



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Probleme und Lösungsansätze beim Monitoring unter-
wasserarchäologischer Fundstellen am Beispiel des
UNESCO – Weltkulturerbes Pfahlbauten“

Verfasser

Viktor Jansa

angestrebter akademischer Grad

Magister der Philosophie (Mag. phil.)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 309

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Ur- und Frühgeschichte

Betreuerin / Betreuer:

ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Wolfgang Neubauer

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung	2
2. Überblick	3
2.1. Die UNESCO	3
2.2. Die Idee „Weltkulturerbe“	4
2.3. Weltkulturerbe „Pfahlbauten“	5
2.4. Das Phänomen Pfahlbausiedlung	5
2.4.1. Zur Geschichte der Pfahlbauforschung - ein Überblick	5
2.4.2. Interpretation und Zeitstellung der Pfahlbauten	9
2.4.3. Ausbreitung der Pfahlbauidee	10
2.4.4. Besonderheiten der Pfahlbauarchäologie	11
2.5. Nominierungsschrift und Managementplan	13
2.6. Die Fundstellen	13
2.6.1. Oberösterreich	13
2.6.2. Kärnten	18
3. Monitoring	21
3.1. Allgemeines	21
3.2. Gefährdungskategorien - Schadensbilder	22
3.2.1. Strömungen	22
3.2.2. Schifffahrt	22
3.2.3. Bojen	23
3.2.4. Stürme	24

3.2.5. Schwimmer	25
3.2.6. Taucher	26
3.2.7. Schadensbilder	27
3.3. Anforderungen an ein effizientes Monitoring - Verfahren	27
3.4. Herkömmliche Methoden des Monitorings	29
3.4.1. Visueller Survey	29
3.4.2. Video und Fotografie	30
3.4.3. Manuelle Vermessungen	30
3.4.4. Untersuchungen der hydrologischen Bedingungen	32
3.4.5. Geophysikalischer Survey	33
3.4.6. Unterwasser - Landschaftsmosaik	36
3.5. Andere, experimentelle Methoden	37
3.5.1. Airborne Laser Bathymetry	38
3.5.2. Georadar	40
3.5.3. 3D - Modellierung	43
4. Structure from Motion	45
4.1. Einleitung	45
4.2. Unterwasserfotografie	47
4.2.1. Digitale Fototechnik	49
4.2.2. Eigenheiten der Unterwasserfotografie	51
4.3. Geometrische Grundlagen	52
4.3.1. Kameramodelle	52
4.3.2. Kamerakalibrierung	56
4.3.3. Epipolargeometrie	58
4.4. Der SIFT - Algorithmus	60
4.4.1. Erkennen von Maxima/Minima - Werten	61
4.4.2. Der Deskriptor	63
4.4.3. Feature Matching	65
4.4.4. SiftGPU	66

4.5. Bündelausgleich	68
4.5.1. Allgemeines	68
4.5.2. Der Levenberg - Marquardt - Algorithmus	68
4.5.3. Parallel Bundle Adjustment	69
4.6. Multi View Stereo - Software	70
4.6.1. Patch - based Multi - view Stereo - Software	70
4.6.2. Clustering Views for Multi - view Stereo	71
4.7. Anwendungen	72
5. Praktische Anwendung - Fallstudie Seewalchen am Attersee	75
5.1. Allgemeines	75
5.2. Projektvorbereitung	76
5.2.1. Vorarbeiten	76
5.2.2. Verfügbares Equipment	77
5.3. Feldarbeit	78
5.3.1. Das Testgebiet	78
5.3.2. Die Monitoring - Strategie	79
5.3.3. Die Unterwasserarbeit	79
5.3.4. Zusammenfassung Feldarbeit	81
5.4. Datenbearbeitung	82
5.4.1. Auswahl der SfM - Software	82
5.4.2. Vorbereitung der Daten	84
5.4.3. Erzeugung der Punktwolke	89
5.4.4. Rekonstruktion und Texturierung der Oberfläche	93
5.4.5. Auswertung der Daten	95
5.5. Analyse	98
5.5.1. Testdatensatz	99
5.5.2. Berechnungsergebnisse - Überblick	100
5.5.3. Zusammenhang Datensatzgröße - Berechnungsdauer	101

5.5.4. Zusammenhang Anzahl Bilder - gefundene Features - rekon-	
struierte Punkte	103
5.5.5. Interpretation der Messungen	104
6. Conclusio - Ausblick	107
6.1. Ergebnisse	107
6.2. Monitoring - Strategie	107
6.3. Offene Fragen	108
6.4. Ausblick	109
A. Anhang	117
A.1. Zusammenfassung	117
A.2. Abstract	118
A.3. Lebenslauf	119
A.4. Verwendete Software	121
A.5. UNESCO - Weltkulturerbe Pfahlbauten: Überblick	122

Abbildungsverzeichnis

2.1. Pfahlbausiedlung Keutschacher See	6
2.2. Interpretation Pfahlbauten	9
2.3. Ausbreitung der Pfahlbauidee	11
2.4. Organische Funde Mondsee	12
2.5. Oberösterreichische Fundstellen	14
2.6. Mondsee - Keramik	17
2.7. See am Mondsee	18
2.8. Fundstelle Keutschacher See	19
2.9. Keutschacher See - Pfahlreste	20
3.1. Bojenkrater	24
3.2. Sprungturmgrube Seewalchen	25
3.3. Erosionsmarker	31
3.4. Bucht von Sipplingen - Bodenabtrag	32
3.5. Sidescan-Sonar	34
3.6. Vergleich ALB - Multibeam Sonar	39
3.7. Funktion Bodenradar	41
4.1. Structure from Motion	45
4.2. Älteste Fotografie	47
4.3. Älteste Unterwasser - Fotografie	48
4.4. Der Bildwinkelfaktor	50
4.5. Extrinsische Orientierung	54
4.6. Lochkamera - Abbildungsgeometrie und Bildkoordinatensystem . .	55
4.7. Innere Orientierung Lochkamera	56

4.8. Varianten radialer Verzerrung	56
4.9. Epipolargeometrie	58
4.10. Der SIFT - Algorithmus	60
4.11. Gauß'scher Glockenbecher	61
4.12. Bluring mit Gauß - Filter	61
4.13. Skalenraum	62
4.14. Erkennen von Maxima- und Minima - Werten	63
4.15. Features in einem Bild	65
4.16. Feature Matching	67
4.17. Methode der kleinsten Quadrate	69
4.18. Vergleich Punktwolkendichte	72
5.1. Das Testgebiet in Seewalchen/Attersee	75
5.2. Dokumentation Mondsee	77
5.3. Positionsmarker	80
5.4. Vergleich Foto mit und ohne Weißabgleich	86
5.5. Lichtverhältnisse	87
5.6. Toolbar VisualSFM	89
5.7. Vergleich ungefilterte - gefilterte Punktwolke	92
5.8. Untexturiertes Mesh	94
5.9. Fertiges Mesh	95
5.10. Testfläche	96
5.11. Testfläche verändert	97
5.12. Schnittebene durch die Testfläche	98
5.13. Schnittlinien	98
5.14. Diagramm Datensatzgröße - Berechnungsdauer	103
5.15. Diagramm Anzahl Bilder - Punkte	105
A.1. Organigramm Management	124

Tabellenverzeichnis

5.1. Software - Vergleich Kubus	83
5.2. Software - Vergleich Kugel	83
5.3. Testdatensätze für die Vergleichsberechnungen	99
5.4. Berechnungsergebnisse Datensätze ohne Weißabgleich - Überblick .	100
5.5. Berechnungsergebnisse Datensätze mit Weißabgleich - Überblick .	101
5.6. Zusammenhang Datensatzgröße - Berechnungsdauer	102
5.7. Zusammenhang Datensatzgröße - Features - Points	104
A.1. Verwendete Software - Linkliste	121
A.2. UNESCO - Weltkulturerbe Pfahlbauten: Mitglieder	122

1. Einleitung

„Damage to cultural property belonging to any people whatsoever means damage to the cultural heritage of all mankind, since each people makes its contribution to the culture of the world.“

Haager Konvention [1954](#), Präambel

1.1. Motivation

Am 10. September 2011 erfolgte im schweizerischen *Neuchâtel* (Neuenburg) die offizielle Verleihung des Status’ als *UNESCO - Weltkulturerbe* für ausgewählte Pfahlbauten im circumalpinen Raum. Darunter befanden sich auch 5 österreichische Fundstellen, nämlich die oberösterreichischen Pfahlbausiedlungen *Absdorf 1* und *3* sowie *Litzlberg Süd* im Attersee, *See* im Mondsee und schließlich die Pfahlbaustation im *Keutschacher See*. Mit dieser Eintragung übernahm der österreichische Staat, in dieser Angelegenheit vertreten durch das *Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur (BMUKK)*, die Verpflichtung zur Erhaltung und Erforschung dieser Fundstellen.

Um für die Erhaltung sorgen zu können, ist ein umfassendes Monitoring erforderlich. Doch welche Methoden sollen angewandt werden? Die bisher übliche Vorgehensweise beschränkt sich im Wesentlichen auf das Vermessen mit Maßbändern, fallweise Tauchgänge zur visuellen Kontrolle sowie manchmal auch eine zeich-

nerische und, im besten Fall, fotografische Dokumentation. Ein Monitoring im strengen Sinne des Wortes stellen diese Maßnahmen allerdings bei Weitem nicht dar.

Aber gibt es überhaupt Methoden, mit denen diese Problematik zu lösen ist? Welche grundsätzlichen Anforderungen müssen an solche Methoden gestellt werden, damit ihre Anwendung sinnvoll ist, und wie könnte die Anwendung bzw. die Ergebnisse dieser Anwendung an einem konkreten Beispiel aussehen? Die Beantwortung dieser Fragen ist Inhalt der vorliegenden Arbeit.

1.2. Zielsetzung

Aufbauend auf den ideellen und rechtlichen Grundlagen des Systems „Weltkulturerbe“ sowie der Forschungsgeschichte zu den österreichischen Pfahlbaustationen sollen die Verpflichtungen, die gemäß der Nominierungsschrift bzw. den einen Teil derselben bildenden Managementplanes vom BMUKK wahrzunehmen sind, dargestellt werden.

Ziel der Arbeit ist es, die maßgeblichen Parameter für ein effizientes Monitoring - Verfahren zu entwickeln. Darauf aufbauend sollen die derzeit aktuellen Verfahren einer Beurteilung unterzogen werden sowie ein neues Verfahren, nämlich ein Monitoring - System basierend auf der zumindest partiellen Erfassung der Fundstellen mittels *Structure from Motion*, evaluiert und anhand einer Fallstudie die Anwendbarkeit des vorgeschlagenen Verfahrens überprüft werden. Außerdem soll eine Strategie zur Umsetzung eines effizienten und praktikablen Monitoring - Systems vorgeschlagen werden.

2. Überblick

2.1. Die UNESCO

Die *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (UNESCO)* ist eine der 17 selbstständigen Sonderorganisationen der *UNO*. Ihr Sitz befindet sich in Paris, Mitglieder sind außer Liechtenstein alle Mitglieder der *UNO* und die nicht in der *UNO* vertretenen Cookinseln, Niue sowie die Palästinensischen Autonomiegebiete (195 Mitglieder insgesamt), außerdem 8 assoziierte Mitglieder (UNESCO 2012). Die *Österreichische UNESCO - Kommission* beschreibt die Zielsetzung der *UNESCO* folgendermaßen:

„Ziel der UNESCO ist es, durch Förderung der internationalen Zusammenarbeit in den Bereichen Bildung, Wissenschaft, Kultur und Kommunikation/Information zur Wahrung des Friedens und der Sicherheit beizutragen. Denn ein ausschließlich auf politischen und wirtschaftlichen Abmachungen von Regierungen beruhender Friede kann die einmütige, dauernde und aufrichtige Zustimmung der Völker der Welt nicht finden. Friede muss – wenn er nicht scheitern soll – in der geistigen und moralischen Solidarität der Menschheit verankert werden.“ (Verfassung der UNESCO 16. November 1945)“ (Österreichische UNESCO-Kommision 2012).

Unter dem Aspekt der internationalen Zusammenarbeit ist auch die Gemeinschaftsbewerbung der Schweiz, Österreichs, Frankreichs, Deutschlands, Italiens und Sloweniens zu sehen. Bei den Pfahlbauten handelt es sich um eine überregionale Siedlungsform, die Bewerbung einer Nation alleine um Aufnahme dieser heraus-

ragenden archäologischen Fundstellen in die Liste der Weltkulturerbestätten hätte schon alleine aus diesem Blickwinkel wenig Sinn gemacht.

2.2. Die Idee „Weltkulturerbe“

Die Idee des kulturellen Erbes wurde bereits im 18. Jh. von *Abbé Henri-Baptiste Grégoire* formuliert und in dem Eingangs zitierten Spruch in der Haager Konvention von 1954 kodifiziert. Der Begriff des *Kulturerbes* wird im Artikel 1 der *Richtlinien für die Durchführung des Übereinkommens zum Schutz des Kultur- und Naturerbes der Welt* definiert:

„Im Sinne dieses Übereinkommens gelten als „Kulturerbe“:

- *Denkmäler: Werke der Architektur, Großplastik und Monumentalmalerei, Objekte oder Überreste archäologischer Art, Inschriften, Höhlen und Verbindungen solcher Erscheinungsformen, die aus geschichtlichen, künstlerischen oder wissenschaftlichen Gründen von außergewöhnlichem universellem Wert sind;*
- *Ensembles: Gruppen einzelner oder miteinander verbundener Gebäude, die wegen ihrer Architektur, ihrer Geschlossenheit oder ihrer Stellung in der Landschaft aus geschichtlichen, künstlerischen oder wissenschaftlichen Gründen von außergewöhnlichem universellem Wert sind;*
- *Stätten: Werke von Menschenhand oder gemeinsame Werke von Mensch und Natur sowie Gebiete einschließlich archäologischer Stätten, die aus geschichtlichen, ästhetischen, ethnologischen oder anthropologischen Gründen von außergewöhnlichem universellem Wert sind.“* (W. u. K. Organisation der Vereinten Nationen für Bildung [2005](#)).

2.3. Weltkulturerbe „Pfahlbauten“

Nachdem das *World Heritage Committee* mit der Veröffentlichung der Entscheidungen für das Jahr 2011 die Aufnahme von 111 der 937 bekannten Pfahlbauten (Stand 2012) im circumalpinen Bereich bekanntgab (World Heritage Committee 2011), erfolgte am 10. September 2011 im schweizerischen *Neuchâtel* (Neuenburg) die offizielle Verleihung des Status *UNESCO - Weltkulturerbestätte*. Dem relativ kurzen Aufnahmeverfahren (ca. 1 Jahr) war ein mehrjähriges Projekt der beteiligten Staaten vorausgegangen, dessen Ziel die Erarbeitung einer entsprechenden Nominierungsschrift war. Im Jahre 2004 initiiert und hauptsächlich von der Schweiz getragen (Hafner und Harb 2008), entstand so ein Werk mit einem Umfang von 3 Bänden und fast 1400 Seiten, in dem neben der Auflistung und Beschreibung der nominierten Stätten auch die kulturhistorische Bedeutung der Pfahlbauten erläutert sowie ein Managementplan enthalten ist, der regelt, welche Verpflichtungen die einzelnen Staaten für ihre Fundstellen einzugehen bereit sind um sie zu schützen und zu erforschen, aber auch im öffentlichen Bewusstsein zu verankern.

