Ein großes Dankeschön geht auch an alle die meine Masterarbeit Korrektur gelesen haben.

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigte sich mit der photogrammetrischen und der laserbasierten Objekterfassung von Betonschalenelementen. Das Ziel hierbei war, zu überprüfen, ob eine Erfassung von Deformationen in Bezug auf die jeweilig angewendeten Verfahren der Stereophotogrammetrie und des terrestrischen Laserscanning möglich sind. Hierzu wurden Daten, basierend auf zwei unterschiedlichen Versuchsanordnungen (ein statischer und ein dynamischer Belastungsprozess) aufgenommen, weiterverarbeitet und analysiert. Die Analyse und Vergleich der aufgenommenen Daten zeigt, dass die grundlegende Art und Weise der Deformation mit beiden Aufnahmeverfahren erfasst werden konnte, sich jedoch erhebliche Unterschiede in der Datenqualität darstellten.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	i
Danksagung.....	ii
Kurzzusammenfassung	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	viii
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung und Rahmenbedingung	2
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen der Photogrammetrie und Laserscanning	5
2.1 Photogrammetrie.....	5
2.1.1 Innere Orientierung.....	5
2.1.2 Äußere Orientierung.....	8
2.1.3 Grundlagen der Stereobildphotogrammetrie.....	10
2.1.4 Image matching.....	13
2.2 Funktionsweise eines Laserscanners.....	18
3 Messinstrumente	22
3.1 Verwendete Kameras.....	22
3.2 Laserscanner ScanStation 2	24
3.3 Leica TCRA 1201	25
4 Genauigkeitsvorbetrachtung	26
4.1 Genauigkeitsvorbetrachtung ScanStation 2	26
4.2 Digitalkameras.....	27
5 Aufnahme Schalenelemente.....	30
5.1 Versuchsaufbau Januar 2012	30
5.2 Versuchsaufbau Februar 2012	34
6 Auswertung der Aufnahmen	38
6.1 Kamerakalibrierung	38
6.2 Punktwolkengenerierung mit PhotoModeler.....	41
6.3 Praktische Punktwolkengenerierung.....	42
6.4 Registrierung der Laserscanpunktvolken.....	48
6.5 Bereinigung der Punktwolke.....	49
6.6 Erstellung Nurbsoberfläche	50
7 Deformationsanalyse	53
7.1 Deformationsanalyse mit Geomagic Qualify	53
7.2 Deformationsanalyse der Laserscandaten des ersten Versuchs	55
7.3 Deformationsanalyse der Laserscandaten des zweiten Versuchsaufbaus.....	64
7.4 Auswertung photogrammetrische Daten des ersten Versuchsaufbaus	73

7.5	Deformationsanalyse der photogrammetrisch erfassten Daten des zweiten Versuchsaufbaus	81
7.6	Vergleich der beiden Aufnahmeverfahren	88
8	Fazit und Ausblick.....	95
9	Quellenverzeichnis.....	98
	Anhang.....	101

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1.1: Darstellung eines Sensorkoordinatensystems mit dem Datum oben links.....	6
Abb. 2.1.2: Skizzenhafte Darstellung der Parameter der inneren Orientierung (Luhmann S.144).	7
Abb. 2.1.3: Darstellung der Parameter der äußeren Orientierung(Luhmann, S.237).....	8
Abb. 2.1.4: Von rechts nach links: Normale, verschwenkte und konvergente Bildpaaraufnahme(Luhmann, S. 133).....	10
Abb. 2.1.5: Darstellung der stereogeometrischen Grundlage.	12
Abb. 2.1.6: Darstellung des schematischen Ablaufes eines Bildzuordnungsverfahrens gemäß Luhmann.	14
Abb. 2.1.7: Merkmalsextraktion eines Bildes durch Verwendung des Moravec-Operators (Roborealm).	16
Abb. 2.1.8: Darstellung der Mustermatrix von einem Kreuz für Grauwerte von 1 bis 9.....	17
Abb. 2.1.9: Verwendung der Suchmatrix (linken Seite) zur Detektion eines Kreuzes in der rechten Suchmatrix.	17
Abb. 2.1.10: Referenz und Suchbild eines eindimensionalen Suchmusters(Kraus, S.348).....	18
Abb. 2.2.1: Darstellung des Funktionsprinzips eines Laserscanners (Wiedemann, S.249).....	19
Abb. 2.2.2: Schematische Darstellung des Impulsvergleichsverfahrens (Deumlich,S.139) auf der linken Seite sowie dem Phasenvergleichsverfahren (Petrahn, S.145) auf der rechten Seite.	20
Abb. 2.2.3:Darstellung der drei verschiedenen Reflexionsarten.	21
Abb. 3.1.1: Von links nach rechts: EOS 60D, EOS 20D und EOS 1DS Mark II mit zugehörigen Objektiven.....	22
Abb. 3.2.1: Leica Scanstation 2 (Leica).....	24
Abb. 3.3.1: Leica TCRA 1201	25
Abb. 5.1.1: Schalenelement in Ausgangslage umschlossen mit Passpunkten auf Zieltafeln für die spätere Verknüpfung der aufgenommenen Bilder.	31
Abb. 5.1.2: Vermutete Kraftverteilung der Gewichte beim ersten Versuchsaufbau.	34
Abb. 5.2.1: Darstellung des Abschattungsbereichs durch die Hydraulikpresse bei der Aufnahme eines Schalenelementes per Laserscanner.	35
Abb. 5.2.2: Aufnahmekonfiguration der vier Kamerastandpunkte bei der Stereoaufnahme eines Schalenelementes.....	36
Abb. 5.2.3: Durch die Krafteinwirkung auf den Rücken des Schalentragerwerkes soll es zu einer Senkung im Bereich der Krafteinwirkung kommen sowie zu einer Hebung an den Seiten des Schalenelementes.....	37
Abb. 6.1.1: Darstellung der Aufnahmekonfiguration des 36 x36 Testfeldes.	39
Abb. 6.6.1: Arbeitsschritte zur Erstellung einer Nurbsfläche aus einer Punktwolke.	51
Abb. 6.6.2: Linke Seite: Darstellung der eingeladenen Punktwolke, rechte Seite: Abbildung des Polygonobjektes.	52
Abb. 6.6.3: Eine auf Nurbs basierte Rekonstruktion einer Schale.....	52
Abb. 7.1.1: Darstellung der detektierbaren Abweichtypen in Geomagic Qualify (Qualify).54	
Abb. 7.1.2: Darstellung des Einflusses der Parameter „Farbe mitteln“ und „Auflösung“ auf die Visualisierung der Abweichung	55
Abb. 7.2.1: Darstellung der Abweichung der gelockerten Schale gegenüber der Schale im befestigten Zustand.	56
Abb. 7.2.2: Darstellung der Abweichung unter 74 kg Last.	57
Abb. 7.2.3: Darstellung der Abweichung unter 150 kg.....	57
Abb. 7.2.4: Darstellung Abweichung unter 300 kg Last, es ist weiter eine abgestufte Hebung und Senkung erkennbar.....	58
Abb. 7.2.5: Veränderung der oberen Seite(links) und der unteren Seite(rechts) des Schalenelementes bei einer Belastung mit 600 kg.	59
Abb. 7.2.6: Darstellung der Deformation der oberen Seite des zweiten Schalenelementes.	60
Abb. 7.2.7: Darstellung der Deformation der oberen Seite des zweiten Schalenelementes.	61

Abb. 7.2.8: Abweichungen des dritten Schalenelementes gegenüber dem Referenzzustand.....	63
Abb. 7.3.1 : Abweichung des ersten Scans zum Referenz- zustand des ersten Schalenelementes.	65
Abb. 7.3.2: Darstellung der Abweichungen des Zustandes 6 und 7, dabei sind nur leichte Unterschiede in 1-2mm Bereich erkennbar.....	65
Abb. 7.3.3: Bei der Darstellung der Abweichungen des elften Zustands ergibt sich eine Senkung der Schale mit unterschiedlicher Stärke. Die größten Abweichungen befinden sich entlang der Hauptachse.....	66
Abb. 7.3.4: Weitere Senkung der Schale ist bei der Darstellung der Abweichungen des Zustandes 16 erkennbar.....	67
Abb. 7.3.5: Abweichungen des ersten Schalenelementes in der Endlage, es sind deutliche Senkbewegungen der Schale erkennbar.	67
Abb. 7.3.6: Darstellungen der Abweichungen des zweiten Zustandes gegenüber dem Referenzzustand.	69
Abb. 7.3.7: Abweichungen des ersten Zustandes gegenüber dem Referenzzustand.	70
Abb. 7.3.8: Beginnende großflächige Senkung der Schale sowie Hebung der rechten Seite.	70
Abb. 7.3.9: Abweichungen des zehnten Zustandes, es sind größere Differenzen im mittleren Bereich der Schale vorhanden.	71
Abb. 7.3.10: Starke Senkung im Bereich des Bohrkerne beim 14ten Zustand.	72
Abb. 7.3.11: In der Endlage sind Hebungen an der rechten sowie linken Seite des Schalenelementes sichtbar, weiterhin kam zu einer stärkeren Senkung des mittleren Bereichs.....	72
Abb. 7.4.1: Darstellung der Abweichungen des Schalenelementes unter der Krafteinwirkung von 74 kg.....	74
Abb. 7.4.2: Abweichungen der Schale unter Belastung von 150 kg im Vergleich zum Referenzzustand.	74
Abb. 7.4.3: Darstellung der Abweichungen der Schale unter 300 kg gegenüber dem Referenzzustand.	75
Abb. 7.4.4: Darstellung der Abweichungen unter der Belastung von 600 kg.	76
Abb. 7.4.5: Darstellungen der Abweichungen der jeweiligen Belastungszustände des zweiten Schalenelementes gegenüber dem Referenzzustand.	78
Abb. 7.4.6: Darstellungen der Abweichungen der jeweiligen Belastungszustände des dritten Schalenelementes gegenüber dem Referenzzustand.	80
Abb. 7.5.1: Beispielhaft ausgewählte Zustände des ersten Schalenelementes zur Verfolgung der Deformation.	82
Abb. 7.5.2: Beispielhaft ausgewählte Zustände des zweiten Schalenelementes zum Aufzeigen der Deformation.	84
Abb. 7.5.3: Beispielhaft ausgewählte Zustände des dritten Schalenelementes zur Deformationsbestimmung.....	87
Abb. 7.6.1: Darstellung des Abschattungsbereiches, auf der linken Seite per Laserscanner erfasst Oberfläche und auf der rechten Seite per Stereophotogrammetrie erfasste Oberfläche ohne Abschattungsbereich.....	89
Abb. 7.6.2: Vergleich des Aussehens der per Laserscanning und Stereophotogrammetrie generierten Oberflächenmodelle während des zweiten Versuchsaufbaus.....	91
Abb. 7.6.3: Die Differenz zwischen den beiden Aufnahmeverfahren ist beim Ausgangszustand minimal, großflächig betragen die Abweichungen 1 mm oder -1 mm.	91
Abb. 7.6.4: Vergleich der Stereobildpaardaten mit den Scandaten des Laserscanners während der zweiten Versuchsdurchführung.....	92
Abb. 7.6.5: linken Seite: Gescannte Marke in der Punktwolke; rechte Seite: Marke näher herangezoomt mit Auswahl der Vergleichspunkte.....	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1.1: Übersicht der Spezifikationen der verwendeten Kameras	23
Tabelle 3.2.1: Genauigkeitsangaben der Scanstation 2.....	24
Tabelle 3.3.1: Übersicht der Spezifikationen des Leica TCRA 1201.....	25
Tabelle 4.2.1: Berechnung Bildmaßstab für $s_x=s_y=0,6$ cm und Objektstruktur von 10Pixel. ..	28
Tabelle 4.2.2: Berechnung Bildmaßstab basierend auf Entfernung und Brennweite.	28
Tabelle 4.2.3: Berechnung Bildmaßstab abhängig von $s_z= 0,4$ cm, $b= 1$ m und $h = 3$ m.	29
Tabelle 4.2.4: Erreichbare Genauigkeiten der Kameras bei einer Basis von 1m und einer Entfernung zum Objekt von 3 m.	29
Tabelle 5.1.1: Genauigkeitsangaben der Stationierungen für die Passpunktbestimmung der einzelnen Schalenelemente.....	32
Tabelle 5.1.2: Mittlere Abweichungen der Scanworlds.....	33
Tabelle 5.2.1: Übersicht der mittleren Fehler bei der Registrierung der Punktwolken.....	36
Tabelle 5.2.2: Genauigkeiten der Stationierung zur Passpunktbestimmung.....	37
Tabelle 6.1.1: Parameter der Kalibrierung zum ersten Aufnahmezeitpunkt.....	39
Tabelle 6.1.2: Parameter der Kalibrierung zum zweiten Aufnahmezeitpunkt.	40
Tabelle 6.1.3: Genauigkeit der Kamerakalibrierungen.....	40
Tabelle 6.2.1: Höhen-Basis-Verhältnis und Konvergenzwinkel der Aufnahme.	41
Tabelle 6.2.2: Schritte und Optionen zur Erstellung von Punktwolken in PhotoModeler.....	42
Tabelle 7.2.1: Abweichungen des ersten Schalenelementes beim ersten Versuchsaufbau(TLS) ..	59
Tabelle 7.2.2: Abweichungen des zweiten Schalenelementes beim ersten Versuchsaufbau(TLS)	62
Tabelle 7.2.3: Abweichungen des zweiten Schalenelementes beim ersten Versuchsaufbau(TLS)	63
Tabelle 7.3.1: Abweichungen des ersten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau(TLS)	68
Tabelle 7.3.2: Abweichungen des dritten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau(TLS)	69
Tabelle 7.3.3: Abweichungen des dritten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau(TLS)	73
Tabelle 7.4.1: Abweichungen des ersten Schalenelementes beim ersten Versuchsaufbau(Stereo)	76
Tabelle 7.4.2: Abweichungen des zweiten Schalenelementes beim ersten Versuchsaufbau(Stereo)	77
Tabelle 7.4.3: Abweichungen des dritten Schalenelementes beim ersten Versuchsaufbau(Stereo)	79
Tabelle 7.5.1: Abweichungen des ersten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau(Stereo)	82
Tabelle 7.5.2: Abweichungen des zweiten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau(Stereo).....	85
Tabelle 7.5.3: Abweichungen des dritten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau(Stereo).....	86
Tabelle 7.6.1 : Abweichungen zwischen Laserscanner und Stereophotogrammetrie Versuch 1 ..	93
Tabelle 7.6.2: Abweichungen zwischen Laserscanner und Stereophotogrammetrie Versuch 2 ...	93
Tabelle 7.6.3: Koordinaten der ausgewählten Marke zum Vergleich	94
Tabelle 7.6.4: Koordinatendifferenz der Laserscandaten	94

1 Einleitung

Das Institut für Membran- und Schalentechologien e.V. der Hochschule Anhalt versucht in einem aktuellen Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Schalentragerwerke den Herstellungs- und Kostenaufwand zu reduzieren. Das soll über die Versteifung mechanisch vorgespannter textiler Konstruktionen mit modifiziertem Spritzbeton geschehen und somit eine beliebig gestaltbare Form einer Schale ermöglichen.

Schalentragerwerke sind formaktive Flächentragerwerke, also Systeme aus flexibler, nicht steifer Materie, in denen die Kraftumlenkung durch geeignete Formgebung und charakteristische Formen erfolgt und das System stabilisiert wird. Die Benutzung von Beton zur Konstruktion von Schalen erlaubt freie und nicht geometrisch bestimmte Formen und entspricht damit den Anforderungen moderner Architektur an räumlich gekrümmten Flächentragerwerken.

Zur Überprüfung der Stabilität der Schalentragerwerke werden zwei verschiedenartige Belastungstests durchgeführt. Dabei sollen die durch die Krafteinwirkungen verursachten Deformationen der Schalenelemente bestimmt werden. Die vorliegende Masterarbeit untersucht die Erfassung der Deformation dieser Schalentragerwerke. Dafür werden zwei Aufnahmeverfahren zur Erfassung und Auswertung von solchen Deformationen untersucht. Für die Bestimmung der Deformation werden aus dem Bereich der Photogrammetrie die Stereobildauswertung sowie das terrestrischen Laserscanning eingesetzt. Mit Hilfe dieser beiden Verfahren soll ein System aufgebaut werden, das die verschiedenen gegebenen Anforderungen der Versuche erfüllt und eine Deformationsanalyse der Schalentragerwerke erlaubt. Die Geometrie der Schalentragerwerke wird mit Hilfe von Punktwolken, die als Ergebnisse der Auswertung der Verfahren entstehen, beschrieben und zu einem Oberflächenmodell zusammengefasst. Im Allgemeinen ist die eine Oberflächenrekonstruktion eine komplizierte Problemstellung, da die aufgenommenen Punkte verrauscht und nur näherungsweise die unebene Fläche darstellen. Meist werden die aufgenommenen Punkte durch Triangulation in ein Polygonales Modell (Vermaschung) überführt (Edelsbrunner). Für den Vergleich der vermaschten Oberflächenmodelle untereinander wird der Grundzustand vor der Krafteinwirkung auf das Schalentragerwerk erfasst. Dieser Grundzustand wird als Sollgeometrie angesehen und dazu die Deformation der Schale bestimmt. Des Weiteren werden die einzelnen Verfahren bezüglich Praktikabilität mit Blick auf das Projekt verglichen.

1.1 Zielsetzung und Rahmenbedingung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin die Veränderung der Form von Schalenelementen unter Belastung, die als Freiformflächen mathematisch schwer bestimmbar sind, zu erfassen. Zur Überprüfung der Stabilität und Festigkeit dieser Konstruktionen wurden die Schalenelemente zwei verschiedenen Belastungstests unterzogen. Als Versuchsobjekte standen drei Schalenelemente zur Verfügung. Die formgebenden Membranen der einzelnen Schalenelemente bestanden aus unterschiedlichen Materialien mit verschiedener Beschaffenheit und wurden jeweils mit Spritzbeton beschichtet. Zwei Membranen waren dabei leicht perforiert, um eine Verzahnungsmöglichkeit des Betons untereinander zu gewährleisten. Die dritte Membran bestand aus einer kompletten PVC-Fläche, auf die der Beton gespritzt wurde.

Beim ersten Belastungsversuchsaufbau wurden die Schalenelemente in der Gerüstkonstruktion, in der sie hergestellt wurden, belassen und Belastungsversuche mittels Aufbringung von verschiedenen Gewichten durchgeführt. Der zweite Belastungsversuch fand unter Verwendung einer Hydraulikpresse statt, die mit einer punktuell kontinuierlich steigenden Kraft auf das jeweilige unter ihr eingespannte Schalenelement wirkte. Die hier einwirkenden Kräfte sind geeignet, eine Verformung (z.B. Dehnung oder Durchbiegung) des Schalenelements hervorzurufen.

Da es im Vorfeld keine Erkenntnisse über die mögliche Stärke sowie Art und Weise der auftretenden Verformung gab, war zu Beginn eine Abschätzung der möglichen Größenordnung der Deformation nicht möglich. Nach Absprache mit dem Institut für Membran- und Schalentechologien wurden zur Erfassung der Deformationen das photogrammetrische Verfahren der Stereophotogrammetrie und das terrestrische Laserscannings als aussichtsreichste Verfahren benannt.

Beide Verfahren ermöglichen die Geometrie der Schalenelemente unter den verschiedenen Belastungen zu erfassen. Darüber hinaus soll untersucht werden, wie die Qualität der Datenerfassung mit Hilfe des terrestrischen Laserscanners, gerade im Vergleich mit der photogrammetrischen Auswertung, gegeben ist.

Der Einsatz von Laserscanner im Bereich der Deformationsmessung ist folgerichtig. Denn terrestrische Laserscanner bieten dieselben Vorteile (hohe räumliche Datendichte bei berührungsloser Messung) wie die Photogrammetrie jedoch ohne den Zwang der Verwendung von Zielmarken. In der Vergangenheit schloss jedoch die geringe Genauigkeit dieser Systeme die Verwendung in diesem Bereich aus (siehe Fraser & Riedel).

Heutzutage werden terrestrische Laserscanner hauptsächlich zu Bauwerksüberwachungen (Brücken, Staudämme etc.), wie z.B. bei Kutterer und Hesse (2006) oder Zogg und Ingensand (2008), verwendet. In der letzten Zeit gab es jedoch stärkere Bestrebungen, Deformationen mit Hilfe von Laserscannern im Vergleich zur Photogrammetrie zu erfassen. So konnten Grether und Keller (2006) in ihrer Arbeit Deformation an wellenförmigen Eternitfassaden ab 10 mm signifikant nachweisen. Sie kamen dabei zur Erkenntnis das Verschiebungen in Richtung der Normalen einer Fläche mittels Laserscanning detektiert werden können. Jedoch Querverschiebungen nur anhand von eindeutig konstruierbaren Kanten oder diskreten Einzelpunkten bestimmbar sind.

Als weiteres Beispiel sei die Deformationsbestimmung einer Polymerbetonwanne durch Große-Schwiep genannt, hierbei wurde untersucht ob eine Deformationsbestimmung mittels Laserscanning anstelle von photogrammetrischen Verfahren möglich ist. Eine erste Machbarkeit konnte nachgewiesen werden, jedoch bedarf es weiteren Untersuchungen.

Insbesondere die zweite Versuchsanordnung erforderte ein Verfahren, das eine große Effizienz bei der Erfassung von 3-D-Informationen innerhalb kürzester Zeit besitzt. Zu eben dieser Erfassung der 3-D-Informationen kann im Bereich der Photogrammetrie das Verfahren der Stereobildauswertung angewendet werden. Im Bereich des Laserscannings lässt sich hierbei auf einen Versuch von Tsakiri,Lichti und Pfeifer(2006) verweisen, bei den die dynamische Veränderung eines Betonträgers unter einer Hydraulikpresse aufgezeigt werden konnte.

Bedingt durch die beiden verschiedenen Versuchsaufbauten musste jeweils ein lokales Referenzsystem für die photogrammetrischen Aufnahmen errichtet werden. Durch die Analyse und Erfassung des momentanen Ist-Zustands der einzelnen Schalen vor dem jeweiligen Versuch und der weiteren Erfassung zukünftiger Ist-Zustände durch die Kräfteinwirkungen wird im Rahmen dieser Masterarbeit eine Deformationsanalyse der einzelnen Schalen ausgearbeitet.

Für die Auswertung der Deformationsmessung wurden die Programme PhotoModeler Scanner 6 von EOS-Systems, Cyclone 7.03 von Leica Geosystems und die Programme Geomagic Studio und Qualify 12 verwendet. Mit dem Programm PhotoModeler Scanner erfolgte die Auswertung der Stereobildaufnahmen der Schalenelemente. Die Bearbeitung der mit dem Laserscanner aufgenommenen Punktwolke geschah mit dem Programm Cyclone 7.03. Die Vermaschung jener per Laserscanner aufgenommenen Punktwolke erfolgte mit dem Programm Geomagic Studio 12. Mit Hilfe des

Programms Geomagic Qualify 12 soll die Deformationsanalyse und der Vergleich der aufgenommenen Daten der beiden Verfahren durchgeführt werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit gliedert sich in acht Abschnitte. Nach der Einleitung im ersten Abschnitt befasst sich das zweite Kapitel mit den Grundlagen der Photogrammetrie und des terrestrischen Laserscannings, die als Verfahren im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet werden. Im dritten Kapitel werden die verwendeten Gerätschaften zur Erfassung der Deformation an den Schalenträgwerken kurz erläutert.

Das Kapitel 4 befasst sich mit der Genauigkeitsvorbetrachtung bezüglich der jeweiligen Aufnahmeverfahren. Hier wird insbesondere auf die Überlegung zur zu erreichenden Genauigkeit näher eingegangen, da im Vorfeld keine konkreten Angaben in Bezug auf diese Größe (siehe Kap. 1.2) gemacht werden konnten. Das nachfolgende fünfte Kapitel beschreibt die jeweiligen Aufnahmesituationen und die Konzepte zur Aufnahme der Schalenträgwerke.

Die Verarbeitung der gewonnenen Daten wird anschließend im sechsten Kapitel vorgenommen und entsprechend erläutert. Es wird dabei auf die einzelnen Programme zur Auswertung der Daten und deren Arbeitsabläufe eingegangen. Dazu gehört beispielsweise die Verarbeitung von Stereobildpaaren mit dem Programm PhotoModeler Scanner. Dafür werden die einzelnen Arbeitsschritte aufgezeigt, die von der Orientierung der Bilder bis zur Punktwolkengenerierung führen. Des Weiteren werden die Aufnahme und die Verarbeitung der gewonnenen Punktwolke mit Hilfe des terrestrischen Laserscanningsystems Scanstation beschrieben in diesem Kapitel beschrieben. Die Verarbeitung der per terrestrischen Laserscanning erfassten Punktwolken geschieht mittels des Programms Cyclon 7.03.

Das siebte Kapitel geht auf die Deformationsanalyse der Schalenträgwerke ein. Hierbei werden kurz die Abläufe des zur Analyse verwendeten Programms Geomagic Qualify 12 näher erläutert. Anschließend werden die einzelnen Analysen der photogrammetrischen und terrestrischen Aufnahmen entsprechend der detektierten Deformation dargestellt. Außerdem werden beispielhaft die Aufnahmeverfahren und die Ergebnisse miteinander verglichen und versucht, die Differenzen aufzuzeigen.

Das letzte Kapitel schließt die Masterarbeit mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse ab.

2 Grundlagen der Photogrammetrie und Laserscanning

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über die Grundlagen der Photogrammetrie und des terrestrischen Laserscannings geben. Die ersten vier Abschnitte befassen sich mit den Grundlagen der Photogrammetrie und sollen den Leser einen Überblick über diese geben. Der letzte Abschnitt beschreibt die theoretische Funktionsweise eines terrestrischen Laserscanners.

2.1 Photogrammetrie

Die Photogrammetrie beschäftigt sich allgemein mit der Gewinnung von Informationen von Objekten durch das Erfassen, Ausmessen und Interpretieren photographischer Bilder verschiedener elektromagnetischer Wellenbereiche. Ziel des Verfahrens ist eine dreidimensionale Rekonstruktion des aufgenommenen Objektes. Dieses soll dabei wirklichkeitsgetreu dargestellt und für die mögliche Weiterverarbeitung und Auswertung in ein portables Format umgewandelt werden. Die Erläuterung des allgemeinen Begriffs der Photogrammetrie trifft so noch keine Aussage über die Art der für die Informationsgewinnung heranzuziehenden Bildaufzeichnungen. Zur Informationsgewinnung können Verfahren der Einzel-, Stereobild und Mehrbildauswertung angewendet werden. Die folgenden Unterkapitel befassen sich speziell mit der Stereobildphotogrammetrie im sichtbaren Frequenzbereich. Bei der Stereobildphotogrammetrie werden, wie der Name beinhaltet, zwei sich inhaltlich überlappende Aufnahmen einer Szene von unterschiedlichen Standorten angefertigt und ausgewertet(Luhmann I).

2.1.1 Innere Orientierung

Die innere Orientierung beschreibt das vollständige geometrische Abbildungsmodell innerhalb der Kamera mit Hilfe von mathematischen Ansätzen. Mittels der inneren Orientierung wird das Aufnahmesystem in das Standardmodell der Lochkamera und der Zentralperspektive zurückgeführt und die Lage des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem ermittelt. Voraussetzung dafür ist ein reproduzierbares Bildkoordinatensystem. Das Bildkoordinatensystem muss kamerafest und im Messbild

rekonstruierbar sein. In der heutigen Zeit wird dafür ein Sensorkoordinatensystem (Abbildung 2.1.1) innerhalb der Kameras angewendet(Luhmann II).

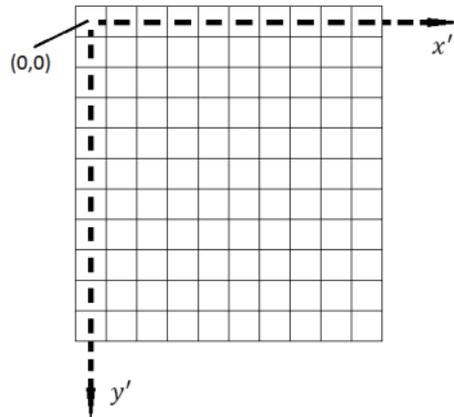


Abb. 2.1.1: Darstellung eines Sensorkoordinatensystems mit dem Datum oben links.

In der digitalen Photogrammetrie wird ein Sensorkoordinatensystem zur Reproduktion eines Bildkoordinatensystemes verwendet. Die Benutzung von künstlichen Bezugspunkten wie bei den anderen beiden Methoden (zum Beispiel Rahmenmarken) entfällt, solange ein eindeutiger Bezug zwischen Bild und Sensor besteht. Mit Hilfe von fest eingebauten Flächensensoren und der direkten Auslesung des Bildes wird diese Voraussetzung erfüllt. Das Datum des Sensorkoordinatensystems befindet sich dabei in der oberen linken Ecke des Flächensensors. Dieser Bezug bleibt stabil, solange keine geometrische Änderung, wie zum Beispiel eine Größenänderung, erfolgt(Luhmann II).

Die Parameter zur Bestimmung der inneren Orientierung (Abb. 2.1.2) sind:

- Bildhauptpunktlage x_0, y_0 die den Lotfußpunkt des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem beschreibt,
- Die Kamerakonstante c , die den senkrechten Abstand zwischen Projektionszentrum und Bildebene angibt,
- Parameter der Verzeichnungen.

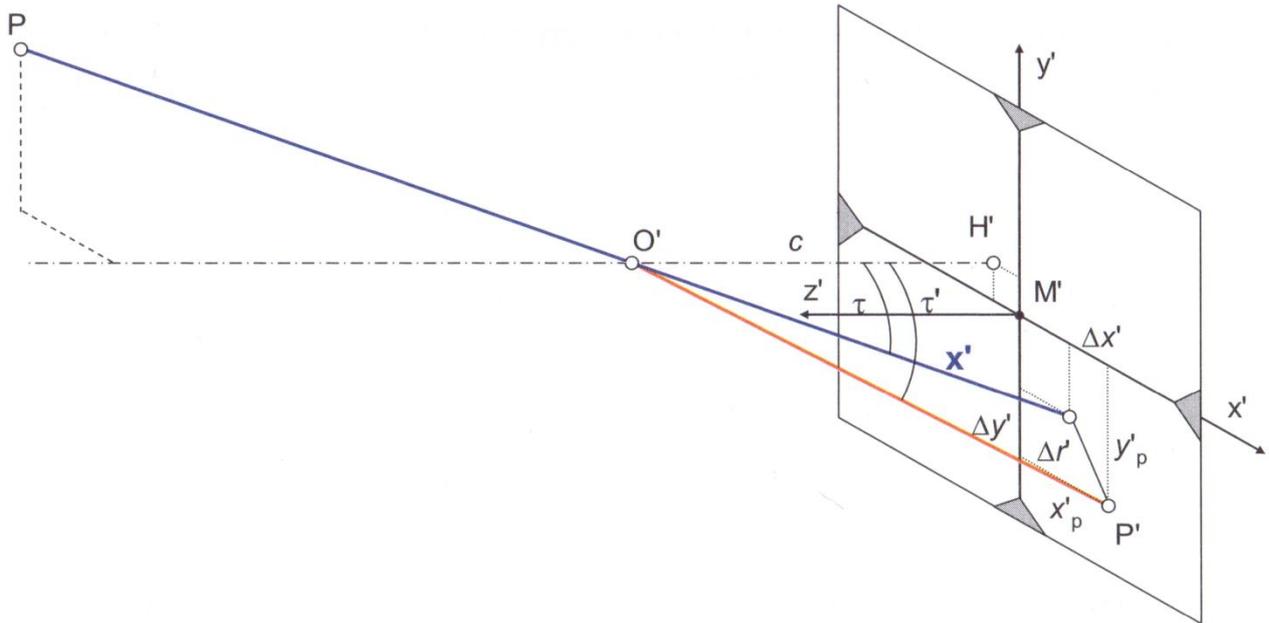


Abb. 2.1.2: *Skizzenhafte Darstellung der Parameter der inneren Orientierung (Luhmann S.144).*

Unter dem Parameter Verzeichnung versteht man die radialsymmetrische, tangential-asymmetrische Verzeichnung sowie die Affinität und die Scherung. Die radialsymmetrische Verzeichnung resultiert aus Brechungsänderungen an den Linsen der Objektivs und hängt sowohl von der aktuellen Fokussierung als auch von der Objektentfernung bei konstanter Fokussierung ab. Die radialsymmetrische Verzeichnung besitzt den größten Einfluss unter den Abbildungsfehlern (Luhmann II).

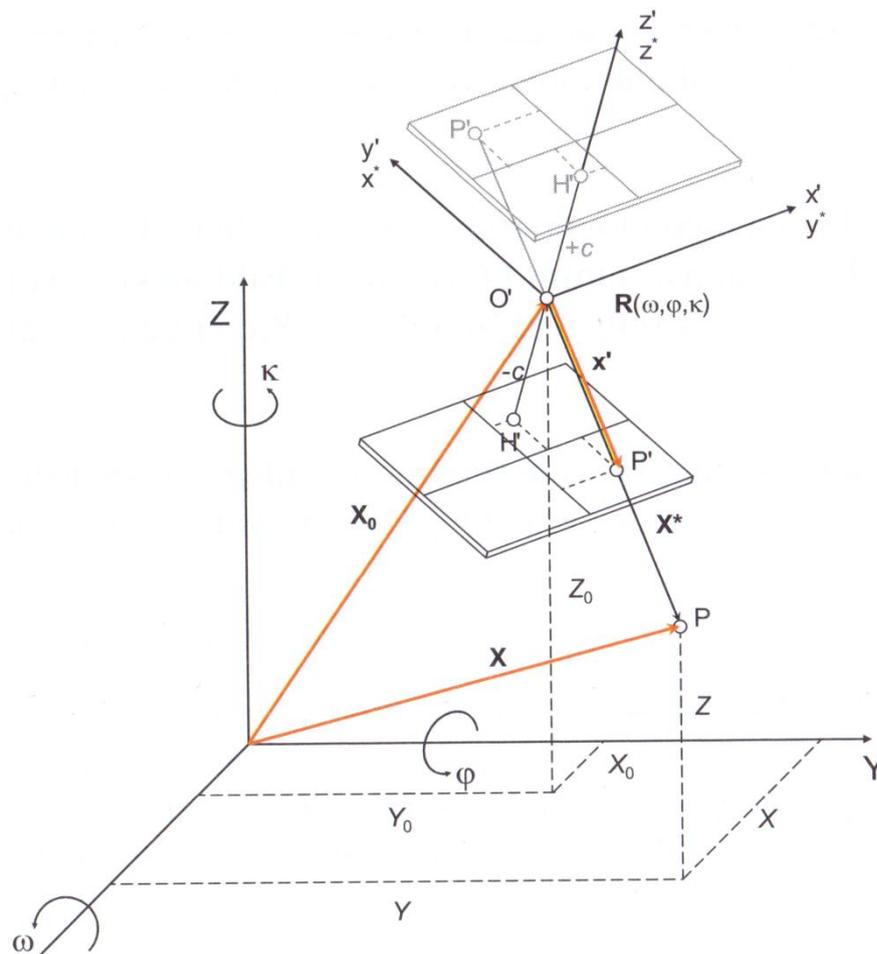
Die tangential-asymmetrische Verzeichnung wird durch eine Dezentrierung der Linsen verursacht. Der Einfluss der tangential-asymmetrischen Verzeichnung ist gegenüber der radialsymmetrischen Verzeichnung gering und wird dadurch nur bei sehr hohen Genauigkeitsanforderungen bestimmt.

Die affinen Verzerrungen bei digitalen Kameras entstehen aufgrund nicht quadratischer Pixel oder deren ungleichmäßiger Anordnung auf dem Kamerasensor. Als Folge stehen die beiden Koordinatenachsen des Bildkoordinatensystems nicht mehr senkrecht aufeinander und weisen zusätzlich unterschiedliche Maßstäbe auf.

Die Scherung der Koordinatenachsen wird hauptsächlich durch die Sensorschiefe verursacht. Diese entsteht bei nicht rechtwinkligem Einbau der Linse in das Kameragehäuse oder durch Einwirkungen der Schwerkraft bzw. anderer mechanischer Kräfte. Sie führt zu projektiven Abbildungsfehlern. Affinität und Scherung besitzen im Normalfall einen sehr geringen Einfluss auf den Abbildungsfehler (Luhmann III) (Kraus I).

2.1.2 Äußere Orientierung

Die drei Parameter der inneren Orientierung (Bildhauptpunkt, Kamerakonstante und Parameter der Verzeichnung) lassen nur eine Rekonstruktion der Strahlenbündel der Aufnahme im Bildkoordinatensystem zu. Für die Verknüpfung des Bildkoordinatensystems mit einem übergeordneten Koordinatensystem ist zusätzlich die äußere Orientierung der Bilder nötig. Erst die äußere Orientierung (Abb. 2.1.3) beschreibt die Lage des räumlichen Bildkoordinatensystems in einem übergeordneten Koordinatensystem. Die Parameter der inneren und äußeren Orientierung sind beide erforderlich, um den allgemeinen mathematischen Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten zu beschreiben.



↙ **Abb. 2.1.3:** Darstellung der Parameter der äußeren Orientierung (Luhmann, S.237).

Die Lage im übergeordneten Koordinatensystem wird mit Hilfe von sechs Parametern, bestehend aus drei Translationen und drei Rotationen, bestimmt. Die Translation des

Bildkoordinatensystems wird durch den Vektor X_0 zum Projektionszentrum O' und die Rotation durch die orthogonale Drehmatrix \mathbf{R} definiert. Die Drehmatrix wird aus den Winkeln α , ϕ , und κ um die Koordinatenachsen X, Y, Z des Bildkoordinatensystems zusammengesetzt (Luhmann IV) (Kraus II).

Die räumliche Lage des Bildkoordinatensystems des bildaufzeichnenden Gerätes wird durch den Vektor $x_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ zum Projektionszentrum O' definiert. Die räumliche Drehung wird durch die Drehmatrix $R = R_\omega * R_\phi * R_\kappa$ bestimmt, die durch die Drehwinkel κ , ϕ und ω um die Koordinatenachse des übergeordneten Koordinatensystems dargestellt werden kann. Die Berechnung der Koordinaten des Punktes X des übergeordneten Systems vom Objektpunkt P ist über die Nutzung des Ortsvektors x_0 und dem Vektor X^* , dem Vektor des Bildkoordinatenursprungs zum Objektpunkt möglich:

$$X = x_0 + X^*$$

Der Vektor X^* wird über den in das übergeordnete Koordinatensystem mittels Maßstab und Drehmatrix transformierten Vektors $x = (x', y', z')$ bestimmt. Der Vektor x' liegt dabei in der gleichen Bildrichtung wie der Vektor X^* . Daraus folgt, dass:

$$X^* = m * x' * R$$

und

$$X = X_0 + m * x' * R$$

ergeben.

Durch Invertierung der letzten Gleichung und der Erweiterung des Korrekturterms $\Delta x' = (\Delta x', \Delta y')$ sowie dem Hinzufügen des Bildhauptpunktes $H'(x'_0, y'_0) = x'_0$ ergibt sich folgende Gleichung:

$$x' - x'_0 - \Delta x' = \frac{1}{m} * R^{-1} * (X - x_0).$$

Ersetzt man nun den Wert X durch $X = X_0 + m * x' * R$ erhält man die Kollinearitätsgleichungen für x' und y' :

$$x' = x'_0 + \frac{z' * r_{11} * (X - X_0) + r_{21} * (Y - Y_0) + r_{31} * (Z - Z_0)}{r_{13} * (X - X_0) + r_{23} * (Y - Y_0) + r_{33} * (Z - Z_0)} + \Delta x'$$

$$y' = y'_0 + \frac{z' * r_{11} * (X - X_0) + r_{21} * (Y - Y_0) + r_{31} * (Z - Z_0)}{r_{13} * (X - X_0) + r_{23} * (Y - Y_0) + r_{33} * (Z - Z_0)} + \Delta y'$$

Die Kollinearitätsgleichungen beschreiben den mathematischen Zusammenhang der zentralperspektivischen Abbildung unter Einbeziehung der Bildkoordinaten (x', y') , der Objektkoordinaten (X, Y, Z) , der inneren $(\Delta x', \Delta y', c, x'_0, y'_0)$ und der äußeren

Orientierung $(\omega, \phi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0)$ des aufgenommenen Bildes. Diese Gleichungen stellen die Grundlage dar für die weiteren Berechnungen bzw. Anwendungen innerhalb der Photogrammetrie, wie dem Vorwärts- und Rückwärtsschnitt sowie der Bündelblockausgleichung. Hier muss hervorgehoben werden, dass durch die Herstellung der Zentralprojektion des Objektbildpunktes und des Projektionszentrums nur eine Richtungsinformation bestimmt wird. Auf dieser Geraden können sich ausgehend vom projizierten Punkt der Richtungsinformation, unendlich viele Punkte befinden. Um den Punkt absolut zu berechnen muss, die Gerade mit einem weiteren geometrischen Element eines weiteren Bildes geschnitten werden (Luhmann IV).

2.1.3 Grundlagen der Stereobildphotogrammetrie

Die Stereobildphotogrammetrie beruht auf der natürlichen Anordnung der Augen des Menschen. Das bedeutet, dass die aufgenommenen Bildpaare parallele Blick- bzw. Bildrichtungen besitzen und diese senkrecht zur Verbindungslinie (Basis) der Projektionszentren angeordnet sind. Hierbei spricht man vom Normalfall der Stereobildphotogrammetrie (Wiedemann). Bei der Stereobildaufnahme können gegenüber dem menschlichen Auge auch geneigte und/oder verschwenkte Bildpaare verwendet werden. Die Abbildung 2.1.4 stellt den Normalfall, eine geneigte und eine verschwenkte Bildpaaraufnahme dar.

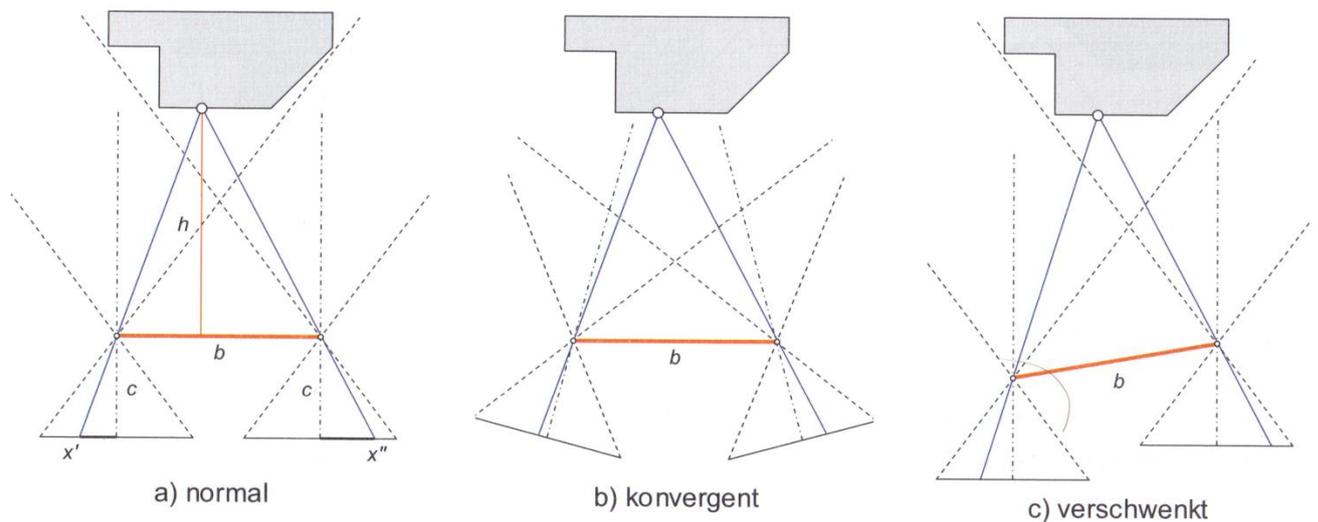


Abb. 2.1.4: Von rechts nach links: Normale, verschwenkte und konvergente Bildpaaraufnahme (Luhmann, S. 133).

Die dreidimensionale Objektrekonstruktion der Stereobildphotogrammetrie basiert einerseits auf der Messung von Bildparallaxen, die in das Abstandsmaß h (Abb. 2.1.4)

der Aufnahme­richtung umgerechnet werden können. Auf der anderen Seite ist es möglich kongruente Bildpunkte auf Basis des räumlichen Vorwärtsschnitts in 3-D-Koordinaten umzurechnen. Die Genauigkeit dieser in Aufnahme­richtung bestimmten Punkte kann dann durch die Bestimmung des Schnittwinkels homologer Bildstrahlen, die sich durch das Höhen-Basis-Verhältnis h/b ergeben, ermittelt werden (Luhmann VI).

Für die Bestimmung der Entfernung und Form eines Objektes sind in der Photogrammetrie und Stereophotogrammetrie mindestens zwei Aufnahmen von unterschiedlichen Standpunkten erforderlich. Dabei ist es unerheblich, ob diese durch mehrere statische Kameras im Raum oder aus der Bewegung einer einzelnen Kamera resultieren. Die Aufnahme von Objekten per Stereobildaufnahme stellt die Minimalkonfiguration zur Erfassung von Objektinformationen dar. Häufig wird diese Konfiguration zur automatischen stereoskopischen Bildauswertung verwendet. Wie in Abbildung 2.1.4 dargestellt und bereits erwähnt, gibt es drei verschiedene Konfigurationen zur Stereobildaufnahme. In der automatischen computergestützten Auswertung ist die Interpretation der drei Aufnahmekonfigurationen möglich, obwohl dennoch der Normalfall so weit wie möglich angestrebt werden soll, da dadurch die vereinfachten Formeln und Auswertung des Normalfalls Verwendung finden (Luhmann VII).

Die dreidimensionale Rekonstruktion von Objekten erfolgt basierend auf Bildparallaxen $p_x = x' - x''$ (Vgl. 2.1.4), die direkt in das Abstandsmaß h in Aufnahme­richtung umgerechnet werden können. Die Genauigkeit der Objektinformation und Objektkoordinaten ist abhängig vom Schnittwinkel homologer Bildstrahlen, der sich durch das Verhältnis von Abstandsmaß h zur Basis b ergibt.

Aufgrund der unterschiedlichen Standorte bei der Objekterfassung ist das Objekt in der zweiten Aufnahme B_2 im Vergleich zum ersten Bild B_1 verschoben (Vgl. 2.1.5). Diese Verschiebung gestaltet sich entfernungsabhängig und wird als Disparität bezeichnet. Die Projektionszentren P_1 und P_2 der beiden Kameras sind mittels der Basislinie B miteinander verbunden. Betrachtet man nun den Objektpunkt X so bildet er mit den Punkten P_1 und P_2 und der Basislinie b eine Ebene E , in der sich die Sichtstrahlen R_1 und R_2 befinden. Dieser vektorielle Zusammenhang lässt sich mit Hilfe der folgenden Komplanaritätsbedingung beschreiben:

$$a, b, c \in R; (a \neq 0) \vee (b \neq 0) \vee (c \neq 0): aB + bR_1 + cR_2 = 0$$

Übertragen auf den Bildraum führt die Komplanaritätsbedingung dazu, dass sich der Bildpunkt X_1/X_2 des Objektpunktes X in der jeweils anderen Kamera nur entlang derjenigen eindimensionalen Kurve befinden kann, die die Schnittmenge von E mit der jeweiligen Projektionsfläche repräsentiert. Legt man das Lochkameramodell zugrunde, so besteht diese als Epipolarlinie bezeichnete Kurve jeweils aus einer Geraden L_1 und L_2 .

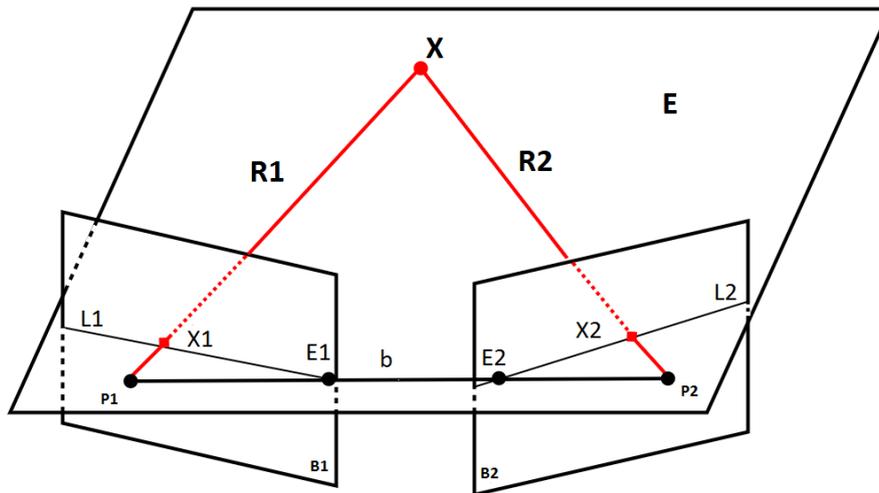


Abb. 2.1.5: Darstellung der stereogeometrischen Grundlage.

Wenn die Stereobilder mit zueinander geneigten Kameras aufgezeichnet werden, so schneiden sich alle Epipolarlinien einer Aufnahme B_1 und B_2 in je einem speziellen Punkt, dem Epipol $E(i)$. Die Epipole E_1 und E_2 entsprechen dabei den Durchstoßpunkten der invarianten Basislinie B durch die Bildflächen und können sich außerhalb des Sichtfeldes befinden. Um die Epipole zu berechnen, werden die komplementären Projektionszentren der Abbildungsvorschrift des planaren Lochkameramodells unterworfen. Zur kompletten Berechnung der Epipolarlinie benötigt man dann noch die Koordinaten des Bildpunktes $X(i)$ zum zugehörigen Objektpunkt X (Luhmann VIII)(Kraus IV)(Kraus V).

Die digitale automatisierte Stereophotogrammetrie kann neben einzelnen Punkten auch eine Punktwolke aus dem Stereobildpaar erzeugen. Durch Korrelationsfunktionen versucht dabei der Auswertalgorithmus, identische Strukturen in den Bildpaaren zu erkennen. Ein Bild dient in diesem Fall als Referenz. Basierend auf dieser Referenz wird pro Muster eine Matrix erstellt. Mit Hilfe dieser Matrix wird dann in dem zweiten

Bild eine identische Matrix gesucht. Die Zentren der Matrizen stellen somit die gleichen Punkte in den beiden Bildern dar, unterscheiden sich jedoch in den jeweiligen zugehörigen Bildkoordinaten. Die Genauigkeit der mit diesem Verfahren bestimmten Punkte liegt im Subpixelbereich, sodass zur Bestimmung der Punkte eine Kombination aus dem Kleinste-Quadrate Korrelations- und dem Kreuzkorrelationsverfahren zum Einsatz kommen muss (Frommholz).

2.1.4 Image matching

Der Begriff image matching (Bildzuordnung) beschreibt Verfahren, mit denen man identische Objektmerkmale (z.B. Kanten, Muster, Punkte) eines aufgenommenen Objektes in zwei oder mehr Bildern identifizieren und eindeutig einander zuordnen kann. Image matching Verfahren werden für folgende Zuordnungsverfahren verwendet:

- *„Identifikation diskreter Bildpunkte für die dreidimensionale Punktmessung;*
- *Identifikation homologer Bildmuster zur dreidimensionalen Oberflächenrekonstruktion;*
- *Identifikation und Verfolgung von Objekten in Bildsequenzen (Luhmann, S.453).“*

Im Bereich des Computersehens ist die automatisierte Zuordnung von korrespondierenden Bildmerkmalen noch immer nach Luhmann eine aktuelle Fragestellung und ein Forschungsbereich. Diese sogenannte Korrespondenzanalyse der Bildmerkmale gehört in die Klasse der schlecht gestellten Probleme („ill-posed problem“). Bei einem „ill-posed problem“ ist nicht sicher, dass es eine eindeutige und robuste Lösung gegenüber Variationen in den Eingangsdaten gibt (Luhmann VII). Praktikable Lösungen der Korrespondenzanalysen gehen daher in der Regel davon aus, dass folgende Voraussetzungen an Objekt und Bildaufnahme weitestgehend erfüllt sein müssen:

- *„Die Intensitätswerte aller verwendeten Bilder liegen im gleichen spektralen Wellenbereich.*
- *Die Belichtungs- und atmosphärischen Einflüsse sowie die Medienübergänge sollten im Zeitraum während der Aufnahme gleichbleibend sein.*
- *Die Objektfläche muss während der gesamten Aufnahme formstabil sein.*

- *Bekannte Näherungswerte für Orientierungsdaten und Objektdaten müssen vorhanden sein.*
- *Die Objektoberfläche weist eine stückweise glatte und undurchsichtige Struktur auf(Luhmann S.453-454).“*

Die Bildzuordnungsverfahren für die Korrespondenzanalyse basieren auf einer hierarchischen Strategie (Vgl. Abbildung 2.1.6). Für die Eingabebilder werden die notwendigen Kalibrierungs- und Orientierungsdaten in der Regel vorab bestimmt. Die folgende Abbildung soll die einzelnen Schritte und das Ablaufschema für das image matching darstellen.

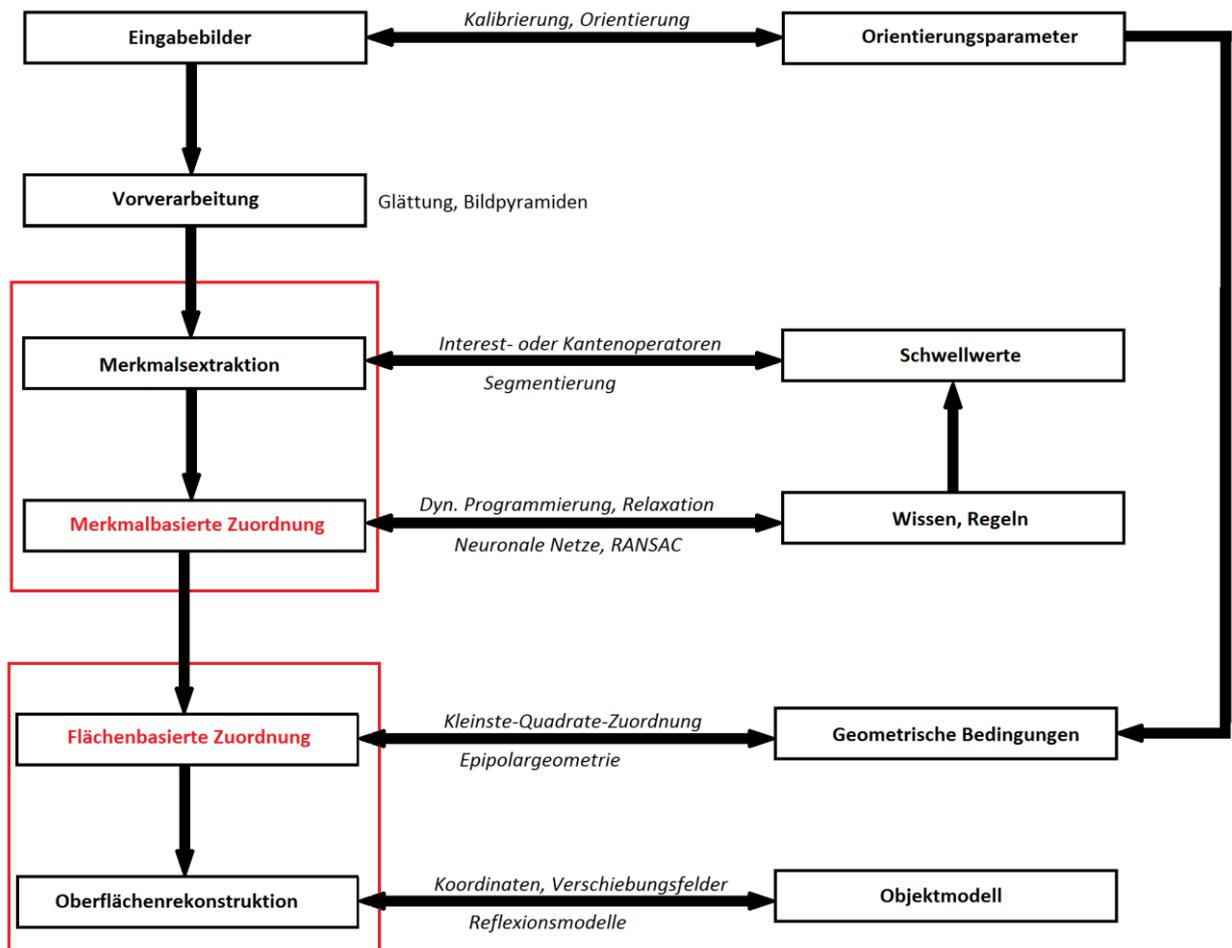


Abb. 2.1.6: Darstellung des schematischen Ablaufes eines Bildzuordnungsverfahrens gemäß Luhmann.

Im Bereich der Bildzuordnung existieren separat die Obergruppen der merkmalsbasierten und der flächenbasierten Zuordnung. In der Merkmalsextraktion werden nach Kraus aus den Bildern unabhängig voneinander Bildmerkmale wie Punktmuster oder Kanten ermittelt, von denen angenommen wird, dass eine größere Schnittmenge in allen beteiligten Bildern enthalten ist. Bei der merkmalsbasierten Zuordnung („feature based matching“) wird dabei versucht, möglichst viele korrespondierende Merkmale in allen Bildern zu identifizieren. Dabei können zusätzliche Informationen in Form von Wissen oder Regeln genutzt werden, um den Suchraum einzugrenzen und Fehlzuordnungen zu minimieren. Die merkmalsbasierte Zuordnung ist im Allgemeinen der schwierigste Schritt im Matching-Prozess.

Bei der merkmalsorientierten Zuordnung kommen zusätzlich Interest-Operatoren und Kantenoperatoren zum Einsatz. Als Interest-Operatoren bezeichnet man Algorithmen zur Extraktion markanter Bildstellen, die sich als Kandidaten für eine Bild-zu-Bild-Zuordnung eignen. So sind zum Beispiel für homologe Punkte Grauwertmuster passende Kandidaten, die in einer begrenzten Umgebung möglichst einzigartig sind und mit hoher Wahrscheinlichkeit im korrespondierenden Bild in ähnlicher Weise abgebildet werden. Interest-Operatoren berechnen für jede Bildposition eine oder mehrere Kenngrößen (Interest-Wert), die zur späteren Merkmalszuordnung verwendet werden. Daraus folgt, dass Interest-Operatoren in der Regel vor der eigentlichen Korrelation genutzt werden, um besonders geeignete Bildstellen auszuwählen. Die Kriterien eines markanten Zuordnungskandidaten und die Anforderungen an einen optimalen Interest-Operator sind (Luhmann VII):

- Deutlichkeit (lokale Einzigartigkeit, Unterscheidbarkeit vom Hintergrund)
- Invarianz gegenüber geometrischen und radiometrischen Verzerrungen
- Robustheit (Unempfindlichkeit gegen Rauschen)
- Seltenheit (globale Einzigartigkeit, Unterscheidbarkeit zu anderen Kandidaten)

In Vertretung der merkmalsbasierten Zuordnungsverfahren können der Förstner- und Moravec-Operator (Abb. 2.1.7) genannt werden.

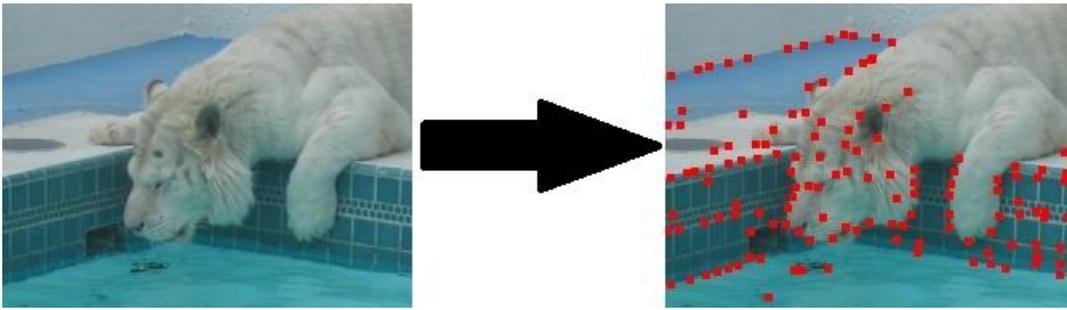


Abb. 2.1.7: Merkmalsextraktion eines Bildes durch Verwendung des Moravec-Operators (Roborealms).

Es ist zu beachten, dass es sich bei merkmalsbasierten Bildzuordnungsverfahren um eine grobe Zuordnung zweier oder mehrerer Bilder handelt, da nur markante Objekte wie Punkte und Kanten betrachtet werden. Die Feinzuordnung von Objekten und Objektstrukturen geschieht durch die flächenbasierte Zuordnung („area based matching“) der Originalgrauwerte mit dem Ziel, das zugehörige Oberflächenelement mit hoher Genauigkeit zu bestimmen.

Zu den flächenbasierten Zuordnungsverfahren gehören Korrelations- und Kleinste-Quadrate-Lösungen. In diesem Schritt können geometrische Zusatzinformationen (z.B. Epipolargeometrie, Objektbedingungen) zur Steigerung von Genauigkeit und Zuverlässigkeit genutzt werden. Aus den durch merkmalsbasierten Zuordnungsverfahren ermittelten homologen Bildelementen lassen sich 3-D-Objektdaten ableiten. Mit einem Korrelationsverfahren löst man die Aufgabe, korrespondierende Bildstellen in zwei Bildern zu suchen, die meist von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen wurden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der maximalen Ähnlichkeit der beiden Bildstellen.

Anhand des folgenden Beispiels nach Kraus wird der Korrelationsalgorithmus mit Hilfe einer Mustererkennung erklärt. Die geometrische zu detektierende Figur ist hierbei ein Kreuz. Dieses Kreuz existiert in einem künstlich erzeugten digitalen Bild. Das Bild wird als Referenzbild bzw. Referenzmatrix bezeichnet. Man nennt eine solche Referenzmatrix auch als Mustermatrix (Abbildung 2.1.8). Die Positionierung des Kreuzes, soll in einem zweiten Bild (Abbildung 2.1.9) gesucht werden. Das zweite Bild wird als Suchmatrix bezeichnet.

Der 5x5-Referenzmatrix wird beispielhaft eine 12x12-Suchmatrix gegenüber gestellt, mit beliebigen Grauwerten zwischen 1 und 9. Das Kreuz liegt in der Suchmatrix offensichtlich in der achten Zeile und siebenten Spalte. Die automatische Suche dieser Position wird dadurch erschwert, dass einerseits das Suchbild verrauscht ist, d.h., die Grauwerte mit zufälligen Fehlern (Grauwerte mit dem Wert von „2“ in den vier rot

markierten Quadranten der Suchmatrix) behaftet sind. Andererseits sind aufgrund der endlichen Größe der Detektoren, mit denen das Suchbild erzeugt wurde, die Grauwertkanten verschmiert sind. Verschmierte Grauwertkanten bedeuten, dass an den Kanten Mischpixel (blau markiert) auftreten.

Die Lösung der Korrelationsaufgabe basierend auf der 12x12 verrauschten Matrix wird anhand eines vereinfachten eindimensionalen Beispiels (Abb.2.1.10) aufgezeigt. Ein Maß für die Korrelation bzw. Ähnlichkeit ist der sogenannte Korrelationskoeffizient r . Die gesuchte Position des Referenzbildes im Suchbild findet man mittels Korrelationsberechnungen

1	1	9	1	1
1	1	9	1	1
9	9	9	9	9
1	1	9	1	1
1	1	9	1	1

Abb. 2.1.8: Darstellung der Mustermatrix von einem Kreuz für Grauwerte von 1 bis 9.

Er wird aus den Standardabweichungen σ_r und σ_s der Grauwertgrund g_s und g_r der beiden Bilder sowie aus der Kovarianz σ_{rs} zwischen den Grauwerten der beiden Bilder berechnet.

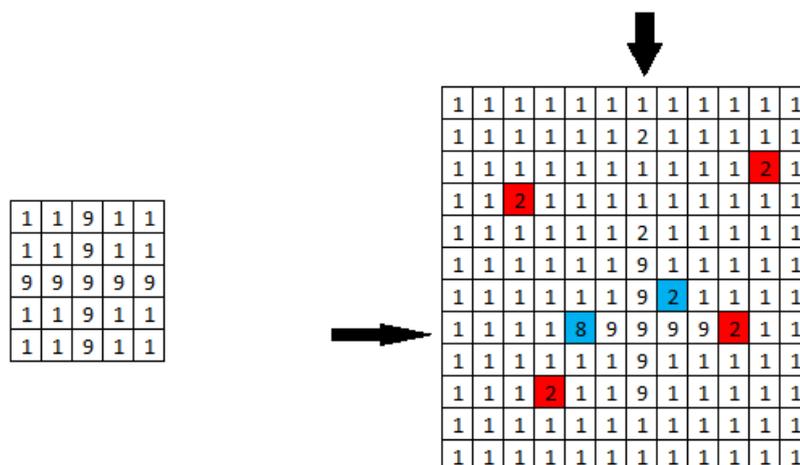


Abb. 2.1.9: Verwendung der Suchmatrix (linken Seite) zur Detektion eines Kreuzes in der rechten Suchmatrix.

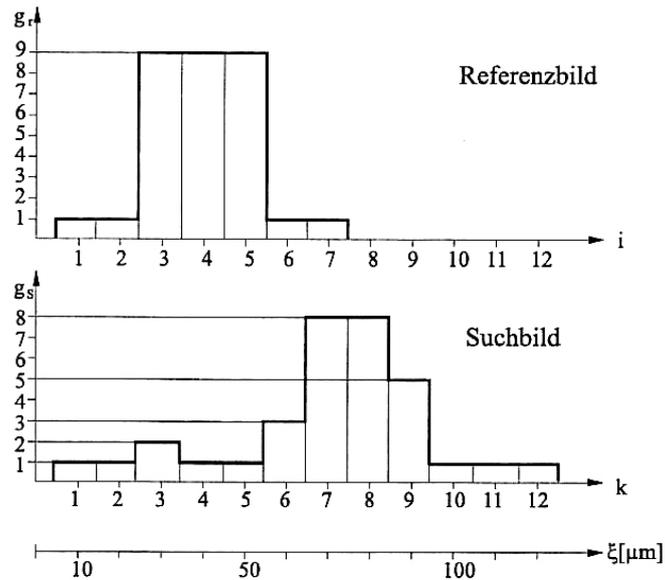


Abb. 2.1.10: Referenz und Suchbild eines eindimensionalen Suchmusters (Kraus, S.348).

Der Korrelationskoeffizient r wird für alle möglichen Positionen des Referenzbildes im Suchbereich mit der folgenden Gleichung ermittelt:

$$r = \frac{\sigma_{rs}}{\sigma_r * \sigma_s} = \frac{\sum (g_r - \bar{g}_r) * (g_s - \bar{g}_s)}{\sqrt{\sum (g_r - \bar{g}_r)^2 * \sum (g_s - \bar{g}_s)^2}}$$

Mit \bar{g}_s und \bar{g}_r als arithmetische Mittelwerte der Grauwerte des Referenzbildes und der Grauwerte im korrespondierenden Ausschnitt des Suchbildes. Die Stelle mit dem größten Korrelationskoeffizienten r ist die gesuchte Positionierung (Kraus VI).

2.2 Funktionsweise eines Laserscanners

LiDAR (light detection and ranging) ist der Überbegriff für Techniken, die elektromagnetische Strahlung zur Messung von Distanzen einsetzen. Der Begriff kommt ursprünglich aus der Fernerkundung. Das Laserscanning fällt ebenfalls darunter, da dafür ein laserbasierender Entfernungsmesser eingesetzt wird. Der Laser (Light amplification by stimulated emission of radiation) arbeitet meist im Nahinfrarotbereich, wobei die konkrete Wellenlänge sowie technische Details zwischen den Herstellern unterschiedlich sein können (Shan et al).

Der Laserscanner ist ein System bestehend aus einer elektro-optischen Distanzmessung (EDM) und einer Ablenkungseinrichtung, das eine regelmäßige Abtastung eines Objektes oder Raumsegmentes erlaubt. (Wiedemann) Im Prinzip funktioniert ein

Laserscanner wie ein reflektorloses Tachymeter, das einen vordefinierten Bereich mit einem definierten Raster automatisch sehr schnell abtastet. Für die Messung wird dabei der Laser als Messstrahl über einen kippbaren Spiegel oder ein rotierendes Glasprisma in der vertikalen Ebene ausgelenkt. Die Drehung des Lasers in der horizontalen Ebene erfolgt durch eine Drehung des gesamten Laserscanners um die eigene vertikale Achse. Als Messergebnis werden die vertikalen und horizontalen Richtungswinkel, die Strecke und häufig auch die Intensität des reflektierten Lasers gespeichert. Somit liegen die ermittelten Koordinaten der einzelnen Punkte als Polarkoordinaten vor. (PhoBa) Die Objektkoordinaten (X, Y, Z) können mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha * \sin \beta * s \\ \sin \alpha * \sin \beta * s \\ \cos \beta * s \end{pmatrix} \text{ mit } \begin{matrix} \alpha = \text{Horizontalwinkel} \\ \beta = \text{Vertikalwinkel} \\ s = \text{Schrägstrecke} \end{matrix} .$$

Die Abbildung 2.2.1. stellt die beschriebene Funktionsweise des Laserscanners schematisch dar.

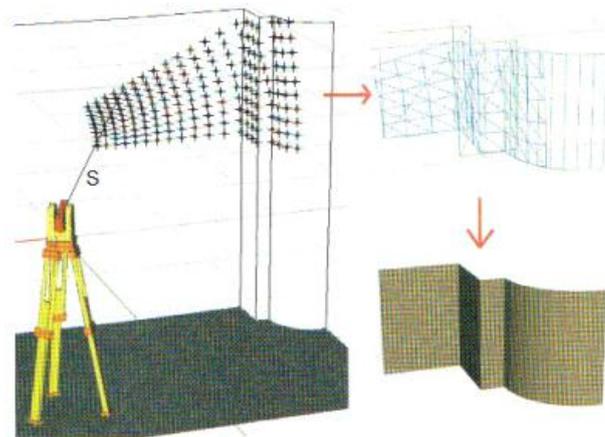


Abb. 2.2.1: Darstellung des Funktionsprinzips eines Laserscanners (Wiedemann, S.249).

Die mit dem EDM erfasste Strecke s beschreibt immer die Entfernung zur Objektoberfläche. Die Streckenermittlung erfolgt dabei entweder per Phasenvergleichsverfahren oder einem Laufzeitmessungs-/Impulsverfahren.

Bei dem Phasenvergleichsverfahren wird die Phasenverschiebung des ausgesendeten und des empfangenen Signals (Welle) ermittelt. Die Mehrdeutigkeit des Signals, die bei diesem Verfahren, vorliegt wird durch ein vorausgegangenes Signal aufgelöst. Es ist zu beachten, dass bei Phasenmessungen, wenn die maximale Wellenlänge überschritten wird, Mehrdeutigkeitsprobleme auftreten können. [Wiedemann] Die Strecke wird beim

Phasenvergleichsverfahren anhand der bekannten Wellenlänge, der Phasendifferenz, und der Anzahl der vollen Wellen bestimmt.

Das Impulsverfahren hingegen basiert auf der Zeitdifferenz des ausgesendeten und des empfangenen Signals des Lasers und dessen bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit). Der Laser wird bei diesem Verfahren impulsweise ausgesendet. Anhand dieser Impulse wird die Entfernung mehrfach bestimmt. Die Genauigkeit des Impulsverfahrens ist abhängig von der Genauigkeit der Zeitmessvorrichtung des Scanners, da sich die elektromagnetischen Wellen, wie oben beschrieben, mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Das bedeutet, je schlechter die Zeitdifferenz erfasst wird, desto ungenauer ist die ermittelte Strecke. Das Impulslaufzeitverfahren besitzt gegenüber dem Phasenvergleichsverfahren jedoch den Vorteil, dass mit diesem eine höhere Reichweite bei der Distanzmessung erzielt werden kann. Das liegt an den energiereichen Impulsen, die vom Laser emittiert werden. Eine beliebige Erhöhung der Impulsenergien ist allerdings nicht möglich, da alle Laser einer Sicherheitsklassenbestimmung unterliegen. Eine zu hohe Gefahrenklasse (Vgl. EN 60825-1) ermöglicht keinen gefahrlosen öffentlichen Gebrauch. Aus diesem Grund wird die Reichweite durch die Sicherheitsklassenbestimmung künstlich begrenzt.

Das Impulslaufzeitverfahren unterliegt aufgrund des relativ einfachen Systemsaufbaus des Distanzmessers gegenüber dem Phasenvergleichsverfahren insgesamt weniger systematischen Fehlereinflüssen. Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren liegt eindeutig beim hohen Aufwand der Laufzeitmessung und der Möglichkeit der Mehrfachreflexion (Runne). Die Abbildung 2.2.1. stellt das Messprinzip der vorher benannten Streckenmessverfahren dar.

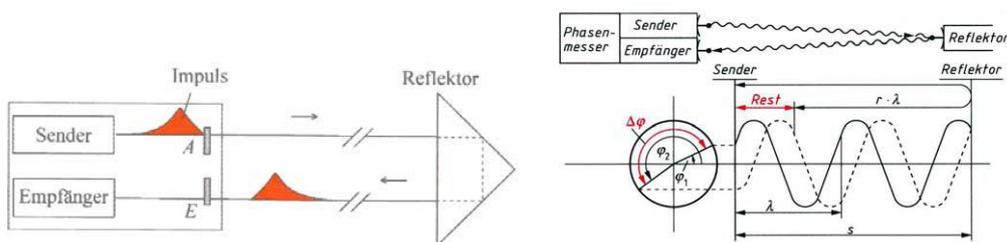


Abb. 2.2.2: Schematische Darstellung des Impulsvergleichsverfahrens (Deumlich, S.139) auf der linken Seite sowie dem Phasenvergleichsverfahren (Petrahn, S.145) auf der rechten Seite.

Die reflektorlose Messung beider Verfahren ist abhängig von der Reflexionseigenschaft der Oberfläche. Es gibt folgende drei Arten (Abb. 2.2.2) der Reflexion:

- Gerichtete Reflexion,
- Diffuse Reflexion,
- und die Retroreflexion.

Bei der gerichteten Reflexion ist der Einfallswinkel des Lasers gleich dem Ausfallwinkel. Das bildet den ungünstigsten Fall für die elektro-optische Streckenmessung, weil die ausgehende Welle nicht wieder zurück zum Gerät reflektiert wird und somit eine Streckenmessung nicht möglich ist. Daher ist es besser wenn die Objektoberflächen eine diffuse Reflexion oder Retroreflexion aufweisen. Weitere Einflüsse auf die Reflexion sind die Transmissions- und Absorptionseigenschaften des Objektes.

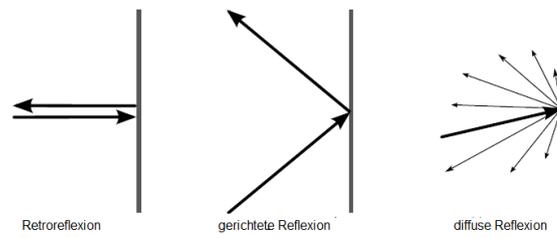


Abb. 2.2.3: Darstellung der drei verschiedenen Reflexionsarten.

3 Messinstrumente

In dem Kapitel Messinstrumente werden die Geräte, die zur Lösung der Aufgabenstellung benötigt werden vorgestellt. Es werden dabei die einzelnen Geräte und die wichtigsten zugehörigen Spezifikationen genannt.

3.1 Verwendete Kameras

Die stereophotogrammetrische Erfassung der Schalenelemente erfolgte mittels zweier Canon EOS 60D, einer Canon EOS 20D und einer Canon EOS-1Ds Mark II. Die Canon EOS 60D (Abbildung 3.1.1) gehört zu den neueren Modellen von Canon im Bereich der digitalen Spiegelreflex Kameras und besitzt eine Auflösung von 18 Megapixeln. Das Gehäuse der Kamera besteht zum einen aus einer Aluminiumlegierung sowie zum anderen aus einem Polykarbonat mit Glasfaser und garantiert dadurch innere Stabilität für die Kamera. Als Objektiv wurde für beide Canon EOS 60D Kameras das Canon EF 24 mm 1:1,4 L II USM verwendet. Das 24mm Weitwinkelobjektiv besitzt eine hohe Lichtstärke von 1:1,4 und eine Kombination von „Ultra-low Dispersion“. Außerdem enthält es asphärische Linsen zur Korrektur von Abbildungsfehlern und chromatischen Aberrationen, die bei Weitwinkelobjektiven auftreten können. Daraus folgend ist mit diesem Weitwinkelobjektiv für beide EOS 60D eine Aufnahme mit niedrigen ISO-Werten, großer Blendenzahl und geringer Aufnahmezeit möglich. Das Ergebnis ist eine rauscharme Aufnahme mit großer Tiefenschärfe.



Abb. 3.1.1: Von links nach rechts: EOS 60D, EOS 20D und EOS 1DS Mark II mit zugehörigen Objektiven.

Die EOS 20D (Abbildung 3.1.1.) ist eine digitale Spiegelreflexkamera mit einer Auflösung von 8,2 Megapixeln aus dem Jahr 2004. Sie besitzt ein Magnesium-Gehäuse, das ihr eine ähnlich hohe innere Stabilität wie der EOS 60D gewährt. Die Kamera wurde mit einem Canon EF 35 mm 1:1,4 L USM Objektiv verwendet. Auch dieses Objektiv enthält ein asphärisches Linsensystem zur Korrektur von Abbildungsfehlern. Des Weiteren weist das Objektiv einen großen Lichtdurchlass aufgrund einer großen Blende auf. Damit können auch mit der EOS 20D Aufnahmen mit niedrigen ISO-Werten (geringes Rauschen), hohen Blendenwerten (hohe Tiefenschärfe) und geringer Belichtungszeit erfolgen.

Bei der Canon EOS – 1Ds Mark II handelt es sich um eine Vollformatkamera, die im Jahr 2004 auf den Markt kam. Sie besitzt einen Vollformat-CMOS-Sensor und eine Auflösung von 16,7 Megapixeln. Dadurch ergibt sich rechnerisch eine Auflösung von 138,7 Pixel/mm. Sie besitzt wie die EOS 20D ein Magnesium-Gehäuse, das eine hohe innere Stabilität aufweist. Bei den Aufnahmen mit der Mark II wurde das Canon EF 24mm 1:1,4L USM Objektiv verwendet. Dabei handelt es sich um das Vorgängermodell des Canon EF 24 mm 1:1,4L I USM Objektivs, das bei den Canon EOS 60D verwendet wurde. Das Objektiv besitzt ebenfalls eine „Ultra-low Dispersion“ und ein asphärisches Linsensystem zur Verringerung der Abbildungsfehler und chromatischen Aberrationen. Das Objektiv erlaubt eine Aufnahme mit niedrigen ISO-Werten, großer Blendenzahl und geringer Aufnahmezeit.

Die folgende Tabelle listet eine Übersicht über die wichtigsten Kenngrößen der Kameras auf:

Tabelle 3.1.1: Übersicht der Spezifikationen der verwendeten Kameras

Kamera	Sensortyp	Auflösung [Pixel]	Sensorgroße [mm]	Pixelgröße [µm]	Verwendetes Objektiv
EOS 20D	APS-C	3.504 x 2.336	22,5 x 15,00	6,4	Canon EF 35mm 1:1,4 L USM
EOS 60D	APS-C	5.184 x 3.456	22,3 x 14,9	4,3	Canon EF 24mm 1:1,4 L II USM
EOS – 1Ds Mark II	Vollformat	4.992 x 3.328	36 x 24	7,2	Canon EF 24mm 1:1,4L USM

3.2 Laserscanner ScanStation 2

Der terrestrische Laserscanner ScanStation2 (Abbildung 3.2.1.) der Firma Leica ist ein Panoramalaserscanner mit einem Sichtfeld, das sich horizontal um 360° und vertikal um 270° erstreckt. Eine Aufnahme großer Bereiche ist damit prinzipiell möglich, wird aber im Fall der Deformationsmessung der zu untersuchenden Schalenelemente nicht komplett benötigt. Die Winkelauflösung des Scankopfes von $60 \mu\text{rad}$ in horizontaler und vertikaler Richtung garantiert auch im mittleren Entfernungsbereich eine sehr gute Punktdichte. Die minimale Rasterauflösung liegt bei 1 mm. Die Scanstation2 weist zudem eine maximale Scanrate von 50000 Punkten/ Sekunde und eine Reichweite von 300 m auf. Die EDM(elektrisch-optische Distanzmessungseinheit) der Scanstation 2 beruht auf dem Impulslaufzeitverfahren, das eine geringere Messrate, hier um den Faktor 10 langsamer, gegenüber ähnlichen (Leica HDS6000) auf der Phasendifferenz basierenden Scannern besitzt. Es ist dabei zu beachten, dass das Signalrauschverhalten von der Scandistanz und den umgebenden Beleuchtungsbedingungen abhängt. Das Impulslaufzeitverfahren erlaubt somit zwar deutlich weitere Streckenmessungen, aber mit einer geringeren Geschwindigkeit.



Abb. 3.2.1: Leica Scanstation 2 (Leica)

Tabelle 3.2.1: Genauigkeitsangaben der Scanstation 2.

Genauigkeit einer Einzelmessung	Position : 6 mm* Distanz : 4 mm* Winkel (horizontal/vertikal): $60 \mu\text{rad} / 60 \mu\text{rad}^{**}$
Laser-Punktgröße*	4 mm (nach FWHH), 6 mm (nach Gauss)
Modellierte Oberflächengenauigkeit/ Rauschen	2 mm**
Zielmarkenerfassung	2 mm Standardabweichung

* Bei einer maximalen Reichweite von 50m, 1Sigma

** 1 Sigma

3.3 Leica TCRA 1201

Das TCRA 1201 (Abbildung 3.3.1.) ist ein Tachymeter der Firma Leica. Es wurde aufgrund der Fähigkeit, reflektorlos Punkte aufzunehmen und dabei eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten, sowie einer einfachen Handhabung gewählt. Die Bestimmung der Festpunkte für die stereophotogrammetrische Aufnahme erfolgte mit dem TCRA 1201.



Abb. 3.3.1: Leica TCRA 1201

Tabelle 3.3.1: Übersicht der Spezifikationen des Leica TCRA 1201.

Winkelmessung	
Genauigkeit Hz, V	1" (0,3 mgon)
Anzeigeauflösung Winkel	0,1" (0,1 mgon)
Distanzmessung	
Reichweite	3000 m
Minstdistanz	1,5 m
Genauigkeit	1 mm+1,5 ppm
Reflektorlose Distanzmessung	
Reichweite	400 m/ 200 m (Kodak Gray Card : 90%/ 18% reflektierend)
Minstdistanz	1,5 m
Genauigkeit < 500 m	2 mm + 2 ppm
Laserpunktgröße bei 30 m	Ca. 7 x 10 mm

4 Genauigkeitsvorbetrachtung

Dieses Kapitel befasst sich mit der theoretischen Betrachtung der zu erwartenden Genauigkeit von aufgenommenen Punkten unter der Verwendung der gegebenen Messinstrumente. Einfluss auf die Betrachtung der erreichbaren Genauigkeit hatten die Rahmenbedingungen, die Aufnahmesituation sowie die Herstellerangaben zu den jeweiligen Instrumenten.

4.1 Genauigkeitsvorbetrachtung ScanStation 2

Die Genauigkeit der aus den Laserpunkten der ScanStation 2 indirekt gewonnenen Objekte (Punkte, Linien, Flächen usw.) ist allgemein sehr hoch, da die so gewonnene stark redundante Punktmenge zu einer wesentlichen Genauigkeitssteigerung der Oberflächen im Verhältnis zur Einzelmessung führt (Kraus). Die Bestimmung der erreichbaren Genauigkeit der ScanStation 2 wird im Folgenden anhand der Daten des Herstellers (Vergleich 3.2) durchgeführt.

Basierend auf der Lokalität und den dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuchsaufbauten ist mit Entfernungen unter 50 m zu rechnen. Auf dieser Grundlage kann von einer Einzelpunktgenauigkeit in der Position von 6 mm und in der Distanz von 4 mm ausgegangen werden. Es ergibt sich daraus ein Helmert'scher Punktfehler von 4,5mm. Gemäß dieser technischen Daten ist eine erreichbare Genauigkeit bei der Oberflächenmodellierung von 2 mm abhängig vom Modellierungsverfahren möglich(Leica).

Die Schwierigkeit an diesen von den Herstellern gegebenen Angaben ist, dass die Geräte nach dem Blackbox-Prinzip 3-D-Koordinaten liefern und somit für den Anwender nicht nachvollziehbar sind. Es ist zu beachten, dass die Genauigkeit am Objekt geringer sein kann als die Genauigkeit der Punkte einer Punktwolke. Das gilt zum Beispiel für die Lage eines interpolierten Punktes auf einer sehr unregelmäßigen Fläche(Böhler et al), wie zum Beispiel der Freiformfläche der Schalenelemente. Es gibt zurzeit noch keine Standards und Kenngrößen für Prüfverfahren von Laserscannern, jedoch konnten in Versuchen an verschiedenen Hochschulen die Genauigkeitsangaben der Hersteller von Laserscannern untersucht und meist bestätigt werden(Lindstaedt et al). Des Weiteren konnte nach Neitzel unter Laborbedingungen bei Deformationsmessung mittels Laserscanner Genauigkeit von unter 1 mm erreicht werden (Neitzel et al).

4.2 Digitalkameras

Als Grundlage zur Auswahl der Kamera und der Aufnahmeconfiguration dienen der Abbildungsmaßstab und die erreichbare Genauigkeit der Bildmessung. Dabei bestimmen die Qualität der Kamera (Stabilität und Kalibrierung), die Messgenauigkeit der Auswertungssysteme und Signalisierung der Bild-/ Objektpunkte die Genauigkeit der Bildmessung. Nach Luhmann besitzen digitale Aufnahmesysteme abhängig von der mechanischen Stabilität und Form der Signalübertragung ein Genauigkeitspotenzial von 0,2 bis 1 μm im Bildraum. (Luhmann V) Um eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen, wird der Bildmaßstab M_b entsprechend dem zur Verfügung stehenden Aufnahmesystem sowie den äußeren Umgebungsparametern gewählt. Der Bildmaßstab ist der reziproke Wert der Bildmaßstabszahl m_b . Die Bildmaßstabszahl stellt das Verhältnis aus der Aufnahmeentfernung h zur Kamerakonstanten c beziehungsweise das Verhältnis des Basisvektors b zur x-Parallaxe px' dar. Daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$m_b = \frac{h}{c} = \frac{b}{x' - x''} = \frac{1}{M_b}.$$

Durch Umformung nach h entsteht:

$$Z = h = \frac{b * c}{x' - x''} = \frac{b * c}{px'}$$

Nach der Differenzierung der oben genannten Gleichung und Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes ergibt sich, unter Berücksichtigung das c und b fehlerfrei sind, eine Genauigkeitsabschätzung der Objektkoordinaten in Aufnahmeichtung von:

$$s_z = \frac{z^2}{bc} s_{px'} = \frac{\frac{h}{c} * h}{c} * s_{px'} = qm_b s_{px'} \quad (\text{Kraus III}).$$

Daraus zeichnet sich wiederum die Abhängigkeit der Genauigkeit in Aufnahmeichtung von der Parallaxenmessgenauigkeit, dem Bildmaßstab h/c und dem Höhen-Basis-Verhältnis ab. Die Berechnung der Genauigkeit für die x- und y-Richtung erfolgt unter Verwendung der Gleichung:

$$X = \frac{h}{c} x' = m_b * x' \text{ und } Y = \frac{h}{c} y' = m_b * y'$$

und der Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes und Differenzierung der Gleichungen zur Bestimmung der Genauigkeit in x- und y-Richtung:

$$s_x = \sqrt{\left(\frac{x'}{c} s_z\right)^2 + \left(\frac{z}{c} s_{x'}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{x'}{c} q m_b s_{px'}\right) + (m_b s_{x'})^2} \quad s_y = \sqrt{\left(\frac{y'}{c} s_z\right)^2 + \left(\frac{z}{c} s_{y'}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{y'}{c} q m_b s_{py'}\right) + (m_b s_{y'})^2} \quad (\text{Kraus III}).$$

Wie man anhand der Gleichungen erkennt, besitzt der zweite Summand einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der x- und y-Richtung. Daraus kann geschlossen werden, dass es ausreichend ist, die Objektgenauigkeit parallel zur Bildebene abzuschätzen. Es folgt:

$$s_x = s_y = m_b * s_{x'y'} \rightarrow m_b = \frac{s_x}{s_{x'y'}}.$$

An der oben genannten Formel ist zu sehen, dass die Objektgenauigkeit abhängig von der Bildmaßstabszahl und der Bildmessgenauigkeit ist. Damit beide Messverfahren, Stereophotogrammetrie und Laserscanning, miteinander verglichen werden können, muss die Objektgenauigkeit s_x und $s_y \leq 0,6$ cm sowie die Distanzmessung $s_z \leq 0,4$ cm sein. Nach Luhmann ist bei der digitalen Auswertung der zu messenden Objektstrukturen ein Bereich von 2 bis 10 Pixel anzunehmen. (Luhmann V) Dadurch kann bei bekannter Pixelgröße der benötigte mittlere Bildmaßstab zur Aufnahme des Objektes berechnet werden (Vgl. Tabelle 4.2.1.).

Tabelle 4.2.1: Berechnung Bildmaßstab für $s_x=s_y=0,6$ cm und Objektstruktur von 10Pixel.

Kamera	Pixelgröße [μm]	Bildmaßstabszahl
Mark 1	7,2	55
20 D	6,4	63
60 D	4,3	93

Geht man nun von einer Aufnahmedistanz von circa 3 m aus, ergeben sich aus der Auswahl der Kamera und dem dazugehörigen Objektiv die folgenden Werte:

Tabelle 4.2.2: Berechnung Bildmaßstab basierend auf Entfernung und Brennweite.

Kamera	Entfernung h [mm]	Kamerakonstante c [mm]	Bildmaßstabszahl
Mark 1	3000	24	125
20 D	3000	35	86
60 D	3000	24	125

Vergleicht man Tabelle 4.2.1 mit der Tabelle 4.2.2. lässt sich erkennen, dass ein größerer Bildmaßstab mit dem Aufnahmesystem, basierend auf den 3 Kameras, erreicht werden kann und somit die geforderte Genauigkeit eingehalten wird. Zur Berechnung der Bildmaßstabszahl abhängig von s_z kann die Parallaxengenauigkeit wie folgt abgeschätzt werden:

$$s_{px'} = \frac{s_{x'}}{\sqrt{2}}.$$

Nach der Abschätzung erhält man unter Verwendung einer Basis von 1 m und einer Entfernung von 3 m die folgenden Werte der Tabelle 4.2.3.

Tabelle 4.2.3: Berechnung Bildmaßstab abhängig von $s_z = 0,4 \text{ cm}$, $b = 1 \text{ m}$ und $h = 3 \text{ m}$.

Kamera	spx [μm]	Bildmaßstabszahl
Mark 1	5,1	69
20 D	4,5	78
60 D	3,0	116

Wie zu erkennen ist, ist die Bildmaßstabszahl in Tabelle 4.2.3 kleiner als die Bildmaßstabszahl in Tabelle 4.2.2 Schlussfolgernd kann unter der zuletzt genannten Aufnahmekonfiguration die Genauigkeit gegenüber dem Laserscanner eingehalten werden.