2.4. Das Phänomen Pfahlbausiedlung

2.4.1. Zur Geschichte der Pfahlbauforschung - ein Überblick

1854 beschrieb der Schweizer Ferdinand Keller erstmals die Überreste von Pfahlstümpfen und Keramiken, die er in Obermeilen am Zürichsee gesichtet hatte und mit prähistorischer Besiedlung in Verbindung brachte. Möglich war dies durch den ungewöhnlich trockenen Winter und den damit verbundenen niedrigen Wasserstand der Seen (Dworsky und Reitmaier 2004). Obwohl bereits früher von solchen Sichtungen berichtet worden war (Samonig 2001), löste Keller mit seiner



Abb. 2.1.: Virtuelle Rekonstruktion der Pfahlbausiedlung Keutschacher See (Quelle: Samonig 2001)

Publikation ein den gesamten mitteleuropäischen Raum erfassendes, regelrechtes Pfahlbaufieber aus. Auch in Österreich - Ungarn wurden im Auftrag einer Kommission der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften vor allem die Oberösterreichischen, Kärntner und Krainer Seen sowie der Gardasee untersucht, was im Jahr 1864 zur Entdeckung der Pfahlbaustation im *Keutschacher See* (siehe Abb. 2.1) führte (Ullepitsch 1864).

In den Jahren 1864 - 1886 wurden an der Fundstelle im *Keutschacher See* von J. Ullepitsch (1864), F. v. Hochstetter (1865), U. Gallenstein (1865), G. v. Wurmb (1871-72) und K. Hauser (1886) Feldforschungen durchgeführt, die geborgenen Artefakte wurden, allerdings erst mehrere Jahrzehnte später, von L. Franz (Franz 1928) und R. Pittioni (Pittioni 1935) bearbeitet und publiziert. Während sich die meisten Stücke der späteren Aufsammlungen aus den Salzkammergut - Seen im Naturhistorischen Museum in Wien befinden, sind die Funde aus dem

Keutschacher See zum größten Teil im Kärntner Landesmuseum, im Gemeindeamt Keutschach und in Privatsammlungen untergebracht.

Bereits 1870 wurde die erste Pfahlbausiedlung im Attersee entdeckt (*Seewalchen I*), der 1872 die für die Mondseekultur namensgebende Fundstelle *See am Mondsee* folgte (Much 1874).

In den Jahren 1900 - 1910 wurden neue Pfahlbausiedlungen im Salzkammergut entdeckt und untersucht. Allerdings stellte man bald fest, dass durch die methodisch mangelhaft durchgeführte Ausbeute der Fundstätten viele Erkenntnismöglichkeiten verloren gegangen waren. Es fehlten zu dieser Zeit die technischen Voraussetzungen, um unter Wasser liegende Fundstätten untersuchen zu können. Zwar hatten bereits 1854 erste Versuche mit Tauchern stattgefunden, doch war die Technik noch lange nicht so weit entwickelt, um unter Wasser wirklich arbeiten und forschen zu können.

Die Errichtung des Pfahlbau - Freilichtmuseums *Kammerl am Attersee* datiert in das Jahr 1910. Im Zuge von Dreharbeiten zum Film „Sterbende Völker“ brannte das Museum im Jahr 1922 ab.

In den 1920er Jahren wurde die Untersuchung der Ufersiedlungen fortgesetzt. Erstmals wurden ganze Siedlungen systematisch freigelegt, maßstabgetreu dokumentiert und fotografisch aufgenommen. Ab den 1930er Jahren kam es zu Großgrabungen in Feuchtgebieten und Seen der Schweiz, Norditaliens und Sloweniens. Während in den Feuchtgebieten die Grundrisse ganzer Häuser aufgedeckt werden konnten, ließen völlig ungenügende Forschungsmethoden die Hausgrundrisse in den Seen unerkannt.

K. Willvonseder begann 1931 mit Forschungen im Salzkammergut und setzte seine Arbeit in den Jahren 1951-1959 fort. Er äußerte sich auch zu den Methoden, mit denen die Pfahlbauforschung bisher betrieben wurde, recht eindrücklich: „Alle

bisher bei Pfahlbauforschungen in den oberösterreichischen Seen angewandten Verfahren können keinen Anspruch auf Wissenschaftlichkeit erheben und daher auch nicht als Methoden angesprochen werden. Wer immer in diesen Seen Pfahlbau-funden nachgespürt hat, angefangen vom Grafen Wurmbrand, . . . bis zu Theodor Wang und dem Fischer Wendel, welche die Suche als Erwerbszweck betrieben, war im Grunde nur bestrebt, möglichst viele Funde zustande zu bringen.“ (Willvonseder [1963-1968](#)).

Die erste interdisziplinäre Untersuchung einer Pfahlbausiedlung fand in den Jahren 1951/52 im *Keutschacher See* statt. Die Kampagne des *Bundesdenkmalamtes* (BDA) unter der Leitung von G. Moßler musste sich allerdings auf einen kleinen Teil des Pfahlfeldes beschränken, da der Einsatz von Schnorcheltauchern lediglich Arbeiten im seichten Wasser erlaubte. Es wurden pollenanalytische Bestimmungen an Bohrkernen, Seewasseranalysen sowie holzanatomische Untersuchungen durchgeführt, die Pfähle innerhalb der untersuchten Fläche wurden von der Oberfläche aus eingezeichnet (Moßler [1954](#)).

Erst in den 1960er Jahren wurde durch die Weiterentwicklung der Tauchtechnik das erfolgreiche Eindringen in die Flachwasserzonen möglich. In Süddeutschland begann 1979 ein Projekt zur Erfassung und Erforschung der Feuchtbodensiedlungen, das sich zu einer ständigen Einrichtung der Forschung und Denkmalpflege entwickelte. Auch in Ostfrankreich und Italien kam die Forschung wieder in Gang (Schlichterle [2001](#)). Bei der Fundstelle *See am Mondsee* wurden 1960 von W. Kunze vom Heimathaus Mondsee und J. Reitingner vom Oberösterreichischen Heimatmuseum erstmals in Österreich Preßlufttaucher für archäologische Arbeiten eingesetzt (Offenberger u. a. [1976](#)). Zwischen 1969 und 1986 wurde unter der Leitung von Johann Offenberger (BDA) eine umfangreiche Bestandsaufnahme unter Mitwirkung von Tauchern durchgeführt (Offenberger [1981](#), Offenberger [1995](#)). E. Ruttkay leitete, in ihrer Eigenschaft als Expertin für neolithische Chronologie und Keramik, von 1989 - 1992 ein Projekt, das die Aufarbeitung der inzwischen

umfangreichen Sammlungen aus den verschiedenen Pfahlbausiedlungen zum Ziel hatte. (Cichocki und Dworsky 2006)

Seit der Einstellung der Taucharbeiten im Jahr 1986 wurde in Österreich, mit Ausnahme einiger Kontrolltauchgänge und einer Kurzinventarisierung durch Dworsky und Reitmaier 2003 kaum archäologische Feldforschung an den Pfahlbaustationen durchgeführt. Eine Ausnahme bildet die Fundstelle im *Keutschacher See*. Sie wird seit Beginn der 1990er Jahre in regelmäßigen Abständen vom Dendrochronologen Otto Cichocki untersucht.

2.4.2. Interpretation und Zeitstellung der Pfahlbauten

Wie bereits erwähnt, war Keller nicht der Entdecker der Pfahlbauten, wohl aber war er der Erste, der diese Siedlungen als Wasserbauten erkannte (Samonig 2001). Seine Interpretation blieb jedoch nicht unwidersprochen. Während er von im offenen Wasser auf gemeinsamen Plattformen errichteten Siedlungen ausging, modifizierten andere Archäologen seine Theorie in verschiedener Weise (siehe Abb. 2.2).

Der deutsche Archäologe Hans Reinert stellte 1922 die These auf, dass die Siedlungen am Ufer errichtet gewesen und jeweils nur bei Hochwasser vom See aus erreicht worden seien. In den 1940er Jah-

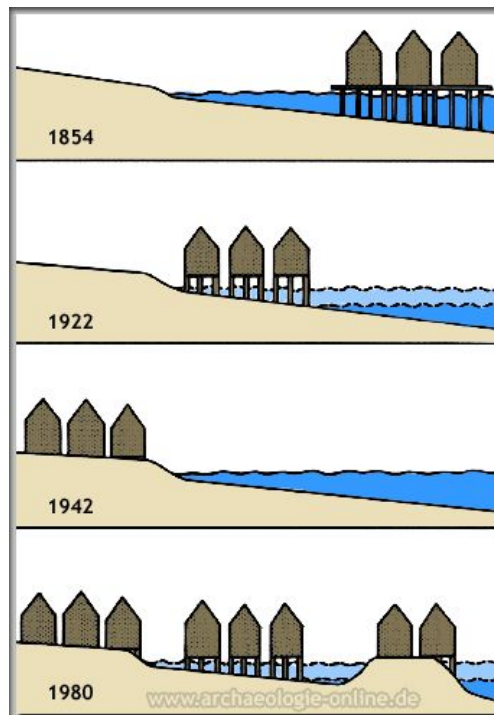


Abb. 2.2.: Interpretation der Pfahlbauten im Wandel der Zeit (Quelle: Schlichterle 2001)

ren wurden die Pfahlbauten überhaupt als romantischer Irrtum betrachtet und man vertrat die Ansicht, die Siedlungen seien ebenerdig am Ufer errichtet worden. Erst die moderne internationale Forschung seit 1970 konnte beweisen, dass es neben den ebenerdigen Ufersiedlungen tatsächlich auch Pfahlbausiedlungen gegeben hat, die am überschwemmungsgefährdeten Ufer lagen oder von Inseln aus in den See hinausterrassiert wurden.

Die älteste derzeit bekannte Pfahlbausiedlung im *Keutschacher See* konnte durch dendrochronologische Analysen und ^{14}C - Datierungen in den Beginn der Kupferzeit, also ca. 4000 v. Chr. datiert werden, während die Siedlungen nördlich des Alpenhauptkammes, die mehrheitlich der *Mondsee - Gruppe* zuzuordnen sind, ca. 3800 - 3100 v. Chr. besiedelt waren. Einige wenige Siedlungen sind bronzezeitlich, die wichtigste ist die Pfahlbausiedlung *Abtsdorf I*, die mittels ^{14}C - Datierungen auf einen Zeitraum von 1690 - 1260 eingegrenzt werden konnte. Holz- und Keramikfunde aus der Urnenfelderzeit im *Keutschacher See* sowie einige Siedlungsreste im *Traunsee* in der Nähe von *Traunkirchen*, die der Hallstattzeit zugeordnet werden, markieren das Ende der Pfahlbau - Phase in Österreich (palafittes [2009c](#)).

2.4.3. Ausbreitung der Pfahlbauidee

Während es in anderen Seen- und Moorgebieten Europas nur sporadisch zur Anlage von Pfahlbausiedlungen kam, wurden im Alpenvorland bisher bereits 937 Siedlungen (Stand 2012) dieser Art entdeckt. Die Besiedlung der circumalpinen Feuchtgebiete setzte offenbar eine Bereitschaft voraus, die den Ackerbaukulturen im restlichen Mitteleuropa fehlte. Im Gegensatz dazu sind im westlichen Mittelmeerraum bereits im 6. Jt. v. Chr. erste Pfahlbauten fassbar, Nachfolgekulturen in den südlichen Alpenrandseen können in das 5. Jt. v. Chr. datiert werden, und es gibt Anzeichen für ein erstes Ausgreifen nach Norden und an die Schweizer Mittel-



Abb. 2.3.: Ausbreitung der Pfahlbauidee (Quelle: Schlichterle 2001)

landseen. Die Siedlungen der *Egolzwiler Kultur*, die um 4300 v.Chr. den Zürichsee erreichen, stehen noch in der gleichen, westeuropäisch-mediterranen Kulturtradition.

Kurz danach begannen Randkulturen der donauländischen *Lengyelkultur* am *Federsee*, am *Keutschacher See* und in Slowenien Pfahlbausiedlungen zu errichten. Diese Siedlungen können als Ausdruck einer anfangs mediterranen Kulturtradition verstanden werden, die sich dann beidseits der Alpen auszubreiten begann und dort von mittel- und osteuropäischen Kulturen adaptiert wurde. Gestützt wird diese These durch die Ausbreitung von Nacktweizen nördlich der Alpen (siehe Abb. 2.3) parallel zum Siedlungstyp „Pfahlbau“ (Schlichterle 2001).

2.4.4. Besonderheiten der Pfahlbauarchäologie

Die prähistorischen Pfahlbauten entlang der Küsten, Flüsse und Seen und in den Sumpfgebieten des Alpenraumes sind eine der wichtigsten Quellen für die Erfor-

schung der frühen bäuerlichen Gesellschaften in Europa zwischen 5000 und 500 v. Chr.. Die außergewöhnlichen Bedingungen im Süßwasser führen dazu, dass auch organisches Material erhalten bleibt (siehe Abb. 2.4). Dadurch bieten diese Fundstellen ein außergewöhnlich detailliertes Bild zu den Lebensbedingungen der prähistorischen Bevölkerung, ihrer sozialen und wirtschaftlichen Entwicklung und der Interaktion mit ihrer Umwelt. Die Ergebnisse von 150 Jahren Pfahlbauforschung haben einen wesentlichen Einfluss auf unser Verständnis der neolithischen und bronzezeitlichen Kulturen im Allgemeinen und die Interaktionen dieser Gruppen im circumalpinen Bereich.

Durch die Erhaltung organischer Materialien bleiben auch Teile der Gebäude erhalten, was uns ein Wissen über die Siedlungsformen und damit die Möglichkeit gibt, eine Geschichte der Architektur zwischen 5000 und 500 v. Chr. zu schreiben.



Abb. 2.4.: Organisches Fundmaterial aus der Pfahlbaustation See/Mondsee (Quelle: [http:// homepage.univie.ac.at / violetta.reiter / OrgReste / 3575.jpg](http://homepage.univie.ac.at/violetta.reiter/OrgReste/3575.jpg))

2.5. Nominierungsschrift und Managementplan

Zuständig für das Erstellen des österreichischen Teils der Nominierungsschrift war die Sektion 4 (Kultur) des Bundesministeriums für Unterricht, Kunst und Kultur. Betrieben wurde das Projekt unter Leitung des Weltkulturerbe - Beauftragten des BMUKK, Dr. Bruno Maldoner, zum überwiegenden Teil von Mag. Cyril Dworsky, der nun, nach der Anerkennung der österreichischen Fundstellen als *UNESCO - Weltkulturerbe*, auch als Geschäftsführer des neu gegründeten Vereins „Kuratorium Pfahlbauten“ fungiert, dessen Aufgabe es ist, die im Managementplan angeführten Punkte, wie beispielsweise Monitoring, Schutz und Verankerung der Fundstellen im öffentlichen Bewusstsein, zu organisieren. Details zu Nominierungsschrift und Managementplan finden sich in Anhang [A.5](#).

2.6. Die Fundstellen

Die österreichischen Fundstellen liegen in drei verschiedenen Alpenseen, die sich in einigen Merkmalen wesentlich voneinander unterscheiden. Im folgenden Abschnitt soll auf diese Unterschiede eingegangen werden.