Zum Schluss bleibt die Fragestellung, welche Genauigkeiten mit der angedachten Aufnahmekonfiguration möglich sind. Die Tabelle 4.2.4 zeigt die basierend auf der Aufnahmekonfiguration errechneten Genauigkeitsangaben. Daraus geht hervor, dass die Genauigkeit der Kameras um den Faktor zwei bis drei besser als die erreichbare Punktgenauigkeit des Laserscanners ist. Eine Genauigkeit von 2 mm kann nach Junghans bei Oberflächengenerierung aus den durch image matching gewonnenen Punktwolken erreicht werden.

Tabelle 4.2.4: Erreichbare Genauigkeiten der Kameras bei einer Basis von 1m und einer Entfernung zum Objekt von 3 m.

Kamera	Bildmaßstab	Genauigkeit X,Y [mm]	Genauigkeit Z [mm]	Gesamt [mm]
EOS Mark 1	125	0,90	1,91	1,74
20D	86	0,55	1,16	1,25
60D	125	0,54	1,14	1,23

5 Aufnahme Schalenelemente

In diesem Kapitel sollen die zwei verschiedenen Versuchsaufbauten und die dadurch bedingten Aufnahmekonfigurationen näher erläutert werden. Dabei wird kurz beschrieben, wie ein gemeinsames Punktfeld für die Verknüpfung der terrestrischen Laserscanning-Aufnahmen mit den photogrammetrischen Aufnahmen geschaffen wurde. Des Weiteren werden die Schwierigkeiten während der verschiedenen Versuchsaufnahmen aufgezeigt.

5.1 Versuchsaufbau Januar 2012

Für die Erstellung der Schalenelemente wurden in einem Konstrukt aus Baugerüsten drei Membranen gespannt. Diese drei Membranen unterscheiden sich in ihrer jeweiligen Beschaffenheit. Eine Membran war eine PVC Plane, die nicht perforiert war. Die beiden anderen Membranen waren ebenfalls PVC Planen, besaßen aber unterschiedliche Perforationsmuster. Durch Auftragung von Beton auf die Membranen wurden die zu untersuchenden Schalenelemente geschaffen.

Ursprünglich sollten die Schalenelemente eine gesamte Dicke von 3 cm besitzen. Die Dicke setzt sich aus einer je 1,5 cm breiten Schicht aus Beton auf der Unter- und Oberseite der Membran zusammen. In der abschließenden Betrachtung nach beiden Versuchsaufbauten wurde bei den Schalenelementen eine Dicke zwischen 5 cm und 8 cm ermittelt. Diese Differenz ist bedingt durch den Herstellungsprozess, besitzt jedoch keinen Einfluss auf die jeweilige Aufnahmekonfiguration

Die Dicke des Schalenelementes hat Einfluss auf das Verhalten der Schale unter Krafteinwirkung, jedoch basiert die Aufnahmekonfiguration auf dem Abstand zwischen Objekt und Aufnahmesystem und dabei ist eine Differenz im cm Bereich unbedeutend.

Bei dem Belastungstest der Schalenelemente im Januar handelte es sich um einen statischen Belastungstest. Die Schalenelemente wurden mit je fünf verschiedenen Konfigurationen belastet und aufgenommen. Folgende Zustände gab es für Schalenelemente, die zwischen die Gerüste gespannt wurden:

1. Schalenelemente in Ausgangslage (nach der Herstellung)
2. Gespanntes Schalenelement wurde gelockert
3. Belastung mit ca. 74 kg
4. Belastung mit 150 kg
5. Belastung mit 300 kg
6. Belastung mit 600 kg

Bevor jedoch die Aufnahme der verschiedenen Zustände erfolgte, musste ein lokales Koordinatensystem zur Verknüpfung der terrestrischen Laserscanning-Aufnahmen mit den photogrammetrischen Aufnahmen geschaffen werden. Vorteilhaft dafür war, dass auf ein Festpunktfeld aus früheren Arbeiten im Bereich des Laserscannings zurückgegriffen werden konnte. In der Halle der Hochschule, in der die Membranen zwischen den Gerüsten gespannt wurden, befanden sich vier Reflexmarken, die schon koordinatentechnisch in einem übergeordneten System bestimmt worden waren. Diese vier Reflexmarken dienten als Festpunkte für die weitere Bestimmung der Passpunkte für die photogrammetrischen Aufnahmen sowie für die Georeferenzierung der per Laserscanning erfassten Punktwolke.

Für die stereophotogrammetrische Auswertung in Photomodeler mussten Passpunkte um die aufzunehmenden Objekte verteilt vorhanden sein. Wie in Abbildung 5.1.1 zu sehen, sind jeweils drei Passpunkte pro Seite um das Schalenelement verteilt.

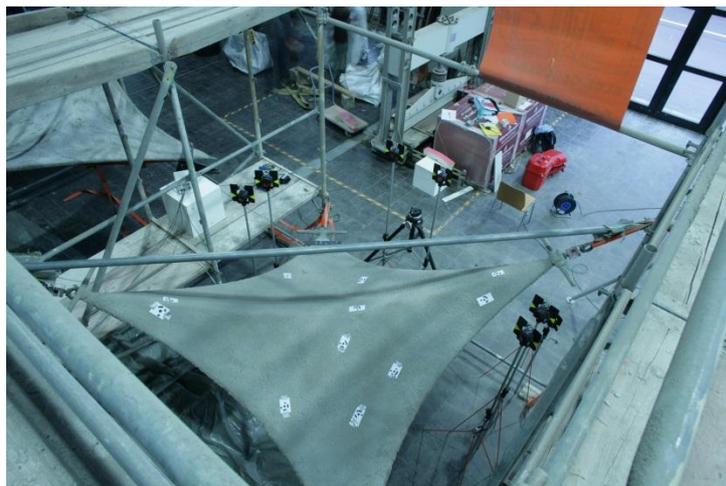


Abb. 5.1.1: *Schalenelement in Ausgangslage umschlossen mit Passpunkten auf Zieltafeln für die spätere Verknüpfung der aufgenommenen Bilder.*

Die Passpunkte wurden, wie in Abbildung 5.1.1 zu sehen ist, auf den Zieltafeln der Prismen angebracht. Die Größe der Passpunkte basiert auf der Aufnahmeentfernung und der Kalibrierung der Kameras, die automatisch vom PhotoModeler berechnet wurde. Die Passpunkte wurden mittels selbstklebenden Papiers auf die Zieltafeln aufgebracht. Die erstellten Passpunkte sollen die spätere Auswertung der photogrammetrischen Aufnahmen des Versuchs vereinfachen.

Die Erfassung der Passpunkte erfolgte reflektarlos mittels des Tachymeters Leica TCRA 1201 über die Verwendung der Reflexmarken vor den einzelnen Belastungsversuchen. Zum Abschluss der Versuche wurden die Passpunkte nochmals

aufgenommen, um eine Abweichung von der Ausgangslage zu erkennen. Eine mögliche Anbringung der Passpunkte am Gerüst selbst wurde nach sorgfältiger Überlegung verworfen, da eine Bewegung des Gerüsts durch die Belastung eines Schalenelementes nicht ausgeschlossen werden konnte und als höchstwahrscheinlich gilt.

Die folgende Tabelle stellt die Genauigkeiten der Stationierungen dar:

Tabelle 5.1.1: *Genauigkeitsangaben der Stationierungen für die Passpunktbestimmung der einzelnen Schalenelemente.*

Membran	RMS Ost [m]	RMS Nord [m]	RMS Höhe [m]	RMS Orientierung [gon]
1	0.001	0.001	0.001	0.0010
2	0.001	0.001	0.001	0.0020
3	0.001	0.001	0.002	0.0025

Nach dem Vergleich der aufgenommenen Passpunkte stellte sich heraus, dass der Punkt 202 eine stärkere Abweichung im Bereich der Lage und Höhe (Differenz ca. -0,5 m) aufweist (Vgl. Anhang A). Aus diesem Grund darf dieser Punkt für die spätere Auswertung der photogrammetrischen Aufnahmen nicht benutzt werden. Da in den Fotos keine sichtbare Veränderung der Position der Zieltafel erkennbar ist, muss davon ausgegangen werden, dass es sich dabei um einen groben Messfehler bei der reflektorlosen Aufnahme des Punktes handelt. Eine Verwendung dieses Punktes würde die Lagegenauigkeit der anderen Punkte negativ beeinflussen, da der Fehler durch die Bündelblockausgleichung bei der Berechnung der Koordinaten auf die neu errechneten Punkte verteilt würde.

Für eine bessere automatische stereophotogrammetrische Auswertung der Schalenelemente wurden diese zusätzlich mit Messmarken beklebt, die genau wie die Passpunkte eine RAD Codierung besitzen. Mit Hilfe dieser Marken kann die Oberflächenstruktur der Schalenelemente erfasst werden.

Problematisch bei der Aufbringung der Messmarken ist jedoch die Oberflächenstruktur der Schalenelemente. Durch das Auftragen von Spritzbeton besitzen die Schalenelemente eine unebene Oberfläche mit Abweichungen von schätzungsweise von 2 mm bis 3 mm. Diese unebene Fläche mit Messmarken zu bestücken, stellte sich als schwierig heraus. Die Messmarken mussten mit Klebeband auf den Schalenelementen

angebracht werden, da ein Einsatz von selbstklebendem Papier oder Klebstoff durch den Beton nicht sinnvoll war.

Die Aufnahme der Schalenelemente mittels Photogrammetrie erfolgte von fünf Standpunkten aus. Die obere Seite des Schalenelementes wurde von allen drei Seiten des Gerüsts aufgenommen, die untere Seite des Schalenelements von zwei Positionen aus. Da keine Angaben und Kenntnisse vorhanden waren, wie viel Krafteinwirkung ein solches Schalenelement aushält, wurden die Aufnahmen innerhalb eines gewissen Sicherheitsabstandes erfasst. Es bestand die Möglichkeit, dass beim Bruch des Schalenelementes Teile durch Splitterung im Raum verteilt worden wären bzw. Gerätschaften unterhalb und in unmittelbarer Nähe des Elementes beschädigt worden wären. Weiterhin bestand die Schwierigkeit, dass die Aufnahme der hinteren Unterseite der Schale durch das Gerüst behindert wurde, da das Aufnahmegebiet durch die Gerüststangen stark verkleinert wurde. Die Gerüststangen waren bei den Aufnahmen als Störobjekt vorhanden.

Parallel dazu wurde für jeden Zustand des Objektes von jeweils zwei Scanstandpunkten aus die Geometrie des Schalenelementes per Laserscanner erfasst. Der Laserscanner konnte daher nicht statisch an einer Position stehen bleiben, sondern musste an einer zweiten Stelle aufgebaut und ebenso wie am ersten Standpunkt separat registriert werden. Durch den Systemaufbau des Gerüsts war eine Erfassung der hinteren unteren Fläche des Schalenelementes nicht möglich. Die Abweichung pro Punkt und Registrierung betrug zwischen 1 mm und 5 mm. Die Tabelle 5.1.2 gibt die mittlere Abweichung der Registrierungsvorgänge an. Eine komplette Tabelle zur Übersicht über die einzelnen Fehlervektoren für jede Reflexmarke pro Standpunkt ist im Anhang A zu finden.

Tabelle 5.1.2: *Mittlere Abweichungen der Scanworlds.*

Database Name	Anzahl Scanworlds	Mittlere Abweichung [mm]
Segel 1	12	2
Segel 2	11	2
Segel 3	11	2

Des Weiteren gab es während der Versuchsdurchführung vor Ort Überlegungen wie die Schalenelemente auf die Krafteinwirkung reagiert haben. Optisch waren keine signifikanten Änderungen der Schalenelemente zu erfassen. Es wird daher angenommen,

dass sich die Krafteinwirkung der aufgebrachten Gewichte gleichmäßig, ausgehend vom Lagepunkt der Gewichte, über die Schalenelemente verteilt. Die Abbildung 5.1.2 soll dies skizzenhaft darstellen. Der rote Kreis verdeutlicht dabei das aufgetragene Gewicht, die Kraft (rote Pfeile) wird vom roten Kreis zu den Rändern des Schalenelements verteilt.

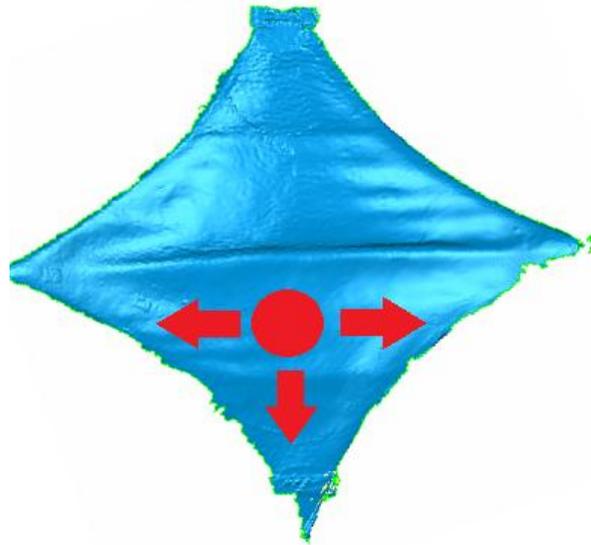


Abb. 5.1.2: Vermutete Kraftverteilung der Gewichte beim ersten Versuchsaufbau.

5.2 Versuchsaufbau Februar 2012

Bei dem zweiten Versuchsaufbau handelt es sich um einen dynamischen Deformationsprozess. Für eine erneute Analyse der Stabilität der Schalenelemente wurden diese unter eine hydraulische Presse gestellt. Für eine gleichmäßige Druckverteilung bekamen die Schalenelemente in der Mitte Bohrkerne aufgesetzt. Durch die Hydraulikpresse wurde ein konstant langsam steigender Druck auf die Schalenelemente abgegeben. Für dieses Verfahren musste der Einsatz der Kameras und des Laserscanners überdacht werden. Grund dafür ist, dass durch die Hydraulikpresse bei unachtsamer Standortpositionierung der einzelnen Geräte große Abschattungsgebiete entstehen. Für eine großflächige Aufnahme der Schalenelemente wurde daher der Laserscanner senkrecht zur Achse der Hydraulikpresse positioniert. Erkennbar ist in Abbildung 5.2.1 der Abschattungsgebiet durch die Hydraulikpresse.

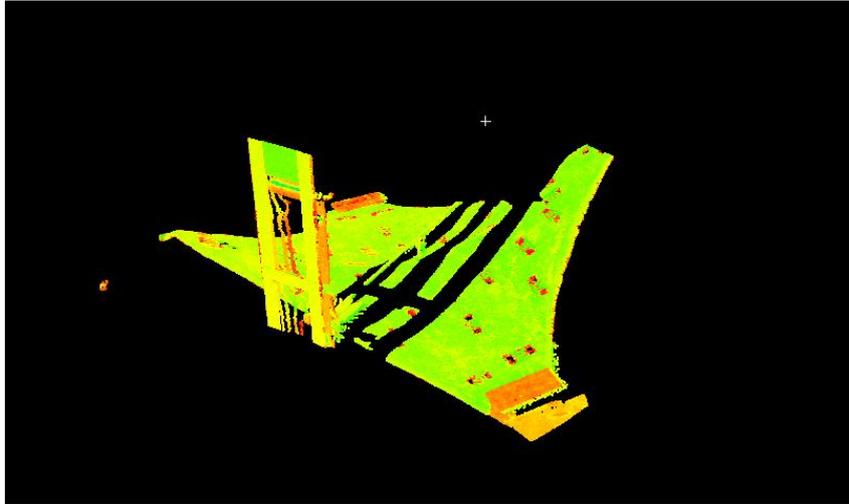


Abb. 5.2.1: *Darstellung des Abschattungsbereichs durch die Hydraulikpresse bei der Aufnahme eines Schalenelementes per Laserscanner.*

Da der vorhergehende Versuch im Januar 2012 keinen Aufschluss über eine punktuelle Belastung des Schalenelementes liefern konnte, war bei der Einstellung des Laserscanners für die Punktwolkenerfassung keinerlei Erfahrung vorhanden. Aufgrund des dynamischen Prozesses und somit möglicher Veränderung der Oberflächenform während der Aufnahme mittels Laserscanner musste ein Kompromiss zwischen Dauer eines Scans und der Anzahl der zu erfassenden Punkte gefunden werden. Als Aufnahmekonfiguration wurde eine Scanzeit von zehn Sekunden für das Gebiet eines Schalenelements festgelegt. Innerhalb dieser Zeit konnten 2000 Punkte erfasst werden. Des Weiteren musste beachtet werden, dass der Laserscanner ca. zwei Sekunden für die Bewegung in die Ausgangslage benötigt. Das bedeutet, dass pro Scan zwölf Sekunden vergehen. Da ein durchgehendes Scannen mit Hilfe des Laserscanners nicht möglich war, musste für die Aufnahme ein Script innerhalb Cyclone's geschrieben werden, das folgendermaßen aufgebaut war:

```
„Distance Units Meters
Angular Units Degrees
Coordinate Labels XYZ
Imperial Type US Survey
set output scan membran2_1
Scan 68.201, -41.411 : 112.524, -21.318 @ 109, 49
set output scan membran2_2
Scan 68.201, -41.411 : 112.524, -21.318 @ 109, 49
... ”
```

Der Befehl „set output scan“ definiert den Namen eines Scanvorganges. Der darauf folgende Befehl „Scan“ gibt den zu messenden Bereich und die Auflösung an und startet den Scanvorgang. Die folgende Tabelle 5.2.1 dokumentiert die mittlere Abweichung für die einzelnen Georeferenzierungen der Punktwolken.

Tabelle 5.2.1: *Übersicht der mittleren Fehler bei der Registrierung der Punktwolken.*

Database Name	Anzahl Scanworlds	Mittlere Abweichung [mm]
Segel220212	35	2

Wie im ersten Versuch im Januar 2012 wurden dieselben Reflexmarken, die schon im Gebäude vorhanden waren verwendet. Die Tabelle zu den Abweichungen der Reflexmarken können im Anhang A näher betrachtet werden. Die Abweichungen betragen zwischen 1 mm und 2 mm. Insgesamt konnten bei dem ersten Schalenelement 17, bei dem zweiten 3 und bei dem dritten 15 Zustände, inklusive Ausgangslagen- und Endergebnisscan, erfasst werden.

Für die stereophotogrammetrische Aufnahme musste wie im ersten statischen Versuch ein Passpunktfeld geschaffen werden. Die Anbringung der Passpunkte erfolgte in diesem Durchgang auf dem Boden um die Hydraulikpresse herum. Da eine Veränderung der Kameraposition während des Versuchs weder möglich noch sinnvoll war, erhielten die vier Kameras eine feste Position auf der jeweiligen Seite der Hydraulikpresse. Die Abbildung 5.2.2 stellt die Aufnahmekonfiguration dar.

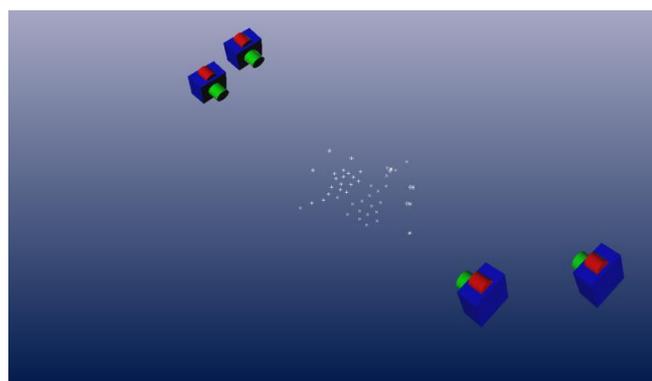


Abb. 5.2.2: *Aufnahmekonfiguration der vier Kamerastandpunkte bei der Stereoaufnahme eines Schalenelementes.*

Des Weiteren wurden die Schalenelemente wieder mit Marken zur besseren Auswertung in PhotoModeler bestückt. Die Genauigkeit der einzelnen Positionierungen der Standpunkte für die Bestimmung der Passpunkte zeigt die folgende Tabelle:

Tabelle 5.2.2: Genauigkeiten der Stationierung zur Passpunktbestimmung.

Membran	RMS Ost [m]	RMS Nord [m]	RMS Höhe [m]	RMS Orientierung [gon]
1	0.001	0.001	0.001	0.0020
2	0.002	0.001	0.001	0.0020
3	0.001	0.001	0.002	0.0015

Die Koordinaten der einzelnen Passpunkte können wieder in der Anlage A überprüft werden. Die Kameras wurden innerhalb eines Intervalls von ca. vier Sekunden gleichzeitig ausgelöst. Daraus ergeben sich 51 aufgenommen Zustände für die erste, 6 Zustände für das Zweite und 45 Aufnahmen für das dritte Schalenelement.

Wie im vorhergehenden Kapitel soll zum Schluss auf die mögliche Deformation der Schalenelemente eingegangen werden. Die Krafteinwirkung der Hydraulikpresse unterscheidet sich im Vergleich zum ersten Versuchsaufbau dahingehend, dass die Kraft durch die Aufbringung des Bohrkerns jetzt punktueller wirkt. Des Weiteren wurde der Bohrkern auf den Rücken, die dickste Stelle in der Mitte der Schale, aufgesetzt. Aus diesem Grund wird angenommen, dass die Kraft den Rücken im Bereich des Bohrkerns nach unten drückt und die Seiten sich im Gegensatz zur Mitte heben (siehe Abbildung 5.2.3).

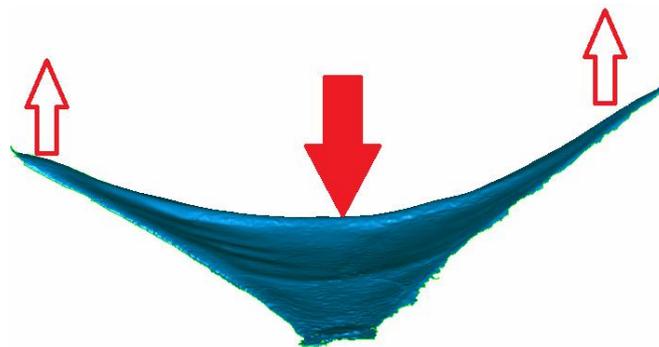


Abb. 5.2.3: Durch die Krafteinwirkung auf den Rücken des Schalentragerwerkes soll es zu einer Senkung im Bereich der Krafteinwirkung kommen sowie zu einer Hebung an den Seiten des Schalenelementes.

6 Auswertung der Aufnahmen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Verarbeitung der Daten, die mit Hilfe der Stereobildaufnahme und dem terrestrischen Laserscanning erfasst wurden. Der erste Teil behandelt die Verarbeitung der Stereobildpaare mittels des Programms PhotoModeler 6 Scanner. Es wird auf die Einstellungen zur Generierung von Punktwolken eingegangen. Danach werden an einem Bildpaar beispielhaft die Bearbeitungsschritte und die Probleme, die während der Bearbeitung entstanden, aufgezeigt.

Der zweite Teil des Kapitels befasst sich mit der Bearbeitung der Punktwolken die per Laserscanner aufgenommen wurden. Das beinhaltet die drei grundlegenden Schritte der Registrierung, Bereinigung (beides im Programm Cyclone) und Vermaschen (Geomagic) der einzelnen Punktwolken.

6.1 Kamerakalibrierung

Für eine exakte Auswertung der stereophotogrammetrischen Aufnahmen wird eine Kalibrierung der verwendeten Kameras benötigt. Mit Hilfe der Kalibrierung werden die Parameter der inneren sowie äußeren Orientierung einer Kamera bestimmt. Es existieren die Simultan-, Testfeld- und Laborkalibrierung als mögliche Verfahren. Da im Versuch die Testfeldkalibrierung angewendet wurde, wird diese im Folgenden kurz vorgestellt.

Bei der Testfeldkalibrierung werden die Parameter einer Kamera mit einem geeigneten Testfeld bestimmt. Dieses Testfeld besitzt idealerweise signalisierte Punkte, die automatisch erkannt werden können, Das Testfeld muss aus mehreren Positionen und formatfüllend aufgenommen werden. Bei der Aufnahme des Testfeldes muss auf eine gute Schnittgeometrie (z.B. kein schleifender Schnitt) geachtet werden, da sonst das Ergebnis der Testfeldkalibrierung verfälscht wird. Mit Hilfe der Bündelblockausgleichung werden die Parameter der inneren und äußeren Orientierung über die gemessenen oder automatisch erfassten Objektpunkte bestimmt. Ein solches Testfeld wird als Datei mit der Software PhotoModeler mitgeliefert und bei der Kalibrierung verwendet.

Die Aufnahme des Testfeldes erfolgte pro Kamera mit je zwölf Aufnahmen, wobei das Testfeld einmal mit horizontal ausgerichteter Kamera sowie mit je um 90° nach links bzw. rechts verschwenkter Kamera von je vier Seiten aufgenommen wurde (Vgl.

Abbildung 6.1.1). Das Testfeld bestand aus 36 x 36 Punkten wovon vier für die automatische Erkennung via PhotoModeler signalisiert sind.

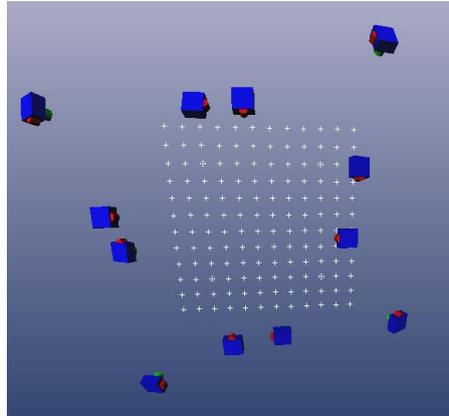


Abb. 6.1.1: Darstellung der Aufnahmekonfiguration des 36 x 36 Testfeldes.

Die automatische Bestimmung der restlichen Punkte erfolgte mittels dieser vier speziell signalisierten Punkte. Ein Bild kann nur für die Kalibrierung verwendet werden, wenn alle vier Punkte erkannt werden. Wichtig ist dabei, dass die Kalibrierung mit den gleichen Einstellungen der Kamera wie bei der späteren Aufnahme der Schalenelemente erfolgt. Als Grundeinstellung für die Kameras wurden als Aufnahmeprogramm die Belichtungszeitautomatik ausgewählt sowie der Fokus auf unendlich, der Blendenwert auf 22 (für eine große Tiefenschärfe) und der ISO Wert auf 100 (gewährt ein minimales Rauschverhalten) ausgerichtet.

Da sich zwischen den beiden Aufnahmen zur Deformationsanalyse ein zeitlicher Abstand von einem Monat bestand, mussten für die jeweiligen Aufnahmen die Kameras neu kalibriert werden. Die Tabelle 6.1.1 und Tabelle 6.1.2 geben die Parameter der Kalibrierung für alle vier Kameras zu den jeweiligen Zeitpunkten an.

Tabelle 6.1.1: Parameter der Kalibrierung zum ersten Aufnahmezeitpunkt.

Kamera	Brennweite [mm]	Xp [mm]	Yp [mm]	K1 [mm]	K2 [mm]	K3 [mm]	Fw [mm]	Fh [mm]
Mark II	24,57	18,03	11,96	1,24E-04	-1,84E-07	-2,46E-09	35,94	23,96
EOS 60D 1	24,87	11,27	7,52	1,25E-04	-2,84E-07	-1,68E-09	22,68	15,11
EOS 60D 2	24,87	11,273	7,52	1,26E-04	-2,74E-07	-2,57E-09	22,68	15,11
EOS 20D	34,21	11,36	7,47	8,95E-05	-6,73E-08	-3,75E-10	22,47	14,99

Tabelle 6.1.2: *Parameter der Kalibrierung zum zweiten Aufnahmezeitpunkt.*

Kamera	Brennweite [mm]	Xp [mm]	Yp [mm]	K1 [mm]	K2 [mm]	K3 [mm]	Fw [mm]	Fh [mm]
Mark II	24,58	18,04	11,96	1,23E-04	-1,79E-07	-2,15E-09	35,94	23,96
EOS 60D 1	24,87	11,27	7,52	1,26E-04	-2,85E-07	-1,46E-09	22,68	15,11
EOS 60D 2	24,87	11,27	7,52	1,25E-04	-2,80E-07	-2,93E-09	22,68	15,11
EOS 20D	34, 21	11, 36	7,47	8,93E-05	-6,60E-08	-3,46E-10	22,47	14,97

Die Werte K1 bis K3 geben die radialsymmetrische Verzeichnung und die Werte Fw und Fh die Sensorhöhe und Breite an. Die kompletten Kalibrierungsergebnisse sind im Anhang B zu finden. Die Tabelle 6.1.3 gibt die Genauigkeit für die jeweiligen Kalibrierungen an.

Tabelle 6.1.3: *Genauigkeit der Kamerakalibrierungen.*

Kamera	Versuchsaufbau	RMS [Pixel]	Max RMS [Pixel]	Min RMS [Pixel]
Mark II	1	0,293	1,255	0,144
Mark II	2	0,280	0,257	0,804
EOS 60D 1	1	0,173	0,519	0,064
EOS 60D 1	2	0,183	0,527	0,074
EOS 60D 2	1	0,176	0,525	0,063
EOS 60 D2	2	0,179	0,529	0,063
EOS 20 D	1	0,182	0,585	0,064
EOS 20D	2	0,181	0,586	0,063

6.2 Punktwolkengenerierung mit PhotoModeler

Die Erzeugung von Punktwolken aus Stereoaufnahmen mittels PhotoModeler ist abhängig von der Aufnahmekonfiguration und den Eigenschaften (Oberflächenstruktur, Transparenz usw.) des Objektes. Die optimale Aufnahmekonfiguration ist der Normalfall der Stereophotogrammetrie. Der maximale Konvergenzwinkel sollte dabei nicht 30° überschreiten, da sonst die Lösung des Stereobildpaares zu stark fehlerbehaftet ist. Des Weiteren wird ein Höhen-Basis-Verhältnis von 0,25 vom Hersteller als optimal angegeben. Das maximale Höhen-Basis-Verhältnis sollte nicht mehr als 0,5 betragen. Bei einem größeren Verhältnis kann die Erzeugung einer Punktwolke nicht mehr möglich sein oder ungenaue Ergebnisse mit einer erheblichen Anzahl von Ausreißern aus der Punktwolke entstehen. Die Tabelle 6.2.1 gibt die maximalen Werte bei den Konvergenzwinkeln und des Höhen-Basis-Verhältnisses für beide Versuchsdurchführungen an.

Tabelle 6.2.1: Höhen-Basis-Verhältnis und Konvergenzwinkel der Aufnahme.

Versuchsaufbau	Membran	Max. Höhen-Basis-Verhältnis	Max. Konvergenzwinkel [°]
1	1	0,29	18,74
1	2	0,27	22,55
1	3	0,29	17,62
2	1	0,30	11,69
2	2	0,32	12,79
2	3	0,32	12,69

Damit PhotoModeler 6 eine Punktwolke aus dem Stereobildpaar generieren kann, muss dieses zuerst durch Anwendung der erstellten Kalibrierungsdaten idealisiert werden. Durch diese Projektidealisierung wird die Genauigkeit der erzeugten Punktwolke gesteigert. Bei der Projektidealisierung wird die Lage der Pixel der aufgenommenen Bilder in der Bildkoordinaten-Matrix derart verschoben, dass unter Berücksichtigung der inneren Orientierung die exakte mathematisch geometrische Pixellage errechnet wird. Das hat zur Folge, dass die Aufnahmen nach der Projektidealisierung verzeichnungsfrei sind. Nachteilig an der Projektidealisierung ist allerdings, dass sich die Verarbeitung der Bilder durch ihre hohe Auflösung als ein zeitaufwendiger Bearbeitungsschritt darstellt. Abhängig von der Anzahl der zu idealisierenden Bilder

beträgt die Bearbeitungszeit zwischen 15 Minuten (zweiter Versuchsaufbau mit Idealisierung von vier Bildern) und 25 Minuten (erster Versuchsaufbau mit Idealisierung von sechs Bildern)(Vgl. Rechnerkonfiguration Anhang B).

Die Erstellung der Punktwolke mit Hilfe des Meshing Moduls in PhotoModeler kann in drei Kategorien bzw. Schritte eingeteilt werden, die nacheinander abgearbeitet werden müssen. Zuerst sind die Grundeinstellungen zu nennen, die für die Erstellung der Punktwolke benötigt werden. Dazu gehören das Auflösungsvermögen und der Tiefenbereich der zu scannenden Ebene. Der zweite Schritt befasst sich mit der Erzeugung der Punktwolke und der dritte Schritt mit der Weiterverarbeitung jener erzeugten Punktwolke. Die nachfolgende Tabelle stellt die einzelnen Optionen der drei Schritte dar.

Tabelle 6.2.2: Schritte und Optionen zur Erstellung von Punktwolken in PhotoModeler.

Grundeinstellungen	Punktwolkengenerierung	Punktwolkenverarbeitung
Depth Range	Decimate Point Cloud	Contours
DSM Trim Mode	Denoise Point Cloud	Decimate Triangles
Matching Region Radius	Filter Isolated Points	Fill Holes and Fjords
Sampling Rate	Register and Merge	Mesh Point Clouds
Subpixel		Smooth/ Sharp Smooth
Super Sampling Factor		Unify Normals
Textur Type		

Eine genaue Erläuterung der jeweiligen Optionen ist im Anhang C zu finden.

6.3 Praktische Punktwolkengenerierung

Anhand eines Beispiels wird in diesem Kapitel die Generierung der Punktwolke mittels PhotoModeler Scanner aufgezeigt. Außerdem werden die Probleme, die während der Verarbeitung der Aufnahme auftraten, benannt. Als Berechnungsgrundlage dient das Stereobildpaar in Abbildung 6.3.1.

Die erste Aufgabe der Verarbeitung war die Idealisierung der Aufnahmen, also die Korrektur der Bildmatrix anhand der Kalibrierungsdaten.



Abb. 6.3.1: *Stereobildpaar für die Weiterverarbeitung und Punktwolkengenerierung.*

In Abbildung 6.3.1 ist erkennbar, dass das Schalenelement von Prismenstäben, d.h. mit Prismen und den dazugehörigen Zieltafeln, umringt ist. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben sind die Zieltafeln mit Marken für die Georeferenzierung bestückt. Des Weiteren sind Zielmarken auf dem Schalenelement sichtbar, die für eine bessere Punktwolkengenerierung notwendig sind, da diese mit in den Algorithmus zur Bestimmung der Oberfläche während des Scanvorgangs einfließen.

Diese Marken sollen die Verarbeitung innerhalb von PhotoModeler beschleunigen, da diese automatisch erkennbar und dadurch untereinander zugeordnet werden können. Des Weiteren erweist sich die Genauigkeit der per Zielmarken erfassten Punkte als größer gegenüber den manuell markierten Punkten. Die Erstellung der Marken erfolgte in PhotoModeler. Das Programm berechnet dafür abhängig von den Kalibrationsdaten und einer Entfernungsangabe, wobei von einer Entfernung von 5m zwischen dem Aufnahmestandpunkt und dem Objekt ausgegangen wird, die Zielmarkengröße. Da unterschiedliche Kameras benutzt wurden, musste zuerst für jede einzelne die Größe bestimmt werden. Das Ergebnis mit der größten errechneten Zielmarkengröße, inklusive einer 10% Vergrößerung, wurde dann für eine problemlose automatische Erfassung verwendet.

Die Erfassung der Marken erfolgt in PhotoModeler mittels eines Moduls zur automatischen Zielerkennung. Zusätzlich ist es wichtig, dass die kodierten Marken dem gleichen Kodierungsschema unterliegen. In vorherigen Tests stellte sich heraus, dass PhotoModeler, nachdem es eine Art von kodierten Marken erkannt hatte, keine anders kodierten Marken automatisch erkennen und zuordnen kann. In dem gegebenen Stereobildpaar sind 23 Marken, die auf beiden Bildern erkennbar sind, vorhanden. Durch die automatische Erkennung wurden 19 Marken von den 23 erfasst. Das entspricht einem Erkennungswert von mehr als 80% und ist auf die anderen

Aufnahmen übertragbar. Die Erkennungsrate ist abhängig von der Lage der Marken in Bezug auf den Aufnahmestandpunkt und die Umgebungsvariablen.

Ein möglicher Störfaktor kann das schwarze Klebeband zur Fixierung der Marken auf dem Beton sein. Zu den während des Versuchs aufgetretenen Fehlern gehörte die fehlerhafte Erkennung der Zielmarken in Objekten der Umgebung durch den Suchalgorithmus (Vgl. Abbildung 6.3.2).



Abb. 6.3.2: Fehlerhafte Erkennung einer angeblichen Zielmarke an einem Schaumstoffteil.

Ein anderer Fehler, der während der Bearbeitung auftrat, war die falsche Zielmarkenidentifizierung durch den Erkennungsalgorithmus. Als Folge dieses Fehlers wurde z.B. einer Marke mit der ID 16 die ID 129 zugeordnet. Schwierig war dabei, dass im Falle des wirklichen Bestehens beider Marken mit diesen IDs in den Aufnahmen der Fehler durch die Prozessierung des Projektes in PhotoModeler verwaschen wurde. Durch die Ausgleichung ist es möglich, dass Fehler auf andere Punkte übertragen werden und somit nicht sofort erkennbar sind. Allerdings verursachen sie eine zeitintensive Analyse. Die nicht erkannten Punkte konnten mit der Funktion „sub pixel target mode“ in PhotoModeler erfasst werden.

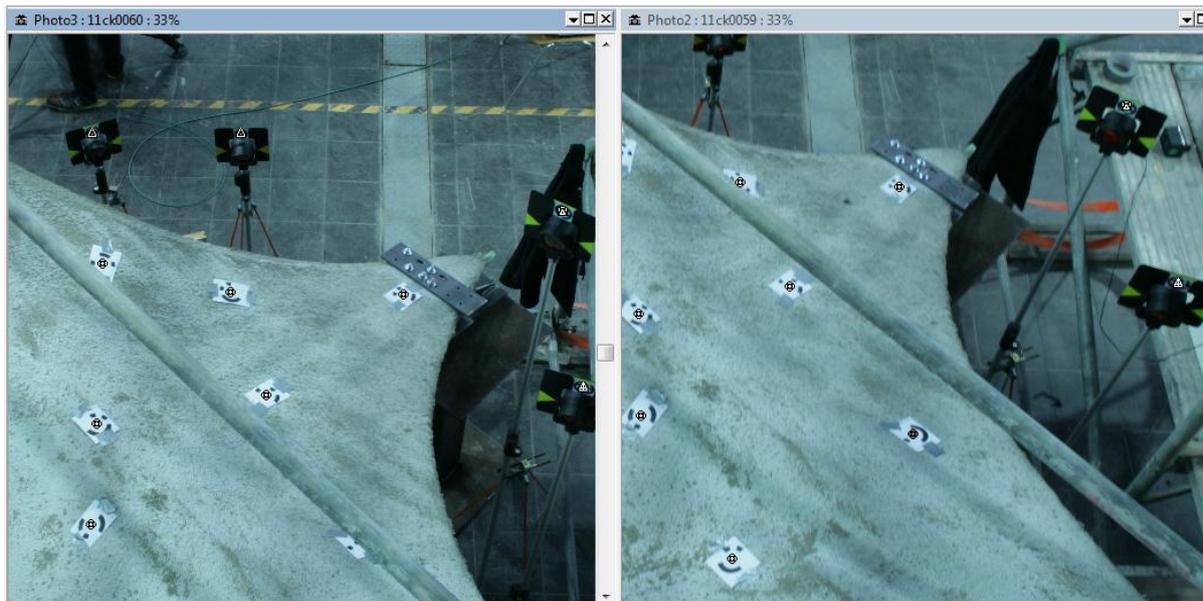


Abb. 6.3.3: *Verknüpfung der Zielmarken untereinander und Georeferenzierung der Marken auf den Zieltafeln (Dreieckssymbol).*

In dem verwendeten Stereobildpaar wurden die Punkte mit einer durchschnittlichen Standardabweichung von 0,114 Pixel und einer maximalen Standardabweichung von 0,337 Pixel miteinander referenziert.

Als nächster Schritt stand die Übertragung der Punkte aus dem lokalen Koordinatensystem in das übergeordnete Koordinatensystem, basierend auf den vier Reflexmarken, an. Dafür wurden die Koordinaten der aufgenommenen Marken in das Programm eingeladen und mit diesen verknüpft. Nach der erneuten Ausgleichung und Neuorientierung betrug die Standardabweichung aller Punkte 0,367 Pixel/0,6mm und die maximale Standardabweichung 0,542 Pixel/0,9mm. Die Ursache der Erhöhung der Abweichungen besteht darin, dass die georeferenzierten Punkte nun fixiert sind und die restlichen Punkte in dieses Netz hinein ausgeglichen werden.

Als letzter Schritt musste das zu erfassende Objekt für die Punktwolkengenerierung abgegrenzt werden. Das erfolgte unter Anwendung des „DSM Trim Mode“. In Abbildung 6.3.3 sind die einzelnen Regionen sichtbar.



Abb. 6.3.3: *Abgrenzung der Regionen zur Punktwolkengenerierung.*

Die Generierung dieser und aller weiteren Punktwolken erfolgte unter der Verwendung der folgenden gleichen Grundeinstellungen:

- Sampling Intervall: 10.000
- Sampling Intervall units: mm
- Depth range : 0.300/0.300 m
- Matching radius: 13
- Texture type: 3
- Down sample factor: 0
- Run isolated point filter: aktiviert
- Sub-pixel: true
- Super Sampling :2

sowie den gleichen Mesh-Einstellungen, die im Anhang C zu finden sind.

Als Ergebnis wurde eine Punktwolke mit 18452 Punkten und eine Oberfläche mit 57690 Dreiecken generiert (siehe Abbildung 6.3.4).

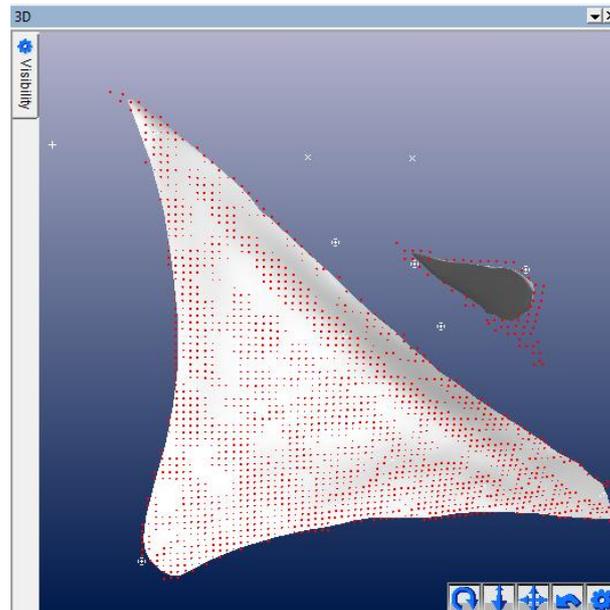


Abb. 6.3.4: Darstellung der erzeugten Punktwolke und der darauf basierenden vermaschten Oberfläche.

Wie man in Abbildung 6.3.4 erkennen kann, konnte keine Punktwolke über das gesamte Objekt generiert werden. Hauptursache dafür bildet die Gerüststange, die quer über das Objekt montiert wurde. Zur Erfassung dieser Lücke wurde das Schalelement noch von mindestens einer weiteren Seite stereophotogrammetrisch aufgenommen. Während beim ersten Versuchsaufbau die Gerüststangen zu Abschattungsbereichen bei der Punktwolkengenerierung führten, war die Ursache in diesem Versuch, wie man in Abbildung 6.3.5 erkennen kann, der Stempel der Hydraulikpresse selbst.



Abb. 6.3.5: Linke Seite Aufnahme eines Schalelementes unter der Hydraulikpresse, auf der rechten Seite ist die daraus resultierende Punktwolke sichtbar.

Als Endergebnis (Abbildung 6.3.6) der Punktwolkengenerierung aus den Stereobildpaaren wurde die vermaschte Oberfläche per stl – Dateiformat exportiert. Diese Oberflächen werden für die Deformationsanalyse im Programm Geomagic Qualify weiterverwendet.

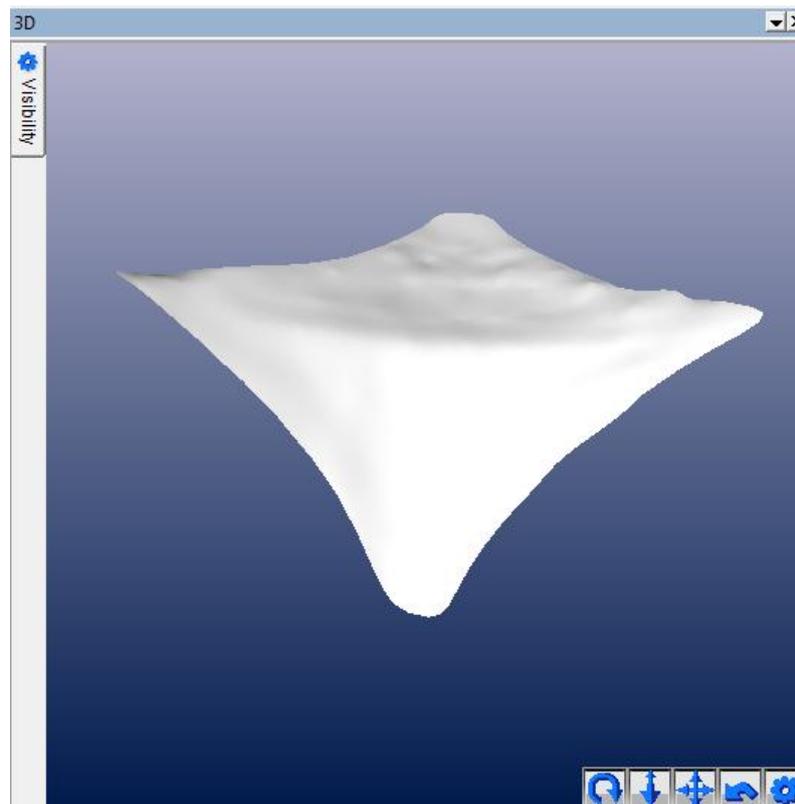


Abb. 6.3.6: Oberflächenmodell das aus der Punktwolkengenerierung abgeleitet wurde und für die Weiterverarbeitung exportiert wird.

6.4 Registrierung der Laserscanpunktvolken

Die Registrierung ist ein Prozess, bei den Punktwolken von unterschiedlichen Standpunkten in ein gemeinsames übergeordnetes Koordinatensystem überführt werden. Ausgehend davon, dass jeder Scan bei dem ersten Versuchsaufbau und jede per Script aufgenommene Scangruppe bei dem zweiten Versuchsaufbau ein eigenes Bezugskoordinatensystem besitzt und ein Vergleich mit dem photogrammetrischen Aufnahmen erfolgen soll, ergibt sich die Notwendigkeit alle Messpunkte in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu überführen. Dies wird mittels Transformation in das lokale übergeordnete Passpunktfeld, basierend auf den vier Reflexmarken durchgeführt. Unter Reflexmarken (Abbildung 6.4.1) versteht man mit Folie beschichtete Zielmarken, die einen hohen Reflexionsgrad des eingehenden Laserlichts aufweisen.

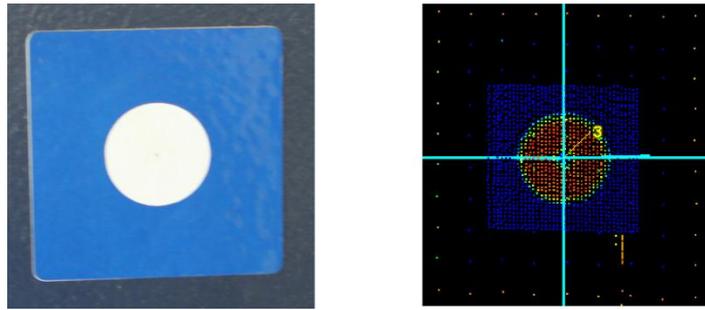


Abb. 6.4.1: Reflexmarke in der Halle auf der linken Seite und auf der rechten Seite durch einen Feinscan erfasst.

Die automatische Erkennung und Erfassung dieser Marken erfolgt mittels eines Feinscans. Dafür muss der Bereich, in dem sich die Marke befindet schon durch einen Grobscan erfasst werden. Der Feinscan bzw. die Zielerkennung erfolgt im niedrig aufgelösten Scan basierend auf der Markierung von Punkten in dem Bereich der Reflexmarken. Der Registrierungsprozess im Programm *Cyclone* berechnet die optimalen ausgleichenden Transformationsparameter für jeden einzelnen Scanstandpunkt, so dass sich die Verknüpfungspunkte und Passpunkte bestmöglich anpassen.

Wie gut diese Ausgleichung aller Standpunkte in das lokale Netz eingepasst wurde, zeigen die Fehlervektoren (x,y,z) und die mittleren Fehler in den jeweiligen Tabellen im Kapitel 5.1 und 5.2 und Anhang A. Durch die Verwendung von vier Passpunkten war eine Ausgleichung über diese vier Punkte möglich, da zur Bestimmung der sieben Transformationsparameter (je drei Rotations- und Translationsparameter sowie ein Parameter für den Maßstab) eines Scannerstandpunktes mindestens drei Passpunkte nötig sind. Das Ergebnis zeigt eine mittlere Abweichung von 1 mm bis 2 mm.

6.5 Bereinigung der Punktwolke

Wichtig bei der Bearbeitung von Scandaten ist eine Bereinigung des Datenmaterials nach der Registrierung der Punktwolken. Bei der Software *Cyclone* ist es von Vorteil, diese Bereinigung nach der Registrierung durchzuführen. Störeffekte wie z.B. Objekte außerhalb des gewollten Aufnahmeobjektes müssen entfernt werden, da diese bei der Deformationsanalyse keine Bedeutung haben. Die fehlerhaften Objekte vergrößern ansonsten unnötig die Daten.

Die Bereinigung der Punktwolke erfolgte schließlich nach der Registrierung. Durch Anwendung des Werkzeuges „Grenzlinie“ in *Cyclone* können Regionen markiert bzw.

abgrenzt werden. Nach dieser Markierung besteht die Möglichkeit, alle Punkte außerhalb oder innerhalb dieser Grenze zu eliminieren. Das Ergebnis ist das reine Schalenelement (siehe Abbildung 6.5.1).

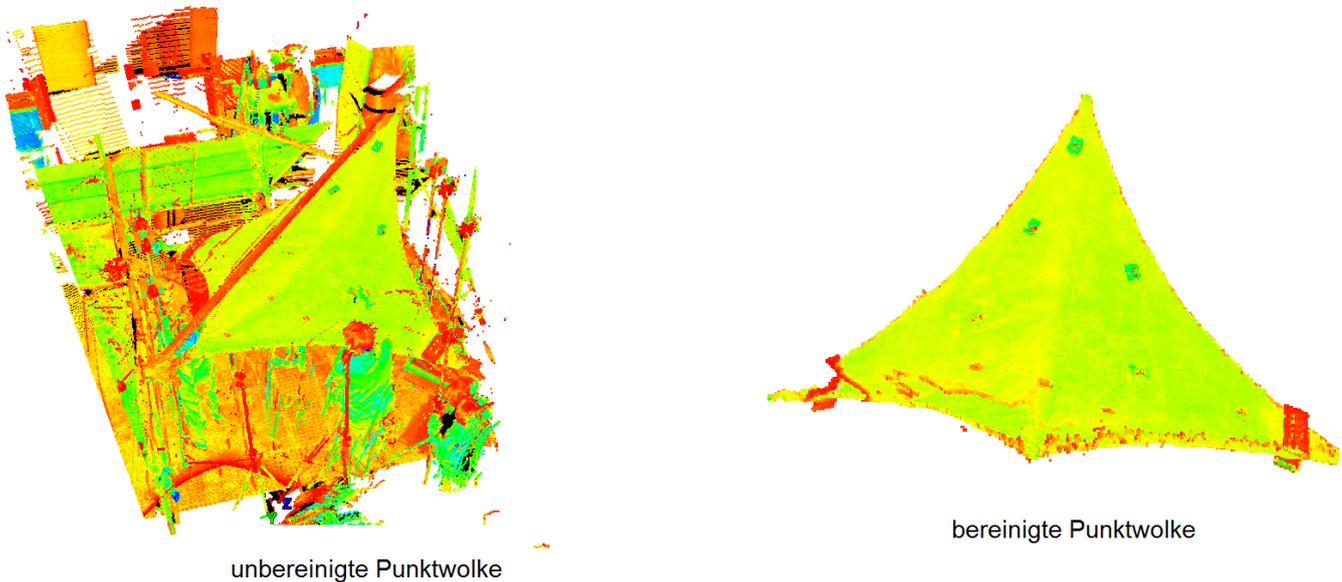


Abb. 6.5.1: Darstellung der Ausgangspunktwolke auf der linken Seite, sowie das Ergebnis der Bereinigung auf der rechten Seite.

Nach der Bereinigung wurde für jeden Zustand der Punktwolke eine ASCII formatierte Datei, die die X-, Y- und Z-Koordinaten beinhaltet, erstellt. Diese Dateien werden für die Weiterverarbeitung im Programm Geomagic Studio zur Vermaschung der Punktwolken benötigt. Die Vermaschung mittels Geomagic Studio wird im nachfolgenden Unterkapitel näher erläutert.

6.6 Erstellung Nurbsoberfläche

Nurbs-Flächen (*nicht-uniforme rationale B-Splines* Flächen) sind mathematisch definierte Kurven oder Flächen, die im Computergrafik-Bereich, beispielsweise in der CGI oder im CAD zur Modellierung beliebiger Formen, verwendet werden (Müller). Die Darstellung der Geometrieinformation erfolgt über stückweise funktional definierte Geometrielemente. Im Prinzip kann jede beliebige technisch herstellbare oder natürliche Form mit Hilfe von Nurbs dargestellt werden. Dadurch ist die Erstellung einer Nurbsoberfläche aus den gegebenen Punktwolken am sinnvollsten, da es sich bei den Schalenelementen um Freiformflächen handelt (Müller).

Die Abbildung 6.6.1 stellt die Arbeitsschritte zur Erstellung einer Nurbsoberfläche im Programm Geomagic Studio dar. Als Datengrundlage dienen die exportierten Punktwolken aus dem Programm Cyclone. Dabei ist die unterschiedliche Datengrundlage bezüglich der beiden Versuchsaufbauten zu beachten.

Während des ersten Versuches wurden die Schalenelemente mit einer hohen Auflösung und beim zweiten Versuchsaufbau aufnahmebedingt mit einer niedrigeren Auflösung aufgenommen. Bei dem ersten Versuchsaufbau bestanden die Punktwolken aus ca. zwei bis vier Millionen Punkten, während beim zweiten Versuchsaufbau bis auf den Scan der Ausgangs- und Endlage die Punktwolken aus ca. 2000 Punkten bestanden. Eine Verarbeitung von sehr großen Punktwolken, wie aus dem ersten Versuchsaufbau entstanden, stellt eine Schwierigkeit im Programm Geomagic Studio dar, da eine solche Verarbeitung einen Absturz des Programms zur Folge hatte. Eine Reduzierung der Punkte ist daher während der Einladung dieser notwendig. Zur weiteren Verarbeitung wurden die Punktwolken des ersten Versuchsaufbaus und die Feinscans der Ausgangs- und Endlage des zweiten Versuchsaufbaus auf ein Verhältnis von 50% bzw. 25% reduziert.

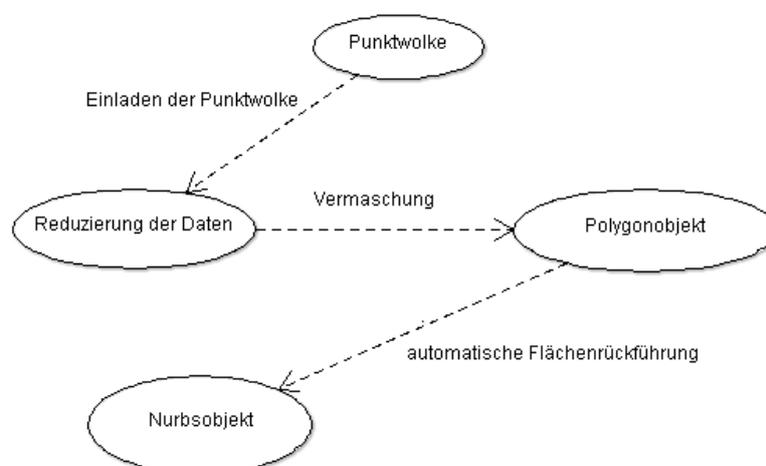


Abb. 6.6.1: Arbeitsschritte zur Erstellung einer Nurbsoberfläche aus einer Punktwolke.

Als nächster Schritt erfolgte dann die Umwandlung der Punktwolken in Polygonobjekte. Dabei wird ein Netz basierend aus den Punkten erstellt. Abbildung 6.6.2 stellt die Vermaschung der Punktwolke in ein Polygonobjekt dar.

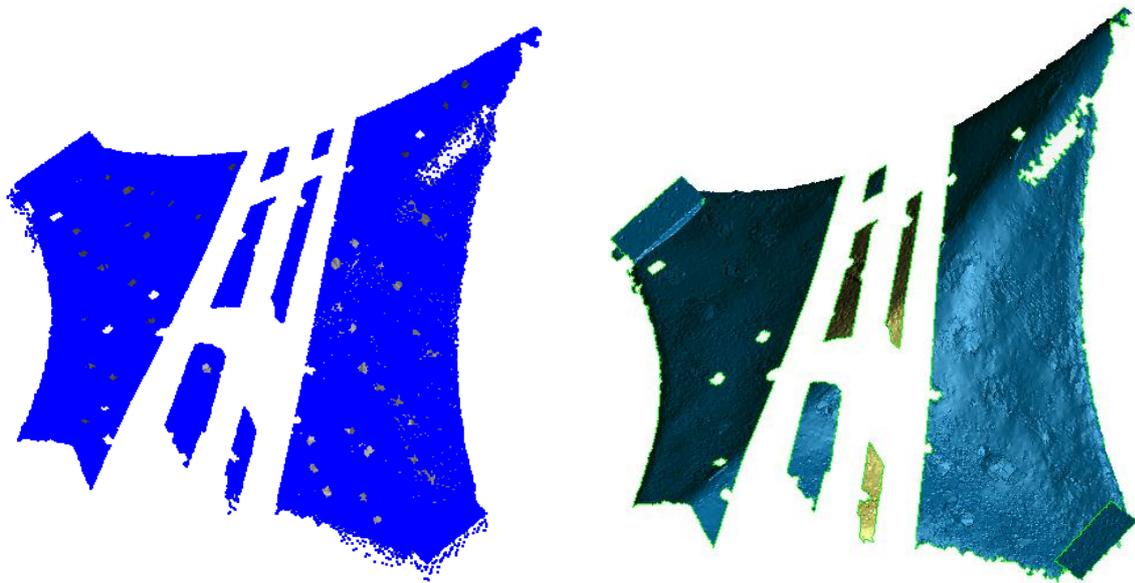


Abb. 6.6.2: Linke Seite: Darstellung der eingeladenen Punktwolke, rechte Seite: Abbildung des Polygonobjektes.

Eine Nachbearbeitung des Polygonobjektes ist in Geomagic Studio möglich. Hiermit wurden die Löcher, die bei der Vermaschung entstanden sind, im Nachhinein gefüllt. Die Füllung der Löcher erfolgte auf der Basis der Krümmung der umgebenden Dreiecke. Die Füllung der Gebiete im mittleren Bereich der Polygonobjekte erwies sich als zu ungenau, da das zu füllende Gebiet zu groß war. Nach der Erstellung und der Bearbeitung der Polygonobjekte, wurden diese mittels Geomagic in Nurbsflächen (Abbildung 6.6.3) Studio umgewandelt. Diese Objekte bestehend aus Nurbsflächen wurden dann später mittels Geomagic Qualify ausgewertet.



Abb. 6.6.3: Eine auf Nurbs basierte Rekonstruktion einer Schale.

7 Deformationsanalyse

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie aus den zuvor bearbeiteten Daten eine Deformationsanalyse erstellt wird. Dabei werden die Ergebnisse der einzelnen Aufnahmeverfahren zuerst separat betrachtet und zum Schluss miteinander verglichen.

7.1 Deformationsanalyse mit Geomagic Qualify

Für die Erfassung der Oberflächenveränderung der Schalenelemente wurde das Programm Geomagic Qualify 12 verwendet. Mit dem Programm lassen sich grafische und zum Teil numerische Vergleiche zwischen digitalen Referenzmodellen abbilden. Zur Detektion von Veränderung müssen im Programm Geomagic Qualify ein Referenzobjekt und ein Testobjekt klassifiziert werden. Diese beiden Objekte werden dann mit Hilfe des Werkzeugs „3-D-Abweichung“ miteinander verglichen. Das Werkzeug „3-D-Abweichung“ besitzt die folgenden sechs Einstellungsmerkmale:

- Abweichungstyp,
- Abweichung,
- Auflösung,
- Farbe mitteln,
- Spektrum.

Die Einstellung Abweichungstyp befasst sich mit der Art und Weise wie Deformation erfasst werden soll. Es stehen dabei die 3-D-Abweichung, die gerichtete Abweichung und Ebenenabweichung zur Verfügung. Die 3-D-Abweichung bestimmt die kürzeste Distanz des Testobjektes zu einem Punkt des Referenzobjektes. Bei der gerichteten Abweichung wird die Abweichung zwischen den beiden Objekten in einer vorgegebenen Richtung bestimmt. Bei der Ebenenabweichung wird die kürzeste Entfernung anhand einer vorgegebener Ebene ermittelt. Die Abbildung 7.1.1 soll die einzelnen Abweichungstypen aufzeigen.

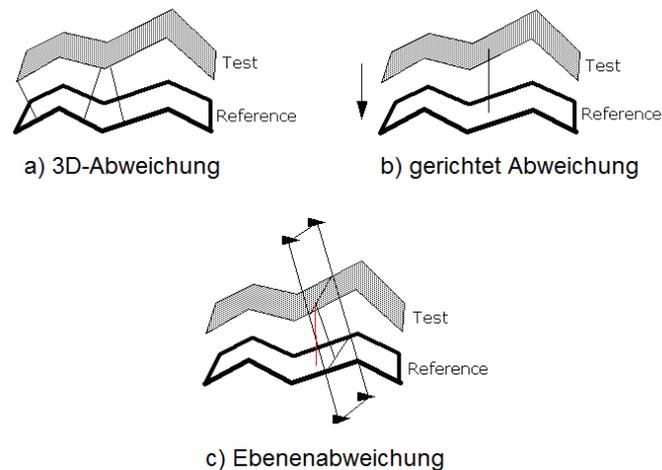


Abb. 7.1.1: Darstellung der detektierbaren Abweichungstypen in Geomagic Qualify (Qualify).

Bei dem Einstellungspunkt Abweichung kann der Bereich, in dem eine Abweichung gesucht und analysiert wird, eingestellt werden. Dabei wird zuerst der maximale Abstand bestimmt, in dem um das Referenzobjekt Punkte des Testobjektes gesucht werden. Falls Punkte des Testobjektes außerhalb dieses Bereichs liegen, werden diese bei der Analyse der 3-D-Abweichung nicht verwendet.

Ein weiterer Einstellungspunkt bei dem Einstellungsmerkmal „Abweichung“ ist der „kritische Winkel“. Dieser Wert gibt den maximalen Winkel der Normalen der einzelnen Punkte zwischen Referenz- und Testobjekt an. Der Bereich ist zwischen 0° und 180° einstellbar. Wenn der Winkel den eingestellten kritischen Wert überschreitet, wird das zu analysierende Punktepaar nicht verwendet.

Das Einstellungsmerkmal „Auflösung“ dient zur Einstellung des Vergleichsrasters, es gibt fünf Stufen zum Vergleich vor. Je feiner die Auflösung gewählt wird, desto mehr Punkte werden zum Vergleich der beiden Objekte herangezogen. In diesem Zusammenhang sei das Einstellungsmerkmal „Farbe mitteln“ erklärt. Mit dieser Option kann eingestellt werden, wie stark die umliegenden nicht verwendeten Punkt eingefärbt werden. Bei der niedrigsten Einstellung werden nur die verwendeten Punkte bezüglich der Abweichung dargestellt. Je höher die Einstellung gewählt wird, desto mehr Punkte umliegende Punkte werden eingefärbt. Das hat zur Folge, dass eine zu hohe Einstellung dieses Wertes einen Verwischeffekt wie in Abbildung 7.1.2 entstehen lässt. Die Einstellung, die für die gesamte Abweichungsanalyse verwendet wurde, wird in Anhang D sichtbar.

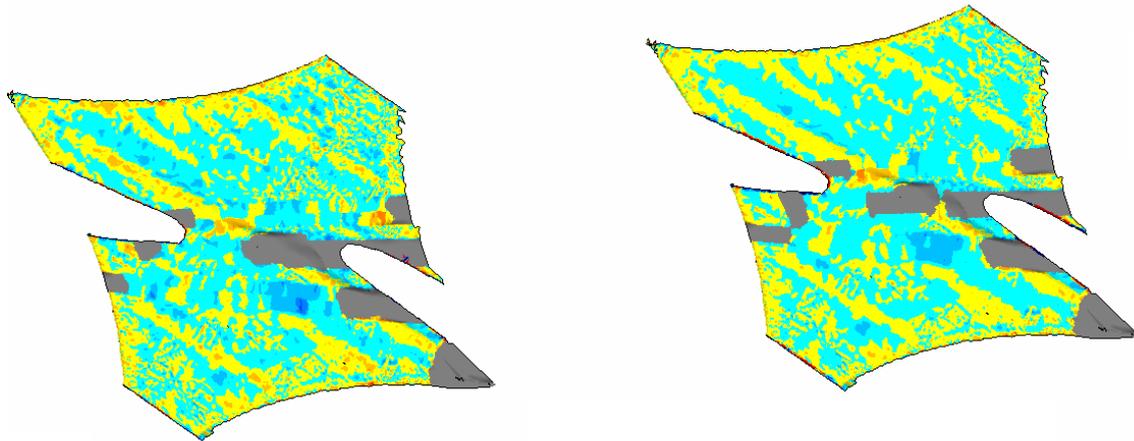


Abb. 7.1.2: Darstellung des Einflusses der Parameter „Farbe mitteln“ und „Auflösung“ auf die Visualisierung der Abweichung

7.2 Deformationsanalyse der Laserscandaten des ersten Versuchs

Bei der Deformationsanalyse der aufgenommenen Daten wird zwischen den beiden Versuchsaufbauten unterschieden. Von daher wird zum Anfang des Kapitels auf die Analyse der Deformationen im ersten Versuchsaufbau eingegangen und danach auf die Analyse der Scandaten des zweiten Versuchsaufbaus.

Wie im Kapitel 5.1 erwähnt, gab es bei dem ersten Versuchsaufbau sechs Zustände, die aufgenommen wurden. Als Referenzzustand wurde der Zustand „Gespanntes Schalenelement wurde gelockert“ verwendet. Dies würde auch dem Grundzustand im normalen Alltag entsprechen, da der erste Zustand nur zur Herstellung der Schalenträgerwerke diente. Als erstes Element wird die Membran 3 mit der feinen Perforation begutachtet. Die Abbildung 7.2.1 zeigt die Abweichungen der oberen und unteren Seite des Schalenelementes des ersten Zustandes („fest“) in Bezug auf den Referenzzustand („gelockert“). Wie man in der Abbildung erkennt, kam es nach der Lockerung der Schale aus der Verankerung zu einer Veränderung im Bereich von 0cm bis 3,8cm. Diese Abbildung kann vertretungsweise auch dazu genutzt werden, um die nicht komplette Aufnahme der unteren Seite des Schalenelementes mittels Laserscanner aufzuzeigen.

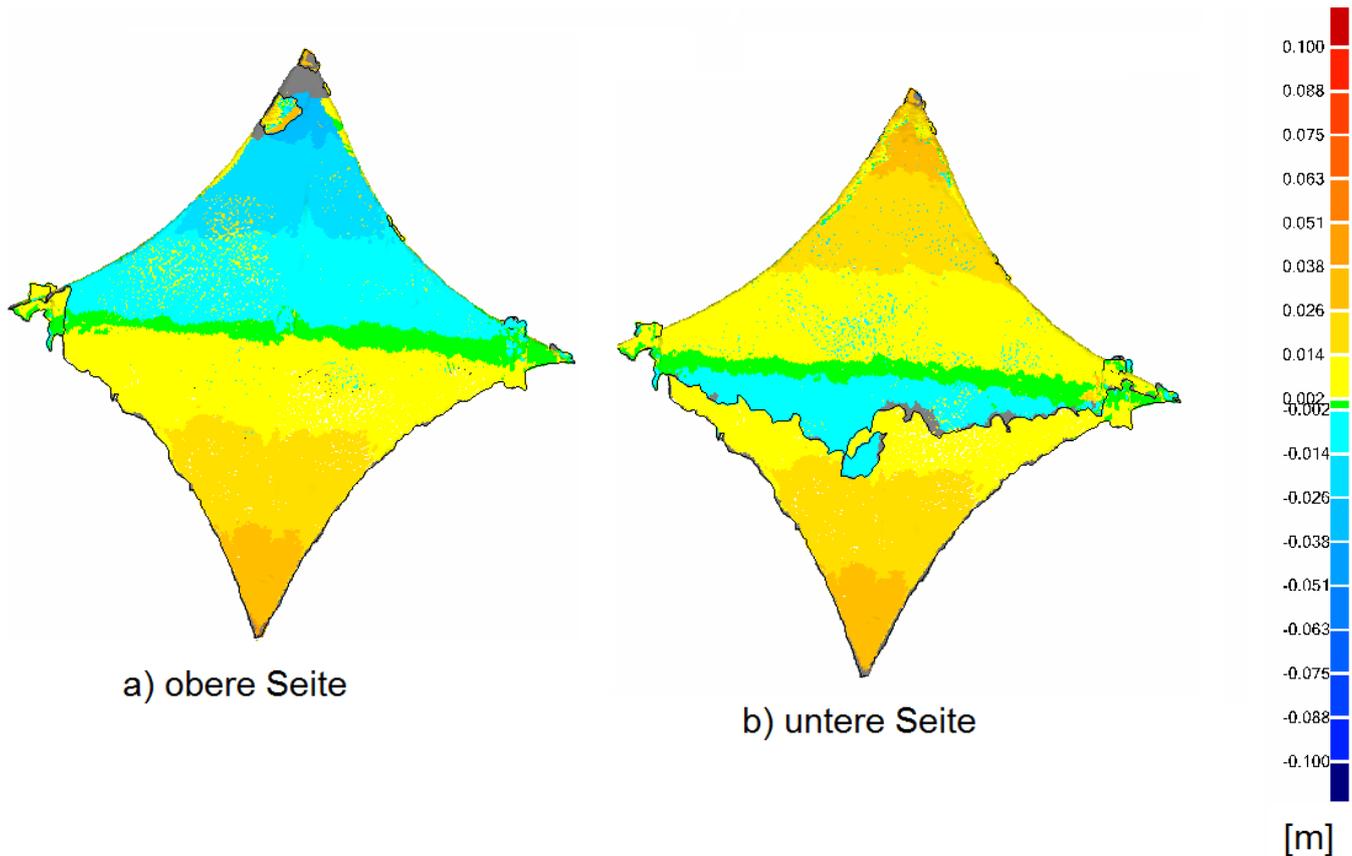


Abb. 7.2.1: Darstellung der Abweichung der gelockerten Schale gegenüber der Schale im befestigten Zustand.

Man kann in Abbildung 7.2.1.b gut die Abgrenzung des aufgenommenen Scanbereiches anhand der Grenze in der Bildmitte erkennen. Des Weiteren ist eine Veränderung der Lage sichtbar. Der hintere Teil hob sich maximal 3,8 cm und der vordere Teil des Schalenelementes sank um den gleichen Betrag.

Als nächstes werden die Scandaten des Referenzzustandes mit den Daten nach Belastung mit 74 kg miteinander verglichen. In Abbildung 7.2.2 ist gut zu erkennen, dass es nach der Gewichtsaufbringung zu einer weiteren Veränderung des Schalenelementes kam. Der hintere Bereich sank durch die Einwirkung des Gewichtes in einem Bereich von 0,002 cm bis maximal 3,8 cm. Im Gegenzug gab es eine Gegenbewegung auf der vorderen Seite des Schalenelementes im gleichen Größenbereich. Erkennbar ist auch in dieser Abbildung die Abschattung im hinteren Bereich des Schalenelementes, die aus dem Aufbringen des Gewichtes im Zentrum resultierte.

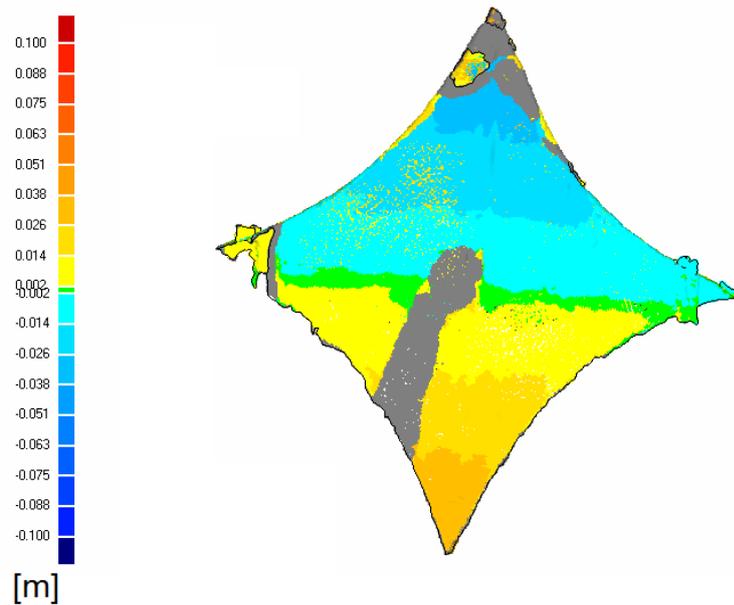


Abb. 7.2.2: Darstellung der Abweichung unter 74 kg Last.

In der Abbildung 7.2.3 wird die Abweichung der oberen Seite der Schale unter 150 kg Last gegenüber dem Referenzzustand dargestellt. Es ist eine stärkere Veränderung im vorderen und hinteren Bereich der Schale sichtbar. Der Abschattungsbereich hat sich durch das Hinzufügen von Gewichten (Zementsäcke) im Vergleich zur vorherigen Abbildung vergrößert.

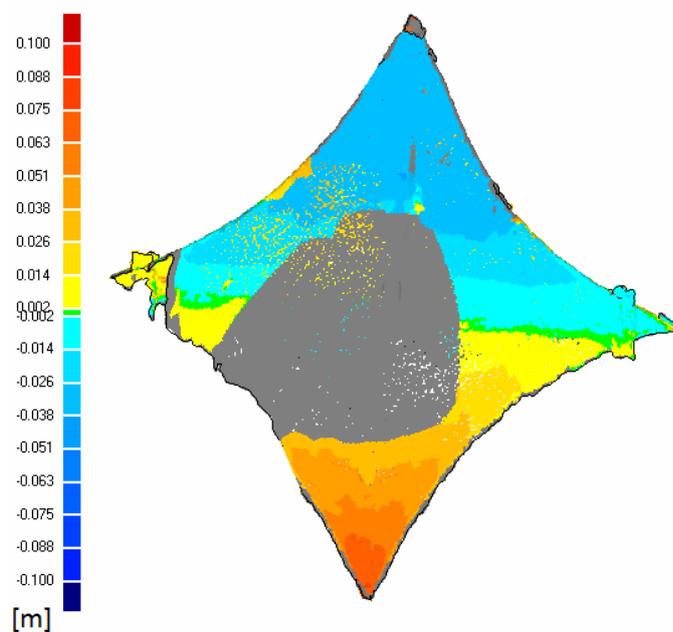


Abb. 7.2.3: Darstellung der Abweichung unter 150 kg

Als Ursache für die weitere Zunahme der Abweichung kann ein Kippen des Schalenelementes möglich sein. Die einseitige Belastung und die lockere Halterung des Schalenelementes können dafür die Ursache bilden. Vergleicht man aber den Referenzzustand mit dem Zustand bei der Belastung der Schale mit 300 kg (Abb. 7.2.4), so sieht man dort im Vergleich zum vorherigen Zustand eine Abnahme der Veränderung. Die maximale Abweichung beträgt maximal 5,1 cm bzw. -5,1 cm gegenüber 7,5 cm bzw. -6,3 cm in Abbildung 7.2.3 Ursache für diese geringere Veränderung der Schale kann eine bessere Lagerung der Gewichte sein und somit wird ein stärkeres Kippen des Schalenelementes verhindert.

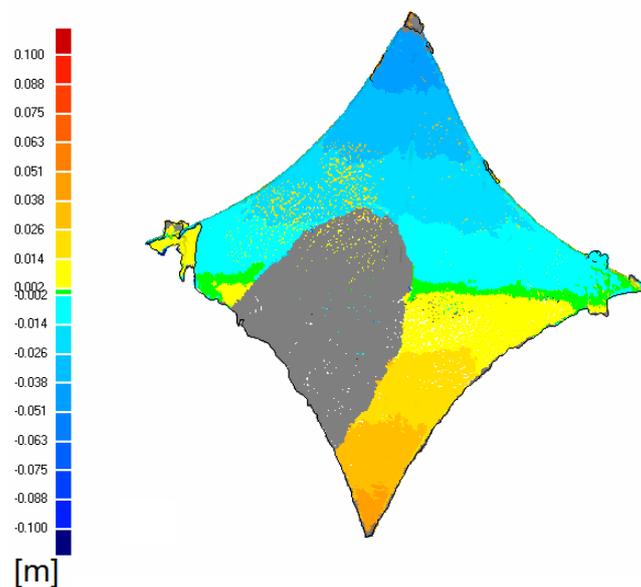


Abb. 7.2.4: Darstellung Abweichung unter 300 kg Last, es ist weiter eine abgestufte Hebung und Senkung erkennbar.

Die Abbildung 7.2.5 verdeutlicht die Abweichung zwischen Referenzzustand und einer Belastung der Schale mit 600 kg. Wie man in der Abbildung sehen kann, ist der analysierte Bereich der oberen Seite stark verkleinert. Ursache dafür ist, dass durch die höhere Belastung ein größerer Bereich mit Gewichten bestückt wurde sowie die daraus resultierenden fehlenden Daten für den vorderen Bereich der Schale. Vergleicht man die Abbildung 7.2.5 mit der Abbildung 7.2.4, so kann man in dem analysierten Bereich kaum einen Unterschied zu den Abweichungsbereichen feststellen. Wenn des Weiteren nur der mittlere Bereich der Schale verglichen wird, so ist über alle Abbildungen kaum eine Änderung erkennbar. Da die Abweichungen über alle Zustände in die gleiche Richtung zeigen und fast horizontal gegliedert sind sowie die Schale auf Metallfüßen gelagert wurde, ist ein Kippen um die Achse (grüner Bereich in den Abbildungen) sehr

wahrscheinlich. Dieser Kippeffekt ist in Anbetracht des Versuchsziels hinderlich, da sich dadurch die Krafteinwirkung und -verteilung auf das Schalenelement ändert und somit die Stabilität des Schalenelementes nicht richtig überprüft werden kann.

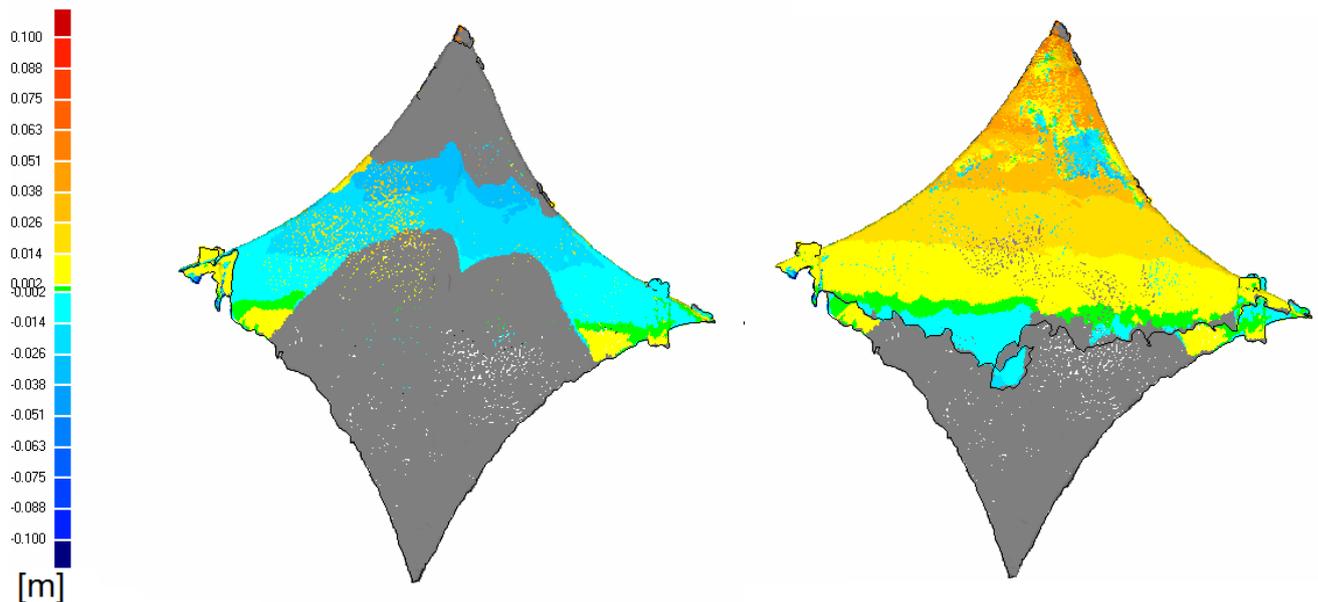


Abb. 7.2.5: Veränderung der oberen Seite(links) und der unteren Seite(rechts) des Schalenelementes bei einer Belastung mit 600 kg.

Die Tabelle 7.2.1 gibt die jeweiligen Abweichungen der einzelnen Zustände des ersten Schalenelementes an. Es ist zu beachten, dass der Wert der Standardabweichung die Standardabweichung aller Abweichungen ist und somit das Streuintervall in dem sich 68,3% aller Abweichungen befinden angibt. Die Spalte „mittlere Abweichung“ gibt die mittleren Abweichungen des positiven und negativen Bereichs an. Wie man erkennt besteht eine größere Diskrepanz zwischen den mittleren Abweichungen und den maximalen Abweichungen. Maßgeblich dafür sind punktuelle Abweichungen an den Rändern der Schalenelemente verantwortlich. Diese Problematik wird in Kapitel 7.6 noch einmal näher betrachtet.

Tabelle 7.2.1: Abweichungen des ersten Schalenelementes beim ersten Versuchsaufbau(TLS)

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standardabweichung [cm]
Fest	9,6	-6,4	1,2/-1,1	1,4
74kg	7,9	-6,6	1,5/-1,4	1,6
150kg	10,1	-10,4	2,9/-2,3	2,8
300kg	11,1	-13,3	1,9/-1,8	2,3
600kg	13,6	-7,2	3,2/-1,6	2,5

Bezogen auf die anderen beiden Schalenträgerwerke stellt sich aus der Analyse des ersten Schalenelementes die Frage, ob eine gleiche Veränderung sichtbar wird. Deshalb wird als nächstes Element das Schalenelement mit der größeren Perforation näher betrachtet werden. Die Abbildung 7.2.6 stellt dabei alle Deformationen der Oberseite des Elementes dar. Wie man in 7.2.6 erkennen kann, gab es nach der Lockerung der Schale eine große Veränderung in einem Bereich von 6,3 cm bis 7,5 cm auf der linken Hälfte sowie eine Abweichung im Bereich von maximal 5,1 cm bis 6,3 cm auf der rechten Seite des Schalenelementes. Betrachtet man die nachfolgenden Zustände, so erkennt man eine gleichmäßige Veränderung des Schalenelementes durch Gewichtszugabe bis zu den Bereichen von maximal 2,6 cm bis 3,8 cm und -2,6 cm bis -3,8 cm bei den Abbildungen b bis d. Bei der Belastung mit 74 kg (Abb. 7.2.6.b) bewegt sich die Veränderung des Schalenelementes im Bereich von 0,2 cm bis 1,4 cm auf der nicht belasteten Seite (rechts) und von -0,2 cm bis -1,4 cm auf der rechten belasteten Seite.

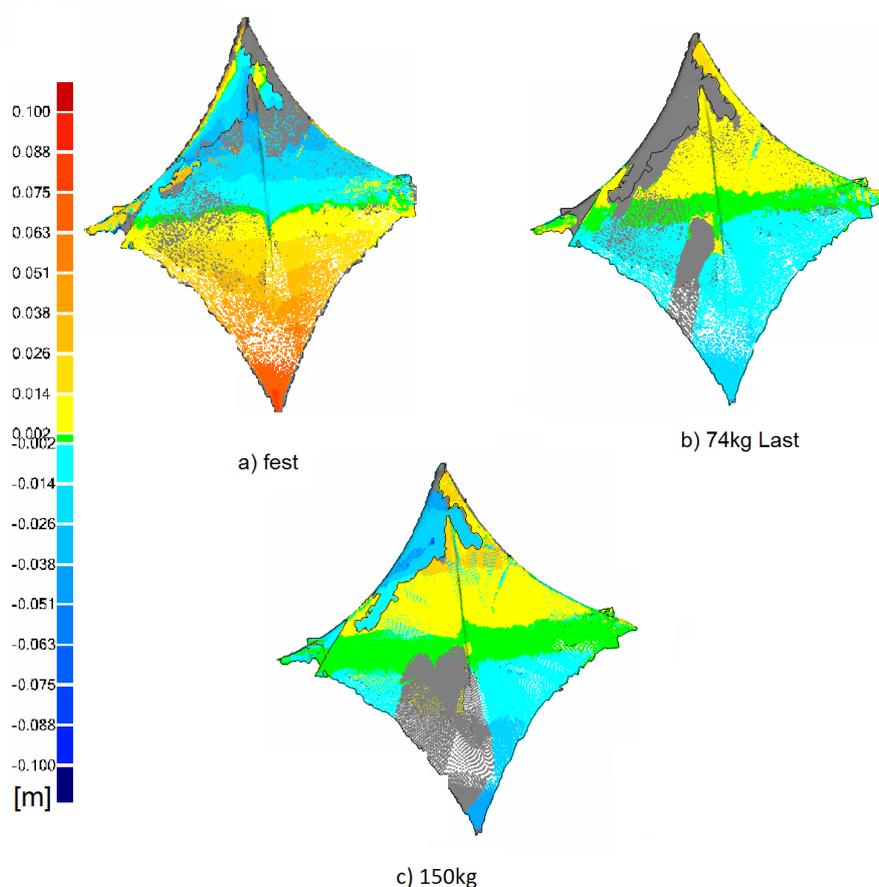


Abb. 7.2.6: Darstellung der Deformation der oberen Seite des zweiten Schalenelementes.

Bei der Belastung des Schalenelementes mit 150 kg (Abb.7.2.6.c) und 300 kg (Abb. 7.2.7.a) erkennt man Veränderungen an der äußeren rechten und linken Seite. Hier belaufen sich die Abweichungen zum Referenzzustand im Bereich von 2,6 cm bis 3,8 cm (rechts) und von -2,6 cm bis -3,8 cm (links). Eine Aufnahme der oberen Seite des Elementes war durch die Aufbringung der Gewichte und den dadurch entstandenen Abschattungsbereich nicht sinnvoll, weshalb eine umfassende Analyse dieses Zustandes nicht möglich ist (siehe Abb. 7.2.7.b).

Des Weiteren wird sichtbar, wie sich der Bereich in der Mitte des Schalenelementes mit steigender Belastung verändert und der grüne Bereich sich verringert. Als höchstwahrscheinliche Ursache für die Veränderung des Schalenelementes unter Lastzunahme kann ein Kippen des Schalenelementes um die Hauptachse (grüner Bereich) angesehen werden. Man erkennt in den Abbildungen 7.2.6 und 7.2.7, dass durch die einseitige Belastung des Elementes eine Senkung zur belasteten Seite hin auftritt.

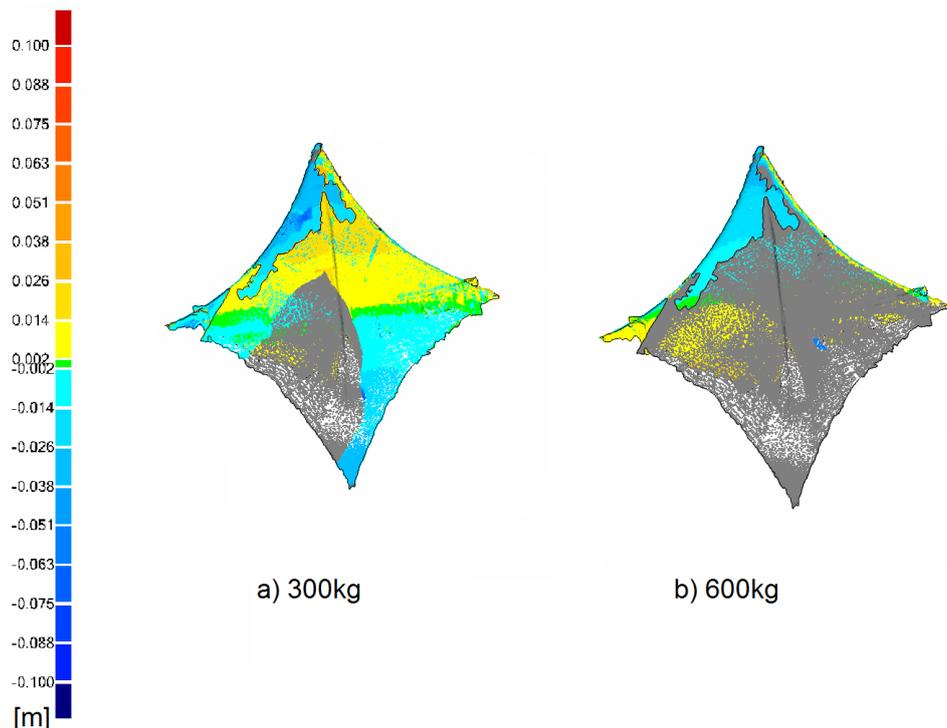


Abb. 7.2.7: Darstellung der Deformation der oberen Seite des zweiten Schalenelementes.

Nachfolgende stellt die Tabelle 7.2.2 die jeweiligen Abweichungen des zweiten Schalenelementes dar. Es zeigen sich wie beim ersten Schalenelemente starke Ausschläge im oberen und unteren Bereich bei den maximalen Abweichungen.

Tabelle 7.2.2: *Abweichungen des zweiten Schalenelementes beim ersten Versuchsaufbau(TLS)*

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standardabweichung [cm]
Fest	13,3	-8,6	2,9/-1,6	2,6
74kg	7,9	-9,8	0,6/-0,7	1,0
150kg	10,0	-11,7	1,3/-1,8	1,8
300kg	10,6	-11,8	1,4/-1,6	2,1
600kg	8,1	-8,8	0,7/-2,1	2,3

Zum Abschluss der Betrachtung der Laserscandaten des ersten Versuchsaufbaus wird das Schalenelement mit durchgängiger Membran begutachtet. Das Schalenelement besitzt im Gegensatz zu den anderen beiden Elementen eine durchgängige Membran, die eine Verzahnung des Betons verhindert.