2.6.1. Oberösterreich

Attersee:

In einem inneralpinen Zungenbecken der Flyschzone gelegen, handelt es sich beim Attersee um den größten und mit einer Tiefe von 170 m zugleich tiefsten zur Gänze in Österreich liegenden See. Er ist das Endglied einer Seenkette mit dem Fuschlsee im Südwesten, dem Irrsee im Nordwesten und dem Mondsee in der Mitte. Mit nur 20° C Oberflächentemperatur im Hochsommer ist der See relativ kühl, nur in

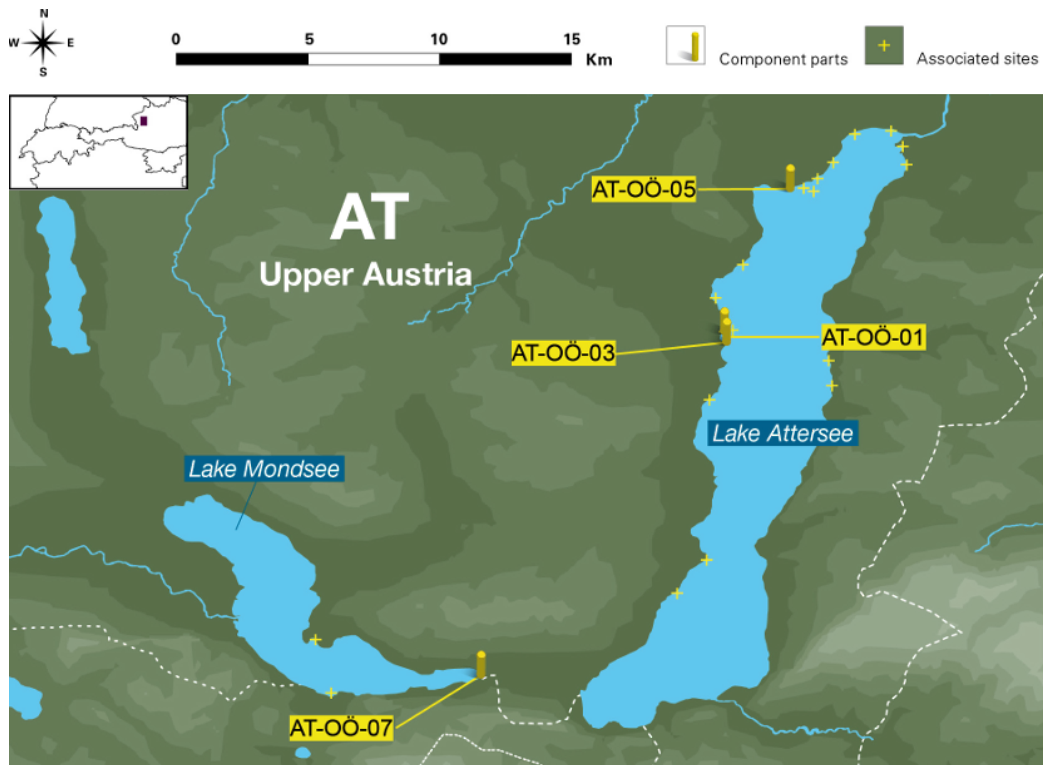


Abb. 2.5.: Die Oberösterreichischen Fundsstellen: AT-OÖ-05 = Litzlberg Süd, AT-OÖ-01 = Abtsdorf I, AT-OÖ-03 = Abtsdorf III, AT-OÖ-07 = See am Mondsee (Quelle: palafittes 2009b, mit eigenen Änderungen)

einigen sonnenexponierten Buchten erreicht die Wassertemperatur Werte bis zu 25° C. 58 % des Oberflächenzuflusses bringt die Mondseeache, die im Süden vom Mondsee kommend nach einer Fließstrecke von 2,5 km in den Attersee mündet. Die Ager, der einzige Abfluss im Norden, entwässert den See über die Traun in die Donau (Gassner u. a. 2002).

Der Attersee wird touristisch stark genutzt, er ist ein bekanntes Tauchgebiet und es gibt eine Linienschiffahrt mit 4 Schiffen. Der Betrieb von privaten Motorbooten ist nur eingeschränkt möglich.

Die Jahresmittelwerte der Sichttiefen des Attersees schwanken zwischen 12 und 13 m mit Maximal - Werten jeweils im Januar eines Jahres. Im Januar 1999 wurde mit

einer Sichttiefe von 26,5 m der höchste je in einem Salzkammergutsee gemessene Wert erreicht (Gassner u. a. [2002](#)).

Sowohl die Linien- als auch die private Schifffahrt spielen als Gefährdungsfaktoren für die Pfahlbauten wohl keine Rolle, da Motorboote nicht im Uferbereich fahren dürfen. Taucher sind ebenfalls zu vernachlässigen, da das verhängte Tauchverbot aus eigener Erfahrung des Verfassers grossteils eingehalten wird. Strömungen spielen, zumindest augenscheinlich, ebenfalls keine Rolle, dass mit Abstand größte Gefährdungspotential bilden die sogenannten „Bojenkrater“ (siehe Abschn. [3.2.3](#)).

Im Attersee liegen 3 der insgesamt 5 österreichischen Fundstellen, die in die Liste der Weltkulturerbe aufgenommen wurden: *Abtsdorf I*, *Abtsdorf III* sowie *Litzlberg Süd*, alle am Westufer gelegen. Alle drei Fundstellen wurden zwar im Zuge der Bestandsaufnahme durch J. Offenberger zwischen 1969 und 1986 vermessen und datiert (Offenberger [1995](#)), abgesehen von einer Zustandskontrolle im Zuge der Kurzinventarisierung durch Dworsky und Reitmaier [2004](#) wurden allerdings keine weiteren Untersuchungen durchgeführt.

Mondsee:

Als mittlerer See der Seenkette Irrsee - Fuschlsee - Mondsee - Attersee liegt der Mondsee am Rande der Nördlichen Kalkalpen. Er gilt als einer der wärmsten Badeseen des Salzkammergutes, die Wassertemperatur an der Oberfläche erreicht im Sommer mind. 22° C, meist noch deutlich mehr. 70 % der Wasserfracht bringen die drei größten Zuflüsse, die Fuschler Ache, die Zeller Ache und die Wangauer Ache, den Abfluss bildet die Mondseeache im Süden, die den See zum Attersee hin entwässert.

Aufgrund der warmen Wassertemperaturen wird der See intensiv als Badesee wie auch zum Tauchen, Surfen, Segeln und Wasserschifahren genutzt. Daneben gibt es mehrere Ausflugsschiffe, private Motorboote sind jedoch verboten.

Die mittlere Sichttiefe schwankt zwischen 5,3 m und 6,4 m, die besten Werte gibt es jeweils zwischen Dezember und Januar. Der höchste gemessene Wert stammt aus dem Jahr 2000 und betrug 11,5 m. Neben biogenen und mineralischen Trübungen dürfte auch die biogene Entkalkung Einfluss auf die geringen Sichttiefen des Sees haben (Gassner u. a. [2002](#)).

In archäologischer Hinsicht ist diese Siedlung der *Mondsee - Gruppe* außerordentlich wertvoll. Durch die Untersuchungen von M. Much steht eine außerordentlich große Sammlung an neolithischen Funden zur Verfügung, nach der die *Mondsee - Gruppe* benannt wurde (Much [1874](#)). Das Fundinventar der Siedlung stellt das mit Abstand umfangreichste in der gesamten bisherigen Geschichte der österreichischen Pfahlbauforschung dar und ist Grundlage für zahlreiche Arbeiten, die sich mit den verschiedenen Fundgattungen, der Herkunft von Rohstoffen oder der Untersuchung von möglichen Handelsverbindungen beschäftigen (z. Bsp. Antl - Weiser [2006](#), Bachner [2002](#)). Neben der typischen Mondsee - Keramik (siehe Abb. [2.6](#)) gehören dazu auch Steingeräte und organische Reste jeglicher Art.

Das Gefährdungspotential der Fundstelle *See am Mondsee* liegt in anderen Bereichen als am Attersee:

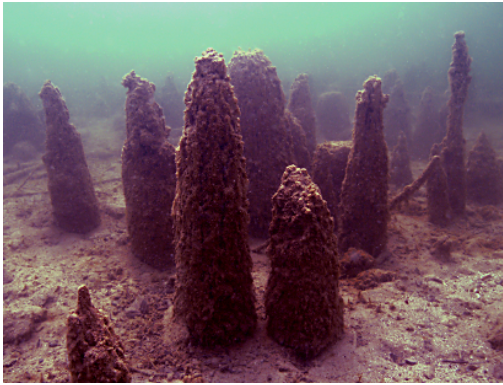
1. Die Fundstelle liegt unmittelbar vor einer öffentlichen Badewiese in einer Tiefe von rund 2 m. Die Pfähle, die teilweise bis zu 1 m frei stehen, reichen also bis knapp unter die Wasseroberfläche (siehe Abb. [2.7](#)). Wie anlässlich eines Kontrolltauchganges im Sommer des Jahres 2012 zu erfahren war, wissen auch zum Teil langjährige Besucher nicht, dass es sich bei den Pfählen im See um die Reste einer fast 6 000 Jahre alten Siedlung handelt und fanden



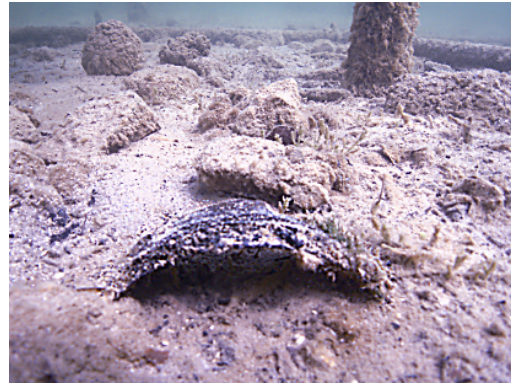
Abb. 2.6.: Typische Mondsee - Keramik: reduzierend gebranntes Wandfragment mit Furchenstich - Linienband, schraffierten Dreiecken und konzentrischen Kreisen, in denen noch Reste der Inkrustierung sichtbar sind (Quelle: [Studien-sammlung des Instituts für Ur- und Frühgeschichte der Universität Wien](#))

es bis zu diesem Zeitpunkt durchaus unterhaltsam, wenn ihre Kinder mitten im See auf Pfählen balancierten. In diesem Fall dürfte also die Geheimhaltungstaktik, von der manche Archäologen immer noch überzeugt sind, als Schutzmaßnahme nicht nur versagt, sondern sogar zu beträchtlichen Schäden geführt haben.

2. Durch die Lage unmittelbar vor dem Abfluss des Mondsees, der Mondseeache, herrscht in diesem Gebiet auch immer eine gewisse Strömung, was die freistehenden Pfähle und auch die zum Teil frei liegenden Scherben erklärt.



(a) Foto der Pfahlbausiedlung See/Mondsee. Durch die Lage direkt am Ausfluss des Mondsees macht sich die Strömung durch massiven Bodenabtrag bemerkbar und legt die Pfähle frei.



(b) Durch die Strömung freigelegte Scherbe mit Mondsee - Keramik. Solche Scherben sind sehr oft oberflächlich zu finden.

Abb. 2.7.: Die Station See am Mondsee: Das Gefährdungspotential dürfte hier vor allem in der herrschenden Strömung liegen (Fotos: V. Jansa).

2.6.2. Kärnten

Der Keutschacher See:

Mit einer Größe von 1,4 km² ist der Keutschacher See der größte der vier Seen im Keutschacher Seental, dass südwestlich von Klagenfurt und südlich vom Wörthersee liegt. Er wird durch den Reifnitzbach zum Wörther See hin entwässert. Ihre jetzige Form bekam die Landschaft in der Endphase der Würmeiszeit.

Ungefähr in der Mitte des bis zu 15,6 m tiefen Sees befindet sich eine Unterwassererhebung, die bis etwa 1,5 m unter die Wasseroberfläche reicht. Diese Erhebung hat eine Länge von ca. 70 m und eine Breite von ca. 30 m, ist länglich-oval und südwestlich-nordöstlich ausgerichtet. Auf ihr befinden sich die im Jahr 1864 gefundenen Überreste einer Pfahlbaustation (Samonig [2001](#)).

In den 1970er - Jahren wurde in deutschen Tauchsportzeitschriften damit geworben, dass im Keutschacher See das Tauchen an einer archäologischen Fundstelle

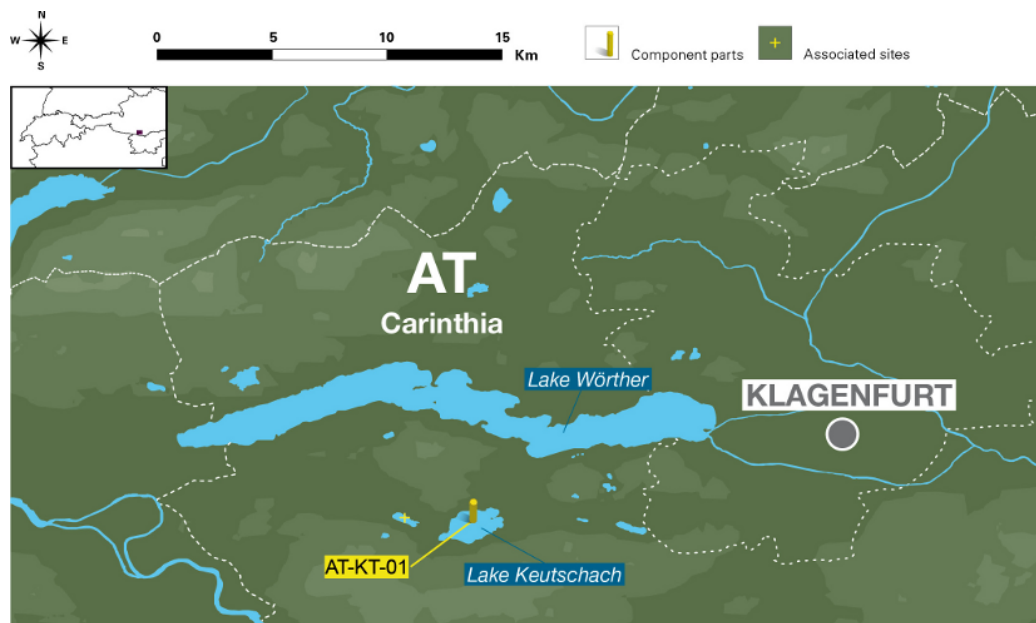


Abb. 2.8.: Die Kärntner Fundstelle: AT-KT-01 = Keutschacher See (Quelle: palafittes 2009b)

möglich sei. Infolgedessen wurde der See überflutet von deutschen Sporttauchern, die Fundstelle wurde von Johann Offenberger nach Untersuchungen im Jahre 1982 als vollständig geplündert und zerstört bezeichnet (Offenberger 1982, Offenberger 1986).

Nach der gefundenen Keramik wird die Pfahlbausiedlung Keutschacher See der *Kanzianiberg - Lasinja -Gruppe* zugeordnet, die in Kärnten, der Südsteiermark sowie im Burgenland beheimatet ist. Sie gehört zum Epilengyel - Komplex und wird von E. Ruttkay in 2 Gruppen unterteilt (Samonig 2001).