Die Veränderungen des Schalenelementes sind im Vergleich zu den anderen beiden Schalenelementen geringfügiger unter dem Einfluss von Last. Das kann man gut in den Abbildungen 7.2.8.b bis d erkennen. Die maximalen Abweichungen zum Referenzzustand („gelockert“) befinden sich in den Bereichen von maximal 0,2 cm bis 1,4 cm und -0,2 cm bis -1,4 cm. Insbesondere fällt auf, dass der grüne Bereich, der den Bereich ohne Abweichung vom Sollzustand beschreibt, in den Belastungszuständen mit 150 kg und 300 kg stark ausgeprägt ist. Außerdem erkennt man in den beiden Zuständen, dass sich das Schalenelement wieder auf die Seite der Last senkt, bei Abb. 7.2.8.c rechte Seite und bei Abb. 7.2.8.d die linke Seite und wahrscheinlich eine Kippbewegung ausführt.

Verglichen mit der Veränderung des Schalenelementes unter 150 kg und 300 kg ist die Deformation des Elementes unter 74 kg Last divergent zu den vorherigen Beobachtungen. Man stellt in Abbildung 7.2.8.b fest, dass sich fast die gesamte Schale in den Bereich von maximal -1,4 cm senkt. Die große positive Abweichung in der Mitte des Elementes ist auf die Last zurückzuführen.

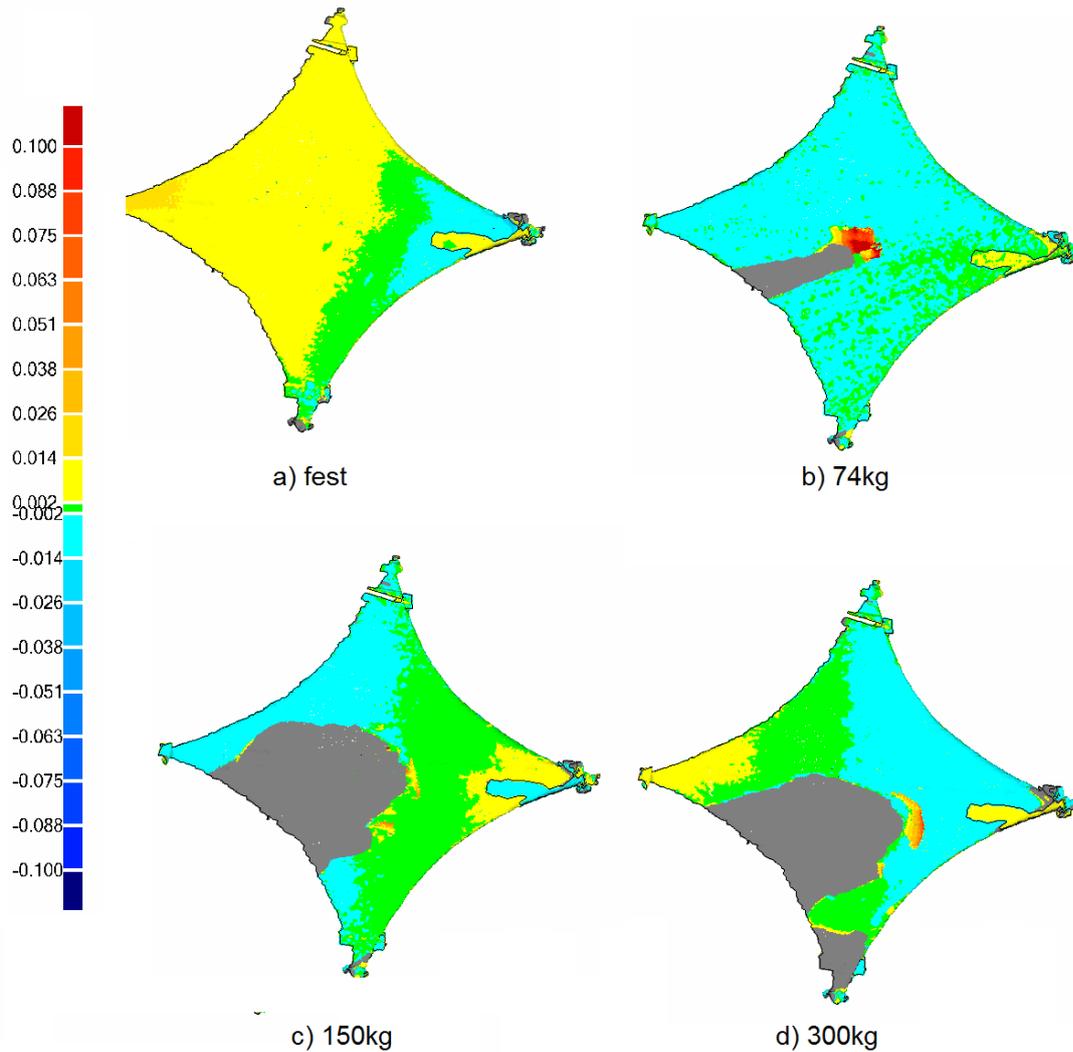


Abb. 7.2.8: Abweichungen des dritten Schalelementes gegenüber dem Referenzzustand.

Zum Abschluß stellt die Tabelle 7.1.3 eine Übersicht über die maximalen, minimalen und mittleren Abweichungen sowie der Standardabweichung dar. Die Abbildungen der unteren Seiten der Schalelemente sind im Anhang D zu finden. In diesen Abbildungen ist sichtbar, dass sich die unteren Seiten analog zu den oberen Seiten der Schalelemente verhalten.

Tabelle 7.2.3: Abweichungen des dritten Schalelementes beim ersten Versuchsaufbau(TLS)

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standardabweichung [cm]
Fest	11,0	-8,6	2,8/-1,4	2,6
74kg	16,1	-9,8	0,6/-0,7	1,0
150kg	10,0	-10,0	1,4/-1,7	1,5
300kg	7,9	-8,8	1,4/-1,6	1,8

7.3 Deformationsanalyse der Laserscandaten des zweiten Versuchsaufbaus

Die Deformationsanalyse der Schalenelemente während des zweiten Versuchsaufbaus wird ausschnittsweise erfolgen. Insbesondere bei dem ersten und dritten Schalenelement werden nicht alle Zustände in dieser Arbeit näher betrachtet, da zwischen den einzelnen Zuständen des Elementes nur sehr geringfügige Änderungen sichtbar sind. Dieser Aspekt wird später in diesem Kapitel noch näher betrachtet. Die Protokolle der Auswertung aller Zustände befinden sich auf der mitgelieferten DVD. Als Referenz-/ Sollzustand wird ein Scan jedes Schalenelementes vor der Krafteinwirkung der Hydraulikpresse verwendet. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, existieren für das erste Schalenelement 17, für das zweite 3 und für das dritte 15 Zustände.

Das erste Schalenelement, das analysiert werden soll, ist das Schalenelement 1 mit der größeren Perforierung. Es werden wie bei der Analyse des ersten Versuchsaufbaus Deformationen, die kleiner beziehungsweise größer als -2 mm und 2 mm sind, als Abweichungen detektiert. Alle Werte, die innerhalb dieses Bereiches liegen, werden grün eingefärbt und als keine Veränderung gegenüber dem Referenzzustand angesehen.

Die Abbildung 7.3.1 stellt die Abweichungen des ersten Schalenelementes nach dem ersten Scandurchgang gegenüber dem Referenzzustand dar. Eine große Abweichung ist dabei nicht erkennbar. Großflächige Bereiche der Schalen sind grün eingefärbt und zeigen keine signifikanten Abweichungen gegenüber dem Referenzzustand an. Weiterhin befinden sich die Senkungen größtenteils in dem Bereich von $0,2\text{ cm}$ bis $0,4\text{ cm}$ sowie die Hebungen im Bereich von $0,2\text{ cm}$ bis $0,8\text{ cm}$.

Wie im Vorhinein erwähnt, werden nicht alle Zustände separat untersucht. Aus diesem Grund sollen als Nächstes die Zustände 6 und 7 (Abb. 7.3.2) der Aufnahmeserie genauer betrachtet werden. Im Gegensatz zum ersten Zustand kam es zu einer Senkung der Schale beim Zustand 6 (Abb. 7.3.2.a) um $0,2\text{ cm}$ bis $0,4\text{ cm}$. Trotzdem ist immer noch ein signifikanter Anteil an Bereichen (grün) vorhanden, die keine Änderungen zum Referenzzustand aufweisen.

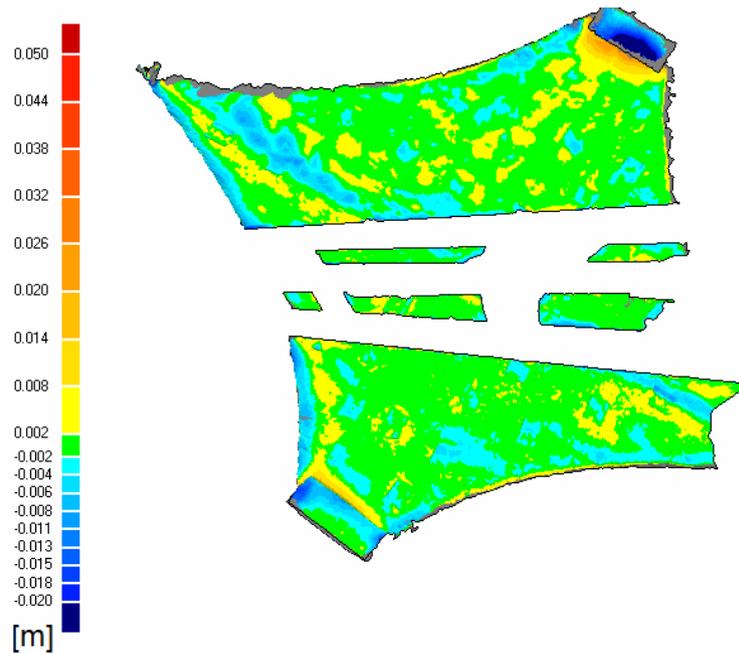


Abb. 7.3.1 : Abweichung des ersten Scans zum Referenzzustand des ersten Schalelementes.

Die Schale weist in der Abbildung 7.3.2.b eine weitere leichte Senkung im Bereich von 0,2 cm bis 0,4 cm auf. Vergleicht man die Zustände 6 und 7 untereinander, so sind geringfügige Änderungen bei der Abweichung gegenüber dem Referenzzustand erkennbar. Daher erfolgt keine komplette Analyse jedes einzelnen Zustandes. Eine Analyse von einzelnen Zuständen, die den Deformationsverlauf aussagekräftig darstellen, ist ausreichend.

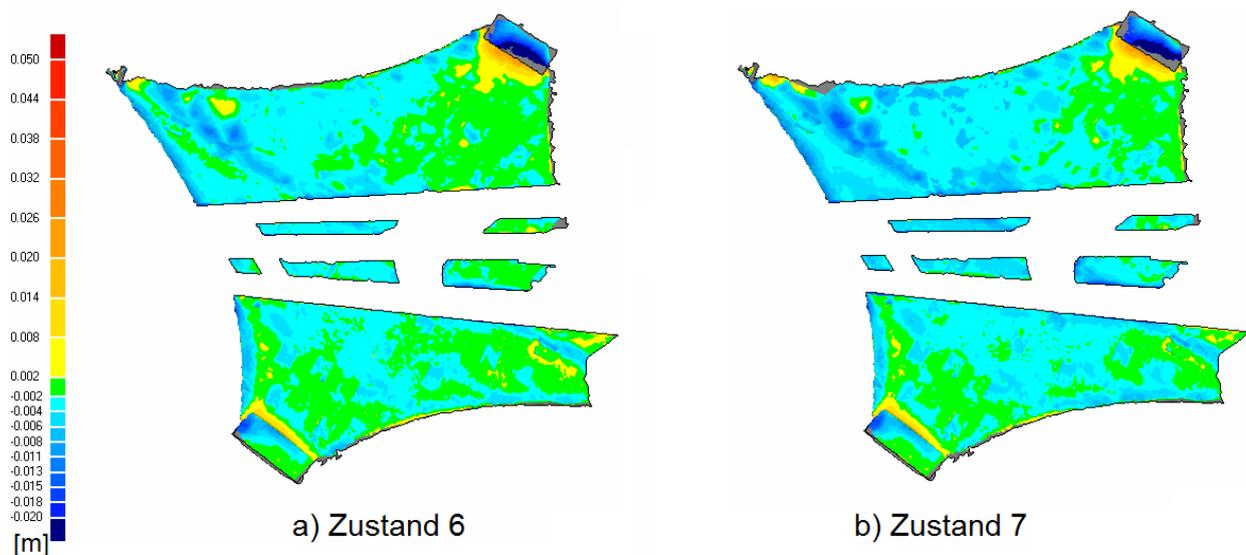


Abb. 7.3.2: Darstellung der Abweichungen des Zustandes 6 und 7, dabei sind nur leichte Unterschiede in 1-2mm Bereich erkennbar.

Als Nächstes wird der Zustand 11 (Abb. 7.3.3) betrachtet. Es erfolgte durch die weitere Krafteinwirkung eine weitere Senkung des Elementes. Die Abweichungen betragen bis zu 1,8 cm gegenüber dem Referenzzustand. Außerdem ist eine stärkere Senkung der Hauptachse (schwarze Gerade in Abb. 7.3.3) der Schale gegenüber den anderen Bereichen sichtbar. Minimale Veränderungen bis keine Veränderung gab es im oberen und unteren Bereich des Schalenelementes.

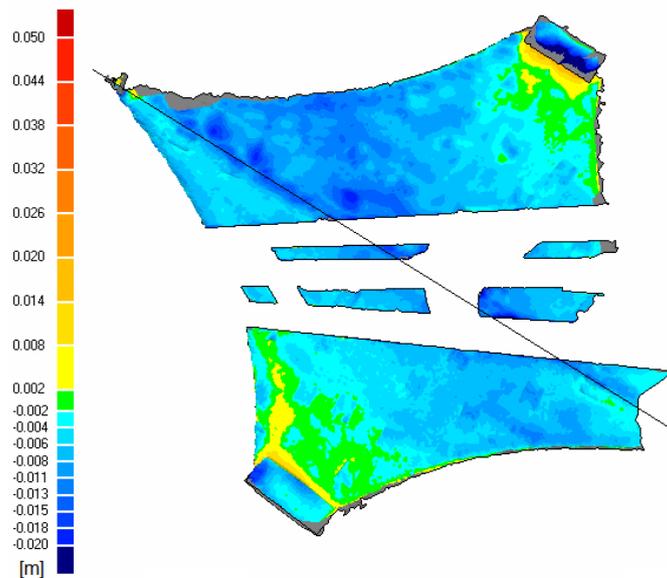


Abb. 7.3.3: Bei der Darstellung der Abweichungen des elften Zustands ergibt sich eine Senkung der Schale mit unterschiedlicher Stärke. Die größten Abweichungen befinden sich entlang der Hauptachse.

Der 16. Zustand (Abb. 7.3.4) ist der letzte komplett erfasste Zustand, bevor das Schalenelement unter dem Krafteinfluss der Hydraulikpresse gebrochen ist. Wie schon bei den vorherigen Zuständen kam es zu einer kaum messbaren bzw. keiner Veränderung der Schalen im oberen und unteren Bereich der Metallhalterung des Elementes. Im Gegensatz zur Abb. 7.3.3. ist eine sichtbare Senkung im mittleren Bereich des Elementes vorhanden. Im Vergleich zum Referenzzustand hat sich die Schale bis zu 5,1 cm gesenkt. In der Abfolge der einzelnen Zustände wird somit eine kontinuierliche Senkung(bis auf den oberen und unteren Bereich) der Schale aufgezeigt.

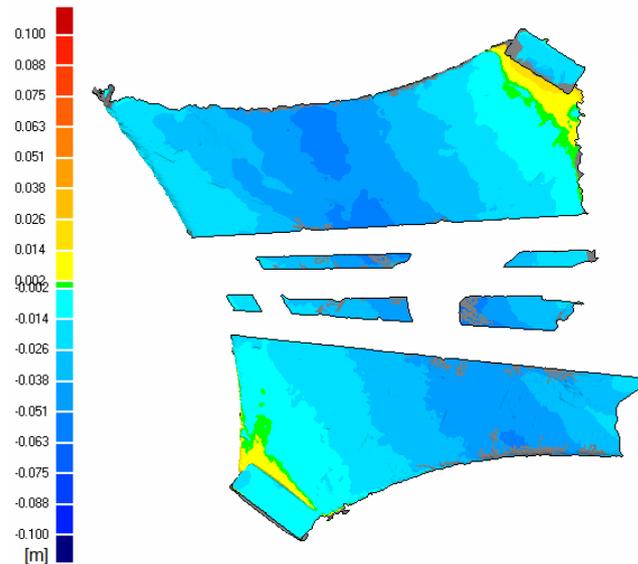


Abb. 7.3.4: Weitere Senkung der Schale ist bei der Darstellung der Abweichungen des Zustandes 16 erkennbar.

Zum Schluss der Betrachtung des ersten Schalenelementes wird die Abweichung des Feinscans der Endlage (Abb. 7.3.5) zum Referenzzustand erfolgen. Die Abweichungen betragen maximal -5,1 cm. Es ist auch eine deutlichere Differenzierung der gesenkten Bereiche gegenüber den vorherigen Zuständen möglich. Ursache hierfür ist die erreichte Punktdichte des Feinscans (ca. 1,5 Millionen Punkte) gegenüber der groben Punktdichte (2000) während des Versuchsablaufes. Entspannungserscheinungen nach dem Bruch der Schale sind nicht erfassbar.

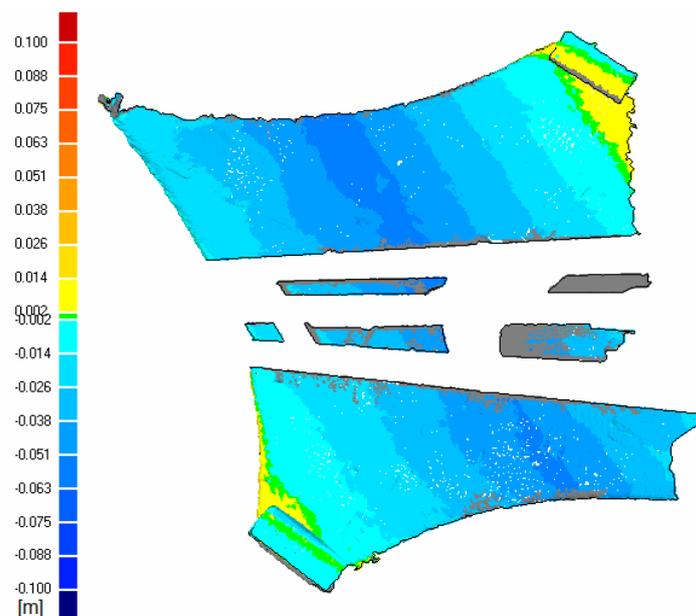


Abb. 7.3.5: Abweichungen des ersten Schalenelementes in der Endlage, es sind deutliche Senkbewegungen der Schale erkennbar.

Die nachfolgende Tabelle stellt die minimalen, maximalen und mittlere Abweichungen der einzelnen Zustände gegenüber dem Referenzzustand dar. Es sind wieder große Ausreißer der oberen und unteren Abweichungen wie bei den Abweichungen des ersten Versuchsaufbaues sichtbar. Weiterhin kann am Wert „mittlere Abweichung“ die Veränderung des Schalenelementes verfolgt werden. Es ist gerade bei der mittleren negativen Abweichung eine Steigerung sichtbar.

Tabelle 7.3.1: *Abweichungen des ersten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau(TLS)*

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standardabweichung [cm]
1	9,6	-7,8	1,0/-1,0	0,4
6	10,2	-8,2	1,6/-1,0	1,1
7	12,2	-9,4	1,5/-1,2	1,2
11	8,4	-8,6	1,3/-1,4	1,5
16	9,6	-12,2	1,7/-3,4	2,8
Endlage	7,9	-8,8	1,6/-3,4	2,7

Das zweite Schalenelement bestand aus der durchgehenden Membran. Diese erwies sich als die instabilste bei dem zweiten Versuchsaufbau. Innerhalb des zweiten Scandurchganges brach das Schalenelement. Dieser Bruch befand sich im unteren Bereich des Elementes und ist gut an der Senkung um bis zu 2 cm gegenüber dem ersten Zustand (Vergleich Abbildung 7.3.6.a und b) des Schalenelementes beim zweiten Zustand erkennbar.

Weiterhin wird eine Entspannungserscheinung des Elementes zwischen beiden Zuständen sichtbar. Während sich bei Zustand 1 noch die Spitze des Elementes auf der linken Seite im Bereich bis maximal 1,4 cm hebt, so ist nach dem Bruch der Schale eine Senkung in den Bereich bis 1,4 cm sichtbar. Ursache für diese Senkung ist der Bruch des Elementes und der daraus nicht mehr erfolgenden Kraftausgleich über das gesamte Schalenelement hinweg. In der Abbildung 7.3.6.c ist der Vergleich des Feinscans des Endzustandes gegenüber dem Referenzzustand verdeutlicht. Im Bereich des Bruches auf der unteren Hälfte des Schalenelementes ist eine Abweichung von bis zu -3,8 cm gegenüber dem Referenzmodell zu erkennen. Es zeigt sich auch eine sichtbare Senkung des Schalenelementes von ca. 2 cm im oberen Bereich.

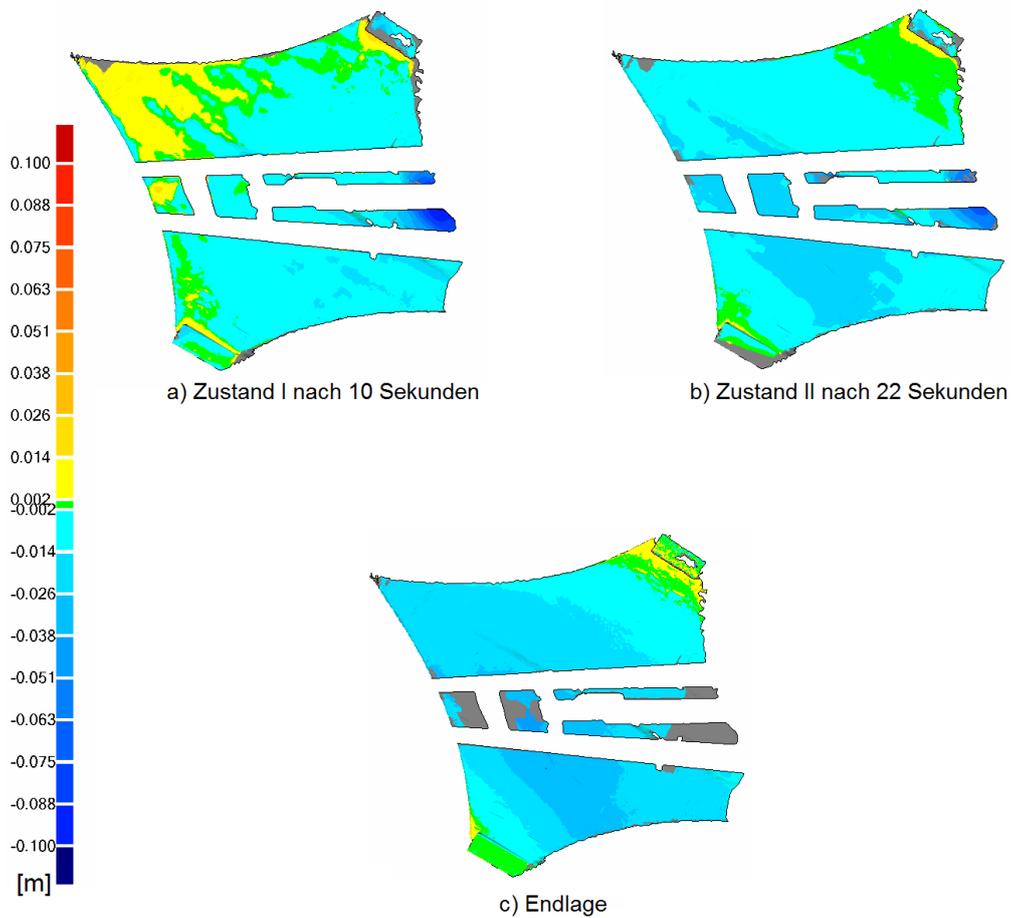


Abb. 7.3.6: Darstellungen der Abweichungen des zweiten Zustandes gegenüber dem Referenzzustand.

Die Tabelle 7.3.2 gibt die jeweiligen Abweichungen der drei Zustände an. Basierend auf den Wert „mittlere Abweichung“ ist die in den Abbildungen die dargestellte Veränderung der Schale nachvollziehbar.

Tabelle 7.3.2: Abweichungen des dritten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau(TLS)

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standardabweichung [cm]
1	9,7	-12,1	1,0/-1,0	1,6
2	9,6	-12,1	1,7/-1,4	1,8
Endlage	8,1	-7,4	0,6/-1,7	1,4

Der Belastungstest und die daraus folgenden Deformationen des dritten Schalenelementes werden nachfolgend aufgezeigt. Zu Beginn der Krafteinwirkung durch die Presse war kaum eine Abweichung des Zustandes gegenüber dem Referenzzustand sichtbar (Vgl. Abb. 7.3.7). Wie man in der Abbildung erkennen kann, ist der grüne Bereich, der keine Abweichungen gegenüber dem Referenzzustand signalisiert, großflächig über das Schalentragwerk verteilt. Die hellblauen und gelben Bereiche deuten auf Abweichungen bis $\pm 1,4$ cm hin. Es ist aber eher davon auszugehen, dass sich die Abweichungen in den unteren Bereichen der jeweiligen Einteilungsbereiche befinden.

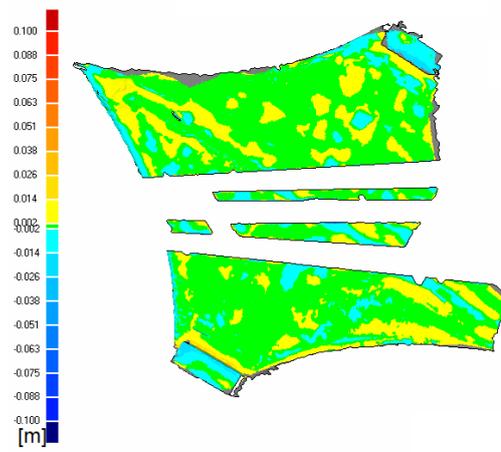


Abb. 7.3.7: *Abweichungen des ersten Zustandes gegenüber dem Referenzzustand.*

Gegenüber dem ersten Zustand ist eine Veränderung des Schalenelementes bei dem zweiten Scan nach ca. 22 Sekunden sichtbar. Es kommt zu einer großflächigen Senkung des Elementes bis zu 1,4 cm. Außerdem ist eine Anhebung der rechten Seite bis zu einer Größenordnung von 1,4 cm in der Abbildung 7.3.8 erkennbar.

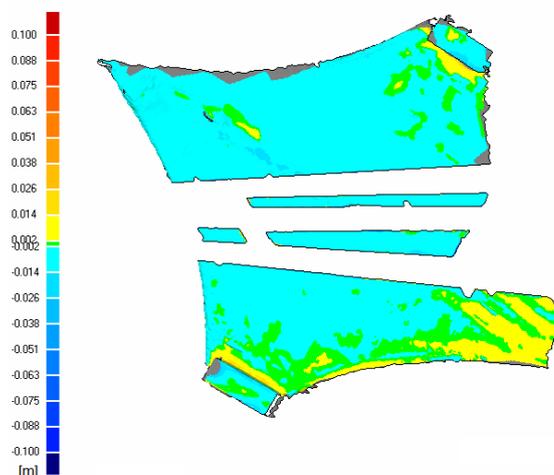


Abb. 7.3.8: *Beginnende großflächige Senkung der Schale sowie Hebung der rechten Seite.*

Als nächster Zustand soll der Zustand 10 genauer betrachtet werden, da hier eine stärkere deutliche Veränderung gegenüber dem Referenzzustand und dem Zustand 5 sichtbar ist. Man erkennt, dass die Hebung der rechten Seite des Schalenelementes noch immer maximal 1,4 cm beträgt. Dafür ist eine Senkung von bis zu 5,1 cm des Elementes in der Mitte wahrnehmbar. In diesem Bereich liegt der Bohrkern auf, der die Kraft der Hydraulikpresse auf das Schalenelement überträgt. Zusätzlich ist eine abgestufte Senkung des Schalenelementes ausgehend vom mittleren Bereich (Bohrkern) erkennbar.

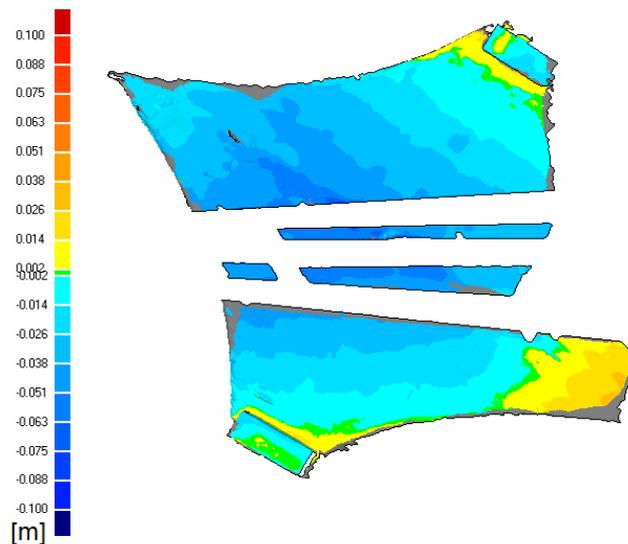


Abb. 7.3.9: *Abweichungen des zehnten Zustandes, es sind größere Differenzen im mittleren Bereich der Schale vorhanden.*

Der 14. Zustand (Abb. 7.3.10) ist der letzte erfasste Zustand, in dem das Schalenelement noch nicht unter der Last der Hydraulikpresse gebrochen ist. Durch weitere Krafteinwirkung kam es zu einer weiteren Senkung der Schale im mittleren Bereich. Hier betrug die Differenz gegenüber dem Referenzzustand maximal 8,8 cm. Wie schon im Zustand 10 ist eine abgestufte Senkung des Schalenelementes ausgehend vom Krafteinwirkungsbereich zu erkennen. Weiterhin kommt es zu einer stärkeren Hebung der rechten Seite des Elementes. Hier betragen die Abweichungen gegenüber dem Referenzzustand bis 5,1 cm. Es ist eine ganzheitliche Deformation des Schalentragerwerkes sichtbar. Insbesondere durch die Krafteinwirkung in der Mitte ist eine einseitige Hebung der Schalen detektiert.

Zum Schluss soll die Abweichung des Endzustandes (Abb. 3.7.11) gegenüber dem Referenzzustand betrachtet werden. Im Vergleich zum vorherigen Zustand 14 ist eine weitere Senkung um 10 cm und mehr gegenüber dem Referenzzustand in der Mitte des

Elementes erkennbar. Es erfolgt daraus auch eine stärkere Abstufung der Senkung von der Mitte ausgehend zum Randbereich des Elementes. Darüber hinaus kam es zu einer Hebung der linken äußeren Seite um 1,4 cm bis 2,8 cm. Ursache dieser Hebung ist der Bruch der Schale in der Mitte und die daraus resultierende Kraftverteilung.

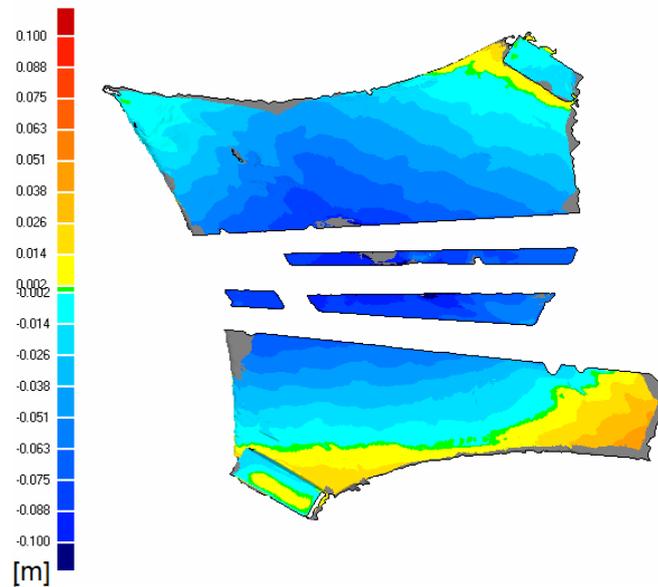


Abb. 7.3.10: *Starke Senkung im Bereich des Bohrkerne beim 14ten Zustand.*

Die Kraft wirkt hierbei auf die rechte Seite der linken Hälften der Schale, die durch den Bruch von deren eigener Hälfte der Schale getrennt ist. Diese Krafteinwirkung führt zu einer Senkung der rechten Seite und als Gegenreaktion zu einer Hebung der linken Seite der linken Schalenhälfte.

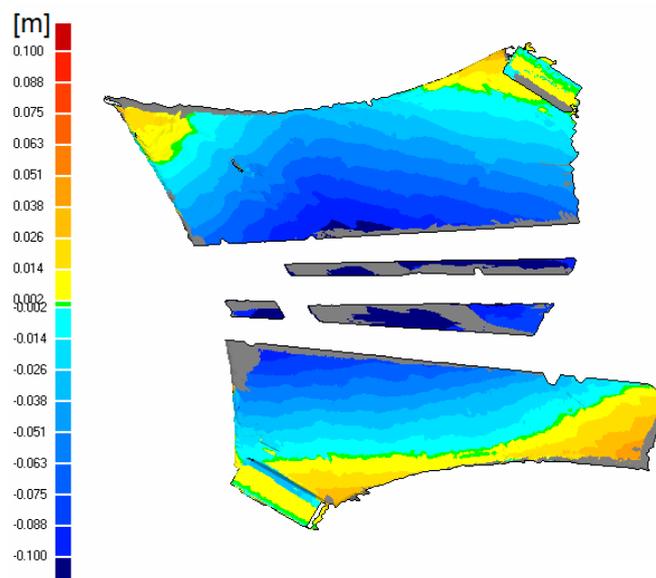


Abb. 7.3.11: *In der Endlage sind Hebungen an der rechten sowie linken Seite des Schalenelementes sichtbar, weiterhin kam zu einer stärkeren Senkung des mittleren Bereichs.*

Wie in den vorherigen Statistiken der Auswertung der Ergebnisse, ist auch die Differenz bei den maximalen oberen und unteren Abweichungen gegenüber den mittleren Abweichungen deutlich (Vgl. Tabelle 7.3.3). Jedoch ist die Veränderung der Schale wieder anhand der mittleren Abweichung erkennbar. Abschließend lässt sich sagen, dass beim zweiten Versuchsaufbau die Veränderungen der Schalen auch mit Hilfe der Statistiken nachvollziehbar sind.

Tabelle 7.3.3: *Abweichungen des dritten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau(TLS)*

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standard- abweichung [cm]
1	9,2	-8,5	0,9/-1,1	2,2
2	10,1	-9,2	1,3/-1,3	2,2
10	8,7	-10,4	1,0/-2,2	2,2
14	9,7	-12,2	1,6/-3,8	3,4
Endlage	11,6	-12,2	1,8/-3,9	3,9

7.4 Auswertung photogrammetrische Daten des ersten Versuchsaufbaus

In diesem Kapitel werden die photogrammetrisch aufgenommenen und weiterverarbeiteten Daten des ersten Versuchsaufbaus näher analysiert. Als Soll- bzw. als Referenzzustand dient wieder der Zustand, in dem das Segel gelockert gelagert wurde. Da eine Genauigkeit, basierend auf der Versuchsanordnung, von 1,5 mm erreicht wird, wird erst ab einem Wert von -1,5 mm bzw. 1,5 mm detektiert. Weiterhin besteht die Frage, ob eine gleiche Deformation der Schalenelemente wie in Kapitel 7.2 detektiert wird.

Zu Beginn erfolgt die Deformationsanalyse des ersten Schalenelementes. Als erster Zustand wird die Belastung der Schale mit einem Gewicht von 74 kg (Abbildung 7.4.1) betrachtet. Es ist eine deutliche Veränderung der oberen und unteren Hälfte des Elementes sichtbar. Während sich die obere Hälfte der Schale um bis 3,3 cm senkt, erfährt die untere Hälfte eine Hebung in der gleichen Größenordnung. Es ist eine Zunahme der Senkung und Hebung der Schale von der Mitte zur oberen und unteren Hälfte erkennbar.

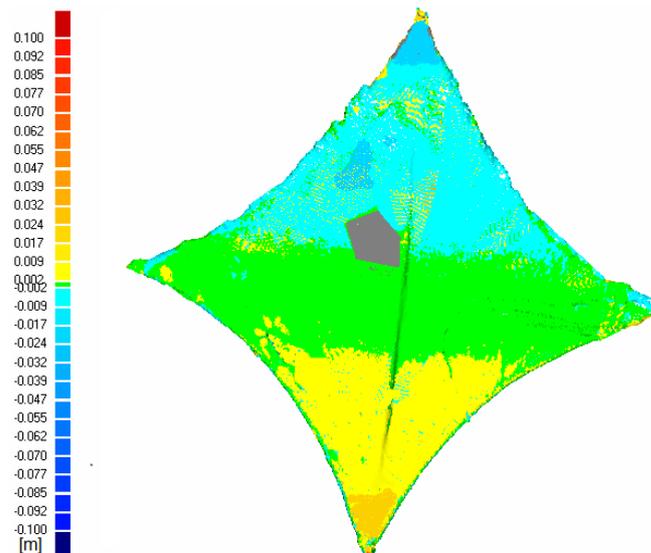


Abb. 7.4.1: *Darstellung der Abweichungen des Schalenelementes unter der Krafteinwirkung von 74 kg.*

Bei der Belastung des Schalenelementes mit 150 kg (Abbildung 7.4.2) ist die gleiche Reaktion des Schalenelementes wie bei 74 kg zu beobachten. Die durch das Gewicht belastete Hälfte, hier die obere, erlebt eine maximale Senkung von bis zu 3,9 cm. Als gegenläufige Reaktion wird eine Hebung der Schale im unteren Bereich bis zu 3,9 cm sichtbar. Außerdem sind die gestaffelte Abgrenzung der einzelnen Bereiche von der Mitte ausgehend zum Rand und ein Kippen der Schale erkennbar.

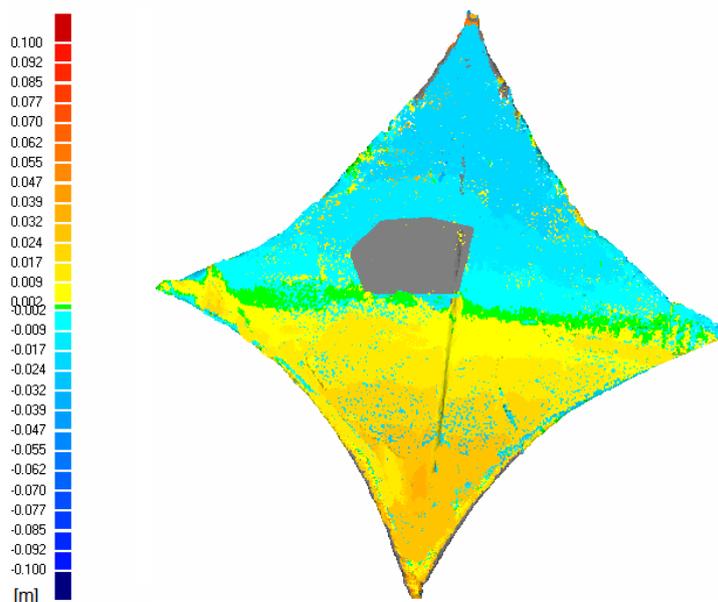


Abb. 7.4.2: *Abweichungen der Schale unter Belastung von 150 kg im Vergleich zum Referenzzustand.*

Eine weitere Kippbewegung der Schale ist auch unter der Belastung mit 300 kg in Abbildung 7.4.3. erkennbar. Basierend auf dieser Kippbewegung ist, wie schon in den vorherigen Beobachtungen, eine horizontale Staffelung der Abweichungen ausgehend von der Mitte sichtbar. Die Belastung der Schale mit dem Gewicht fand auf der oberen Hälfte der Schale statt. In dieser Hälfte ist daraus resultierend eine Senkung bis 4 cm am äußeren Randbereich sichtbar. In derselben Größenordnung kommt es in der unteren Hälfte der Schale zu einer Hebung.

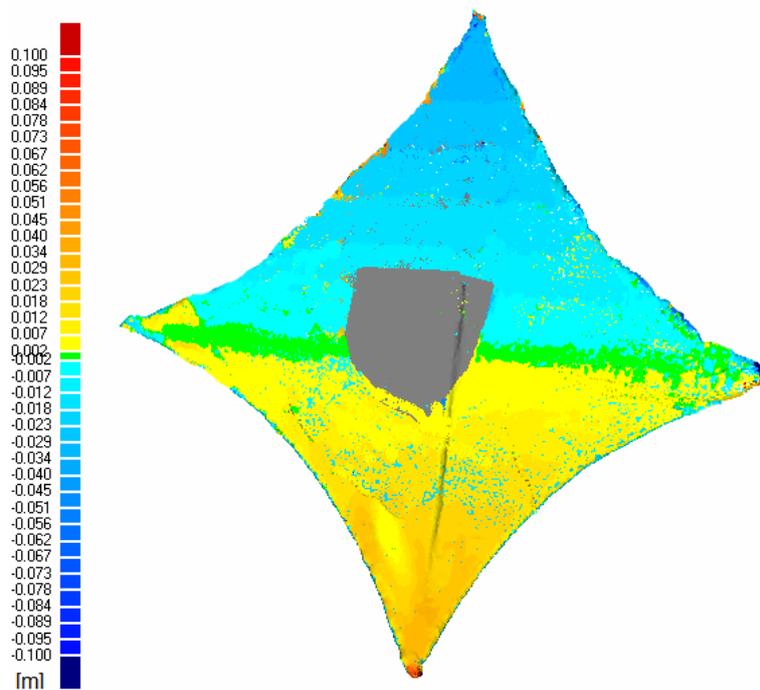


Abb. 7.4.3: Darstellung der Abweichungen der Schale unter 300 kg gegenüber dem Referenzzustand.

Der letzte Zustand des ersten Schalenelementes ist die Belastung der Schale mit 600 kg. Wie in der Abbildung 7.4.4 erkennbar, ist der Bereich für die Datenerfassung durch das Aufbringen der Gewichte stark verkleinert worden. Trotzdem lässt sich an den Randbereichen eine Kippbewegung erkennen, wobei sich die obere Hälfte aufgrund der größeren Belastung bis maximal 4,5 cm senkt und sich die untere Hälfte um den gleichen Betrag hebt.

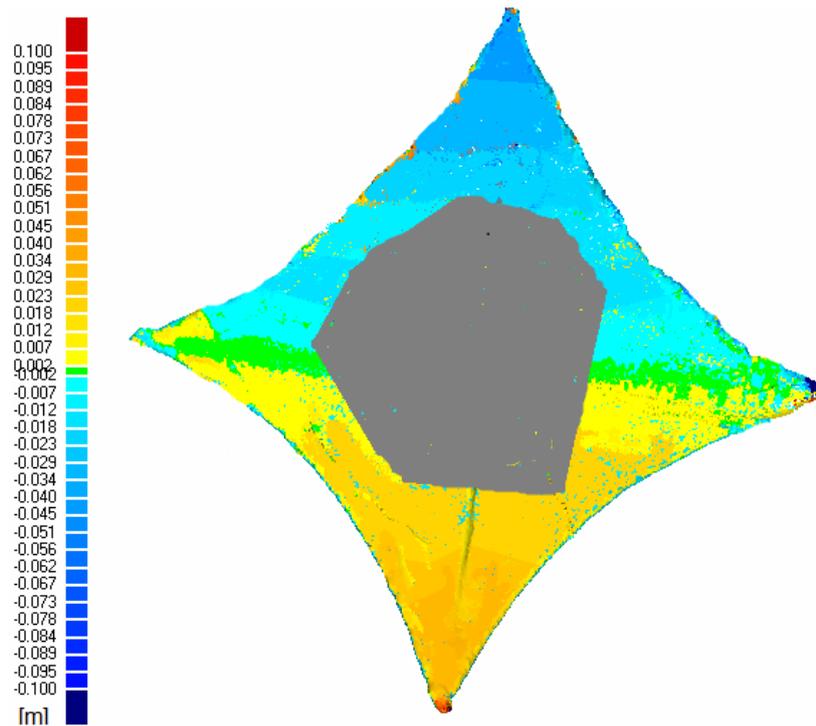


Abb. 7.4.4: Darstellung der Abweichungen unter der Belastung von 600 kg.

Die Tabelle 7.4.1 enthält die Abweichungen der jeweiligen Zustände der ersten Schale.

Tabelle 7.4.1: Abweichungen des ersten Schalenelementes beim ersten Versuchsaufbau(Stereo)

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standard- abweichung [cm]
74kg	6,6	-5,9	1,2/-1,1	1,2
150kg	6,2	-6,3	1,8/-1,6	1,8
300kg	7,8	-6,8	2,0/-1,8	2,3
600kg	7,6	-7,2	2,1/-1,9	2,4

Im Weiteren wird die Deformation ausgehend von den vier Belastungszuständen des zweiten Schalenelementes (nicht perforierte Membran) analysiert. Zuerst wird die Veränderung der Schale unter der Belastung von 74 kg (Abb. 7.4.5.a) näher betrachtet. Im Gegensatz zu den Deformationen des ersten Schalenelementes ist keine eindeutige Kippbewegung sichtbar. Die Schale senkt sich großflächig um bis zu 9 mm. In der linken Hälfte der Schale sind im Vergleich zum Referenzzustand geringe Abweichungen erfasst. Im Übrigen entspricht dies auch der per Laserscanning (Vgl. 7.2) erfassten Veränderung des zweiten Schalenelementes unter der Belastung mit 74 kg.

In der Abbildung 7.4.5.b wird die Abweichung des Schalenelementes unter 150 kg Last gegenüber dem Referenzzustand dargestellt. Bei diesem Zustand wird wieder das Kippen der Schale entlang einer mittleren Achse ersichtlich. Durch das Aufbringen der Gewichte in der oberen Hälfte der Schale kommt es in diesem Bereich zu einer Senkung von bis zu 3,2 cm. Eine horizontale Staffelung der Senkung, ausgehend von Mitte zum Randbereich hin, ist wie im Vergleich zur ersten analysierten Schale erkennbar. Analog zur Senkung der oberen Hälfte kommt es in der unteren Schalenhälfte zu einer Anhebung in der gleichen Größenordnung.

Vergleicht man den Referenzzustand mit dem Zustand bei der Belastung der Schale mit 300 kg (Abb. 7.4.5.c), so erkennt man dort im Vergleich zum vorherigen Zustand eine Abnahme der Veränderung. Die maximale Abweichung beträgt 0,9 cm bzw. -0,9 cm gegenüber 3,2 cm bzw. -3,2 cm (siehe Abbildung 7.4.5.b). Es ist weiterhin ein Kippen der Schale zu beachten, das durch die Aufbringung der Last in der unteren Hälfte der Schale zustande kommt.

Die Abbildung 7.4.5.d stellt die Abweichung zwischen Referenzzustand und einer Belastung der Schale mit 600 kg dar. Durch das Aufbringen der Gewichte (Zementsäcke) ist die Erfassung der Deformation im mittleren Bereich des Schalentragwerkes nicht möglich. Wie in den beiden vorherigen Zuständen wird auch bei dieser Belastung der Schale mit 600 kg eine Kippbewegung um die mittlere Achse deutlich. Die Abweichung gegenüber dem Referenzzustand befindet sich in einem Bereich von -1,2cm bis 1,2 cm.

Die nachfolgende Tabelle 7.4.2 stellt die minimalen, maximalen und mittlere Abweichungen der einzelnen Zustände gegenüber dem Referenzzustand dar.

Tabelle 7.4.2: Abweichungen des zweiten Schalenelementes beim ersten Versuchsaufbau (Stereo)

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standard- abweichung [cm]
74kg	6,1	-4,8	0,6/-0,7	0,8
150kg	6,4	-5,2	1,8/-2,3	2,2
300kg	5,3	-5,2	1,4/-1,3	1,5
600kg	5,7	-5,4	1,6/-1,6	1,7

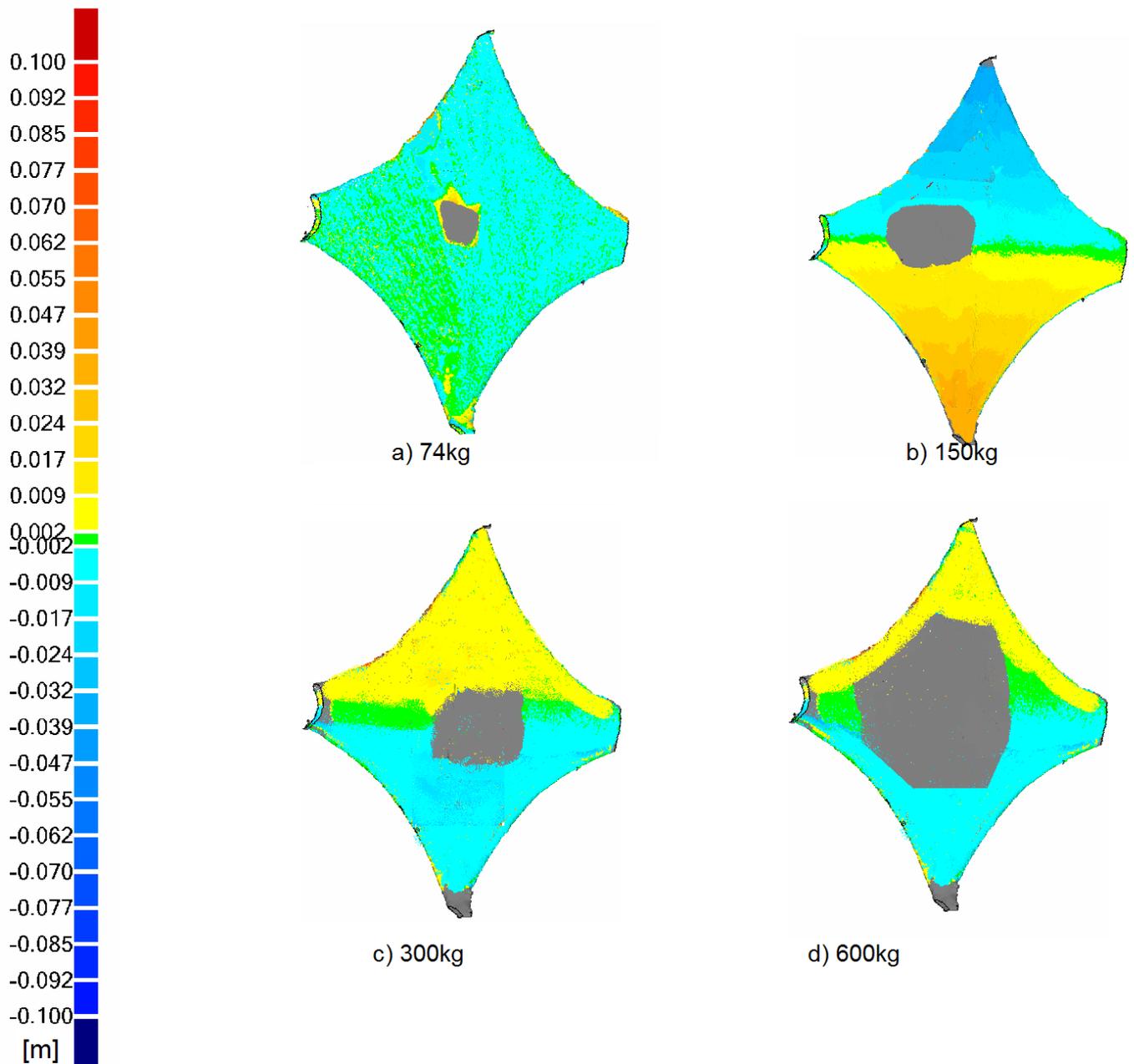


Abb. 7.4.5: *Darstellungen der Abweichungen der jeweiligen Belastungszustände des zweiten Schalenelementes gegenüber dem Referenzzustand.*

Zum Abschluss der Deformationsanalyse des ersten Versuchsaufbaus wird das dritte Schalenelement näher betrachtet werden. Die Abbildung 7.4.5 stellt dabei alle Deformationen der einzelnen Zustände der oberen Seite der Schale dar. Schaut man sich die nachfolgenden Zustände an, so erkennt man ein Kippen des Schalenelementes durch die Gewichtszugabe und somit ein Senken und Heben der Schale bis maximal 5,1cm bzw. -5,1 cm in den Abbildungen a bis d.

Bei der Belastung mit 74kg (Abb. 7.4.6 a) kommt es zu einer von der Mitte zum Rand ausgehenden steigenden Hebung des Schalenelementes im Bereich von 0,2 cm bis 2,9 cm auf der nicht belasteten unteren Hälfte. Analog dazu senkt sich die Schale bis -2,9 cm auf der oberen durch das Gewicht belasteten Hälfte.

Bei der Belastung des Schalenelementes mit 150 kg (Abb.7.4.5.b) ist eine geringere Abweichung zum Referenzzustand im Vergleich zum vorherigen Zustand sichtbar. Die Abweichungen zum Referenzzustand belaufen sich auf einem Bereich von bis zu 1,8 cm (obere Hälfte) bzw.-1,8 cm (untere Hälfte).

Bei der Belastung der Schale mit 300 kg (Abb. 7.4.6.c) erkennt man im Vergleich zum vorherigen Zustand eine Erhöhung der Abweichungen gegenüber dem Referenzzustand. Die größten Abweichungen befinden sich wieder in den oberen und unteren Randbereichen der Schale. Ausgehend von der mittleren Achse (grün gefärbter Bereich) steigen die Abweichungen bis maximal 2,3 cm bzw. -3,4 cm an.

Als letzter Zustand wird die Belastung der Schale mit 600 kg untersucht. Die Abbildung 7.4.5.d stellt hierbei die Abweichung zwischen dem Referenzzustand und den aufgenommenen Daten dar. Wie in den beiden vorherigen Zuständen wird auch bei der Belastung der Schale mit 600 kg eine Kippbewegung um die mittlere Achse deutlich. Es kommt dabei zu einer Hebung von maximal 4 cm in der oberen Hälfte und einer Senkung der Schale in der unteren Hälfte von maximal 2,3 cm. Die jeweiligen maximalen und mittleren Abweichungen der einzelnen Zustände finden sich für das dritte Schalenelement in Tabelle 7.4.3.

Tabelle 7.4.3: *Abweichungen des dritten Schalenelementes beim ersten Versuchsaufbau(Stereo)*

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standard- abweichung [cm]
74kg	6,6	-5,9	1,4/-1,7	1,6
150kg	6,6	-6,3	1,8/-1,6	1,8
300kg	8,8	-6,6	2,0/-1,8	2,3
600kg	7,6	-6,2	2,3/-1,7	2,4

Abschließend lässt sich sagen, dass mittels der aufgenommenen photogrammetrischen Daten dieselbe Art von Deformation der Schalenelemente aufgezeigt werden konnte wie bei der Analyse der Laserscandaten. Des Weiteren war eine komplette Aufnahme und Analyse der unteren Seite der Schalenelemente möglich. Da sich diese analog zu den

oberen Seiten, der hier zu analysierenden Schalen verhalten haben, wurde auf eine nähere Betrachtung verzichtet. Die einzelnen Zustände der unteren Seiten stehen im Anhang E zum Vergleich bereit.

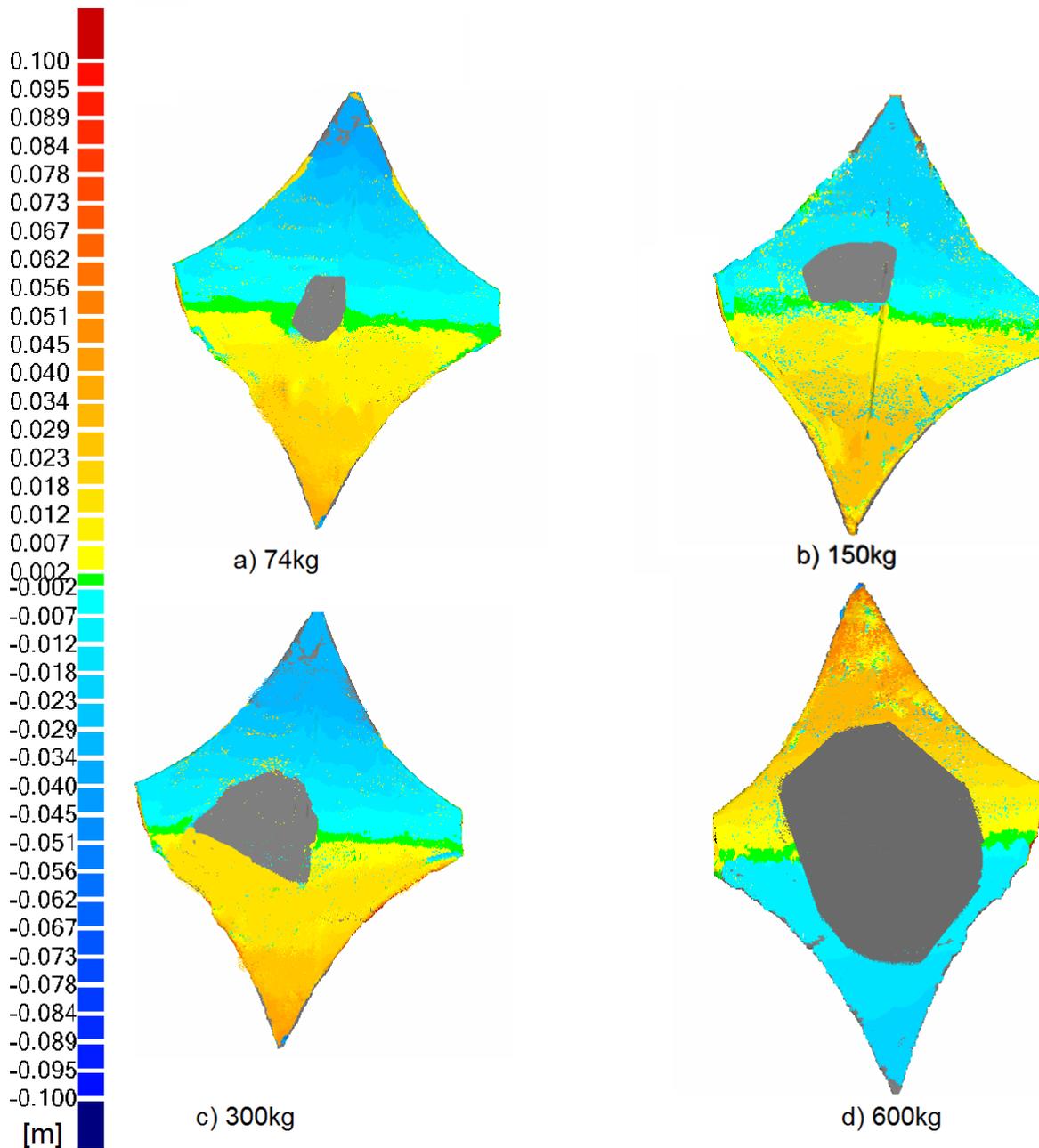


Abb. 7.4.6: Darstellungen der Abweichungen der jeweiligen Belastungszustände des dritten Schalenelementes gegenüber dem Referenzzustand.

7.5 Deformationsanalyse der photogrammetrisch erfassten Daten des zweiten Versuchsaufbaus

Wie im Kapitel 7.3 soll auch die Deformationsanalyse mittels Stereophotogrammetrie ausschnittsweise erfolgen. Es wurden insgesamt für das erste Schalenelement 51, für das zweite Schalenelement sechs und für das dritte Schalenelement 45 Zustände erfasst. Als Referenz-/Sollzustand wird jeweils eine Aufnahme der Schalenelemente vor der Krafteinwirkung der Hydraulikpresse verwendet. Die Protokolle der Auswertung aller Zustände befinden sich auf der mitgelieferten DVD.

Die Abbildung 7.5.1 stellt die Abweichungen des ersten Schalenelementes während verschiedener Zeitpunkte gegenüber dem Referenzzustand dar. An dem Anfang wird der erste aufgenommene Zustand (Abb. 7.5.1.a) im Vergleich zum Referenzzustand gesetzt. Hierbei wurde eine leichte Abweichung detektiert. Es wird eine Senkung der Schale im mittleren Bereich von bis zu 0,7 cm sichtbar. Weiterhin ist eine geringfügige Hebung der rechten und linken Seiten der Schale zu erkennen. Diese Hebung kann als Gegenbewegung der Schale zur Senkung betrachtet werden. Großflächig sind jedoch keine signifikanten Abweichungen (grüner Bereich) gegenüber dem Referenzzustand vorhanden.

Als Nächstes wird der 17. aufgenommene Zustand (Abbildung 7.5.1.b) betrachtet. Durch die kontinuierliche Krafteinwirkung kam es zu einer weiteren Senkung der Schale. Die Abweichungen betragen bis zu 1,8 cm gegenüber dem Referenzzustand. Die größte Abweichung ist im Bereich der Auflagefläche des Bohrkernes erfasst. Weiterhin ist eine stärkere Hebung der rechten Seite in einen Bereich von bis zu 1,2 cm ersichtlich.

Der 34. Zustand (Abb. 7.5.1.c) ist der vorletzte Zustand des ersten Schalenelementes der näher betrachtet werden soll. Es kann eine weitere fortschreitende Verformung im mittleren Bereich sowie der äußeren rechten und linken Seite der Schale erfasst werden. Im Vergleich zur Abbildung 7.5.1.b ist eine Veränderung der Hebung an der linken Seite der Schale nicht sichtbar. Des Weiteren kam es zu einer Senkung des Elementes im Bereich des Bohrkernes, die Differenz zum Referenzzustand beträgt hierbei maximal 4,0 cm. Zum Schluss der Betrachtung des ersten Schalenelementes soll die Abweichung des letzten aufgenommenen Zustandes zum Referenzzustand (Abb. 7.5.1.d) kurz nach dem Bruch des Schalenelementes erfolgen. In der Abbildung 7.5.1.d ist eine Senkung des Bereiches um den Bohrkern herum von bis zu 5,1 cm zu beobachten. Ausgehend von diesem Bereich kam es, wie schon in den vorherigen Zuständen, zu einer weiteren

abgestuften Senkung der Schale. Weiterhin ist die Hebung der Spitzen der rechten und linken Seite der Schale fortgeschritten. Es lässt sich abschließend sagen, dass es zu der in Kapitel 5.2 vermuteten Deformation des Schalenelementes kam. Die Tabelle 7.5.1 zeigt die einzelnen Abweichungen der Zustände des ersten Schalenelementes gegenüber dem Referenzzustand auf.

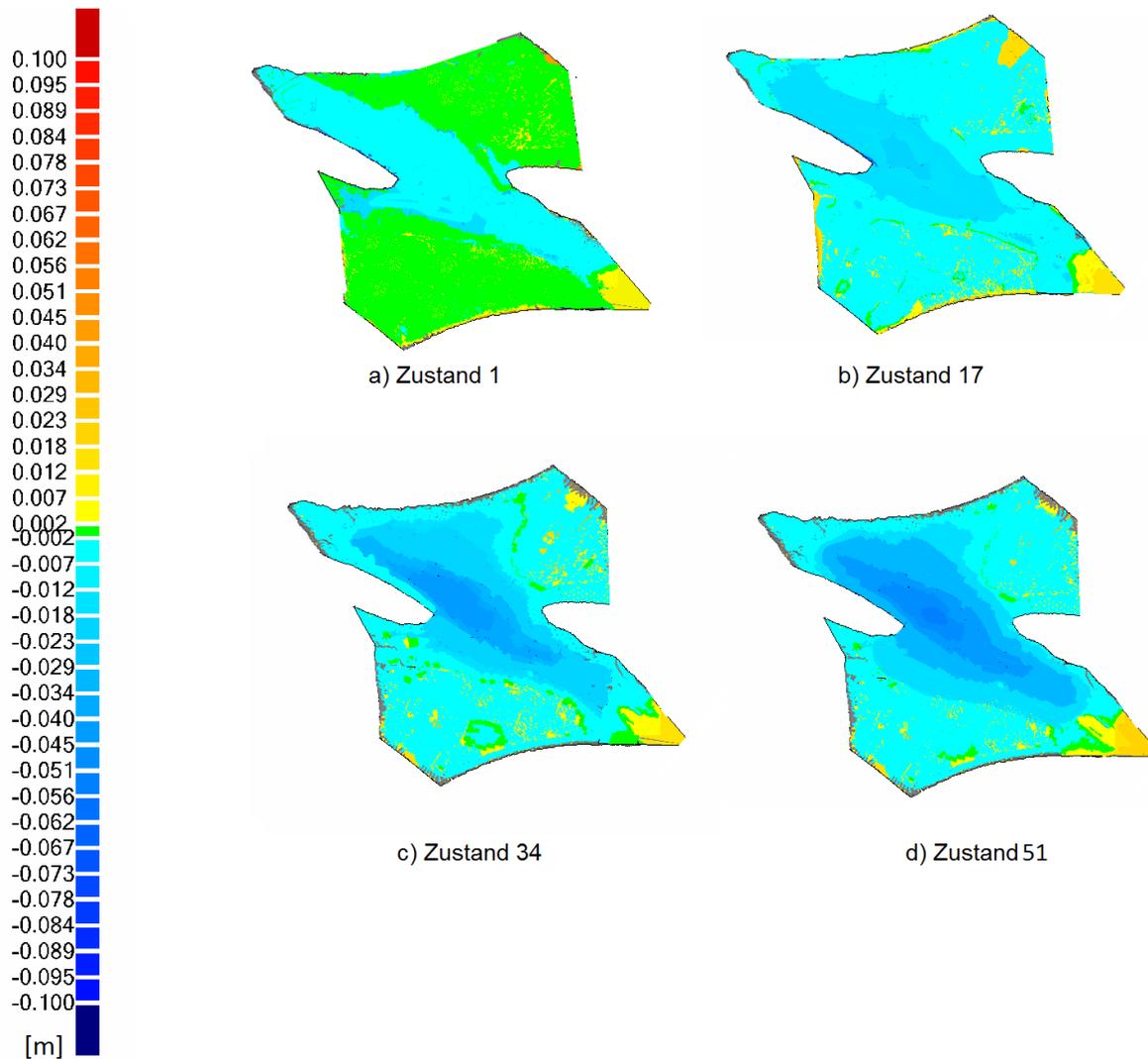


Abb. 7.5.1: Beispielhaft ausgewählte Zustände des ersten Schalenelementes zur Verfolgung der Deformation.

Tabelle 7.5.1: Abweichungen des ersten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau (Stereo)

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standard- abweichung [cm]
1	6,7	-4,2	0,6/-0,6	0,2
17	6,2	-5,6	1,1/-1,6	1,6
34	5,6	-6,2	1,3/-2,2	2,4
51	5,2	-8,8	1,8/-3,3	3,4

Als Nächstes steht die Betrachtung des zweiten Schalenelementes, bestehend aus der durchgehenden Membran, im Mittelpunkt. Aufgrund des frühzeitigen Bruches dieser Schale werden alle sechs aufgenommenen Zustände in Abb. 7.5.2 dargestellt.

Im Vergleich zur ersten Schale kommt es schon während des ersten Zustandes (Abb. 7.5.2.a) zu einer großflächigen Veränderung der Schale. Einerseits senkt sich diese im mittleren Bereich um bis zu 0,7 cm und andererseits erhöhen sich die rechte und linke Seite der Schale um bis 0,7 cm. Gegenüber dem ersten Zustand ist eine geringfügige Veränderung des Schalenelementes bei dem zweiten Zustand sichtbar. Es kommt zu vereinzelten punktuellen Senkungen des Elementes. Die größte Abweichung besteht im Bereich des Bohrkernes, dort kommt es zu einer Senkung von 1,2 cm. Des Weiteren ist keine Änderung der Anhebung auf der rechten Seite in der Abbildung 7.5.2.b erkennbar.

Betrachtet man als Nächstes den dritten Zustand (Abb. 7.5.2.c), so kommt es zu einer weiteren leichten Veränderung der Oberfläche. Es handelt sich dabei wieder um einzelne punktuelle Senkungen. Man erkennt, dass die Hebung der rechten Seite des Schalenelementes noch immer maximal 0,6 cm beträgt und sich somit nicht verändert hat.

In der Abbildung 7.5.2.d wird die Abweichung des Schalenelementes des vierten Zustandes dargestellt. Bei diesem Zustand ist eine großflächige Senkung der Schale zu bemerken. Durch die weitere Krafteinwirkung der Hydraulikpresse im mittleren Bereich der Schale kommt es dort zu einer Senkung von bis zu 1,8 cm. Weiterhin ist eine Staffelung dieser Senkung ausgehend vom Bohrkern zum Randbereich ersichtlich. Eine weitere Veränderung der Schale stellt sich in der Abbildung 7.5.2.e, der Darstellung der Abweichung des fünften Zustandes, dar. Aufgrund der kontinuierlichen Krafteinwirkung kommt es zu einer weiteren Senkung der Schale. Basierend auf der Senkung der Schale im Bereich des Bohrkernes erhöht sich der Wert der Hebung der äußeren rechten und linken Seite der Schale. Die Differenz zum Referenzzustand beträgt jetzt maximal 1,8 cm. Die Abbildung 7.5.2.f weist die Abweichungen des kurz nach dem Bruch der Schale aufgenommenen Zustandes nach. Am auffälligsten im Vergleich zu den vorherigen Zuständen gestaltet sich die Verringerung der Hebungen an den äußeren Seiten der Schale. Sie betragen nur noch 0,7 cm, Ursache hierfür ist der Verlust der Spannung innerhalb der Schale durch den Bruch. Aufgrund des Bruches der Schale erhöhte sich die Senkung der Schale im Bereich des Bohrkernes auf bis zu 3 cm.

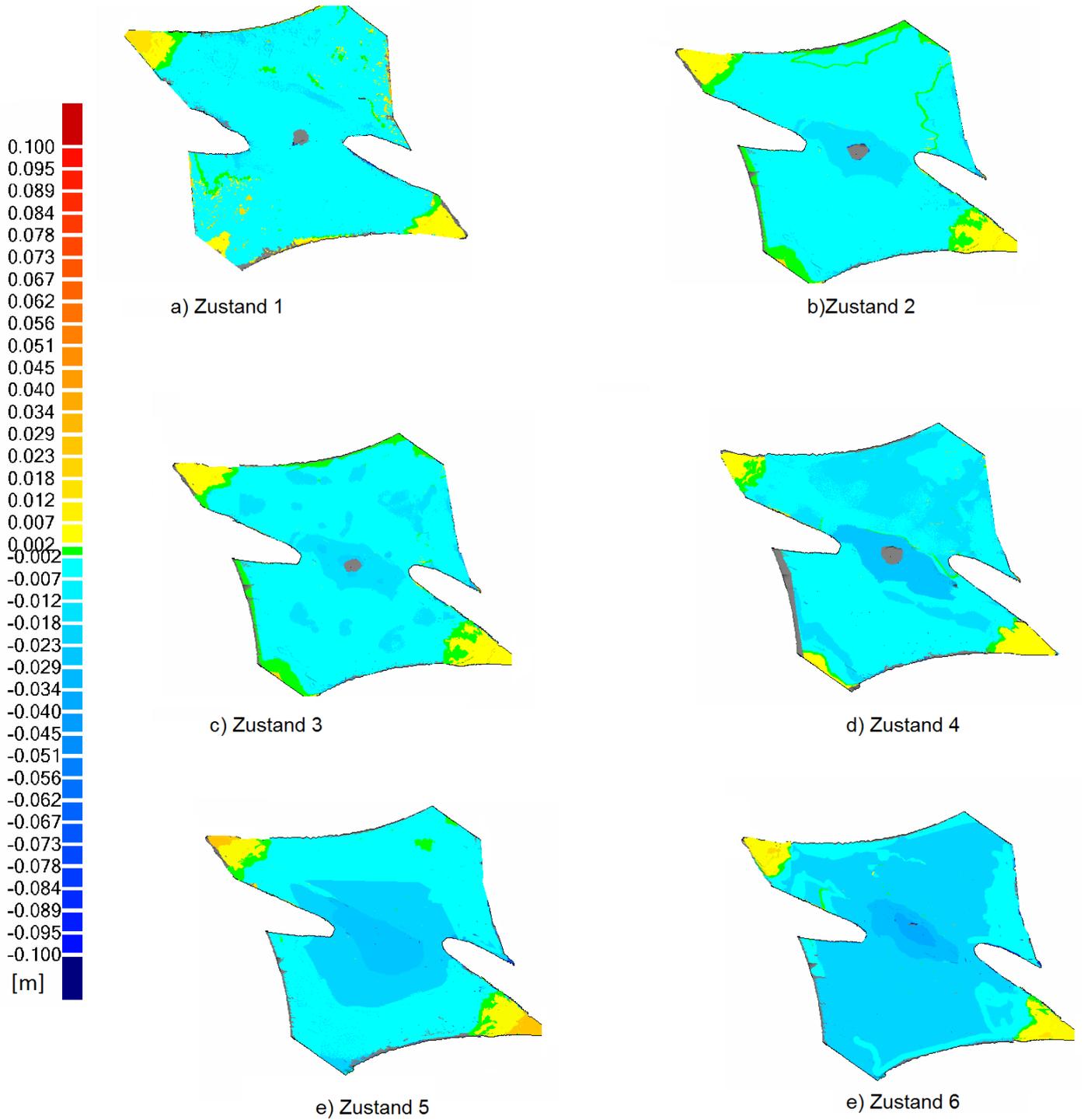


Abb. 7.5.2: *Beispielhaft ausgewählte Zustände des zweiten Schalenelementes zum Aufzeigen der Deformation.*

Die Tabelle 7.5.2 gibt die einzelnen Abweichungen (maximale und mittlere) des zweiten Schalenelementes an.

Tabelle 7.5.2: *Abweichungen des zweiten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau(Stereo)*

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standardabweichung [cm]
1	3,7	-5,1	0,7/-0,6	0,6
2	3,6	-5,3	0,6/-0,7	0,8
3	4,1	-6,4	0,7/-1,1	1,2
4	3,9	-6,2	1,0/-1,5	1,5
5	5,1	-6,5	1,5/-2,2	2,3
6	4,0	-7,3	0,8/-2,8	3,2

Zum Abschluss der stereophotogrammetrisch erfassten Daten wird das dritte Schalenelement auf Art und Größe der Deformation untersucht. Die Abbildung 7.5.3 stellt dabei eine Auswahl von Zuständen der Schale dar. Beispielhaft für die Deformation werden der 2., 14., 28., 42. und letzte aufgenommene Zustand betrachtet. Im Vergleich zu den beiden vorherigen Schalenelementen ist die Deformation der dritten Schale am größten. Wie man in Abbildung 7.5.3.a erkennen kann, kam es zum Beginn der Versuchsreihe zu einer geringen Abweichung gegenüber dem Referenzzustand. Die Schale senkt sich bis auf die rechte Seite, die unverändert zum Referenzzustand bleibt, großflächig um 0,7 cm. Bei dem 14. Zustand (Abb.7.5.3.b) deutet sich die größte Senkung im Bereich des Bohrkernes an. Sie beträgt maximal 3,8 cm, des Weiteren kommt zu einer Hebung der rechten Seite der Schale um 2,6 cm.

Als Nächstes wird der Zustand 28 (Abb. 7.5.4.c) kurz näher betrachtet. Es wurde eine weitere Senkung in der Mitte des Elementes detektiert. Die Abweichung beträgt nun maximal 5,6 cm gegenüber dem Referenzzustand. Die rechte Seite der Schale hebt sich jetzt um 0,6 cm auf 2,9 cm. Betrachtet man den 42. Zustand (Abb. 7.5.4.d), so ist eine weitere gleichartige Veränderung der Schale erfassbar. Das bedeutet, dass die Schale im Bereich des Bohrkerns sich weiter senkt und die rechte Seite sich hebt. Im Bereich des Bohrkerns betrug die Differenz gegenüber dem Referenzzustand maximal 7,8 cm. Die rechte Seite des Elementes hebt sich um 4,5 cm gegenüber dem Referenzzustand.

Zum Schluss wird der zuletzt aufgenommene Zustand betrachtet. Wie schon im Kapitel 7.3 ist nach dem Bruch der Schale eine stärkere Senkung im Bereich des Bohrkerns ersichtlich. Sie beträgt jetzt mehr als 10 cm. Des Weiteren kommt es nun auch zu einer Hebung der linken Seite, die Hebungen betragen hierbei maximal 3,4 cm. Eine Auflistung der mittleren und maximalen Abweichung aller Zustände ist in der Tabelle 7.5.3 vorhanden.

Abschließend lässt sich sagen, dass Deformationen, ähnlich wie in Kapitel 5.2 angeben, über alle drei Schalenelemente erfasst werden konnten.

Tabelle 7.5.3: *Abweichungen des dritten Schalenelementes beim zweiten Versuchsaufbau(Stereo)*

Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standard- abweichung [cm]
2	4,0	-5,1	0,9/-0,7	0,7
14	5,1	-7,3	1,2/-1,5	2,2
28	4,5	-7,2	1,1/-2,3	2,4
42	6,7	-8,9	2,0/-4,1	3,9
45	6,2	-10,0	2,3/-4,8	4,5

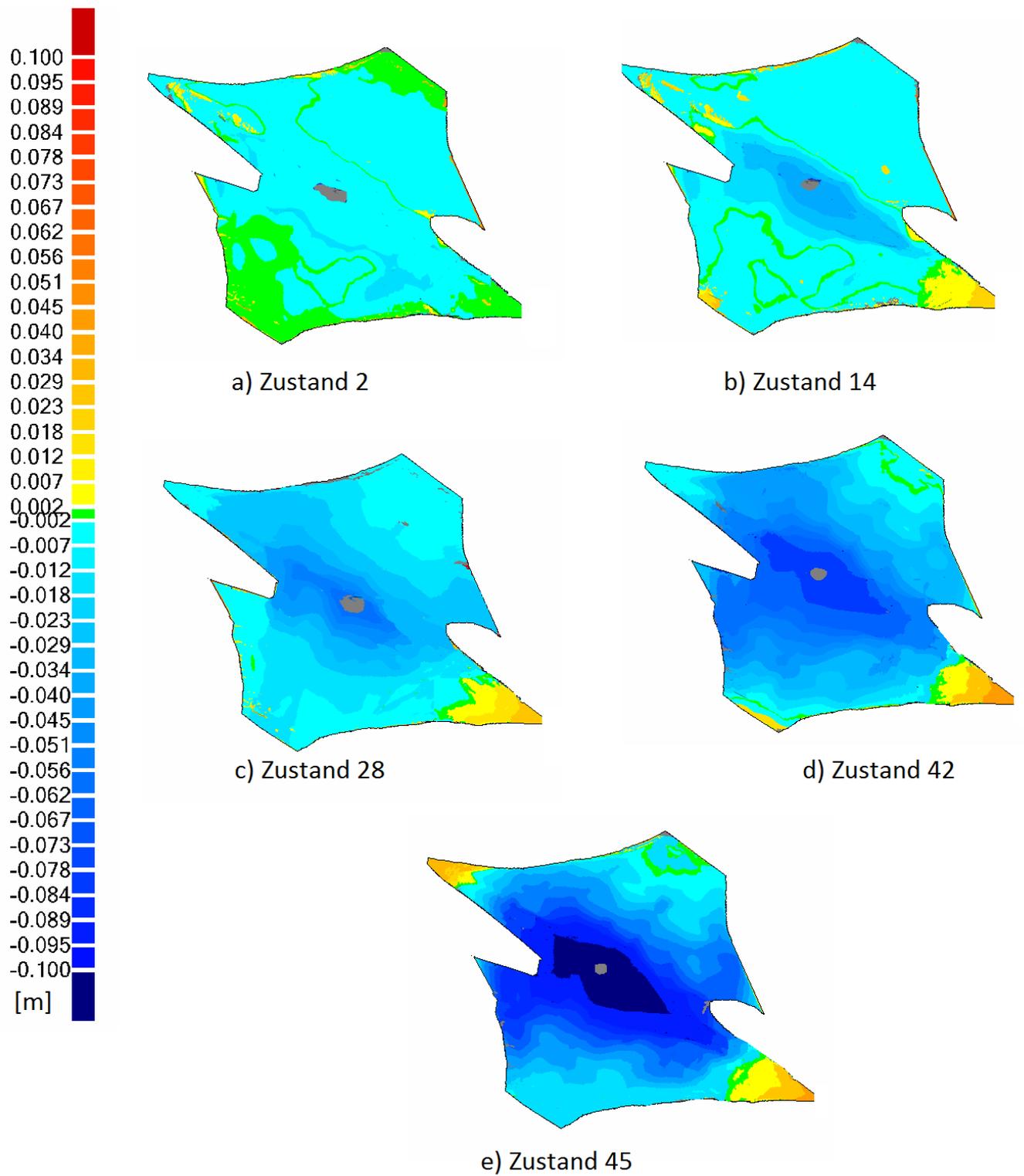


Abb. 7.5.3: Beispielhaft ausgewählte Zustände des dritten Schalenelementes zur Deformationsbestimmung.

7.6 Vergleich der beiden Aufnahmeverfahren

Basierend auf den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen zur Detektion von Deformationen der Schalenelemente findet nun ein Vergleich der beiden Aufnahmeverfahren statt. Eine differenzierte Betrachtung der Verfahren bezogen auf die jeweiligen Versuchsanordnungen ist hierbei notwendig.

Vergleicht man den Signalisierungsaufwand der einzelnen Verfahren, so lässt sich sagen, dass der Aufwand im Bereich des Laserscanning im Vergleich zur Stereophotogrammetrie geringer ist. Es wurden jeweils vier im Raum verteilte Retromarken zur Bestimmung der Scannerposition benötigt. Eine weitere Signalisierung war dabei nicht erforderlich, da von den gewählten Stationspunkten in beiden Versuchsanordnungen die Erfassung dieser vier Retromarken möglich war. Bei der Stereophotogrammetrie war der Aufwand der Signalisierung entschieden höher. Für die Auswertung und Modellierung der zu erfassenden Schalenelemente mussten mehrere Verknüpfungspunkte, die außerhalb des Objektes lagen, geschaffen werden. Außerdem war für die bessere Auswertung der Stereobildpaare eine Signalisierung der Objekte mittels Marken nötig. Mit Hilfe solcher vermarkten Punkte ist eine genauere Punktwolkengenerierung in PhotoModeler möglich. Bei der ersten Versuchsanordnung wurden jeweils neun Marken ober- und unterhalb der Schalenelemente als Passpunkte für das Stereobildpaar verwendet. Dazu kamen jeweils noch mindestens 25 Marken, die auf den Schalen verteilt aufgebracht wurden. Somit waren beim ersten Versuchsaufbau pro Schalenelement mindestens 40 Marken zur Signalisierung die Grundlage. Bei der zweiten Versuchsanordnung wurden jeweils 10 Marken zur Verknüpfung und mindestens 24 Marken auf den Schalen benötigt.

Betrachtet man die Datenerfassung der jeweiligen Verfahren, so ist ein deutlicher Unterschied in der Praktikabilität sichtbar. Vergleicht man die aufgenommenen Daten in der ersten Versuchsanordnung ist die Stereophotogrammetrie gegenüber dem Laserscanning vom Einsatz der Gewichte an vorzuziehen. Die Aufnahmen der einzelnen Stereobildpaare konnten innerhalb eines einzigen Scanvorganges durchgeführt werden. Weiterhin war eine komplette Aufnahme der Schalenelemente möglich, wohingegen bei dem Laserscanning die dem Gerüst zugewandte hintere untere Seite der Schale nicht aufgenommen werden konnte. Abschattungseffekte, ausgehend von den aufgebrachten Gewichten, konnten in der Stereophotogrammetrie durch die jeweiligen Positionierungen bzw. Neupositionierungen vermieden werden. Es sei anzumerken, dass durch weitere Stationierungen des Laserscanners diese Abschattungseffekte zum Teil

hätten eliminiert werden können, aber der zeitliche Rahmen der Versuche dies nicht erlaubte. Dadurch hatte sich der Vorteil der geringeren Signalisierung bei Laserscanner egalisiert. Aufgrund des Abschattungseffektes war gerade bei der Belastung der Schalen mit 600kg eine Aufnahme der oberen Seite der Schalen per Laserscanner nicht mehr sinnvoll, da durch die Gewichte eine höhere Abdeckung und Abschattung der Schale erfolgte. Die Abbildung 7.6.1 verdeutlicht zum wiederholten Male die Unterschiede der aufgenommenen Bereiche bei der Belastung eines Schalenelementes. Allerdings wurde trotz der Abschattungsschwierigkeiten bei der Aufnahme der Laserscandaten die gleiche Deformationsart bzw. Veränderung der Schalenelemente wie bei der stereophotogrammetrischen Auswertung detektiert, jedoch war die Datengrundlage zur Auswertung schwächer und ungenauer als die photogrammetrisch erfassten Daten.

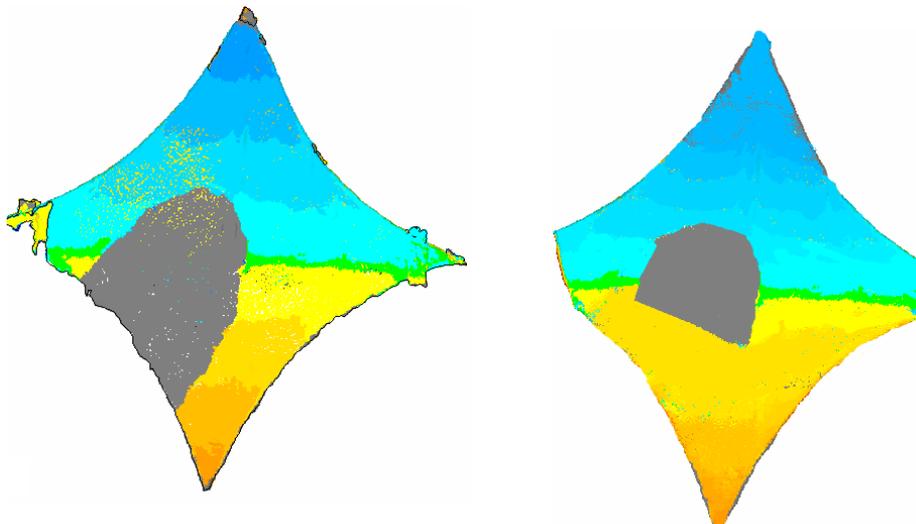


Abb. 7.6.1: *Darstellung des Abschattungsbereiches, auf der linken Seite per Laserscanner erfasst Oberfläche und auf der rechten Seite per Stereophotogrammetrie erfasste Oberfläche ohne Abschattungsbereich.*

Des Weiteren stellt sich die Frage wie sehr die aufgenommenen Daten voneinander abweichen. Beispielhaft sollen dafür die Aufnahmen für das zweite Schalenelemente unter 74 kg Belastung verwendet werden. Wie man in Abbildung 7.6.3 erkennen kann betragen die Abweichungen 1 bis 3 mm. Weiterhin ist zu beachten, dass die Modellierungsgenauigkeit bei beiden Verfahren bestenfalls 2 mm beträgt. Es sind somit nur sehr geringe Differenzen zwischen den beiden Aufnahmeverfahren zu erkennen.

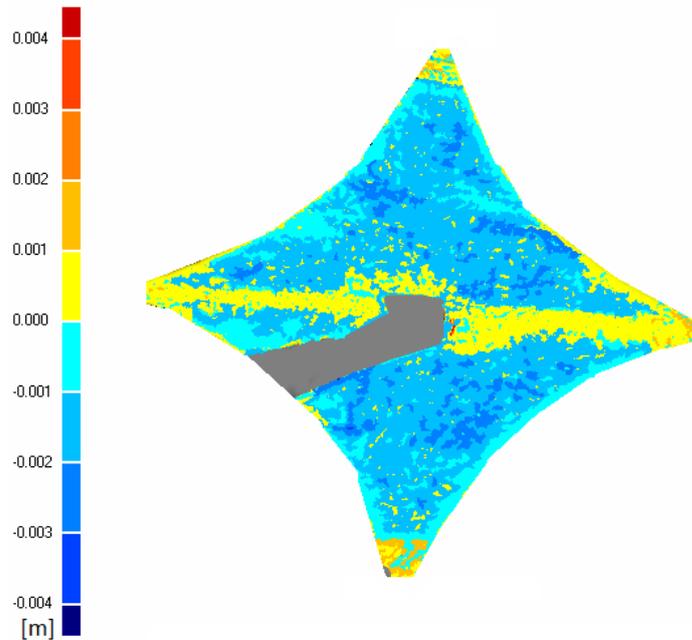


Abb. 7.6.2: *Darstellung der Abweichungen der erfassten Daten der beiden Aufnahmeverfahren beim zweiten Schalenelement unter 74 kg Last.*

Bei der zweiten Versuchsanordnung konnten Abschattungseffekte bei beiden Verfahren nicht vermieden werden (Vgl. Kapitel 5.2). Ursache hierfür war die Hydraulikpresse, in der die Schalenelemente eingespannt wurden. Einen größeren Einfluss auf die erfassten Daten hatte jedoch die Versuchsdurchführung. Bei dem zweiten Versuch handelte es sich im Gegensatz zum ersten Versuch um einen dynamischen Prozess. Dies hatte gerade bei dem terrestrischen Laserscanning starken Einfluss auf die zu erfassenden Daten. Während beim ersten Versuchsaufbau eine Erfassung des Objektes im Bereich von drei bis vier Millionen Punkten möglich war, musste diese Einstellung aufgrund der kontinuierlichen Erfassung der Schalenoberfläche bei der zweiten Versuchsanordnung drastisch reduziert werden, da eine Scandauer von mehreren Minuten eine dynamische Erfassung der Deformation nicht ermöglichte. Das hatte zur Folge, dass innerhalb eines 12 Sekunden langen Scanvorganges nur 1500 bis 2000 Punkten erfasst werden konnten. Im Gegensatz dazu wurden bei der photogrammetrischen Aufnahme ca. 40000 Punkten erfasst. Des Weiteren stellen die gleichzeitig aufgenommenen Stereobildpaare einen einzelnen momentanen Zustand der Schale unter der Presse dar, während bei der Aufnahme mittels des Laserscanners eine Veränderung der Schale vom Scananfang bis Scanende aufgenommen wird. Die Abbildung 7.6.3 stellt den Unterschied der generierten Oberflächen des zweiten Versuchsaufbaues dar. Das per Stereobildpaare erstellte Oberflächenmodell besitzt im Vergleich zum Oberflächenmodell eines einzelnen

Laserscans einen mehr organischen Eindruck und entspricht somit auch besser der wahren Gestalt des Objektes.