Neben mehr oder weniger großen Bruchstücken von Keramikgefäßen besteht das Fundmaterial aus Tüllenlöffel, Gusslöffel, Spinwirteln und Hüttenlehm sowie Knochen und Geweihstücken (Samonig2001). Die meisten Funde können in das Neolithikum eingeordnet werden, allerdings wurde auch Keramik aus der Spätlatènezeit, der Römischen Kaiserzeit und dem Mittelalter sowie eine in die Hallstattzeit datierte Holzkonstruktion entdeckt, die als Fischreuse angesprochen wird. Vor al-

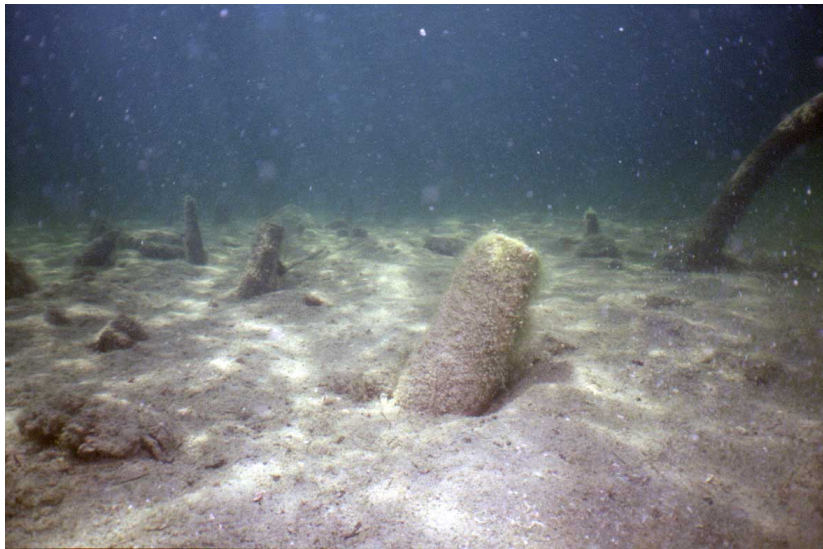


Abb. 2.9.: Pfahlreste im Bereich der Untiefe im Keutschacher See (Foto ©Cyril Dworsky).

lem die Fischreuse muss allerdings nicht bedeuten, dass die Pfahlbausiedlung zu dieser Zeit noch bewohnt war, es könnte sich lediglich um einen Hinweis auf Fischfang handeln (Cichocki und Dworsky 2006).

Zwar wird die Fundstelle seit Anfang der 1990er Jahre von dem Dendrochronologen Otto Cichocki regelmäßig untersucht, Publikationen, denen der Erhaltungszustand oder das Gefährdungspotential zu entnehmen sind, fehlen bisher aber. Auch vom „Kärntner Institut für Seenkunde“ sind keine Informationen bezüglich Sichttiefen, durchschnittlichen Temperaturen im Jahresverlauf o. ä. zu erhalten, entsprechende Anfragen wurden nicht beantwortet.

3. Monitoring

3.1. Allgemeines

Zum Begriff Monitoring findet man im Duden folgende Erklärung: „[Dauer] Beobachtung [eines Systems]“, Herkunft: engl.: monitor: beobachten, kontrollieren.

Im Grunde geht es beim Monitoring darum, durch dauerhafte oder regelmäßige Beobachtung Veränderungen an definierten Strukturen festzustellen. Auf Basis der Ergebnisse dieser Beobachtungen können dann entsprechende Maßnahmen gesetzt werden. Das Monitoring spielt in vielen Bereichen der Naturwissenschaften und Technik eine große Rolle, wobei es sich nicht zwangsläufig immer um Schutzmaßnahmen handeln muss. Denkbar sind auch Szenarien, bei denen, beispielsweise in der Biologie oder Landwirtschaft, durch das Monitoring Futterzusammensetzungen optimiert werden oder in der Bauwirtschaft, wo das Monitoring vorhandener Risse in Bauwerken bei Umbauarbeiten in manchen Fällen primär zur Abwendung von Haftungsklagen dient.

Wie für alle anderen Tätigkeiten unter Wasser gilt auch für das Monitoring, dass mit einem deutlichen Mehraufwand und Erschwernissen im Vergleich zu ähnlichen Tätigkeiten an Land zu rechnen ist.

3.2. Gefährdungskategorien - Schadensbilder

3.2.1. Strömungen

Strömungen, auch schwache, führen im Laufe der Zeit zu einer Abtragung und Verlagerung des Seebodens und der prähistorischen Holzpfähle (siehe Abb. 2.7). Problematisch an dieser Gefährdungskategorie ist die Tatsache, dass sie ohne größere bauliche Maßnahmen und damit verbundene Eingriffe in das hydrodynamische und ökologische System des jeweiligen Gewässers nicht zu vermeiden ist.

Als bauliche Maßnahmen kommen Molen oder Spundwände in Frage, die die Strömungen entsprechend umleiten, allerdings muss eine Planung derselben unbedingt unter Mitwirkung von Limnologen und Hydrologen erfolgen, da sonst beispielsweise durch Brackwasserbildung die Gefahr einer Verschlechterung der Wasserqualität und damit einer erhöhten chemischen oder biologischen Beanspruchung der Holzteile im strömungsberuhigten Bereich bestünde.

3.2.2. Schifffahrt

Die Gefährdung unterwasserarchäologischer Fundstellen durch die Schifffahrt vor allem im Flachwasserbereich ist evident, wird allerdings aus Sicht des Verfassers zumindest im Fall der österreichischen Fundstellen überschätzt. Im Mondsee ist der Betrieb privater Motorboote mit Verbrennungsmotor generell untersagt, im Attersee gilt ein ähnliches Verbot in der Zeit vom 1. Juli bis zum 31. August, davor und danach ist der Betrieb von Motorbooten aufgrund des Klimas und damit der praktisch beendeten Sommersaison vernachlässigbar. Darüber hinaus ist auf allen Seen das Befahren der 200 m - Zone vor dem Ufer ausschließlich zum An- und Ablegen erlaubt, wobei eine Maximalgeschwindigkeit von 10 km/h

eingehalten werden muss. Eine Gefährdung durch private Motorboote ist daher nicht wahrscheinlich.

Die gewerbliche Schifffahrt, die sowohl am Atter- als auch am Mondsee existiert, befährt genau vorgegebene Routen, sollte eine dieser Routen tatsächlich direkt über eine Pfahlbausiedlung führen und die Wassertiefe so gering sein, dass eine Beschädigung erfolgen kann, so müsste lediglich die Route abgeändert werden. Ein entsprechendes Szenario ist auf jeden Fall bei der Anlegestelle Seewalchen gegeben.

Was bisher leider fehlt, sind Untersuchungen zum Gefährdungspotential der verschiedenen Schiffstypen und Schiffsschrauben.

3.2.3. Bojen

Für das Anlegen mit einem Segelboot wird im Uferbereich am Seegrund ein Fundament betoniert, das durch eine Kette mit einer an der Oberfläche schwimmenden Boje verbunden ist. Um im Falle von starkem Wind und Böen aus verschiedenen Richtungen dem Boot eine gewisse Bewegungsfreiheit („*Schwöjkreis*“) zu geben und zu verhindern, dass die Verankerung am Boden beschädigt wird, haben die Ketten meist eine Länge, die die Wassertiefe deutlich, zum Teil um mehr als das Doppelte, übersteigt. Da aber meist kein starker Wind herrscht, schleifen die Ketten langsam über den Grund und graben im Laufe der Zeit Krater mit einem Durchmesser bis zu 10 m und einer Tiefe von 1 m oder mehr. In diesem Bereich ist jede archäologische Stratifikation völlig zerstört (siehe Abbildung 3.1). Leider werden die Bojen bisher ohne Rücksicht auf archäologische Fundstellen installiert.

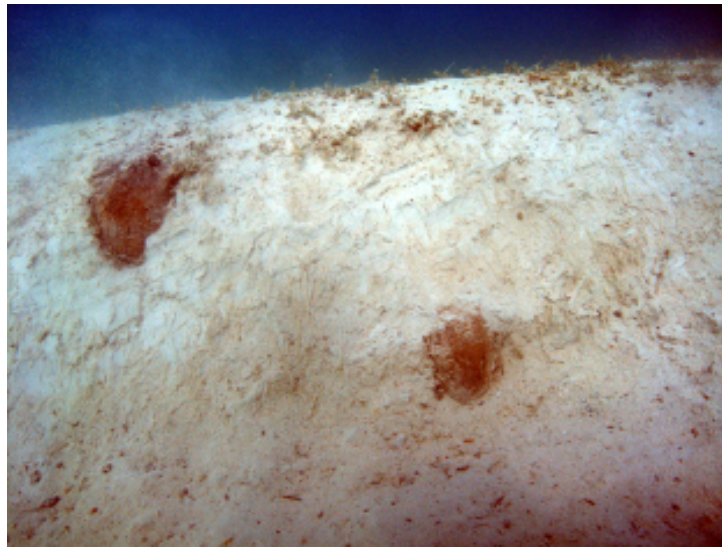


Abb. 3.1.: *Durch Bojenketten freigelegte Pfähle im Bereich der Pfahlbausiedlung Seewachen I. Im unteren Bereich des Bildes ist die Verfärbung durch die Kulturschicht zu erkennen. Im Lauf der nächsten Jahre werden diese Pfähle wohl endgültig zerstört sein (Foto: V. Jansa 2012).*

Die Bojen sind von den anthropogenen Störungen wohl die derzeit größte Bedrohung. Alleine im Attersee gibt es Hunderte davon, eine Lösung dieser Problematik ist derzeit nicht in Sicht.

3.2.4. Stürme

Für Stürme gilt im Grunde das in Abschnitt 3.2.1 gesagte mit dem Unterschied, dass die Schädigung nicht kontinuierlich über einen langen Zeitraum, sondern intensiv in einer kurzen Zeitspanne geschieht. Stürme katastrophalen Ausmaßes können natürlich entsprechende Schäden verursachen, da es sich aber um Naturkatastrophen handelt, die weder zu verhindern noch vorhersehbar sind, ist ein effektiver Schutz wohl nicht möglich.

3.2.5. Schwimmer

Die Schwimmer sind eine nicht zu unterschätzende Gefahr für die Pfahlbauten. Wie bereits erwähnt (siehe Abschn. 2.6.1), liegt die Station See am Mondsee direkt vor einer stark frequentierten Badewiese, die Station Seewalchen/Attersee, die zwar nicht zu den Weltkulturerbestätten, aber sehr wohl zu den sogenannten „assozierten Fundstellen“ zählt, liegt gar unmittelbar im Bereich des öffentlichen Strandbades Seewalchen.

Die Gefährdung durch Schwimmer wurde bereits in Abschn. 2.6.1 angesprochen, im Fall von Seewalchen kommt noch die Gefährdung durch die sogenannte „*Sprungturmgrube*“ hinzu. Der 10 m - Turm des Bades liegt in einem Bereich, in dem die Wassertiefe eigentlich zu gering für Sprünge aus einer solchen Höhe ist, deshalb wird regelmäßig die entsprechende Tiefe durch Baggerungen hergestellt. Dabei werden massive Zerstörungen verursacht. Das Problem ist sowohl bei den lokalen Behörden als auch beim Bundesdenkmalamt bekannt, allerdings gibt es bisher keine Bestrebungen, irgend etwas an dieser Situation zu ändern. Im Jahresabstand werden Bagge-



runge durchgeführt, die massive Zerstörungen verursachen. Da eine Aufgabe des Badebetriebes unrealistisch ist, wäre zumindest eine Notgrabung angebracht. In den Grubenwänden tauchen immer wieder interessante Details auf, die allerdings

Abb. 3.2.: *Sprungturmgrube Seewalchen: die durch die Baggerungen freigelegten Pfähle, die beim nächsten Mal wohl endgültig zerstört werden (Foto ©2012 V. Jansa).*

nicht erforscht, sondern bei der nächsten Baggerung undokumentiert zerstört werden.

3.2.6. Taucher

Nachdem, bedingt durch die reißerische Werbung für das Tauchen an archäologischen Fundstellen bezogen auf den Keutschacher See in den 1970er Jahren, die Fundstelle Keutschacher See völlig geplündert wurde, verhängten die zuständigen Bezirkshauptmannschaften ein rechtlich bedenkliches Tauchverbot an allen archäologischen Fundstellen. Dieses Verbot wird auch weitestgehend eingehalten, und zwar aus folgenden Gründen:

1. die meisten Fundstellen liegen in einem unmittelbar vor dem Strand liegenden Bereich in einer Tiefe von 2 bis 3 m, was für Taucher kein besonders spannendes Szenario bietet
2. bis auf wenige Ausnahmen sind archäologische Fundstellen für den Laien nur sehr schwer als solche zu erkennen
3. das Fundmaterial beschränkt sich auf Scherben, die nur für Experten eine sinnvolle Informationsquelle darstellen

Die Verbote haben nach Ansicht des Verfassers lediglich dazu geführt, dass das Bewusstsein für die Fundstellen in der Bevölkerung verloren ging, während Raubgräber völlig unbeeindruckt ihrer Tätigkeit nachgehen.

3.2.7. Schadensbilder

In Anlehnung an die Regeln zur Überwachung von Bauteilen im Wasser (Mayer und Pilgram 2006), wie sie im Bauwesen normiert sind, können für Pfahlbauten folgende Schäden angenommen werden:

- Abrasion/Erosion
- Verdrehungen, Verformungen, Verschiebungen
- mechanische Beschädigungen

Als Ursache für diese Schadensbilder kommen jeweils eine oder mehrere der bereits genannten Gefährdungskategorien in Frage, um welche es sich konkret handelt, muss in jedem Einzelfall bestimmt werden.

3.3. Anforderungen an ein effizientes Monitoring - Verfahren

Aus den definierten Schadensbildern ergeben sich die Parameter, die im Zuge eines sinnvollen Monitorings überwacht und dokumentiert werden müssen. Abrasion und Bodenabtrag durch Strömungen bedingen Größenveränderungen der Pfähle bzw. Niveauänderungen des Seegrundes. Verdrehungen, Verformungen und Verschiebungen bewirken Lageänderungen und mechanische Beschädigungen Formveränderungen. All diese Veränderungen passieren im dreidimensionalen Raum, ein sinnvolles Monitoring kann also nur durchgeführt werden, wenn eine umfassende räumliche Dokumentation der Fundstelle durchgeführt wird, und zwar in einer Form, die einen Vergleich mit einer mehrere Jahre zuvor erfolgten dreidimensionalen Dokumentation derselben Fundstelle ermöglicht.

In Übereinstimmung mit dem Managementplan ist darauf zu achten, dass die Ergebnisse des Monitorings in ein GIS integriert werden können, eine georeferenzierte Vermessung ist dazu unbedingt erforderlich, ebenso die Einbindung in eine entsprechende Datenbank. Das Design dieser Datenbank sollte gemäß Managementplan im Zeitraum 2011 - 2012 durchgeführt werden (palafittes 2009b, Proj. Nr. AT-3.2), allerdings liegen keine Informationen zum Stand der Dinge vor.

Als weitere, allgemeine Parameter können folgende Punkte angenommen werden:

- *Kostengünstig*: Aufgrund der chronischen Unterfinanzierung archäologischer Projekte, an der sich wohl auch in den nächsten Jahren nichts ändern wird, ist darauf zu achten, dass die angewendeten Methoden möglichst kostengünstig sind.
- *Flexibel einsetzbar*: Wünschenswert ist auch eine flexible, d. h. an unterschiedlichen Fundstellen mit unterschiedlichen Bedingungen einsetzbare Methode.
- *Einfach anzuwenden*: Je einfacher die Methoden in der Anwendung sind, desto geringer ist die Fehleranfälligkeit.
- *Gut dokumentiert*: Ein Problempunkt bei vielen Anwendungen ist die mangelnde Dokumentation. Das Wissen um die Anwendung bestimmter Methoden wird oft in der Art eines Geheimwissen nur mündlich weitergegeben. Das führt, neben einer Verzerrung der Informationen durch den wohl allseits bekannten *Stille - Post - Effekt* auch dazu, dass die Informationen oft genau in dem Moment und für die Person nicht verfügbar sind, die sie gerade benötigen würde. Abhilfe könnte hier die Installation eines Wikis schaffen, durch

dass solche Informationen jederzeit online für Personen mit entsprechender Zugangsberechtigung abrufbar wären.