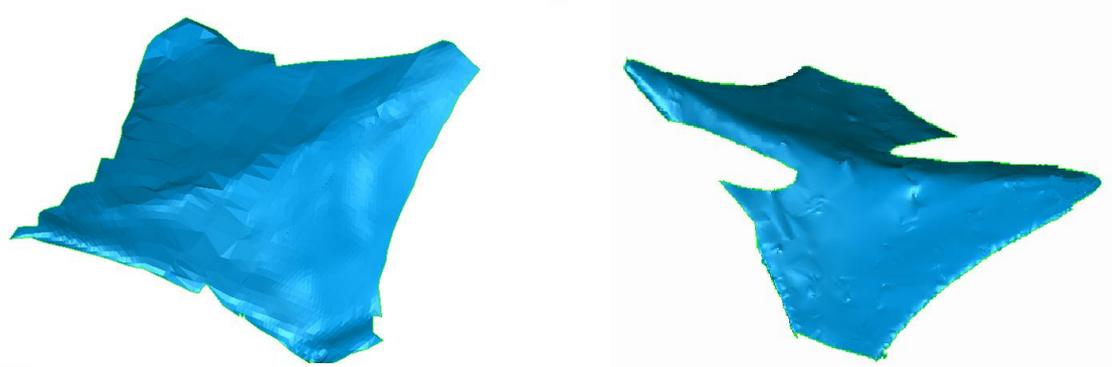


Abb. 7.6.2: Vergleich des Aussehens der per Laserscanning und Stereophotogrammetrie generierten Oberflächenmodelle während des zweiten Versuchsaufbaus.

Vergleicht man beispielhaft die per Laserscanning und Stereophotogrammetrie aufgenommenen Ausgangszustände (Abbildung 7.6.4) des ersten Schalenelements während des zweiten Versuchsaufbaues, so sind dabei nur geringe Abweichungen zwischen den beiden Aufnahmeverfahren festzustellen. Diese betragen durchschnittlich 1 mm oder -1 mm. Es sind jedoch vereinzelt punktuelle größere Abweichungen bis 3 mm oder 4 mm vorhanden.

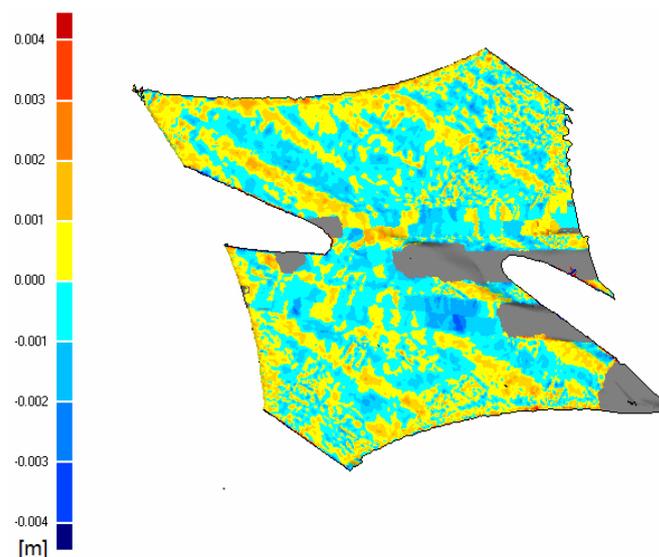


Abb. 7.6.3: Die Differenz zwischen den beiden Aufnahmeverfahren ist beim Ausgangszustand minimal, großflächig betragen die Abweichungen 1 mm oder -1 mm.

Betrachtet man aber die Abweichungen während des Versuches, so sind größere Differenzen zwischen den beiden Verfahren ersichtlich. Die Abbildung 7.6.5 stellt die Differenz zwischen einem Scan und der am Ende des Scans aufgenommenen Stereobildpaare dar. Hierbei sind im Vergleich zu vorherigen Abbildungen größere Abweichungen festzustellen. Die Abweichungen betragen nun 3 bis 4 mm im Durchschnitt. Ursache hierfür ist die geringere Auflösung der Laserscandaten sowie die Veränderung der Schale während des Scanvorganges.

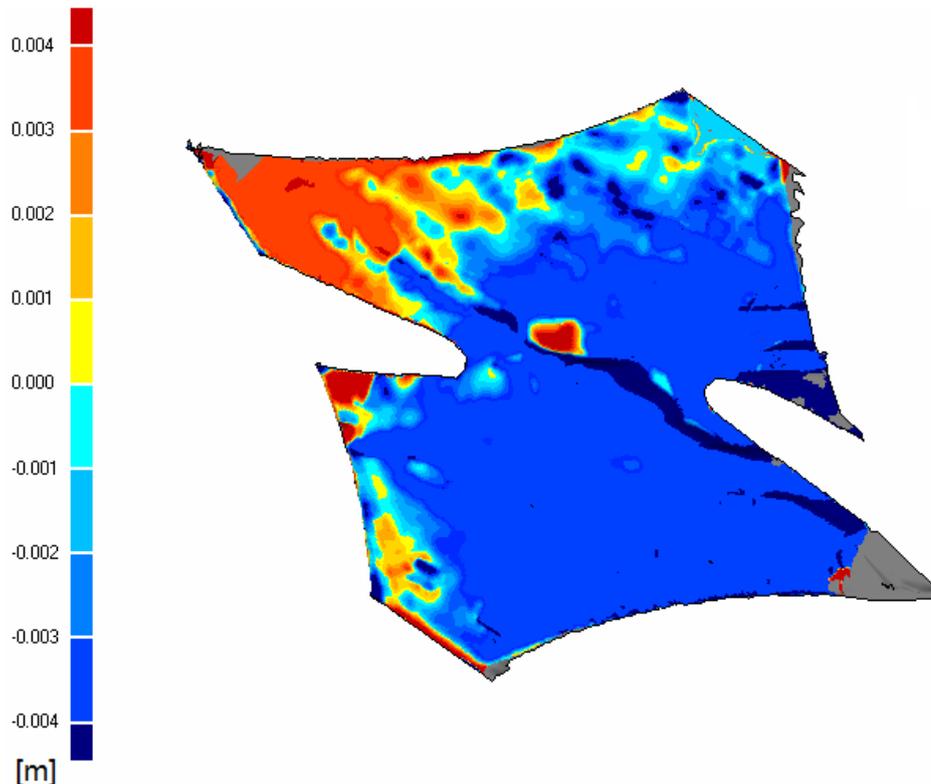


Abb. 7.6.4: *Vergleich der Stereobildpaardaten mit den Scandaten des Laserscanners während der zweiten Versuchsdurchführung.*

Zum besseren kompletten Vergleich beider Verfahren, werden mehrere Zustände miteinander verglichen. Dabei sollte berücksichtigt werden dass es sich dabei um dieselben Zustände während den einzelnen Versuchsdurchführungen handelt. Von daher wurden die Zustände „locker“, „fest“, „74kg“, „150kg“ sowie „300kg“ beim ersten Versuch und die Zustände „Anfang“ und „Ende“ beim zweiten Versuch verwendet. Als Referenzzustand wurden die Modelle basierend auf den terrestrischen Laserscanning-Daten bestimmt und mit den Stereophotogrammetrischen Objektmodellen verglichen. Die Tabelle 7.6.1 zeigt die einzelnen Abweichungen zwischen den modellierten Objektzuständen der Aufnahmeverfahren während des ersten Versuchs. Wie man erkennen kann betragen die mittleren Abweichungen größtenteils 2 mm und die Standardabweichungen 3 mm. Die größeren Differenzen in den maximalen oberen und unteren Abweichungen resultieren wieder aus den aufgenommenen Randstrukturen der Schalenelemente. Bei dem Vergleich der ausgewählten Zustände des zweiten Versuchs in Tabelle 7.6.2 erkennt man dass die Abweichungen gegenüber den ersten

Versuchsaufbau leicht höher sind, die mittlere Abweichung beträgt 3 mm und die Standardabweichung 4 mm. Es jedoch zu beachten, dass die „Ende“-Zustände in Bezug auf die Abweichung signifikant schlechter sind als die „Anfang“-Zustände. Ursache hierfür können weitere Entlastungserscheinungen während der Laserscan-Aufnahme sein.

Tabelle 7.6.1 : Abweichungen zwischen Laserscanner und Stereophotogrammetrie Versuch 1

Schale	Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standardabweichung [cm]
1	Fest	3,3	-2,7	0,3/-0,2	0,4
1	lose	2,6	-2,3	0,2/-0,2	0,3
1	74kg	1,7	-2,1	0,2/-0,1	0,3
1	150kg	1,9	-3,2	0,1/-0,2	0,4
1	300kg	4,6	5,0	0,1/-0,5	0,5
2	Fest	5,0	-5,0	0,1/-0,2	0,3
2	lose	2,7	-4,0	0,1/-0,2	0,4
2	74kg	3,5	-1,3	0,2/-0,1	0,3
2	150kg	6,6	-0,9	0,2/-0,1	0,3
2	300kg	5,3	-0,6	0,3/-0,4	0,5
3	Fest	2,3	-3,4	0,3/-0,2	0,4
3	lose	2,7	-4,1	0,2/-0,2	0,3
3	74kg	6,4	-2,9	0,2/-0,1	0,3
3	150kg	5,7	-1,3	0,1/-0,2	0,2
3	300kg	3,1	-4,8	0,1/-0,1	0,2

Tabelle 7.6.2: Abweichungen zwischen Laserscanner und Stereophotogrammetrie Versuch 2

Schale	Zustand	max. obere Abweichung [cm]	max. untere Abweichung [cm]	mittlere Abweichung [cm]	Standardabweichung [cm]
1	Anfang	5,3	-2,4	0,1/-0,2	0,2
1	Ende	3,7	1,7	0,3/-0,4	0,4
2	Anfang	2,0	2,0	0,2/-0,2	0,3
2	Ende	6,7	-2,3	0,4/-0,3	0,5
3	Anfang	2,3	1,1	0,2/-0,2	0,3
3	Ende	3,1	-4,5	0,3/-0,4	0,5

Gegenüber dem flächenhaften Vergleich beider Aufnahmeverfahren besteht noch die Möglichkeit einzelne markante Punkte miteinander zu vergleichen. Dies gestaltet sich in diesem Fall jedoch schwierig, da aufgrund der Freiformfläche keine markanten Punkte oder Kanten vorhanden sind. Insbesondere für den Vergleich der Laserscan-Daten wäre ein Vorhandensein solcher Punkten und Kanten vom Vorteil. Eine Option zum Vergleich beider Verfahren im punktuellen Bereich ist die Verwendung der aufgebrachten Marken für die Stereophotogrammetrie. Beispielhaft dafür wird eine Marke während des zweiten Versuchsaufbaus verwendet. Der Vergleich erfolgt auf Basis

der hochauflösenden Laserscandaten zum Anfang des Versuches mit denen der Referenzzustand erfasst und modelliert wurde. Wie man in Abbildung 7.6.5 erkennen kann ist die Auswahl des Mittelpunktes der Marke innerhalb der Laserscan-Daten schwierig. Von daher wurden beispielhaft drei Punkte in unmittelbarer Nähe des Mittelpunktes ausgewählt und exportiert.

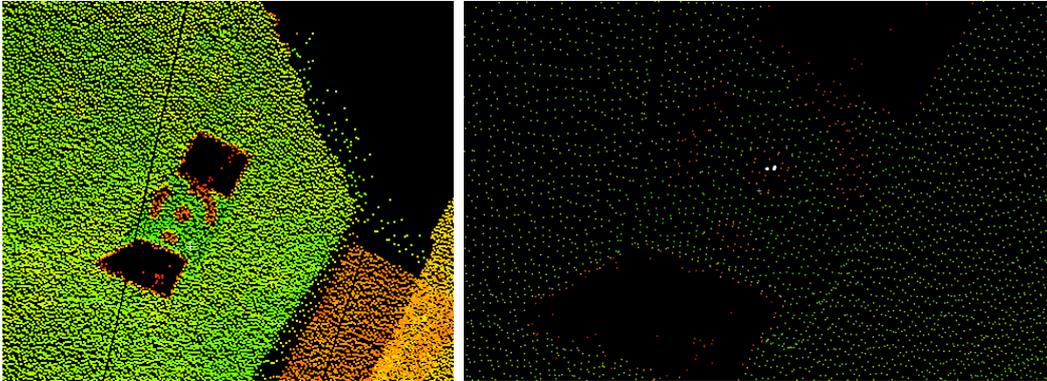


Abb. 7.6.5: *linken Seite: Gescannte Marke in der Punktwolke; rechte Seite: Marke näher herangezoomt mit Auswahl der Vergleichspunkte*

Die Tabelle 7.6.3 beinhaltet die Koordinaten der per Stereophotogrammetrie erfassten Marke 23 und der drei ausgewählten Punkten (Pick 1-3) der Laserscan-Daten. Vergleicht man nun diese drei Punkte mit der per Stereophotogrammetrie ermittelten Koordinate der Marke, so kann man in Tabelle 7.6.4 erkennen dass die Gesamtabweichung zwischen 2,5 mm und 3,3 mm beträgt. Weiterhin erkennt man eine maximale Abweichung von 5 mm in X-Richtung. Darüber hinaus sollte beachtet werden dass die Genauigkeit der einzelnen Punkte (basierend auf den Angaben in Kapitel 3.2) beim Laserscanning bei 6 mm in der Position und 4 mm bei der Distanz betragen. Die Standardabweichung der photogrammetrisch erfassten Marke beträgt im PhotoModeler Projekt in X-Richtung 1,23 mm, in Y-Richtung 1,27 mm und in Z-Richtung 1,74 mm. Eine punktuelle Betrachtung der Veränderung der Schalenelemente anhand der Laserscan-Daten ist somit im Vergleich zum photogrammetrischen Verfahren nicht sinnvoll.

Tabelle 7.6.3: *Koordinaten der ausgewählten Marke zum Vergleich*

	X [m]	Y[m]	Z[m]
Marke 23	4515947,646	5745771,258	68,872
Pick 1	4515947,642	5745771,254	68,875
Pick 2	4515947,648	5745771,261	68,874
Pick 3	4515947,641	5745771,260	68,870

Tabelle 7.6.4: *Koordinatendifferenz der Laserscandaten*

Punkt	dx [m]	dy [m]	dz [m]	Gesamt [mm]
Pick 1	0,004	0,004	-0,003	3,27
Pick 2	-0,002	-0,003	-0,002	2,57
Pick 3	0,005	-0,003	0,002	3,27

8 Fazit und Ausblick

Die Aufgabe dieser Masterarbeit war die Erfassung der Deformationen von Schalenelementen unter Verwendung der Stereophotogrammetrie und des terrestrischen Laserscannings sowie der Vergleich beider Verfahren. Es sollte dabei aufgezeigt werden, ob mit den jeweiligen Verfahren eine Erfassung der Deformation möglich sei.

Dabei hat die Auswertung der Messdaten ergeben, dass die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Verfahren eine Deformationsanalyse, wenn auch in unterschiedlichen Maßen, ermöglichen. Es ist eine differenzierte Betrachtung der Verfahren erforderlich. Die Stereophotogrammetrie ist im Gegensatz zum terrestrischen Laserscanning eine in diesem Bereich gängig eingesetzte Technologie zur Erfassung von Deformationen. Insbesondere bei der Erfassung von dynamischen Prozessen besitzt die Photogrammetrie durch die Möglichkeit der Momentaufnahme einen Vorteil gegenüber dem Laserscanning. Obwohl Arbeitsaufwand und Signalisierung beim Laserscanning geringer sind, erwies sich hingegen die Dauer für die hochauflösende Erfassung der Schalenelemente bei diesen Versuchsanordnungen als ein weiterer Nachteil. Gegenüber dem Laserscanning besitzt die Photogrammetrie auch eine größere Flexibilität bei der Aufnahme der Objekte. Während des ersten Versuchsaufbaus wurde zum Beispiel deutlich, dass eine komplette Aufnahme der Schalenelemente mittels Laserscanning nicht möglich war. Ursache hierfür waren einerseits die Abschattungseffekte der aufgebrachten Gewichte sowie andererseits Versuchsaufbau und -dauer an sich (Vgl. Kapitel 5.1 und 7.2).

Bei dem zweiten Versuchsaufbau stellte sich schon die Datenerfassung mit dem Laserscanner als problematisch heraus. Der zweite Versuchsaufbau befasste sich mit einem dynamischen Verformungsprozess der Schalen. Mit Hilfe der Stereophotogrammetrie war eine momentane Erfassung des Schalenzustands möglich. Der Laserscanner konnte bedingt durch seine Funktionsweise keine Momentaufnahmen der Schalen erfassen. Durch die Begrenzung der Scanzeit für die Dokumentation der Veränderung der Schalen kam es auch zu einer starken Verringerung der akquirierten Datenmenge. Innerhalb des vorgegebenen 10 Sekunden Scanintervalls war lediglich eine Detektion von ca. 1500 bis 2000 Punkten verteilt über das Schalenelement möglich. Im Vergleich dazu bestanden die Oberflächenmodelle der Stereophotogrammetrie aus mindestens 40000 Punkten (Vgl. Kapitel 6.3 und 7.4). Dies hatte unmittelbar Einfluss auf die Genauigkeit der Oberflächenmodellierung der Schalenelemente.

Ein weiteres Kriterium bei der Deformationsanalyse ist die Qualität der erfassten Daten. Hierbei erreicht das Laserscanning eine Genauigkeit von ca. 4,5 mm pro Punkt. Bei den mittels Stereophotogrammetrie registrierten Daten konnten Genauigkeiten von ≤ 2 mm punktuell erreicht werden. Für die Genauigkeitsangaben der Oberflächenmodelle konnte nur auf die Angaben der Hersteller der Geräte bzw. der Software zurückgegriffen werden (Vgl. Kapitel 4.1 und 4.2). Von daher wäre für zukünftige Projekte eine separate Untersuchung der beiden Verfahren im Bereich der Modellierungsgenauigkeit von Freiformflächen wünschenswert (Vergleich Kapitel 4.1 und 4.2).

Außerdem muss bei zukünftigen Versuchsreihen und -aufbauten eine immer genauere Planung des Versuchsaufbaues mit Blick auf das zu erreichende Ziel und der verwendeten Aufnahmetechnik erfolgen. Gerade der erste Versuchsaufbau hatte durch die Lagerung der Schalen auf zwei Stahlträgern einen entscheidenden Nachteil. Aufgrund dieser Lagerung kam es bei der Belastung der Schalenelemente zu einer Kippbewegung in Richtung der durch die Gewichte am stärksten belasteten Seite.

Weiterhin wäre gerade im Rahmen der Belastungsversuche eine zeitliche Analyse der Schalen unter Belastung vorteilhaft. Bei den stattgefundenen Versuchen wurden die Gewichte nach Abschluss der Messung wieder von den Schalen entfernt. Hier stellt sich vor allem die Frage ob das Schalentragswerk dauerhaft eine Belastung von 300 kg oder 600 kg aushalten kann und welche Veränderung in diesem Falle stattfinden.

Die vorliegende Untersuchung hat ergeben, dass das terrestrische Laserscanning keine geeignete Alternative gegenüber der Stereophotogrammetrie zur Erfassung von dynamischen Deformationen darstellt. Es lassen sich, wie in dieser Arbeit beschrieben, zwar fast die gleichen Deformationen erfassen, jedoch sind insbesondere im Bereich der dynamischen Prozesse die Möglichkeit von Momentaufnahmen der Objekte und die Qualität der akquirierten Daten bei der Stereophotogrammetrie die entscheidenden Vorteile.

Im Bereich der statischen Versuche kann der Einsatz von neueren, schnelleren und kleineren Laserscannern eine sinnvolle Alternative zur Photogrammetrie sein, da damit innerhalb von kürzester Zeit Daten mit hoher Genauigkeit gewonnen werden können.

Für die zukünftige Erfassung ähnlicher Versuche sollte daher basierend auf der Deformationsart das Aufnahmeverfahren ausgewählt werden. Bei dynamischen Deformationsprozessen ist der Einsatz der Stereophotogrammetrie zu bevorzugen, das terrestrische Laserscanning kann als komplementäres Verfahren angewendet werden.

Bei statischen Prozessen ist die Verwendung des terrestrischen Laserscanners in Betracht zu ziehen, insbesondere bei der Verwendung von neueren Scannern die eine höhere Datendichte bei geringerem Zeitaufwand ermöglichen. Wenn ein Laserscanner verwendet werden soll, so ist der Versuchsaufbau so zu gestalten dass von mehreren Positionen eine komplette Erfassung des Objektes möglich ist. Bei der Verwendung photogrammetrischer Verfahren ist die Anzahl der verwendeten Kameras vom Versuchsaufbau abhängig, je mehr Abschattungseffekte ein Versuchsaufbau bewirkt desto mehr Kameras müssen verwendet werden um eine komplette Erfassung zu ermöglichen. Des Weiteren ist die Verwendung eines Projektors zum Abbilden der Marken auf das Objekt in Betracht zu ziehen, dadurch können Unebenheiten der aufgebrachten Marken sowie die Problematik der Aufbringung dieser Marken vermieden werden. Es wäre allgemein sinnvoll zukünftige Schalenelemente in einem separaten Versuchsaufbau zu testen und somit die Bedürfnisse der einzelnen Aufnahmeverfahren zu berücksichtigen. Hierbei könnten dann speziell Positionen für den Laserscanner und Konstruktionen zur Befestigung der Kameras und des Projektors geschaffen werden. Abschließend lässt sich sagen, je früher man sich über die Problematik der Aufnahme in ein solches Projekt einbezogen wird, desto besser ist dies für die Planung, Organisation und Durchführung des Projektes.

9 Quellenverzeichnis

(Böhler et al) W. Boehler. & A. Marbs: Vergleichende Untersuchung zur Genauigkeit und Auflösung, verschiedener Scanner , Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004,VDE Verlag, Berlin,2004

(Deumlich/ Staiger, 2002) Fritz Deumlich/ Rudolf Staiger: „Instrumentenkunde der Vermessungstechnik“ Herbert Wichmann Verlag, 2002

(Edelsbrunner) Edelsbrunner, H.: Geometry and Topology for Mesh Generation, volume 6 of Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics. Cambridge University Press, UK, 2001.

(Fraser & Riedel) C. S. Fraser & B. Riedel: “Monitoring the Thermal Deformation of Steel Beams via Vision Metrology”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55(4), 268-276, 2000

(Junghans) Oliver Junghans, Bachelorarbeit: Untersuchungen zur photogrammetrischen Erfassung von Punktwolken mit dem System PhotoModeler Scanner, Hochschule Bochum,2010

Grether und Keller(2006)M. Grether & M. Keller : Diplomarbeit: Laserscanning bei Deformationsmessungen, Fachhochschule Nordwestschweiz, 2006

(Große-Schwiep et al) Martina Große-Schwiep, Heidi Hastedt und Thomas Luhmann, Deformationsmessung mit Terrestrischem Laserscanning und Photogrammetrie, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013,VDE Verlag, Berlin,2013

(Kraus) Kraus, Karl : Photogrammetrie: Grundlagen und Standardverfahren,6. Auflage,Dümmler Verlag, Bonn, 1997

(Kraus I)Kraus, Karl : Photogrammetrie: Grundlagen und Standardverfahren,6. Auflage,Dümmler Verlag, Bonn, Seite 29-37, 1997

(Kraus II) Kraus, Karl : Photogrammetrie: Grundlagen und Standardverfahren,6. Auflage,Dümmler Verlag, Bonn, Seite 13-16, 1997

(Kraus III) Kraus, Karl : Photogrammetrie: Grundlagen und Standardverfahren,6. Auflage,Dümmler Verlag, Bonn, Seite 24-28, 1997

(Kraus IV) Kraus, Karl : Photogrammetrie: Grundlagen und Standardverfahren,6. Auflage,Dümmler Verlag, Bonn, Seite 358-362, 1997

(Kraus V) Kraus, Karl : Photogrammetrie: Verfeinerte Methoden und Anwendungen,3. Auflage,Dümmler Verlag, Bonn, Seite 399-412, 1996

(Kraus VI) Kraus, Karl : Photogrammetrie: Grundlagen und Standardverfahren, 6. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn, Seite 347-353, 1997

Kutterer und Hesse (2006) High-speed laser scanning for near real-time monitoring of structural deformations. In: Tregoning, P., Rizos, R. (Eds.): Dynamic Planet – Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools. IAG Symposia, Vol. 130, Springer, 2006

(Leica) Handbuch Scanstation 2

(Lindstaedt et al) M. Lindstaedt, T. Kersten, K. Mechelke und T. Graeger, Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner-Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012, VDE Verlag, Berlin, 2012

(Luhmann) Luhmann, Thomas: Nahbereichsphotogrammetrie , 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin, 2010

(Luhmann I) Luhmann, Thomas: Nahbereichsphotogrammetrie , 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin, Seite 2-6, 2010

(Luhmann II) Luhmann, Thomas: Nahbereichsphotogrammetrie , 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin, Seite 138-144, 2010

(Luhmann III) Luhmann, Thomas: Nahbereichsphotogrammetrie , 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin, Seite 148-153, 2010

(Luhmann IV) Luhmann, Thomas: Nahbereichsphotogrammetrie , 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin, Seite 236-241, 2010

(Luhmann V) Luhmann, Thomas: Nahbereichsphotogrammetrie , 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin, Seite 530-531, 2010

(Luhmann VI) Luhmann, Thomas: Nahbereichsphotogrammetrie , 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin, Seite 279-296, 2010

(Luhmann VII) Luhmann, Thomas: Nahbereichsphotogrammetrie , 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin, Seite 453-460, 2010

(Luhmann VIII) Luhmann, Thomas: Nahbereichsphotogrammetrie , 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin, Seite 463-464, 2010

(Müller) Müller, Kerstin , Disertation : NURBS und Unterteilungsflächen: Adaptive Visualisierung von Unterteilungsflächen und ihre Erweiterung auf nicht-uniforme Flächen., TU-Braunschweig, 2005

(Neitzel et al), Frank Neitzel, Waldemar Mordwinzew und Christian Lerche, Untersuchung von Registrierungsverfahren hinsichtlich des Einsatzes terrestrischer Laserscanner in der Deformationsmessung, FH-Mainz, 2010

(Petrahn) Günter Petrahn: „Grundlagen der Vermessungstechnik“ Cornelsen, 2001

(PhotoModeler) Handbuch/Hilfe PhotoModelerScanner 6, EOS Software

(Roborealm) <http://www.roborealm.com/help/Moravec.php>, letzter Zugriff 14.09.13

(Runne) Runne, Heinz: Vorlesung Terrestrisches Laserscanning 2010, HS-Anhalt

(Shan et al) SHAN, Jie (Hrsg.), TOTH, Charles K. (Hrsg.): Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009

Tsakiri, Lichti und Pfeifer (2006) Tsakiri M., Lichti D. & Pfeifer N., Terrestrial Laser Scanning for deformation, 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006

(Wiedemann) Wiedemann, Albert : Handbuch Bauwerksvermessung, 1. Auflage, Birkhäuser Verlag, Basel, Seite 248-254, 2007

Zogg und Ingensand (2008), Zogg H.-M. & H. Ingensand Terrestrial Laser Scanning for Deformation Monitoring - Load Tests on the Felsenau Viaduct (CH) In: Beiträge zu XXI ISPRS Kongress, Beijing, China, 2008

Anhang

Anhang A

Tabelle A-1: Koordinaten der Passpunkte des ersten Versuchs

Messung 1					Messung 2				
Schale	Punkt	X [m]	Y [m]	Z [m]	Schale	Punkt	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	100	4515950,298	5745771,609	60,593	1	100	4515950,296	5745771,607	60,593
1	101	4515950,684	5745773,567	60,590	1	101	4515950,687	5745773,570	60,589
1	102	4515951,005	5745773,172	60,591	1	102	4515951,003	5745773,170	60,589
1	103	4515950,704	5745771,940	60,591	1	103	4515950,705	5745771,942	60,593
1	104	4515950,297	5745771,609	60,593	1	104	4515950,295	5745771,607	60,593
1	105	4515949,909	5745771,294	60,590	1	105	4515949,911	5745771,294	60,593
1	106	4515948,847	5745771,399	60,583	1	106	4515948,849	5745771,400	60,583
1	107	4515948,532	5745771,911	60,550	1	107	4515948,534	5745771,912	60,551
1	108	4515948,243	5745772,329	60,293	1	108	4515948,243	5745772,329	60,292
1	109	4515948,703	5745773,574	60,588	1	109	4515948,704	5745773,576	60,587
1	110	4515949,094	5745773,902	60,592	1	110	4515949,092	5745773,900	60,591
1	111	4515949,290	5745774,063	60,587	1	111	4515949,288	5745774,063	60,586
2	200	4515947,794	5745777,090	60,590	2	200	4515947,796	5745777,092	60,588
2	201	4515948,113	5745776,714	60,126	2	201	4515948,111	5745776,715	60,598
2	202	4515948,434	5745776,310	60,590	2	202	4515948,433	5745776,312	60,588
2	203	4515948,321	5745775,233	60,590	2	203	4515948,319	5745775,232	60,587
2	204	4515947,937	5745774,911	60,583	2	204	4515947,936	5745774,910	60,582
2	205	4515947,541	5745774,595	60,591	2	205	4515947,540	5745774,593	60,590
2	206	4515946,792	5745774,742	60,354	2	206	4515946,792	5745774,742	60,354
2	207	4515946,042	5745774,888	60,117	2	207	4515946,040	5745774,885	60,119
2	208	4515945,771	5745775,297	60,116	2	208	4515945,768	5745775,298	60,115
2	209	4515946,091	5745776,357	60,588	2	209	4515946,091	5745776,356	60,588
2	210	4515946,484	5745776,687	60,592	2	210	4515946,483	5745776,688	60,591
2	211	4515946,689	5745776,839	60,621	2	211	4515946,689	5745776,842	60,622
3	300	4515945,145	5745780,327	60,593	3	300	4515945,143	5745780,327	60,596
3	301	4515945,475	5745779,934	60,590	3	301	4515945,472	5745779,935	60,590
3	302	4515945,961	5745779,338	60,587	3	302	4515945,958	5745779,336	60,589
3	303	4515945,559	5745778,228	60,620	3	303	4515945,561	5745778,226	60,617
3	304	4515945,347	5745778,062	60,590	3	304	4515945,348	5745778,059	60,591
3	305	4515944,961	5745777,747	60,593	3	305	4515944,961	5745777,747	60,592
3	306	4515943,728	5745777,773	60,110	3	306	4515943,728	5745777,772	60,109
3	307	4515943,325	5745778,253	60,114	3	307	4515943,327	5745778,251	60,115
3	308	4515943,018	5745778,573	60,117	3	308	4515943,017	5745778,574	60,119
3	309	4515943,243	5745779,429	60,582	3	309	4515943,241	5745779,429	60,585
3	310	4515943,849	5745779,926	60,588	3	310	4515943,848	5745779,925	60,589
3	311	4515944,244	5745780,229	60,586	3	311	4515944,242	5745780,232	60,588

Tabelle A-2: Koordinatendifferenz zwischen beiden Messungen

Schale	Punkt	dX [m]	dY [m]	dZ [m]
1	100	0.002	0.002	0.000
1	101	-0.003	-0.003	0.001
1	102	0.002	0.002	0.002
1	103	-0.001	-0.002	-0.002
1	104	0.002	0.002	0.000
1	105	-0.002	0.000	-0.003
1	106	-0.002	-0.001	0.000
1	107	-0.002	-0.001	-0.001
1	108	0.000	0.000	0.001
1	109	-0.001	-0.002	0.001
1	110	0.002	0.002	0.001
1	111	0.002	0.000	0.001
2	200	-0.002	-0.002	0.002
2	201	0.003	-0.004	-0.472
2	202	0.001	-0.002	0.002
2	203	0.002	0.001	0.003
2	204	0.001	0.001	0.001
2	205	0.001	0.002	0.001
2	206	-0.001	-0.001	0.000
2	207	0.002	0.003	-0.002
2	208	0.003	-0.001	0.001
2	209	0.000	0.001	0.000
2	210	0.001	-0.001	0.001
2	211	0.000	-0.003	-0.001
3	300	0.002	0.000	-0.003
3	301	0.003	-0.001	0.000
3	302	0.003	0.002	-0.002
3	303	-0.002	0.002	0.003
3	304	-0.001	0.003	-0.001
3	305	0.000	0.000	0.001
3	306	0.000	0.001	0.001
3	307	-0.002	0.002	-0.001
3	308	0.001	-0.001	-0.002
3	309	0.002	0.000	-0.003
3	310	0.001	0.001	-0.001
3	311	0.002	-0.003	-0.002

Tabelle A-3: Mean absolute Error der Registrierung der Scanworlds

Schale	ScanWorld	MEAN ABSOLUTE ERROR [m]
1	ScanWorld 1	0,002
1	ScanWorld 2	0,002
1	ScanWorld 3	0,002
1	ScanWorld 4	0,002
1	ScanWorld 5	0,001
1	ScanWorld 6	0,002
1	ScanWorld 7	0,002
1	ScanWorld 8	0,002
1	ScanWorld 9	0,002
1	ScanWorld 10	0,001
1	ScanWorld 11	0,002
1	ScanWorld 12	0,002
2	ScanWorld 13	0,002
2	ScanWorld 14	0,002
2	ScanWorld 15	0,003
2	ScanWorld 16	0,002
2	ScanWorld 17	0,002
2	ScanWorld 18	0,001
2	ScanWorld 19	0,002
2	ScanWorld 20	0,002
2	ScanWorld 21	0,002
2	ScanWorld 22	0,002
2	ScanWorld 23	0,001
3	ScanWorld 24	0,002
3	ScanWorld 25	0,002
3	ScanWorld 26	0,002
3	ScanWorld 27	0,002
3	ScanWorld 28	0,002
3	ScanWorld 29	0,002
3	ScanWorld 30	0,002
3	ScanWorld 31	0,001
3	ScanWorld 32	0,002
3	ScanWorld 33	0,002
3	ScanWorld 34	0,002

Tabelle A-4: Registrierung der ersten Schale

Name	ScanWorld	Scanworld	Type	On/Off	Weight	Error [m]	Error Vector [m]
TargedID:1000	ScanWorld 1	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.000, 0.002)
TargedID:1001	ScanWorld 1	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 1	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.002, 0.001, 0.001)
TargedID:1003	ScanWorld 1	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(-0.001, 0.000, -0.001)
TargedID:1000	ScanWorld 2	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.001, 0.003, 0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 2	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1002	ScanWorld 2	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 2	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1000	ScanWorld 3	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1001	ScanWorld 3	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.001, 0.002, 0.001)
TargedID:1002	ScanWorld 3	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1003	ScanWorld 3	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1000	ScanWorld 4	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.001, 0.002, 0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 4	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.001)
TargedID:1002	ScanWorld 4	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004	(0.002, 0.004, 0.001)
TargedID:1003	ScanWorld 4	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.001, 0.000)
TargedID:1000	ScanWorld 5	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1001	ScanWorld 5	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004	(0.002, 0.003, 0.003)
TargedID:1002	ScanWorld 5	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1003	ScanWorld 5	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.001, 0.001, 0.002)
TargedID:1000	ScanWorld 6	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, -0.001, 0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 6	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 6	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, -0.002, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 6	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001 , 0.000, 0.000)
TargedID:1000	ScanWorld 7	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(-0.001, -0.001, 0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 7	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(-0.001, 0.001, 0.002)

TargedID:1002	ScanWorld 7	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 7	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(-0.001, 0.000, -0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 8	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.001, 0.002, 0.001)
TargedID:1002	ScanWorld 8	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0,005	(0.004, 0.003, 0.004)
TargedID:1003	ScanWorld 8	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1000	ScanWorld 9	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 9	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 9	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(-0.001, 0.000, 0.002)
TargedID:1003	ScanWorld 9	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1000	ScanWorld 10	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.002, 0.002, 0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 10	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(-0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 10	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.002, 0.001)
TargedID:1003	ScanWorld 10	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1000	ScanWorld 11	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.002, 0.001, -0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 11	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 11	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, -0.001, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 11	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.000, 0.000, 0.001)
TargedID:1000	ScanWorld 12	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004	(0.004, 0.000, 0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 12	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.002, -0.001, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 12	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 12	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.002, -0.001, 0.001)

Tabelle A-5: Registrierung der zweiten Schale

Name	ScanWorld	Festpunktfeld (leveled)	Type	On/Off	Weight	Error [m]	Error Vector [m]
TargedID:1000	ScanWorld 13	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 13	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 13	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(-0.001, 0.000, 0.002)

TargedID:1003	ScanWorld 13	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1000	ScanWorld 14	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.002, 0.002, 0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 14	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(-0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 14	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.002, 0.001)
TargedID:1003	ScanWorld 14	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1000	ScanWorld 15	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.002, 0.001, -0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 15	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 15	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, -0.001, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 15	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.000, 0.000, 0.001)
TargedID:1000	ScanWorld 16	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1001	ScanWorld 16	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1002	ScanWorld 16	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 16	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1000	ScanWorld 17	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, -0.002, 0.000)
TargedID:1001	ScanWorld 17	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001 , 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 17	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(-0.001, -0.001, 0.001)
TargedID:1003	ScanWorld 17	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(-0.001, 0.001, 0.002)
TargedID:1000	ScanWorld 18	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1001	ScanWorld 18	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(-0.001, 0.000, -0.001)
TargedID:1002	ScanWorld 18	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.001)
TargedID:1003	ScanWorld 18	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004	(0.002, 0.004, 0.001)
TargedID:1000	ScanWorld 19	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.001, 0.000)
TargedID:1001	ScanWorld 19	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 19	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004	(0.002, 0.003, 0.003)
TargedID:1003	ScanWorld 19	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 20	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1002	ScanWorld 20	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.001, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 20	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1000	ScanWorld 20	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004	(0.002, 0.003, 0.003)

TargedID:1001	ScanWorld 21	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1002	ScanWorld 21	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.001, 0.001, 0.002)
TargedID:1003	ScanWorld 21	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, -0.001, 0.001)
TargedID:1000	ScanWorld 22	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1001	ScanWorld 22	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, -0.002, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 22	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001 , 0.000, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 22	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1000	ScanWorld 23	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.001, 0.000)
TargedID:1001	ScanWorld 23	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 23	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, -0.002, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 23	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.002, 0.001, -0.001)

Tabelle A-6: Registrierung der dritten Schale

Name	ScanWorld	Festpunktfeld (levelled)	Type	On/Off	Weight	Error [m]	Error Vector [m]
TargedID:1000	ScanWorld 24	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1001	ScanWorld 24	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004	(0.002, 0.003, 0.003)
TargedID:1002	ScanWorld 24	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.001, 0.001)
TargedID:1003	ScanWorld 24	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.001, 0.001, 0.002)
TargedID:1000	ScanWorld 25	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, -0.001, 0.001)
TargedID:1001	ScanWorld 25	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(-0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 25	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 25	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(-0.001, 0.000, 0.002)
TargedID:1000	ScanWorld 26	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1001	ScanWorld 26	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.002, 0.002, 0.001)
TargedID:1002	ScanWorld 26	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(-0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 26	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.002, 0.001)
TargedID:1000	ScanWorld 27	Festpunktfeld (levelled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)

TargedID:1002	ScanWorld 34	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, -0.002, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 34	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003	(0.002, 0.001, -0.001)

Tabelle A-7: Fehlervektoren Registrierung zweiter Versuchsaufbau

Name	ScanWorld	Scanworld	Type	On/Off	Weight	Error [m]	Error Vector [m]
TargedID:1000	ScanWorld 1	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002	(0.001, 0.000, 0.002)
TargedID:1001	ScanWorld 1	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.000, 0.000)
TargedID:1002	ScanWorld 1	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(0.001, 0.001, 0.000)
TargedID:1003	ScanWorld 1	Festpunktfeld (leveled)	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001	(-0.001, 0.000, -0.001)

Tabelle A-8: Koordinaten Passpunkte zweiter Versuchsaufbau

Messung 1

Punkt	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	4515943,016	5745771,936	58,435
2	4515942,507	5745773,868	58,432
3	4515944,363	5745773,062	58,433
4	4515944,089	5745771,501	58,434
5	4515943,553	5745771,969	58,433
6	4515941,802	5745771,258	58,433
7	4515940,761	5745771,148	58,434
8	4515942,164	5745771,744	58,434
9	4515941,548	5745772,000	58,432
10	4515942,558	5745773,530	58,434
11	4515942,591	5745774,132	58,434
12	4515941,590	5745774,226	58,433
13	4515941,183	5745777,051	58,433
14	4515941,242	5745776,509	58,433
15	4515941,205	5745775,823	58,433

Messung 2

Punkt	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	4515943,017	5745771,937	58,424
2	4515942,508	5745773,869	58,434
3	4515944,362	5745773,061	58,434
4	4515944,090	5745771,502	58,434
5	4515943,555	5745771,971	58,434
6	4515941,800	5745771,257	58,433
7	4515940,762	5745771,149	58,434
8	4515942,163	5745771,745	58,433
9	4515941,548	5745771,999	58,433
10	4515942,560	5745773,529	58,433
11	4515942,589	5745774,131	58,433
12	4515941,588	5745774,224	58,433
13	4515941,185	5745777,052	58,433
14	4515941,240	5745776,511	58,433
15	4515941,203	5745775,821	58,433

Tabelle A-9: Koordinatendifferenz Passpunkte zweiter Versuchsaufbau

Punkt	dX [m]	dY [m]	dZ [m]
1	-0.002	0.003	0.002
2	-0.001	-0.001	-0.002
3	0.001	0.001	-0.001
4	-0.001	-0.001	0.000
5	-0.002	-0.001	-0.001
6	0.002	0.001	0.000
7	-0.001	-0.002	0.000
8	0.001	0.002	0.001
9	0.000	0.001	0.000
10	-0.002	0.001	0.001
11	0.001	0.001	0.004
12	0.002	0.002	-0.001
13	-0.002	-0.001	0.000
14	0.002	-0.001	0.003
15	0.002	0.002	0.003

Tabelle A-10: Genauigkeit PhotoModelerauswertung der PhotoModeler Projekte des ersten Versuchsaufbaus

Schale	Zustand	RSM [Pixel]	Min. RSM [Pixel]	Max. RSM [Pixel]	RSM Point Precession [mm]
1	1	1,1326	0,0025	2,1687	1,70
1	2	1,2288	0,0082	1,7757	1,85
1	3	1,0763	0,0081	2,0333	1,62
1	4	1,3747	0,0084	2,0227	2,07
1	5	0,9533	0,0037	2,1805	1,43
1	6	1,1910	0,0075	2,4794	1,79
2	1	0,8044	0,0019	1,6399	1,21
2	2	0,6680	0,0062	1,3577	1,01
2	3	0,7912	0,0041	1,5727	1,19
2	4	1,4192	0,0070	1,9774	2,14
2	5	0,8518	0,0081	1,5846	1,28
2	6	0,7798	0,0060	1,4255	1,17
3	1	1,0008	0,0098	1,9122	1,51
3	2	0,9555	0,0082	1,9663	1,44
3	3	1,0604	0,0052	1,8069	1,60
3	4	1,4313	0,0043	1,8811	2,15
3	5	0,7939	0,0041	1,5964	1,19
3	6	1,4299	0,0072	2,1599	2,15

Tabelle A-11: Genauigkeit PhotoModelerauswertung der ersten Schale während des zweiten Versuchsaufbaus

Zustand	RSM [Pixel]	Min. RSM [Pixel]	Max. RSM [Pixel]	RSM Point Precession [mm]
1	1,4157	0,0006	1,6354	1,56
2	1,1755	0,0031	2,4081	1,30
3	1,1765	0,0003	1,9764	1,30
4	1,3003	0,0008	1,8117	1,44
5	1,0251	0,0031	1,9567	1,13
6	1,0725	0,0017	1,5712	1,18
7	0,8761	0,0031	2,3916	0,97
8	1,4864	0,0002	2,2559	1,64
9	1,1344	0,0018	2,4786	1,25
10	1,4152	0,0047	2,0280	1,56
11	0,8399	0,0011	2,1871	0,93
12	0,9003	0,0030	1,5091	0,99
13	1,4721	0,0010	2,0514	1,63
14	1,1753	0,0042	2,1842	1,30
15	1,3441	0,0049	2,2466	1,48
16	1,4716	0,0004	2,1705	1,63
17	0,8715	0,0011	1,9933	0,96

18	0,9403	0,0042	1,6194	1,04
19	1,2878	0,0028	1,8349	1,42
20	1,3778	0,0004	1,5018	1,52
21	1,0727	0,0032	1,7173	1,18
22	1,3225	0,0040	1,8215	1,46
23	1,4447	0,0032	1,7611	1,60
24	1,3733	0,0016	2,4902	1,52
25	0,8078	0,0003	2,0559	0,89
26	1,3853	0,0040	1,9913	1,53
27	1,1601	0,0037	1,9536	1,28
28	1,4119	0,0042	1,7513	1,56
29	0,9772	0,0035	2,0538	1,08
30	1,2588	0,0022	1,9087	1,39
31	0,8074	0,0017	2,2102	0,89
32	1,4602	0,0042	1,5746	1,61
33	1,4291	0,0012	2,3879	1,58
34	1,3771	0,0009	2,1901	1,52
35	1,4020	0,0021	2,4123	1,55
36	0,9878	0,0046	2,3793	1,09
37	1,4217	0,0047	2,4852	1,57
38	0,8320	0,0010	2,2913	0,92
39	0,9266	0,0004	1,9585	1,02
40	1,4123	0,0032	1,8168	1,56
41	1,3823	0,0048	1,5589	1,53
42	1,4927	0,0034	1,8495	1,65
43	1,4365	0,0036	1,9436	1,59
44	1,0426	0,0001	1,8943	1,15
45	0,8227	0,0028	2,2545	0,91
46	1,0723	0,0022	1,7384	1,18
47	0,8163	0,0018	2,1019	0,90
48	1,1218	0,0037	2,2952	1,24
49	0,9399	0,0047	1,6998	1,04
50	1,3635	0,0015	2,2163	1,51
51	1,0432	0,0007	1,6955	1,15

Tabelle A-12: Genauigkeit der zweiten Schale während des zweiten Versuchsaufbaus

Zustand	RSM [Pixel]	Min. RSM [Pixel]	Max. RSM [Pixel]	RSM Point Precession [mm]
1	1,3669	0,0044	1,8427	1,51
2	0,9146	0,0018	1,6204	1,01
3	1,3509	0,0030	1,7642	1,49
4	1,3478	0,0010	2,0023	1,49
5	1,4952	0,0009	1,5615	1,65
6	1,4043	0,0015	1,8133	1,55

Tabelle A-13: Genauigkeit Photoodelerauswertung der dritten Schale während des zweiten Versuchsaufbaus