3.4. Herkömmliche Methoden des Monitorings

In *Underwater Archaeology - The NAS Guide to Principle an Practice* sind als empfohlenen Methoden für das Monitoring unterwasserarchäologischer Fundstellen unter anderem visuelle Surveys, Video und Fotografie, Manuelle Vermessungen, Probenentnahme und Untersuchung der hydrologischen Bedingungen genannt (The Nautical Archaeology Society [2008](#)).

3.4.1. Visueller Survey

Die einfachste Variante des Monitorings ist der visuelle Survey. Dabei wird die Fundstelle von einem Archäologen betaucht und der Erhaltungszustand anhand visueller Beobachtung beurteilt.

Die ausschließlich verbale Beurteilung des Erhaltungszustandes einer Fundstelle ohne einer genauen Festlegung der zu beurteilenden Parameter und ohne einem dokumentierten Beurteilungssystem (Punkte, Noten, Maße, etc...) ist nicht zielführend, da in diesem Fall die subjektiven Empfindungen des beurteilenden Archäologen zu stark in den Vordergrund treten. So beurteilte etwa Thomas Reitmaier anlässlich eines Kontrolltauchganges im Jahr 2006 den Zustand der Römischen Anlage in Weyregg am Attersee als gut (Reitmeier [2007](#)), während nur 4 Jahre später, im Jahr 2010, der Verfasser im Zuge umfangreicherer Untersuchungen die Anlage als nahezu zerstört erlebt hat (Breitwieser und Jansa [2012](#)).

Allerdings hat diese Methode durchaus ihre Berechtigung, wenn sie entsprechend sorgfältig geplant wird. Dazu gehört neben einer strategischen Streckenplanung des Tauchganges auch die Ausarbeitung einer Checkliste, in der alle zu beurteilenden Punkte erfasst sind und die Entwicklung eines Beurteilungssystems, das es ermöglicht, auch nach einem Personalwechsel das Monitoring weiter zu führen, ohne auf die subjektiven Erinnerungen einer Person angewiesen zu sein. Eine solche Vorgangsweise nimmt der Methode natürlich auch ihre einfache Anwendbarkeit.

3.4.2. Video und Fotografie

Video und Fotografie sind eine wichtige Ergänzung zum Visuellen Survey und stellen gleichzeitig die Basis für fortgeschrittenere Methoden des Monitorings dar (siehe Kap. 4). Im Falle der Pfahlbauten ist ein besonderes Problem die räumliche Ausdehnung dieser Fundstellen. Sie kann von einigen 1 000 bis zu mehreren 10 000 m² betragen. Für eine aussagekräftige Foto- oder Videodokumentation ist daher auch die Position und Orientierung jedes einzelnen Fotos und jeder Videosequenz zu dokumentieren. Unter Einhaltung der Vorgaben können mit diesen Techniken bereits akzeptable Monitorings durchgeführt werden.

3.4.3. Manuelle Vermessungen

Um die Dynamik von großflächigen Bodenveränderungen festzustellen, wurden bis vor wenigen Jahren eher zufällige Beobachtungen herangezogen, beispielsweise wenn Pfähle, die vor wenigen Jahren noch fast vollständig im Untergrund eingebettet waren, plötzlich deutlich über den Seegrund hinausragen. Einer der ersten Versuche, diese Vorgänge systematisch zu messen, fanden zwischen 2003 und 2005 am Nordufer des Überlinger Sees von Überlingen im Westen bis nach Haltnau bei

Meersburg im Osten statt. Dabei wurden in regelmäßigen Abständen Holzpfähle versetzt und diese lage- und höhenmäßig geodätisch eingemessen. Der Abstand zwischen der Oberkante dieser „Erosionsmarker“ und dem Seegrund kann nun gemessen und so das Ausmaß der Erosion festgestellt werden (Königer 2005, 64). Problematisch dürften die verwendeten Materialien sein: Wie auf den Abbildungen zu erkennen ist, sind die Fixpunkte Holzpfähle mit einem Querschnitt von ca. 5 x 5 cm, die sich als langfristig verwendbare Punkte eher wenig eignen (siehe Abbildung 3.3). Da es sich bei Monitoring um einen langfristigen Prozess handelt, wäre die Anwendung anderer Materialien anzudenken, die langfristig mehr Stabilität versprechen und auch besser zu verankern sind.

Im Zürichsee wurde diese Idee aufgegriffen und weiterentwickelt. Hier werden die einzelnen Erosionsmarker durch Schnüre miteinander verbunden (siehe Abbildung 3.3) und jeweils entlang dieser Profile in definierten Entfernungen der Abstand zum Seegrund gemessen. Damit wird die punktförmige, eindimensionale Messung des Überlinger Sees um eine Dimension erweitert und die Interpolation der Oberfläche des Seegrundes auf eine wesentlich umfangreichere Datenbasis gestellt.



Abb. 3.3.: Erosionsmarker im Zürichsee (Quelle: <http://www.erosion-und-denkmalschutz-bodensee-zuerichsee.eu/>)

Nicht übersehen werden darf bei dieser Methode, dass der Grad des Durchhängens der Schnüre von der Kraft abhängt, mit der diese gespannt sind. Davon direkt abhängig ist natürlich die Vergleichbarkeit der Messungen, es muss daher unbedingt darauf geachtet werden, die Schnüre mit vergleichbarer Spannung zu montieren, um exakte und vor allem vergleichbare Messwerte zu erhalten.

Das manuelle Einmessen auffälliger Strukturen, wie Geländekanten, kann verwendet werden, um durch Bodenabtrag bzw. Anschwemmung verursachten Bewegungen des Seegrundes nachzuvollziehen (siehe Abb. 3.4).

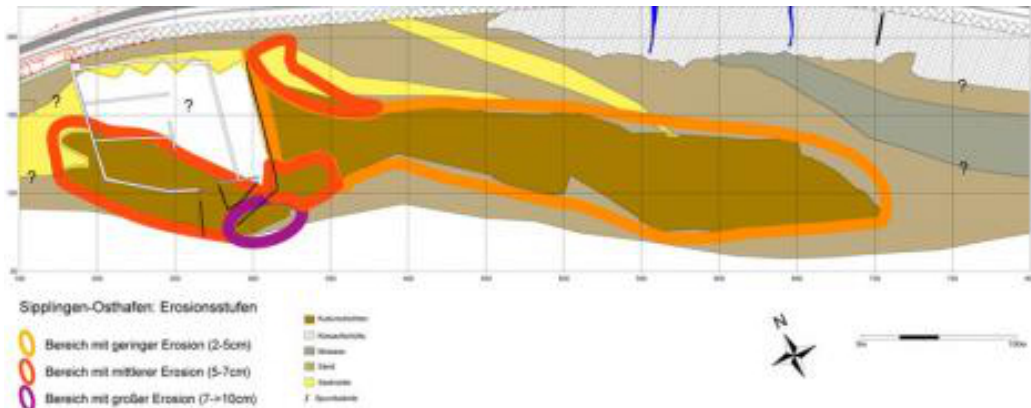


Abb. 3.4.: Bucht von Sipplingen: Darstellung der verschiedenen durch Bodenabtrag bedrohten Gebiete (Quelle: <http://www.der-see-erzaehl.eu/typo3temp/pics/191949ba87.jpg>)

3.4.4. Untersuchungen der hydrologischen Bedingungen

Messungen der Wassertemperatur, des Salzgehaltes oder des PH - Wertes eines Gewässers können mit relativ geringem Kostenaufwand durchgeführt werden. Es können auch Data - Logger verwendet werden, um Richtung und Stärke von Strömungen oder andere Faktoren, die den Erhaltungszustand beeinflussen könnten, zu messen. Auch aus der Art und Verteilung des verschiedener Organismen können Rückschlüsse über ein Gefährdungspotential gezogen werden (The Nautical Archaeology Society 2008). Solche Daten können auch in Zusammenarbeit mit vorhandenen limnologischen Forschungsstationen erhoben werden, wie in Oberösterreich dem *Limnologischen Institut Mondsee der ÖAW* oder in Kärnten dem *Institut für Seenkunde*. Gerade Untersuchungen solcher Faktoren sind auf jeden Fall interdisziplinär durchzuführen.

3.4.5. Geophysikalischer Survey

Geophysikalische Methoden, allen voran die schallbasierten Methoden wie Sidescan Sonar oder Multibeam Sonar, können dazu verwendet werden, um die Oberflächenform des Seegrundes darzustellen, außerdem können auch archäologisch relevante Strukturen prospektiert werden. Bei regelmäßiger Aufzeichnung in Zusammenspiel mit einer genauen Georeferenzierung kann auch die Veränderung des Seegrundes, die Bewegung von Sandbänken und Ähnliches aufgezeichnet werden. Wesentlich ist auch hier, dass die Daten in eine Form gebracht werden, die die Integration in ein GIS ermöglichen. Für Sidescan - Sonardaten wird im Allgemeinen eine Konvertierung in GeoTIFFs¹ durchgeführt, während das Ergebnis eines Surveys mit Multibeam - Sonar eine georeferenzierte Punktwolke ist, aus der eine Oberfläche interpoliert werden kann.

Die Bearbeitung der Sonardaten ist deutlich komplexer als alle anderen bisher besprochenen Methoden. Nachfolgend sollen beispielhaft einige der erforderlichen Schritte kurz beschrieben werden.

- *Slant Range Correction*: In den Rohdaten eines Sidescan - Sonars sind erhebliche Verzerrungen im rechten Winkel zur Fahrtrichtung enthalten, Diese Verzerrungen ergeben sich aus der Messgeometrie und müssen durch ein Verfahren namens *slant range correction* (Korrektur der schrägen Entfernungen) behoben werden. Dieses Verfahren beruht im Prinzip auf einer einfachen Dreiecksberechnung und geht von einem quer zu Fahrtrichtung ebenen Grund aus. Durch die *slant range correction* werden die Pixel von einer scheinbaren auf ihre wahre Position verschoben. Da bei einem Sidescan - Sonar allerdings nur die Höhe des Transducer über Grund bekannt ist, muss bei der Berechnung von einem ebenen Grund ausgegangen werden, was na-

1. GeoTIFFs sind Bilder, die georeferenziert und maßstäblich skaliert sind. Dieses Datenformat kann von allen herkömmlichen geographischen Informationssystemen gelesen und dargestellt werden.

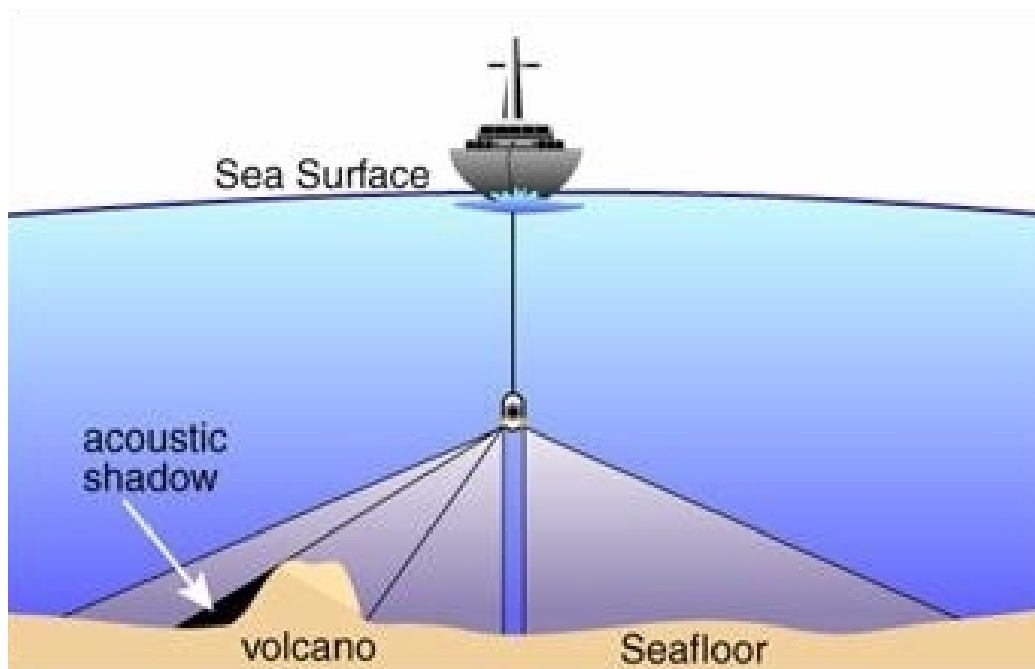


Abb. 3.5.: Anwendung eines Sidescan-Sonar (Quelle: <http://gralston1.home.mindspring.com/Sidescan.html>)

turgemäß bei stark profiliertem Unterwasser - Gelände zu entsprechenden Ungenauigkeiten führt.

- *Anamorphosis*: Nach der *slant range correction* ist das Sonarbild quer zur Fahrtrichtung geometrisch korrekt, soweit es möglich ist. Der nächste Schritt ist die Beseitigung von Verzerrungen in Fahrtrichtung, die sich durch Änderung der Fahrgeschwindigkeit während der Aufnahme der Sonardaten bilden. Dieser Prozess erfolgt bei neueren Systemen, bei denen die Positionierung mittels GPS erfolgt und die Positionsdaten direkt in der Sonardatei für jeden Ping abgespeichert werden, meist automatisch, ebenso wie die Überprüfung der Validität der Positonsdaten. Bei kurzzeitigem Ausfall des GPS - Datenstroms wird die Position der betroffenen Pings, für die die Lat/Lon - Werte dann ja entweder 0 oder aufgrund ihrer Position zumindest unglaublich

sind, interpoliert. Die Parameter, mit denen diese Überprüfungen erfolgen, unterscheiden sich je nach verwendeter Software.

- *Histogramm - Manipulationen*: Während bei den bisher vorgestellten Methoden geometrische Korrekturen vorgenommen wurden, die dazu dienen, das Sonarbild entsprechend der Form des Unterwasser - Geländes möglichst korrekt abzubilden, handelt es sich bei den Manipulationen des Histogramms um Veränderungen der Helligkeit, des Kontrastes und der Farbwertverteilung beruhend auf der Häufigkeit der auftretenden Werte. Diese Veränderungen haben keine Auswirkung auf den tatsächlichen Inhalt, sondern lediglich auf die Verteilung der Grauwerte und damit die bessere Lesbarkeit des Bildes. Man spricht in diesem Zusammenhang deshalb auch von statistischen Methoden (Blondel 2009). Diese Art der Korrektur ist im Wesentlichen durch zwei Umstände erforderlich:

1. *Energieverlust durch Dämpfung*: Bei der Schallausbreitung im Wasser wird die Dämpfung des Schalls im Wesentlichen durch zwei Mechanismen verursacht (Waite 2005):

- a) die *Viskosität*: Dämpfungsverluste durch Viskosität treten in Süß- und Salzwasser auf, sie sind proportional zum Quadrat der Frequenz.
- b) die *molekulare Relaxation*: Diese tritt nur in Salzwasser auf. Dabei werden durch den Druck des Schalls die neutralen Moleküle des Wassers in elektrisch geladene Ionen umgewandelt, die dadurch vernichtete Schallenergie ergibt die Dämpfung. Bei hohen Frequenzen (ab ca. 500 kHz) sind die Druckwechsel der Schallwelle zu schnell und der Prozess findet nicht mehr statt, es wird also keine Energie mehr absorbiert.

Zum Thema Dämpfung wurden intensive Messungen durchgeführt und daraus verschiedene empirische Formeln entwickelt, durch die versucht wird, die Beziehungen zwischen Frequenz, Temperatur und Salzgehalt darzustellen.

Zusätzlich zu dieser Dämpfung beeinflussen erfahrungsgemäß auch Schwebeteilchen und Wasserpflanzen den Grad der Dämpfung, ebenso wie die Rauheit bzw. Korngröße des Sandes am Seegrund (Collier und Brown 2005). Diese Faktoren sind mathematisch nur schwer zu formulieren.

2. *Energieverlust durch Reflexion:* Gemäß dem Reflexionsgesetz ist der Einfallswinkel einer Welle beim Auftreffen auf eine Schichtgrenze gleich dem Ausfallswinkel. Daraus ist leicht zu erkennen, dass durch die seitliche Abstrahlung des Schallfächers eines Sidescan - Sonars die am Boden auftreffenden Schallimpulse vom Transducer weg reflektiert werden, nur ein verschwindend geringer Teil gelangt durch die Streuung zum Transducer zurück. Je weiter vom Transducer entfernt die Schallwellen auf eine Schichtgrenze treffen, desto flacher ist der Einfallswinkel, und der zuvor beschriebene Effekt wird weiter verstärkt.

Sonarsysteme wurden bisher für das Monitoring von Pfahlbaustationen weder in Österreich noch international angewendet, Erfahrungen fehlen in dieser Hinsicht daher.

3.4.6. Unterwasser - Landschaftsmosaik

Das Erstellen von Unterwasser - Landschaftsmosaiken ist eine bildbasierte Methode für die Kartierung und das Monitoring von größeren Flächen (100 - mehrere 1000 m²). Entwickelt wurde diese Methode speziell für das Monitoring von Korallenriffen (Gleason u. a. 2012). Ähnlich wie bei *Structure from Motion* (siehe Kap.

4) werden durch spezielle Algorithmen markante Bildpunkte gesucht, die aber nicht zur Konstruktion eines 3D -Modells, sondern zum Erstellen eines Fotomosaiks verwendet werden. Gleason u. a. 2012 stellen eine Methode vor, bei der durch die Anwendung spezieller Suchmuster in weniger als 2 Minuten eine Fläche von 44 m² dokumentiert werden konnte. Dabei schwimmt ein Taucher mit einer Videokamera in einem optimierten Raster über das fragliche Gebiet und filmt den Grund aus der Vogelperspektive. Durch Extraktion von Einzelbildern aus dem Video und weiteres Processing wird daraus ein Orthofoto des gesamten Areals mit einer Auflösung im 2 mm - Bereich erreicht. Die besten Ergebnisse wurden naturgemäß mit hochwertigen DSLR - Kameras erreicht, allerdings wiesen auch die Ergebnisse, die durch die Anwendung von *low - cost* - Kompakt - Kameras erzielt wurden, eine nur unwesentlich schlechtere Qualität auf (Gleason u. a. 2012).

Diese durchaus interessante Methode wird bisher in der Unterwasserarchäologie nicht angewendet.

3.5. Andere, experimentelle Methoden

Die derzeit etablierten Monitoring - Methoden haben alle gewisse Nachteile: Die Sinnhaftigkeit visueller Surveys ist grundsätzlich zu hinterfragen. Mittels Erosionsmarker ist es zwar möglich, ein einigermaßen genaues Geländemodell bzw. die darin entstehenden Veränderungen zu beobachten, eine Veränderung der Pfähle zu dokumentieren ist damit aber nicht möglich. Dazu bedarf es einer fotografischen Dokumentation, da die zeichnerische Dokumentation organischer Formen nicht zielführend ist. Dabei ist aber einerseits eine exakte Positionierung und Ausrichtung der Kamera nötig, andererseits auch Messungen, um einigermaßen aussagekräftige Vergleiche anstellen zu können.

Neben den bisher vorgestellten, etablierten Methoden gibt es aber auch noch einige Techniken, die als Monitoring - Methoden in Frage kommen, bisher aber entweder nicht angewendet wurden oder deren Anwendung die experimentelle Phase noch nicht überschritten hat.

3.5.1. Airborne Laser Bathymetry

Airborne Laser (oder Lidar) Bathymetry (ALB) ist eine Technologie zur Vermessung flacher und küstennaher Gewässer unter Verwendung von Laser, der von einem Flugzeug aus eingesetzt wird (Hickman und Hogg 1969). Der Begriff *Lidar* ist ein Akronym und steht für *LIght Detection And Ranging*. *ALB* ist eine genaue, günstige, sichere, schnelle und flexible Methode, um entlang von Küsten und in Flachwasserbereichen, in denen der Einsatz von *Sonar* nicht möglich oder zumindest gefährlich ist, die Gewässertiefen zu vermessen.

Bereits kurz nach der Entwicklung der Laser - Technologie wurde auch eine Anwendung zur Suche von U - Booten entwickelt (Ott 1965). Die entscheidende Arbeit bezüglich der Anwendung für die küstennahe Bathymetrie wurde von Hickman und Hogg 1969, basierend auf der Forschungsarbeit am *Syracuse University Research Center* verfasst. Der Hauptgrund für die Entwicklung dieser Technologie war die Tatsache, dass die meisten Küstengebiete der Welt nur ungenügend oder gar nicht vermessen sind, was für die Schifffahrt eine große Gefahr darstellt (LaRocque und West 1999).

In den 1970ern wurden von der *U.S. Navy* (Ott und Krumboltz 1971), der *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* (Kim u. a. 1975), in Kanada (O'Neil u. a. 1978) und Australien (Abbot 1975) einige erfolgreiche Tests mit der ersten Generation der Laserscanner durchgeführt. Zu Beginn der 1980er Jahre entwickelte die Firma *Optech Incorporated* in Kanada mit *LARSEN* das erste tat-

sächlich für den praktischen Einsatz geeignete System (Anderson u. a. 1983). Es folgten weitere Systeme in Australien (*LADS*, Compton und Hudson 1988) in den USA (*SHOALS*, Lillycrop und Brooks 1996) und Schweden (*Hawk Eye*, Steinvall u. a. 1997), um nur einige zu nennen. Seit kurzer Zeit wird auch versucht, diese Technologie für die Erfassung unterwasserarchäologischer Fundstellen zu nutzen (Doneus u. a. 2012).

Mit *ALB* können bis zu $77 \text{ km}^2/h$ erfasst werden (Wozencraft und Lillycrop 2003). Die wesentliche Einschränkung dieser Technologie liegt in ihrer Abhängigkeit von der Sichttiefe der zu vermessenden Gewässer. In sehr klaren Gewässern sind Messtiefen von über 50 m möglich (Guenther 2007), in sehr trüben Gewässern hingegen kann unter sehr schlechten Bedingungen gar nicht gemessen werden.

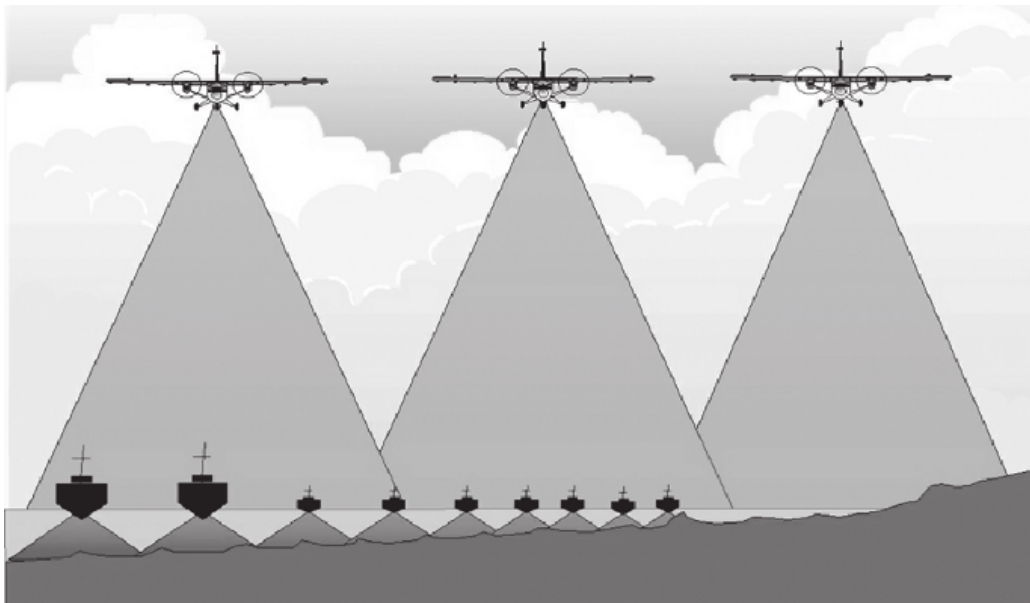


Abb. 3.6.: Gegenüberstellung von *ALB* und *Multibeam Sonar* zur Gewässervermessung. (Quelle: Guenther 2007)

Ein großer Vorteil von *ALB* ist die Tatsache, dass sowohl unter als auch über Wasser liegende Geländebereiche vermessen werden können. Obwohl im ersten Moment der Eindruck entstehen könnte, es handle sich um eine sehr teure Tech-

nologie, ist tatsächlich das Gegenteil der Fall: Durch die enorme Geschwindigkeit, mit der sehr große Flächen vermessen werden können, betragen die Kosten pro m^2 nur 15 - 30 % der Kosten herkömmlicher Vermessungsmethoden (Guenther 2007).

Die grundsätzliche Technologie von *ALB* besteht in der gleichzeitigen Anwendung eines grünen Lasers und eines Infrarot - Lasers. Der grüne Laser dringt mit dem geringsten Verlust in das Wasser ein und kann bis zum Grund gelangen, während der Infrarot - Anteil das Wasser praktisch gar nicht durchdringt, durch die Reflexion dieser Anteile des Lasers kann also die Wasseroberfläche genau erkannt werden (Jerlov 1976). Durch die Messung der Laufzeit, der genauen Richtung des Laser - Strahls und die Kenntnis der exakten Position des Senders kann die dreidimensionale Position der reflektierenden Stelle am Boden bzw. dem Seegrund errechnet werden. Die vertikale Genauigkeit der verschiedenen Systeme liegt in einem Bereich von ca. 0,30 m.

ALB ist eine vergleichsweise junge Technologie, die von den Entwicklungen auf dem Gebiet der Optik, Elektronik und Softwareentwicklung abhängig ist und die noch viel Potential für Weiterentwicklungen bietet.

3.5.2. Georadar

Beim *Georadar* (*GPR-Ground Penetrating Radar*) handelt es sich um ein elektromagnetisches Impulsreflexionsverfahren, bei dem kurze elektromagnetische Impulse in den Untergrund ausgesendet und nach Reflexion an Objekten und Schichtgrenzen oder Streuung an Einlagerungen wieder empfangen werden (Schlögel 2007). Bei Georadarmessungen wird eine hochfrequente elektromagnetische Welle in einem Frequenzbereich zwischen 10 und 1000 MHz ausgesendet, deren Ausbreitung von der *Permittivität* ϵ und der *elektrischen Leitfähigkeit* σ des Materials bei dieser

Frequenz abhängt. Die *Permittivität* beeinflusst die Geschwindigkeit, mit der sich das Radarsignal ausbreitet, während die *elektrische Leitfähigkeit* bestimmt, wie stark das Signal absorbiert wird. Haben zwei unterschiedliche Materialien gleiche oder sehr ähnliche physikalische Eigenschaften, so wird an der Grenze zwischen den Materialien kein Signal reflektiert (Leckebusch 1998).

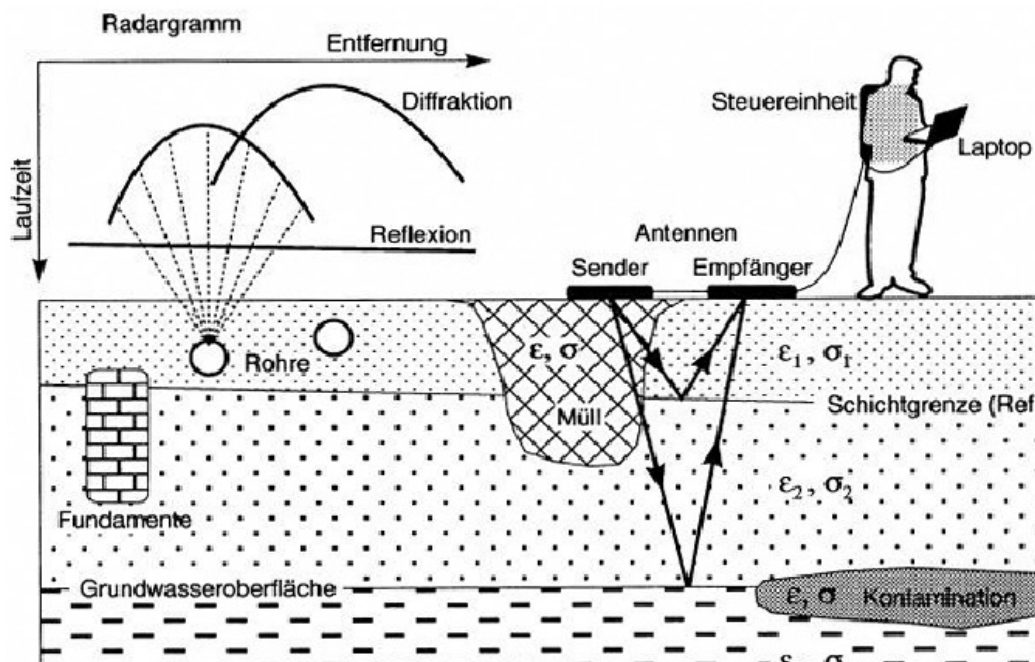


Abb. 3.7.: Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten des Bodenradars (Quelle: Schlögel 2007)

Zur Datenaufnahme wird eine Sender-Empfänger-Kombination entlang einer Messlinie mit möglichst geringem Abstand über die Messfläche gezogen. Gemessen wird diskret in einem Abstand von wenigen Zentimetern, sodass der Messfortgang als kontinuierlich bezeichnet werden kann. Registriert wird die Signalamplitude in Abhängigkeit der Zeit als sogenannte Signalspur. Die Amplitude wird meist grauwert- oder farbcodiert dargestellt. Durch Aneinanderreihung der Signalspuren erhält man ein Diagramm, in dem die Entfernung entlang der Messlinie über der Laufzeit aufgetragen ist. In diesem sog. Radargramm - im Prinzip ein Tiefenschnitt - zeigen sich die reflektierenden Strukturen als mehr oder weniger starke

Signale (Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH [2005](#)). Durch die hohe elektrische Leitfähigkeit von Salzwasser ist der Einsatz von Georadar auf Süßwasser beschränkt, aber auch hier ist nur mit einer geringen Eindringtiefe zu rechnen.

Der Einsatz des Georadars beschränkt sich aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit von Salzwasser auf Süßwasser. Auch in diesem Medium ist der Einsatz aber beschränkt. Der Richtwert für die Eindringtiefe des Georadars in Süßwasser beträgt 4-6 m (Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH [2005](#)), unter Berücksichtigung der Tatsache, dass ja noch eine Reserve für das Eindringen der elektromagnetischen Welle in den Untergrund vorhanden sein soll, erscheint der Einsatz oberflächengebundener Systeme bei einer Wassertiefe von mehr als 2,5 m nicht mehr zielführend. Allerdings ist auch der Einsatz der Radarantennen bei entsprechender konstruktiver Ausführung unter Wasser denkbar. Ein solches System wäre einerseits von der Wassertiefe unabhängig, andererseits wären auch Störungen durch Wellenbewegungen an der Wasseroberfläche, die normalerweise auftreten, nicht mehr spürbar.