Zustand	RSM [Pixel]	Min. RSM [Pixel]	Max. RSM [Pixel]	RSM Point Precession [mm]
1	1,1807	0,0025	2,1580	1,42
2	1,4136	0,0042	1,7975	1,70
3	1,3849	0,0047	2,4408	1,67
4	0,8822	0,0018	1,8691	1,06
5	0,9813	0,0039	1,7806	1,18
6	1,3598	0,0020	2,4593	1,64
7	1,4954	0,0047	1,6857	1,80
8	1,4993	0,0047	1,7393	1,81
9	1,4539	0,0018	2,1669	1,75
10	0,8533	0,0037	1,8936	1,03
11	1,0745	0,0005	1,8447	1,29
12	1,2558	0,0005	1,9503	1,51
13	1,0562	0,0010	2,0221	1,27
14	1,2983	0,0047	1,8543	1,56
15	1,3324	0,0037	1,9292	1,61
16	0,8336	0,0016	2,1855	1,00
17	1,0117	0,0007	1,9404	1,22
18	1,4663	0,0022	2,1919	1,77
19	1,2933	0,0005	1,5288	1,56
20	1,3751	0,0020	2,2200	1,66
21	0,8360	0,0050	1,8632	1,01
22	0,8460	0,0015	1,8079	1,02
23	1,4621	0,0031	2,0993	1,76
24	1,0375	0,0035	1,7216	1,25
25	0,9530	0,0014	1,9953	1,15
26	0,8629	0,0038	2,3299	1,04
27	0,9678	0,0046	1,5854	1,17
28	1,4881	0,0018	2,1087	1,79
29	1,0124	0,0022	2,3988	1,22
30	1,2080	0,0025	1,8413	1,46
31	1,1236	0,0036	2,4085	1,35
32	1,0732	0,0038	2,4993	1,29
33	1,3136	0,0005	2,2609	1,58
34	0,8140	0,0049	1,8684	0,98
35	1,0013	0,0040	1,6249	1,21
36	1,2638	0,0028	2,3012	1,52
37	1,3093	0,0021	1,9526	1,58
38	1,2926	0,0009	1,7944	1,56
39	0,8536	0,0022	1,6570	1,03
40	1,1911	0,0046	1,5014	1,43
41	1,3847	0,0045	2,1531	1,67

42	0,9963	0,0006	2,2350	1,20
43	1,1700	0,0019	2,1618	1,41
44	1,2372	0,0040	2,3684	1,49
45	0,9846	0,0021	1,8533	1,09

Anhang B

Tabelle B-1: Ergebnis der Kamerakalibration erster Versuchsaufbau

Kamera	Brennweite [mm]	Bildhaupt- punkt Xp [mm]	Bildhaupt- punkt Yp [mm]	K1 [mm]	K2 [mm]	K3 [mm]	P1 [mm]	P2 [mm]	Fw [mm]	Fh [mm]
Mark II	24,574041 ± 0,001	18,031655 ± 0,001	11,95948 ± 0,001	1,236e-004 ±5,324e-006	-1,838e-007 ±6,724e-009	-2,458e-009 ±8,821e-011	9,466e-006 ± 4,234e-07	7,952e-006 ± 8,165e-08	35,937423 ±4,2e-004	23,959803
EOS 60D 1	24,871065 ± 0,001	11,27277 ± 0,001	7,518590 ± 0,003	1,251e-004 ±3,465e-006	-2,837e-007 ±7,123e-009	-1,678e-009 ±7,638e-011	1,917e-006 ± 3,875e-07	3,184e-006 ± 9,002e-08	22,674606 ±5,1e-004	15,113000
EOS 60D 2	24,870765 ± 0,001	11,27342 ± 0,002	7,519230 ± 0,001	1,262e-004 ±6,543e-006	-2,737e-007 ±6,529e-009	-2,574e-009 ±5,873e-011	1,871e-006 ± 4,031e-07	3,216e-006 ± 7,945e-08	22,674655 ±2,7e-004	15,113000
EOS 20D	34,206686 ± 0,001	11,356802 ± 0,001	7,474132 ± 0,001	8,946e-005 ±7,121e-007	-6,733e-008 ±3,123e-010	-3,754e-010 ±1,751e-011	9,766e-006 ± 1,863e-07	4,294e-006 ± 2,792e-08	22,469453 ±1,3e-004	14,986000

Tabelle B-2: Ergebnis der Kamerakalibration zweiter Versuchsaufbau

Kamera	Brennweite [mm]	Bildhauptpu nkt Xp [mm]	Bildhaupt punkt Yp [mm]	K1 [mm]	K2 [mm]	K3 [mm]	P1 [mm]	P2 [mm]	Fw [mm]	Fh [mm]
Mark II	24,581040 ± 0,001	18,035726 ± 0,001	11,959481 ± 0,002	1,225e-004 ±8,932e-006	-1,786e-007 ±5,487e-009	-2,154e-009 ±7,925e-011	6,405e-006 ±5,252e-07	2,503e-006 ±9,379e-08	35,936660 ±4.5e-004	23, 959803
EOS 60D 1	24,871065 ±0,001	11,27253 ±0,002	7,518467 ±0,001	1,262e-004 ±2,549e-006	-2,845e-007 ±6,152e-009	-1,456e-009 ±8,225e-011	1,908e-006 ±3,842e-07	3,174e-006 ±8,756e-08	22,674598 ±3.8e-004	15,113000
EOS 60D 2	24,871065 ±0,001	11,27277 ±0,001	7,518590 ±0,001	1,245e-004 ±4,365e-006	-2,799e-007 ±5,963e-009	-2,934e-009 ±7,926e-011	1,894e-006 ±4,573e-07	3,181e-006 ±8,381e-08	22,674634 ±5.1e-004	15,113000
EOS 20D	34,207555 ±0,001	11,355758 ±0,001	7,472935 ±0,003	8,933e-005 ±7,121e-007	-6,602e-008 ±5,523e-010	-3,455e-010 ±1,504e-011	9.877e-006 ±1,215e-07	3.945e-006 ±2,254e-08	22,469432 ±1.6e-004	14,986000

Rechnerkonfiguration:

Betriebssystem: Windows 7 64bit

CPU: Intel Q6800 4x2,8Ghz

Arbeitsspeicher: 6GB DDR-3 Ra

Grafikkarte: Nvidia GTX 265

Festplatte: Western Digital 500GB 7200RP

Anhang C

Grundeinstellungen

Depth Range

Die Depth Range gibt den Tiefenbereich bezogen auf die Scanebene an. Mit Hilfe dieser Option kann die axiale Entfernung eines zu erzeugenden Punktes angegeben werden. Eine Unterscheidung in den Abstand zwischen Unter- (Below Surface) und Oberseite (Above Surface) ist hierbei möglich. Punkte die außerhalb dieser Grenzen generiert werden, werden automatisch gelöscht. Das hat zur Folge, dass je größer die Grenzen gesetzt werden, eher Punkte generiert werden können. Das kann aber ein weiteres Problem verursachen. Je eher Punkte generiert werden und je größer die Grenzen sind, desto größer ist auch der Anteil der fehlerhaft erstellten Punkte.

DS Trim-mode

Mit Hilfe der Option DS Trim-mode kann entschieden werden, ob anhand des kompletten Bereiches des Stereobildpaares die Punktwolkenerzeugung stattfindet oder unter Verwendung eines selektierten Bereiches. Eine mehrfache Selektion ist hierbei möglich. Die Verwendung der Selektion von Bildelementen ist vorzuziehen, da somit relevante Daten nur für das aufzunehmende Objekt generiert werden. Dadurch kommt es zu einer Zeitersparnis gegenüber einer kompletten Generierung der Punktwolke der Aufnahmesituation.

Matching Region Radius

Diese Option gibt die Begrenzung der Region an, in dem ein korrelierendes Muster innerhalb von zwei oder mehr Bildern gesucht wird. Je größer diese Region ist, desto größer ist auch der daraus resultierende Zeitaufwand für die Suche. Eine Vergrößerung der Suchregion erfolgt, wenn die Oberflächenstruktur des aufzunehmenden Objektes schlecht scanbar ist oder nur wenig Oberflächeninformationen besitzt (z.B. fast ebene einfarbige Wände).

Sampling Rate

Die Sampling Rate gibt das Auflösungsvermögen des Scans zur Punktwolkengenerierung an und damit den minimalen Abstand zwischen zwei Punkten auf der Scanebene. Das bedeutet, je niedriger dieser Wert eingestellt wird, desto mehr Punkte können generiert werden. Eine größere Punktdichte hat aber auch eine größere Bearbeitungszeit als Folge.

Subpixel

Die Option Subpixel steuert die Verwendung der Korrespondenzanalyse im Subpixelbereich. Die Option beschäftigt sich mit dem Sucher nach einer Korrespondenz des Objektpunktes im Subpixelbereich in den beiden Aufnahmen. Nur wenn diese Option aktiviert ist kann, eine hochauflösende Punktwolke generiert werden, da bei Deaktivierung nur ein niedrigauflösender Scan möglich ist.

Super Sampling Factor

Der Super Sampling Factor befasst sich mit der Oberflächengenauigkeit der zu erstellenden Punktwolke. Je größer dieser Wert gewählt wird, desto glatter die Oberfläche und umso länger dauert die Verarbeitung.

Texture Type

Die Option Texture Type regelt die Oberflächenerkennung eines aufzunehmenden Objektes. Wenn eine Verringerung des Wertes vorgenommen wird, muss bei einer schlecht aufzulösenden Textur des Objektes mit wenig generierbaren Punkten gerechnet werden. Eine Erhöhung des Wertes bei einer schlecht aufgelösten Textur hat aber auch einen Anstieg von Fehlpunkten zur Folge(PhotoModeler).

Punktwolkengenerierung

Decimate Point Cloud

Es handelt sich hier um eine Funktion zur Reduktion der zu erstellenden Punktwolke auf ein vorgegebenes Maß. Sie ist sinnvoll bei der Verwendung von mehreren Scans zur Erfassung eines Objektes, da somit die Scans ausgedünnt werden und das Datenvolumen begrenzt wird. Die Mehrzahl der Scans liegt allerdings immer noch in genügender Qualität vor.

Denoise Point Cloud

Bei dieser Option geht es um eine Filteroption zur Entfernung von fehlerhaften Punkten, die bei der Punktwolkengenerierung entstanden sind.

Filter Isolated Points

Die Filter Isolated Points geben eine Option zur Eliminierung von isoliert liegenden Punkten während der Punktwolkengenerierung wider. Mit Hilfe dieser Option wird der Anteil der fehlerhaften Punkte minimiert.

Register and Merge

Bei dieser Option handelt es sich um eine Funktion zur Verschmelzung und Registrierung von Punktwolken. Es kann unterschieden werden, ob nur die Punktwolken miteinander verschmolzen werden oder ob eine Registrierung der einzelnen Punktwolken und eine darauf folgende Verschmelzung jener stattfindet.

Punktwolkenverarbeitung

Contours

Diese Option ist zur Erzeugung von Konturlinien zur Ausgabe der Veraschung. Die Option steuert die Ausgabe (Abstand der Konturlinie und Ursprungsachse) von Höhenlinien im Modell.

Decimate Triangles

Hier geht es um die Funktion zur Reduzierung der durch die Veraschung entstandenen Dreiecke und somit zur Reduzierung des Datenvolumens. Die Reduzierung erfolgt unter der Beibehaltung der original erstellten Geometrie.

Fill Hole and Fjords

Während der Punktwolkengenerierung und der anschließenden Veraschung der Punkte, kann es vorkommen, dass sich Bereiche bilden, in denen keine Punkte zur weiteren Veraschung existieren. Diese Bereiche können Löcher oder auch Fjörde (lang gezogene Löcher mit einseitiger Öffnung) sein. Durch Nachbarschaftsbeziehung wird mit dieser Option versucht, diese Bereiche zu schließen. Die Funktion erlaubt eine Einstellung von Grenzwerten für diesen Schritt.

Mesh Point Cloud

Ihre Funktion ist die Steuerung der Veraschung der Punkte zu Dreiecken. Als mögliche Option ist die Aktivierung und Deaktivierung möglich.

Sooth/Sharp Sooth

Hier handelt es sich um Funktionen zur Glättung der Oberfläche während der Veraschung. Mit Hilfe dieser Funktionen können starke Übergänge während der Veraschung vermindert und die Modellierung sanfter gestaltet werden.

Unify Normals

Ihre Funktion liegt in der Bildung einer homogenen Struktur der Oberfläche der generierten Punktwolke. Dafür werden die einzeln erstellten Dreiecke innerhalb einer Veraschung in eine gemeinsame Richtung ausgerichtet (PhotoModeler).

Parameter Punktwolkengenerierung

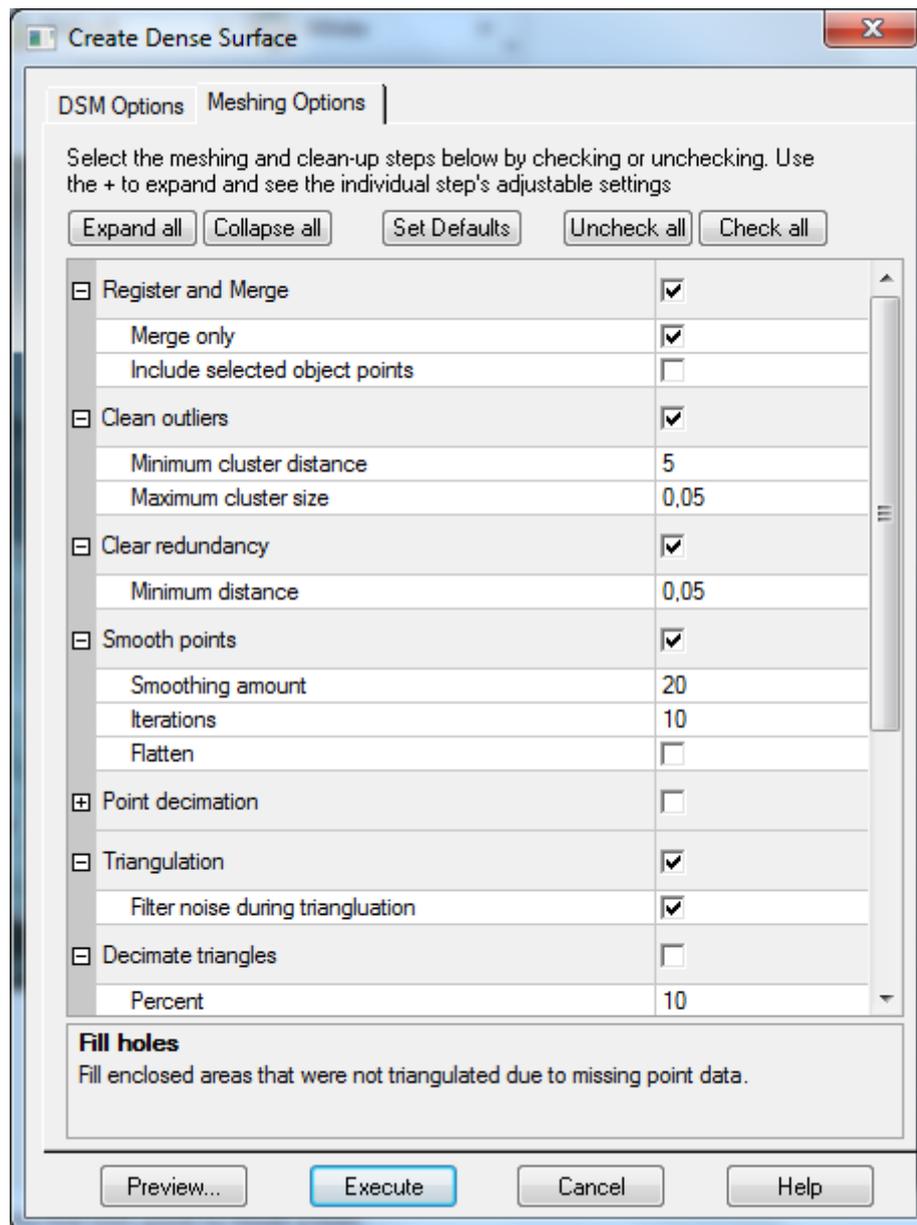


Abb. C-1: Parameter zur Generierung von Punktwolken in PhotoModeler.

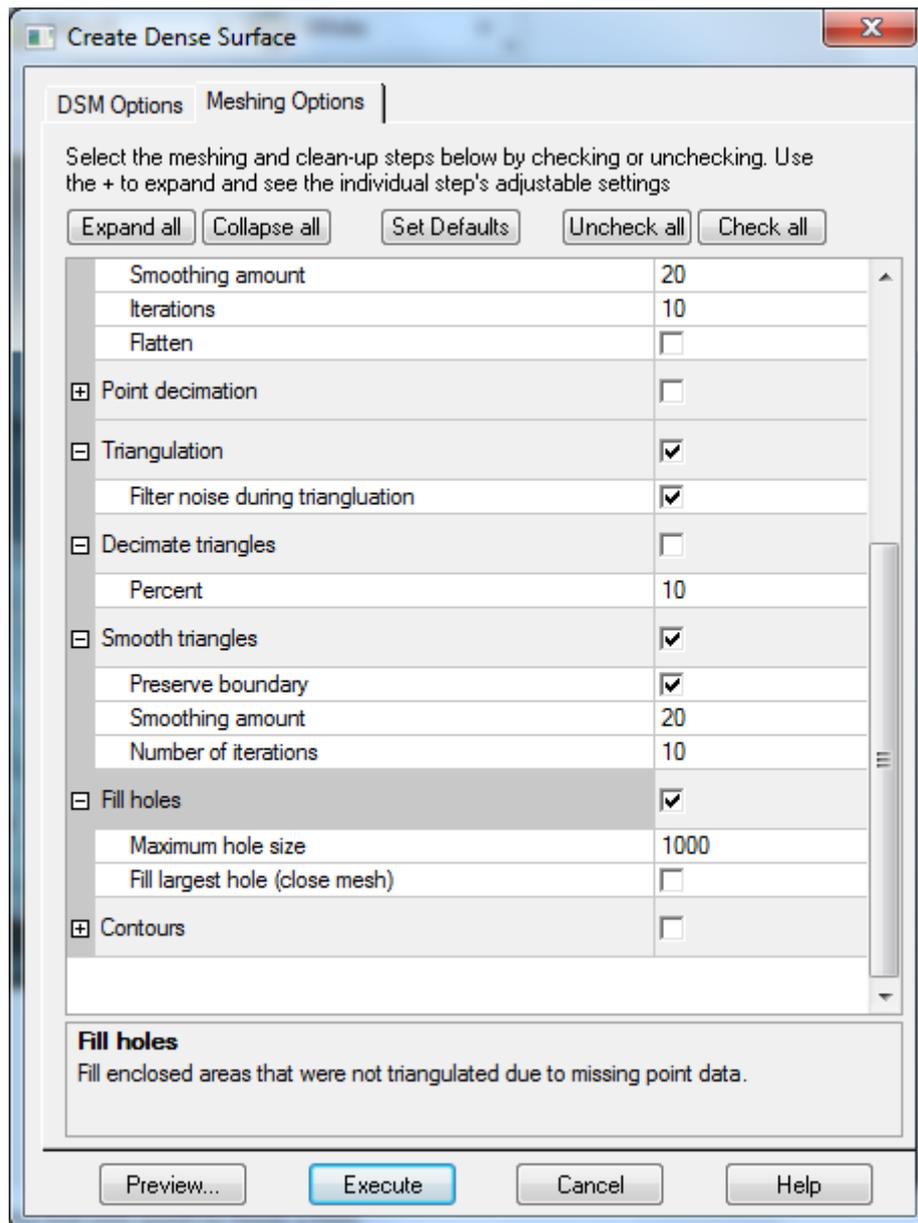


Abb. C-2: Zweiter Teil der Parameter zur Generierung von Punktwolken in PhotoModeler.

Schritte für die Registrierung von Punktwolken

1. Erstellen einer Registrierung i Projektordner der zu verknüpfenden *ScanWorlds* im Cyclone-NAVIGATOR
2. Öffnen des Registrierungsfensters (Cyclone-REGISTER) und Hinzufügen der zu verknüpfenden *ScanWorlds*
3. Festlegen der HomeScanWorld (übergeordnetes Koordinatensystem)
4. Benennen bzw. Hinzufügen der Referenzpunkte in jeder vorhandenen *ScanWorld*

5. Registrierung aller vorhandenen *Scan Worlds* und Genauigkeitsprüfung der Referenzpunkte
6. Erstellen einer registrierten *Scan World*
7. Erstellen eines *ModelSpaces* (Modelraum) von der registrierten *Scan World*

Einstellungen Nurbserstellung

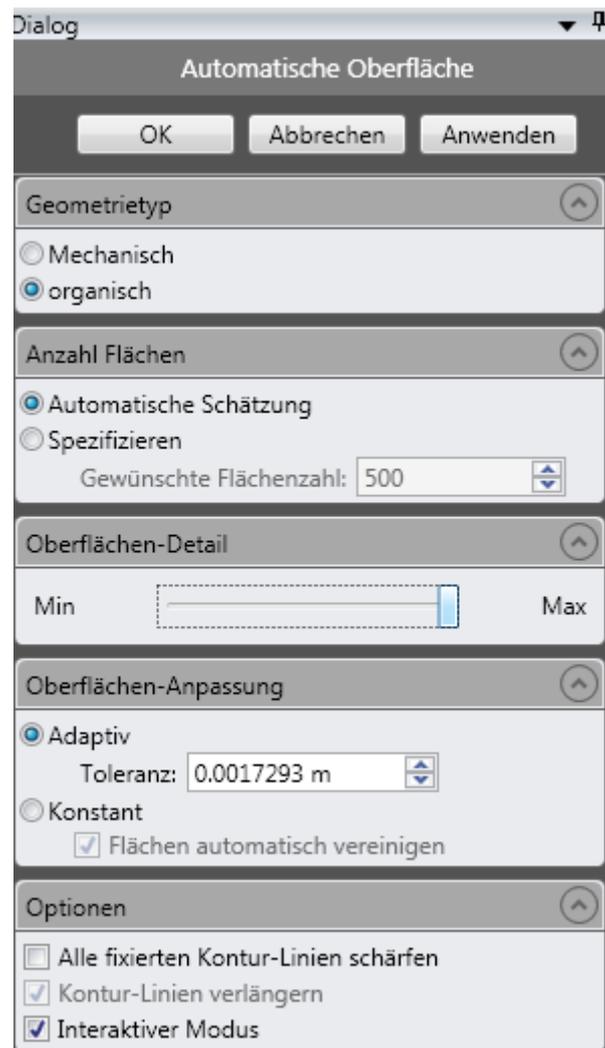


Abb. C-3: Einstellungen zur Nurbserstellung in Geomagic Studio 12

Anhang D

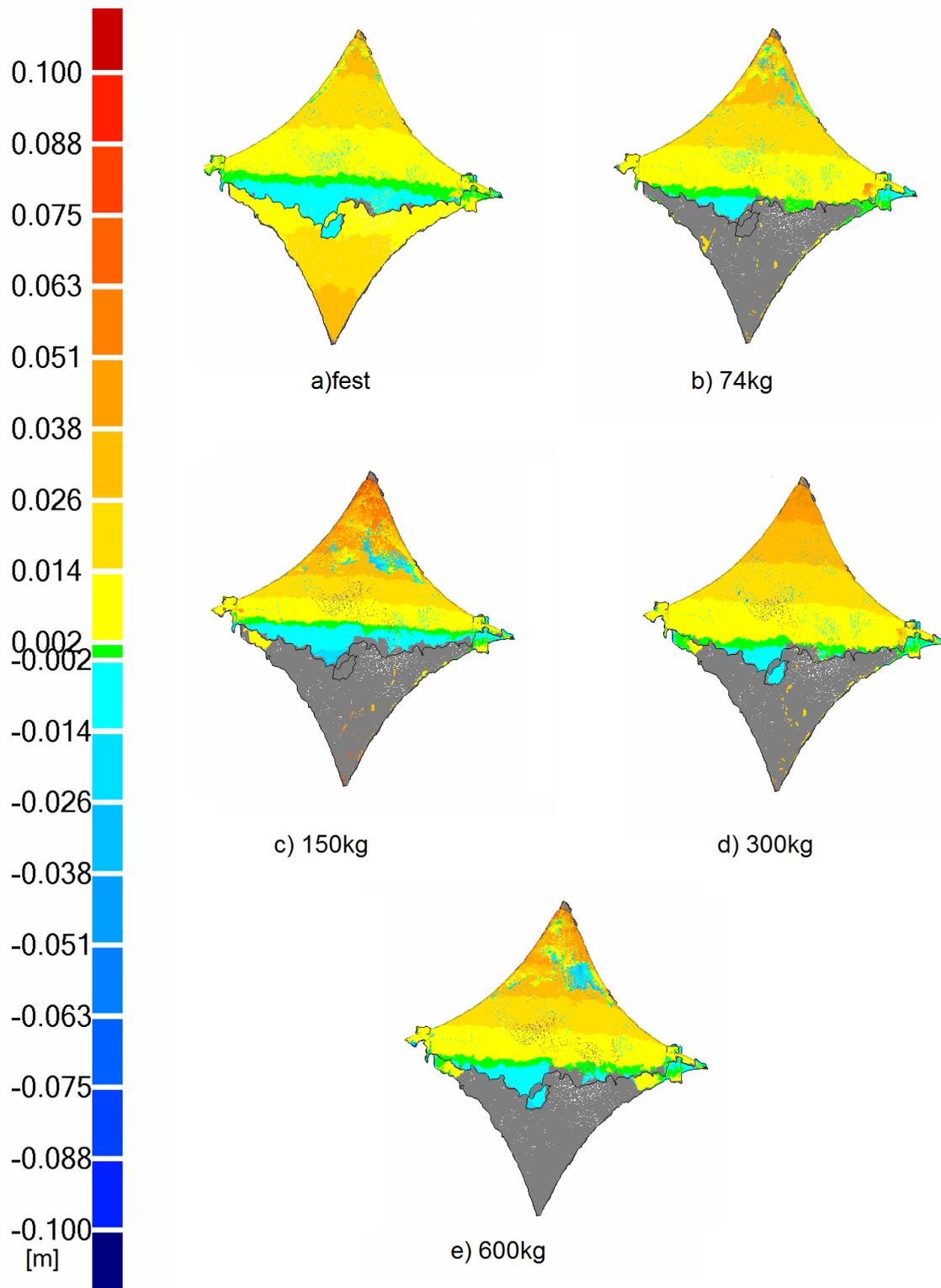


Abb. D-1: Abweichungen der unteren Seite des ersten Schalenelementes(Laser)

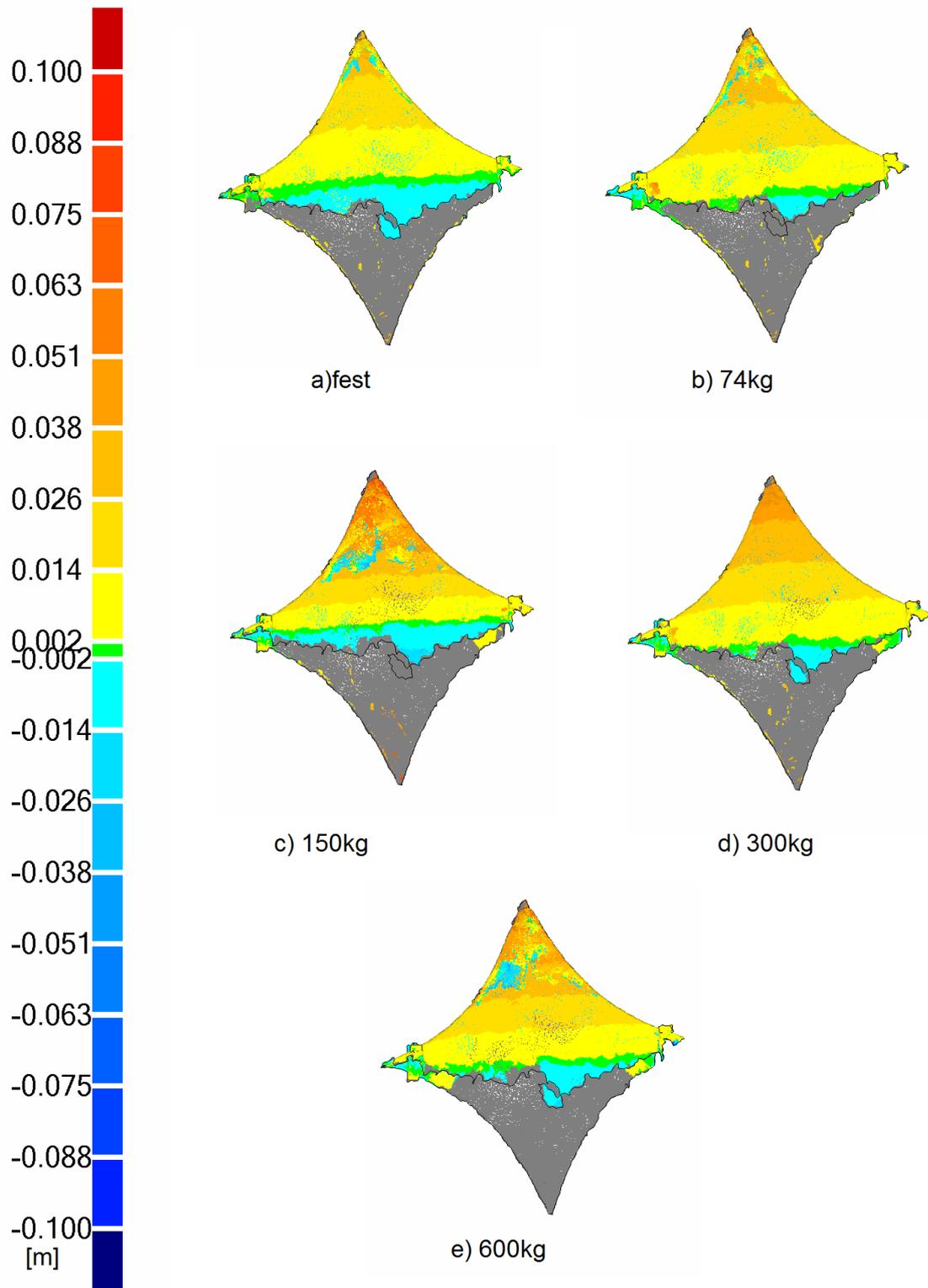


Abb. D-2: Abweichungen der unteren Seite des zweiten Schalelementes(Laser)

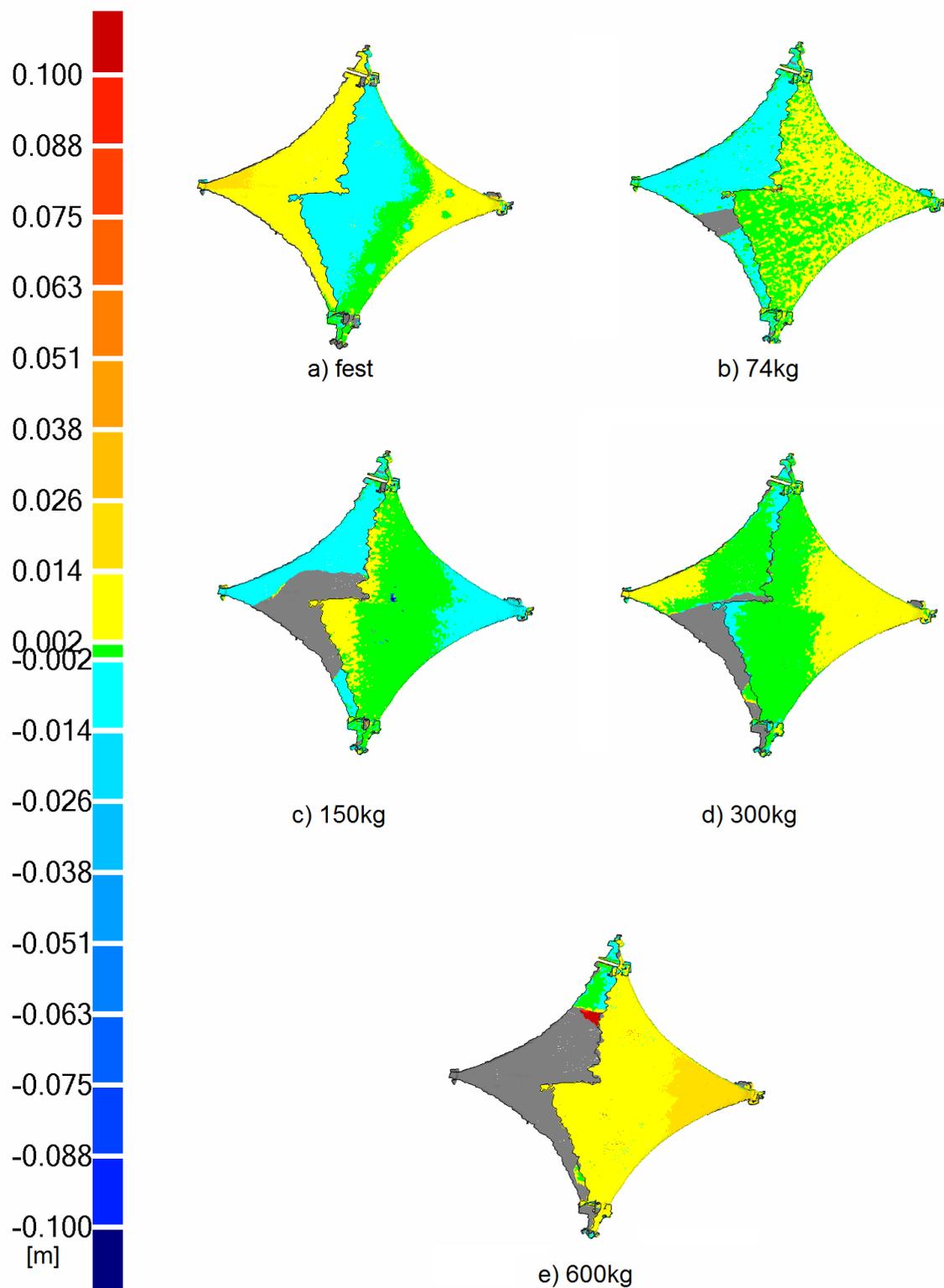


Abb. D-3: Abweichungen der unteren Seite des dritten Schalenelementes(Laser)

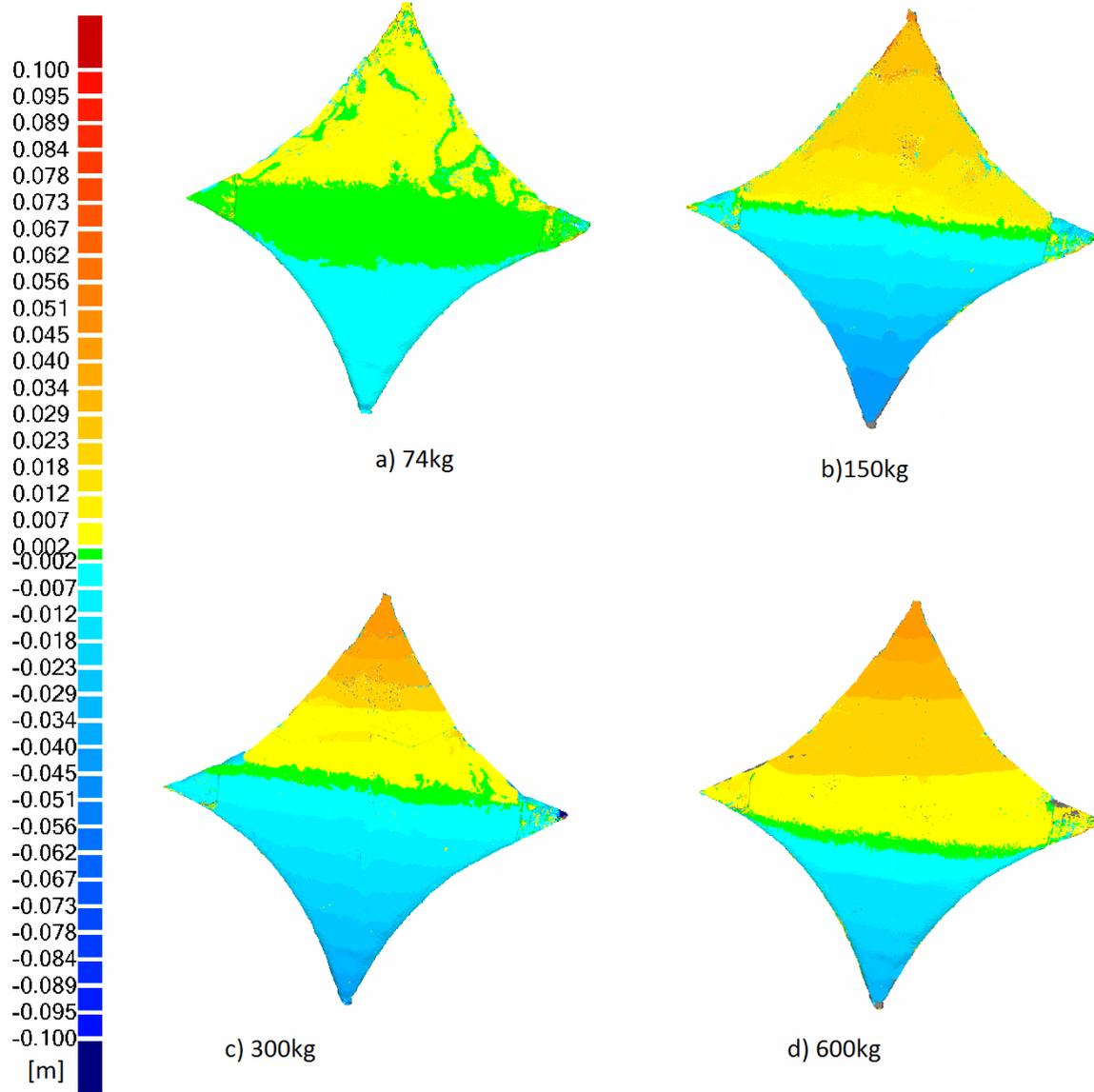


Abb. D-4: Abweichungen der unteren Seite des ersten Schalelementes(Photo)

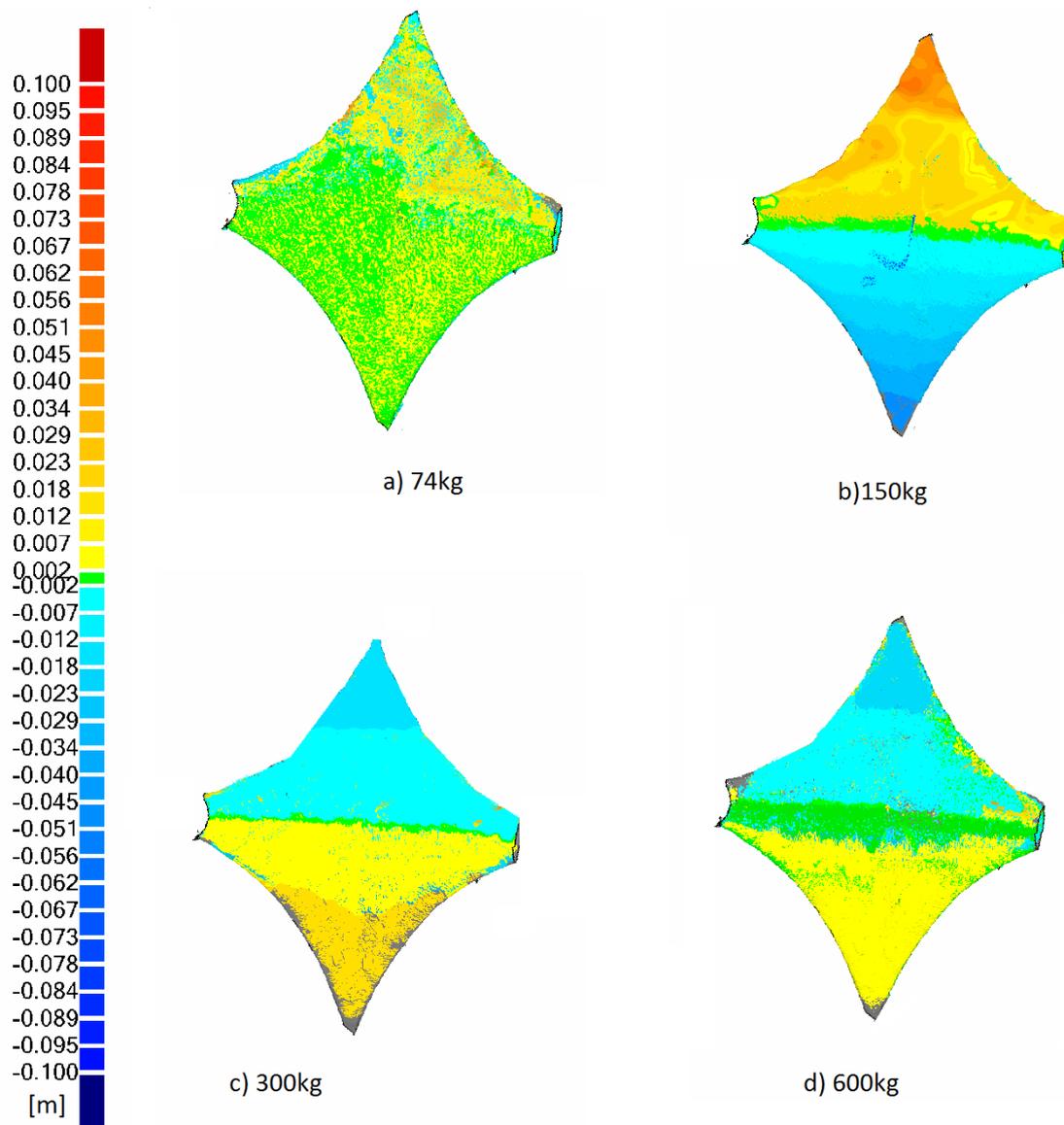


Abb. D-5: Abweichungen der unteren Seite des zweiten Schalenelementes(Photo)

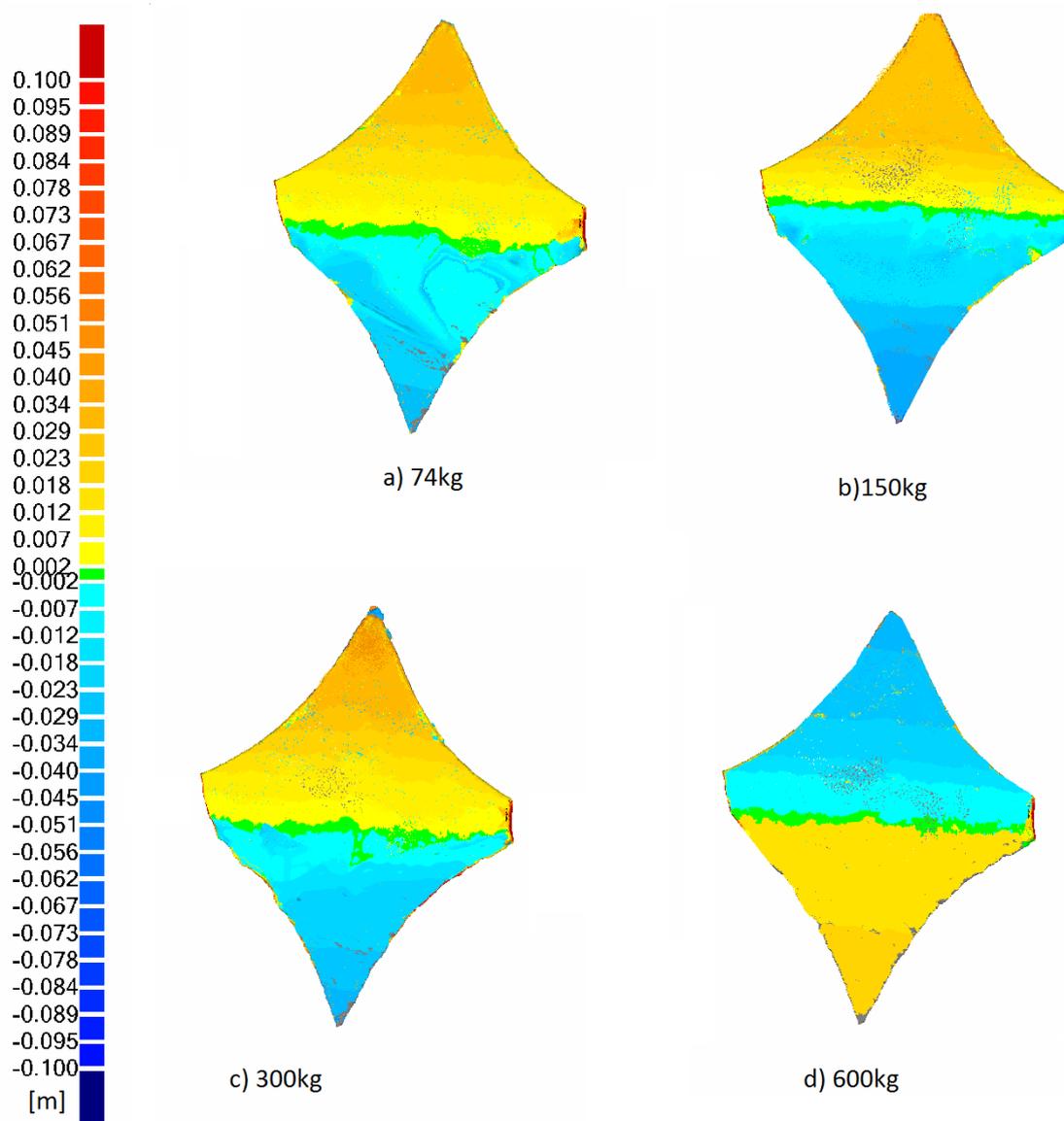


Abb. D-6: Abweichungen der unteren Seite des dritten Schalenelementes(Photo)