Bereits 1998 veröffentlichte Jürg Leckebusch einen Bericht über Georadar - Messungen der Pfahlbausiedlung Greifensee - Böschen mit Georadar (Leckebusch [1998](#), 51-57). Die Pfähle konnten mit dieser Methode zwar nicht gemessen werden, allerdings konnte die Ausdehnung der Kulturschicht festgestellt werden. Durch Anwendung fortschrittlicherer Methoden und Auswertungsprogramme könnte diese Technologie für die Pfahlbauforschung „wiederbelebt“ werden, eine Anwendung, die eine zerstörungsfreie Vermessung der Siedlungen über die sichtbaren Pfahlfelder hinaus ermöglicht, ist derzeit sonst nicht bekannt.

3.5.3. 3D - Modellierung

Wie in Abschnitt 3.3 bereits erläutert, erhöht eine exakte, zumindest partielle dreidimensionale Erfassung exponierter Stellen die Qualität und Möglichkeiten des Monitorings enorm. Um dies zu erreichen, sind mehrere Techniken denkbar: Die bereits erwähnte *ALB* stellt eine Möglichkeit dar, eine andere ist die Erfassung mittels *Multibeam Sonar*, das sinngemäß wie die *ALB* arbeitet, mit dem Unterschied, dass zur Messung der Entfernungen nicht Licht, sondern Schall verwendet wird, der sich im Wasser wesentlich besser ausbreitet, außerdem werden Sonarsysteme ausschließlich von Schiffen aus eingesetzt.

Im Bereich der *Computer Vision* gibt es eine Vielzahl von Informatikern, die sich daran versuchen, aus zweidimensionalen Abbildungen Informationen zum Erstellen eines dreidimensionalen Geländemodells zu gewinnen (z. B. Callow 2003, Cuschieri und Hebert 1990, Daum und Dudek 1998, Lorenson und Kraus 2009). Stepnowski präsentierte 2005 ein Verfahren, dass es ermöglicht, aus 2D- Sidescan-Bildern ein 3D - Modell des Seegrundes zu errechnen (Stepnowski u. a. 2005). Die Modellrechnung basiert im Wesentlichen auf dem *Lambert'schen Beleuchtungsmodell*, nach dem die Intensität der reflektierten Lichtmenge abhängig von der Neigung der reflektierenden Oberfläche, bezogen auf die Position und Richtung der Lichtquelle, ist.

Eine weitere Möglichkeit ist die dreidimensionale Modellierung mittels *Structure from Motion*. Dabei wird aus einem Satz von Bildern eines Gegenstandes oder einer statischen Szene aus verschiedenen Perspektiven ein virtuelles, dreidimensionales Modell des Objektes oder der Szene auf der Grundlage der Regeln der Epipolargometrie (siehe Abschnitt 4.3.3) erstellt. Die Idee wurde bereits in den 1980er Jahren entwickelt (Bolles u. a. 1987), aber erst ein von David Lowe 1999 entwickelter Algorithmus ermöglichte einen praktikablen Einsatz dieses Verfahrens (Lowe 1999).

Die meisten der erwähnten Monitoring - Methoden haben einen Nachteil. Die etablierten Methoden sind ungenau, während experimentelle Methoden wie das *ALB* oder das *GPR* einen hohen technischen und finanziellen Aufwand erfordern. In den folgenden Kapiteln soll daher ein Monitoring - System basierend auf *Structure from Motion* evaluiert und anschließend die Anwendbarkeit des Verfahrens anhand eines Fallbeispiels überprüft werden.

4. Structure from Motion

4.1. Einleitung



Abb. 4.1.: *Structure from Motion: Punktwolke der Piazza San Marco (Venedig), 27.707.825 Punkte, rekonstruiert aus 13.703 aus dem Internet heruntergeladenen Bildern (Quelle: Furukawa u. a. [2010](#))*

Die Erstellung dreidimensionaler, texturierter Modelle aus zweidimensionalen Abbildungen ist eines der spannendsten und bestuntersuchten Gebiete der *Computer Vision* (Abk. *CV* - *Maschinelles Sehen*). Die Technologie besteht grundsätzlich aus 2 Schritten: Zuerst wird die Bewegung einer Kamera aus zweidimensionalen Bildern extrahiert, um im zweiten Schritt aus diesen Bewegungsinformationen und Kameraparametern eine dreidimensionale Struktur in Form einer Punktwolke zu berechnen. Während die mathematischen Grundlagen schon länger bekannt sind

(z. B. Koenderink und van Doorn [1991](#) oder Horn [1986](#)), war die Umsetzung in Form von Software lange Zeit ein Problem. Durch die Fortschritte in der Hardware - Entwicklung, aber auch die Entwicklung leistungsfähiger Algorithmen, die verschiedene Teilprobleme von *Structure from Motion* lösen können, sind seit einiger Zeit auch Lösungen verfügbar, die ohne aufwändige Großrechenanlagen akzeptable Ergebnisse bringen.

Die Anwendungsmöglichkeiten von *Structure from Motion* sind vielfältig: Durch Objekterkennung im Echtzeitbetrieb könnten damit Navigationssysteme für Fahrzeuge aufgebaut werden, die Präsentation verschiedenster Strukturen, wie Immobilien, kann damit einfach bewerkstelligt und das Monitoring komplexer räumlicher Strukturen damit wesentlich vereinfacht werden.

Im folgenden Kapitel soll die grundlegende Funktionsweise dieser Technologie sowie ihre Anwendungsmöglichkeiten für das Monitoring unterwasserarchäologischer Fundstellen erklärt werden. Es sind für die verschiedenen Teilprobleme auch verschiedene Lösungsansätze vorhanden, in dieser Arbeit werden folgende Programme verwendet:

- *SiftGPU*: Ein Programm zur Erkennung markanter Bildpunkte, das die Rechenkapazität des Grafikprozessors nutzen kann (Wu [2007](#)),
- *Parallel Bundle Adjustment (PBA)*: Ein auf einem Kameramodell mit 8 Parametern basierendes Verfahren zum Errechnen der Aufnahmegeometrie (Wu u. a. [2011](#))
- *CMVS/PMVS*: Clustering Software für das Berechnen einer dichten Punktwolke aus dem Ergebnis von *SiftGPU* und *PBA* (Furukawa u. a. [2010](#)).

Die oben genannten Programme sind freie Software und für Linux, Windows und Mac OS verfügbar. Es handelt sich um Kommandozeilen - Programme, die jedoch

von Changchang Wu, University of Washington, unter einer graphischen Oberfläche namens *VisualSFM* zusammengefasst wurden (<http://homes.cs.washington.edu/ccwu/vsfm/>). *VisualSFM* ist zwar keine freie Software im Sinne Richard Stallmanns², aber kostenlos zum Download verfügbar.

4.2. Unterwasserfotografie



Abb. 4.2.: Die älteste erhaltene Fotografie: Joseph Nicéphore Niépce hielt 1826 einen Blick aus seinem Arbeitszimmer mit einem Verfahren namens Helio-graphie fest (Quelle: <http://upload.wikimedia.org/>)

Fotos von Unterwasserszenarien sind heute eine Selbstverständlichkeit, so wie alle anderen Illustrationen, die uns täglich über die Medien erreichen. Das war nicht immer so: Obwohl die älteste erhaltene Fotografie aus dem Jahre 1826 stammt (siehe Abb. 4.2) und die Geburtsstunde der „modernen“ Fotografie mit der Entwicklung eines verbesserten Verfahrens durch *Louis Jacques Mandé Daguerre* im Jahr 1837 angegeben wird, dauerte es bis 1893, ehe die ersten Unterwasserbilder veröffentlicht wurden (Hübner 2005).

2. Als freie Software bezeichnete Stallmann 1983 im Zuge der Gründung des GNU - Projektes Software, die nicht nur kostenlos ist, sondern auch als Quellcode weitergegeben wird und bei der jeder User das Recht hat, diesen auch zu verändern und weiter zu geben.

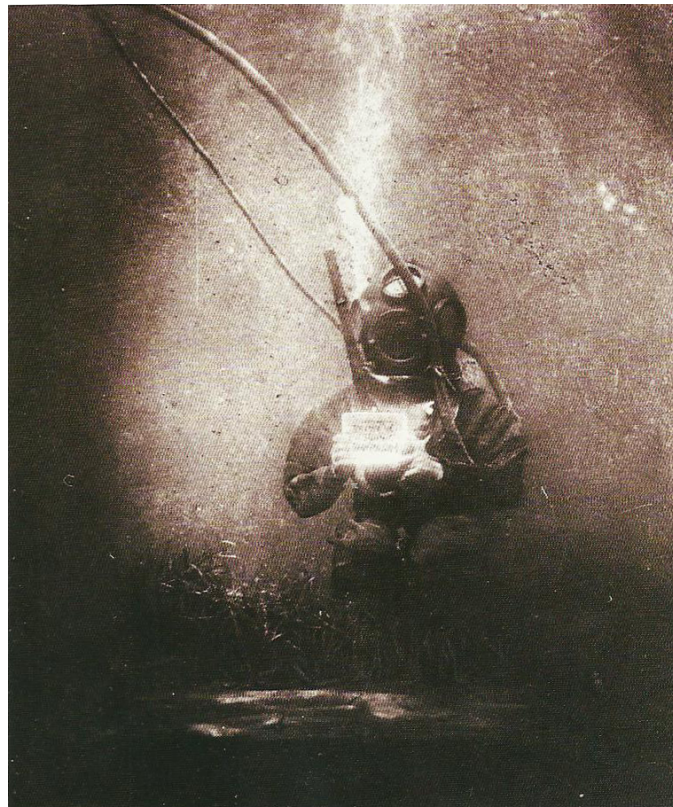


Abb. 4.3.: Die älteste Unterwasser - Fotografie aus dem Jahr 1893 (Quelle: Hübner 2005)

Seither hat sich die Fototechnik enorm weiterentwickelt. Die digitale Fotografie hat die analoge Fotografie praktisch verdrängt, Speichermedien, Computer und Software für die Bildbearbeitung werden immer leistungsfähiger und die Produktpalette der Unterwasserkameras immer größer. Auch die Angebote an Software für die meist erforderliche Nachbearbeitung der Bilder wird immer umfangreicher und die Software immer leistungsfähiger. Gerade diese Auswahlmöglichkeiten führen auch zu einer gewissen Unsicherheit bezüglich der anzuwendenden Fototechnik. Das Fallbeispiel (siehe Abschnitt 5) zeigt allerdings, dass auch bei Verwendung einer billigen digitalen Kamera und kostenloser Opensource - Software zumindest brauchbare Ergebnisse erzielbar sind.

4.2.1. Digitale Fototechnik

Der Fotosensor

Die digitale Fototechnik unterscheidet sich in einigen Punkten von der herkömmlichen Analogfotografie. Das Aufnahmemedium ist nicht mehr ein Film, sondern ein lichtempfindlicher Halbleiterchip, der *Bildsensor*. Dieser besteht aus vielen kleinen Elementen (*Pixel*³), die nebeneinander angeordnet sind. Gegenwärtig werden meist *Complementary Metal Oxid Semiconductor (CMOS) Chips* verwendet. Bei dieser Bauart liegen die für die Farben Rot, Grün oder Blau empfindlichen Elemente unterschiedlich tief im Sensor, das farbige Licht dringt ebenfalls unterschiedlich tief in den Sensor ein und regt so die entsprechenden Elemente an (Hübner 2005).

Die Lichtempfindlichkeit

Analog zu den Filmen der Vergangenheit reagieren auch Bildsensoren mit unterschiedlicher Empfindlichkeit auf Licht. Der Vorteil ist jedoch, dass die Empfindlichkeit des Sensors elektronisch geregelt werden kann, während jeder Film eine bestimmte Empfindlichkeit aufwies und ausgetauscht werden musste, wenn eine andere Empfindlichkeit erforderlich war.

Die Empfindlichkeitswerte sind international genormt, zur Anwendung komme eine Mischung aus der *Deutschen Industrie - Norm (DIN)* und der *American Standards Association (ASA)*, die von der *International Organisation for Standardization (ISO)* festgelegt wurde (z. B. *ASA 50*, *DIN 18 = ISO 50/18°*). Normale Werte liegen zwischen 100 und 400 ASA, wenn höhere Werte eingestellt werden, ver-

3. Pixel ist ein aus dem englischen Begriff „Picture Element“ gebildetes Kunstwort

schlechtert sich die Bildqualität sichtbar, der Höchstwert von 400 ASA sollte daher nach Möglichkeit nicht überschritten werden (Hübner 2005).

Der Bildwinkelfaktor

Sowohl die Bildsensoren von Kompaktkameras als auch jene von Spiegelreflexkameras sind meist wesentlich kleiner als das ehemalige Kleinbildformat von 24 x 36 mm. Bei gleicher Brennweite ergeben sich daher andere Bildwinkel (siehe Abbildung 4.4).

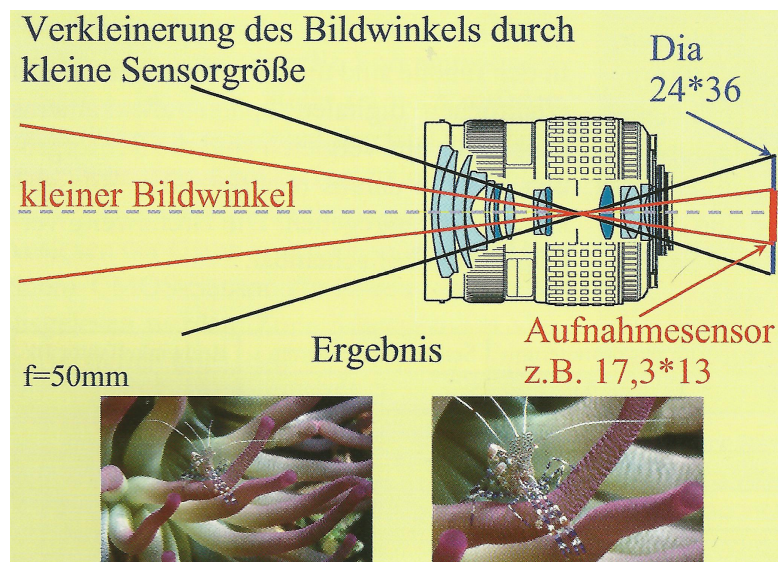


Abb. 4.4.: Änderung des Bildwinkels in Abhängigkeit von der Sensorgröße (Quelle: Hübner 2005)

Eine Nikon Spiegelreflexkamera D5100 mit einem Bildsensor mit einer Größe von 23,7 x 15,6 mm und einer Bilddiagonale von 28,37 mm benötigt ein 28 mm - Objektiv, um den gleichen Bildwinkel wie ein 50 mm - Normalobjektiv bei einer Kleinbildkamera zu erreichen. Es entsteht eine scheinbare Verlängerung der Brennweite, die sich im Bereich der Unterwasserfotografie negativ auswirkt, da es

hier ganz besonders wichtig ist, möglichst nahe am Objekt zu sein und daher kurze Brennweiten langen immer vorzuziehen sind (Hübner 2005).

4.2.2. Eigenheiten der Unterwasserfotografie

Die Unterwasserfotografie unterscheidet sich zum Teil erheblich von der Fotografie an Land bezüglich der Lichtverhältnisse und Sichtweiten, aber auch beim fotografieren an sich.

Lichtverhältnisse

Die für uns sichtbaren Wellenlängen des Lichts reichen vom violetten Bereich mit 400 nm bis zum roten Bereich mit 800 nm. Dringt Licht in ein dichteres Medium wie Wasser ein, so ändert sich seine Ausbreitungsgeschwindigkeit und seine Richtung, es wird gebrochen. Zusätzlich wird es, abhängig von seiner Wellenlänge und damit der sichtbaren Farbe, abgeschwächt, dieses Phänomen wird *selektive Extinktion* genannt. Die warmen Farbtöne, wie rot und Orange, werden als erste bereits ab 5 m Entfernung von der Lichtquelle ausgefiltert, danach folgen gelb und grün, ab einer Tiefe von etwa 40 m sind Farbkontraste nur mehr als Blauschattierungen wahrnehmbar. Die genannten Werte verringern sich in trüben Seen noch erheblich, daher ist bei Unterwasseraufnahmen fast immer der Einsatz von Kunstlicht erforderlich (Hübner 2005).

Sichtweiten

Während an Land die Sichtweite normalerweise zumindest einige hundert Meter, meist sogar mehrere Kilometer beträgt, ist unter Wasser eine Sichtweite von 20 m schon außergewöhnlich gut, meist betragen die Sichtweiten nur wenige Meter.

Um ein Gebiet unter Wasser fotografisch zu dokumentieren, sind also wesentlich mehr Einzelfotos erforderlich, um auch tatsächlich die gewünschte Abdeckung zu erreichen.

Erstellen von Fotos

Auch das Fotografieren unter Wasser unterscheidet sich wesentlich von der Fotografie an Land. Die Temperaturen in Seen erfordern meist den Gebrauch von Handschuhen, sodass die Feinmotorik eingeschränkt wird. Da man speziell an einer archäologischen Fundstelle den Untergrund nicht berühren sollte, um einerseits Zerstörungen, andererseits aber auch massive Verschlechterungen der Sicht durch aufgewirbeltes Sediment zu vermeiden, muss schwebend fotografiert werden. Das erfordert eine gute Tauchtechnik und ist äußerst zeitraubend, aber auch bei der besten Technik ist es praktisch unmöglich, vergleichbar scharfe Bilder wie an Land zu machen. Im Zuge der Fallstudie wurde daher dazu übergegangen, Filme zu drehen und daraus die erforderliche Anzahl an Einzelbildern zu extrahieren (siehe Abschnitt 5).

4.3. Geometrische Grundlagen

4.3.1. Kameramodelle

Die Kamera ist die Schnittstelle zwischen der dreidimensionalen Szene und der zweidimensionalen Abbildung auf einem Foto. Um die physikalischen Eigenschaften einer realen Szene bzw. deren Überführung in die zweidimensionale Abbildung mathematisch möglichst exakt zu beschreiben, wurden sogenannte *Kameramodelle* entwickelt. Diese verbinden die verschiedenen Koordinatensysteme, nämlich das Koordinatensystem der realen Welt, das Koordinatensystem der Kamera und je-

nes der zweidimensionalen Abbildung auf dem Bildsensor. Die bei diesem Projekt verwendete Software verwendet ein Modell mit 8 Parametern. Bei den 8 Parametern handelt es sich um die *Brennweite* f , den *Korrekturfaktor* k_1 für die *radial Distortion*, die *Translation* ($x, y, z = \text{Lage im Raum}$) und die *Rotation* ($\omega, \phi, \kappa = \text{Drehung um die } x, y \text{ und } z - \text{Achse}$) (Wu 2011).

Die *extrinsische* oder *äußere Orientierung* beschreibt die Position und Orientierung der Kamera bezogen auf den Aufnahmegegenstand, was dem Aufstellen, Montieren und Ausrichten einer realen Kamera entspricht. Der Koordinatenursprung wird in der Eintrittspupille der Kamera platziert, die lt. Konvention in die negative z - Richtung blickt, die y - Achse zeigt nach oben (Nef 2002).

Es gibt 2 unterschiedliche Ansätze (siehe Abbildung 4.5), wie die Orientierung einer bereits platzierten Kamera beschrieben werden kann, nämlich

1. durch Angabe eines Sichtvektors, der von der Kamera zum anvisierten Objekt zeigt, und eines Up - Vektors, der die Richtung der vertikalen Achse des Abbildes angibt, und
2. durch Angabe einer Rotationsachse und einen Rotationswinkel um diese Achse (Nef 2002).

Nachdem die Kamera im Raum positioniert und orientiert ist, erfolgt im nächsten Schritt die Definition der *intrinsischen* oder *inneren Orientierung*.

Die Lochkamera

Das einfachste Gerät, um die Abbildung eines realen Gegenstandes zu erzeugen, ist eine *Lochkamera*. Man benötigt dazu lediglich eine verschließbare, lichtdichte

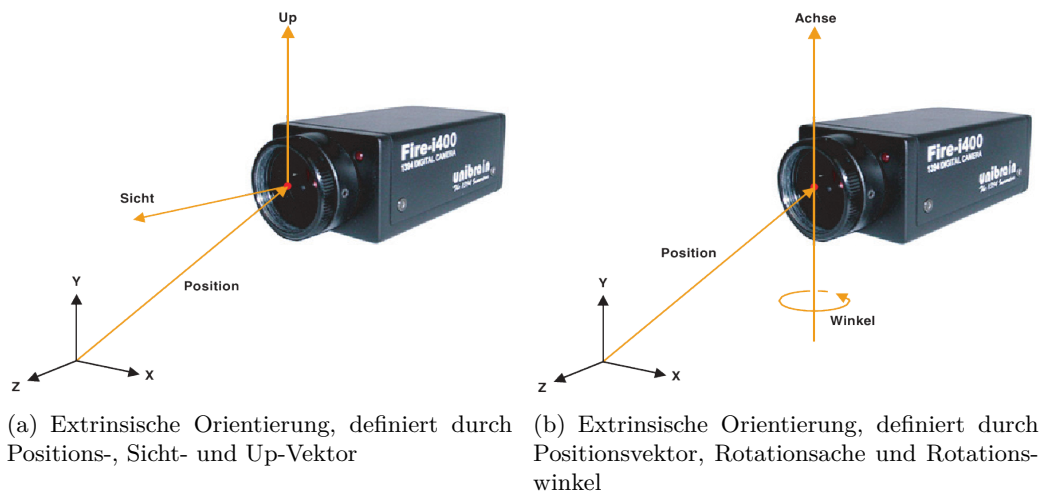
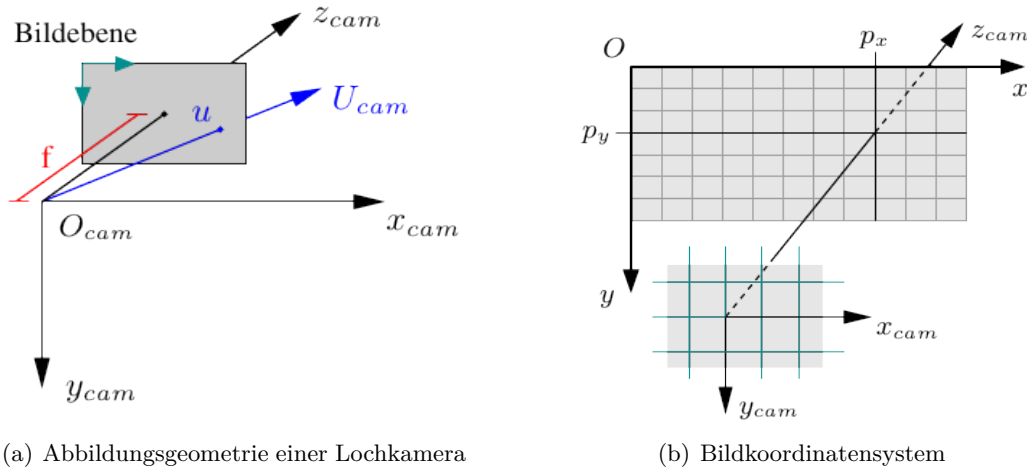


Abb. 4.5.: Extrinsische Orientierung, Ansätze zur Definition (Quelle: Nef 2002).

Box, in deren Vorderwand ein kleines Loch erzeugt wird⁴. Durch das Loch in der Vorderseite fallen die Lichtstrahlen gebündelt auf die innere Rückseite der Box und können dort mit fotoempfindlichem Material sichtbar gemacht werden. Eine Lochkamera besitzt keine Optik, die Lichtstrahlen fallen also ohne jegliche Brechung auf die Bildebene, damit ist die Lochkamera eine Vereinfachung komplizierter optischer Systeme. Interessant ist sie, abgesehen von historischen Gründen, vor allem deshalb, weil jede moderne Kamera geometrisch als Lochkamera modelliert werden kann (Hartley und Zisserman 2004). Nach den physikalischen Gesetzen der Strahlenoptik erzeugt ein unendlich kleines Loch eine unendlich scharfe Abbildung, die allerdings auch unendlich lichtschwach ist (Hartley und Zisserman 2004).

Die innere Orientierung einer Lochkamera wird durch die *Kammerkonstante* und die Position des *Hauptpunktes* in der Bildebene beschrieben.

⁴. Da dieses Loch meist mit einer Nähnadel gestochen wird, heißt der englische Terminus *pinhole camera*



(a) Abbildungsgeometrie einer Lochkamera

(b) Bildkoordinatensystem

Abb. 4.6.: Lochkamera - Abbildungsgeometrie und Bildkoordinatensystem (Quelle: Möller 2005, 14).

Kameramodell nach Tsai Eine Erweiterung des Lochkamera - Modells ist das *Kameramodell nach Tsai*. Dieses berücksichtigt nun auch einfache Linsensysteme mit all den daraus resultierenden Problemen und ist das derzeit in der *Computer Vision* am meisten angewendete Modell (Tsai 1992, 221). Für die Anwendung von *Structure from Motion* ist vor allem die *radiale Verzerrung* (*radial distortion*) von Bedeutung, bei der Bildpunkte in Abhängigkeit von der Entfernung vom Bildmittelpunkt immer weiter von ihrer tatsächlichen (idealen) Lage entfernt abgebildet werden. Dieser Effekt führt zu kissen- oder tonnenförmigen Verzerrungen (siehe Abb. 4.8).

Roger Y. Tsai und Zhengyou Zhang (Tsai 1992, Zhang 2000) haben die Auswirkungen der radialen Verzerrung empirisch untersucht und sind zu dem Schluss gekommen, dass es für die Nachbildung eines Kamerasystems, aber auch für eine genügend genaue Kalibrierung, reicht, eine einzige *Verzeichnungskonstante* k_1 anzuwenden. Gleichzeitig wurden auch die Auswirkungen der *tangentialen Verzerrung* untersucht, die aber von beiden Wissenschaftlern als vernachlässigbar angesehen werden.

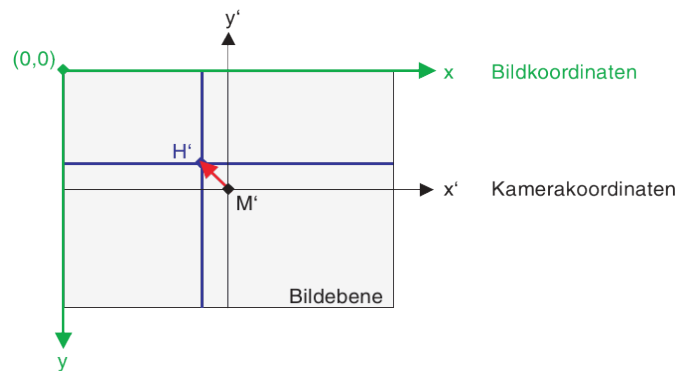


Abb. 4.7.: Innere Orientierung einer Lochkamera
(Quelle: Nef 2002)

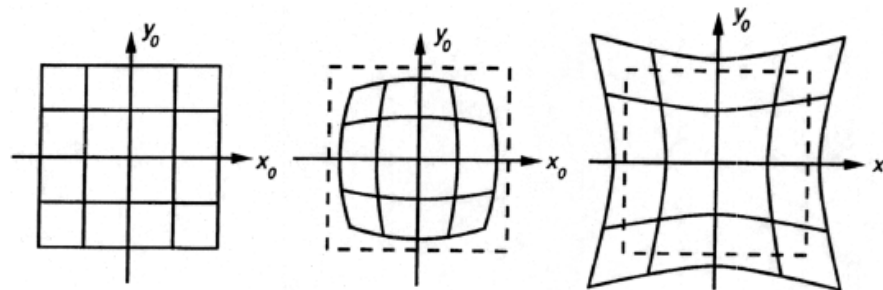


Abb. 4.8.: Varianten radialer Verzerrung, von links nach rechts: Keine Verzerrung, tonnenförmige Verzerrung, kissenförmige Verzerrung
(Quelle: <http://www.uni-koeln.de/>)

4.3.2. Kamerakalibrierung

Die Rekonstruktion der extrinsischen und intrinsischen Parameter, mit denen Bilder aufgenommen wurden, nennt man *Kalibrierung* (Möller 2005). Es existieren verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Kameraparameter, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Offline - Kalibrierung

Im Allgemeinen bilden Paare von 3D - Punkten in der Realität mit ihren korrespondierenden Abbildungen in Aufnahmen den Ausgangspunkt für die Ermittlung der extrinsischen und intrinsischen Parameter. Dazu werden Kalibriermuster fotografiert und analysiert. Das gängigste Verfahren, das zusätzlich auch noch Korrekturfaktoren für eventuell vorliegende Linsenverzerrungen berechnet, wurde 1986 von Tsai publiziert (Tsai 1986). Sein Algorithmus arbeitet in 2 Schritten, wobei im ersten Schritt für möglichst viele Parameter Schätzwerte ermittelt werden, die dann im zweiten Schritt mittels einer iterativen Optimierung verfeinert werden.

Die Genauigkeit einer Offline - Kalibrierung hängt unmittelbar mit der Genauigkeit zusammen, mit der die Punktpaare gebildet werden. Weiters ist auch die Anzahl der verwendeten Paare von Bedeutung. Diese Art der Kalibrierung wird vor dem tatsächlichen Einsatz der Kamera durchgeführt, außerdem ist auch für verschiedene Einstellungen an der Kamera jeweils eine eigene Kalibrierung durchzuführen.

Online - Kalibrierung

Da die Offline - Kalibrierung aufwändig ist, die Bereitstellung eines möglichst genauen Kalibriermodells erfordert und die Flexibilität beim Einsatz von Kameras für Zwecke, bei denen eine Kalibrierung unbedingt erforderlich ist, einschränkt, wurden sogenannte *Autokalibrierungsverfahren* entwickelt. Diese umgehen die genannten Einschränkungen und erlauben eine automatische Kalibrierung, bei der auch unterschiedliche Einstellungen an der Kamera berücksichtigt werden. Im Gegensatz zur Offline - Kalibrierung werden bei diesem Verfahren die Parameter nicht aus Paaren von 3D - Punkten mit ihren Abbildungen, sondern aus Abbil-

dungen desselben Punktes auf verschiedenen Bildern ermittelt, wobei keine bekannten Weltkoordinaten mehr erforderlich sind (Möller 2005, 20). Ein solches Verfahren wird von der verwendeten Software *VisualSFM* standardmäßig verwendet, eine Entzerrung der Fotos vor Erstellung des 3D - Modells ist also nicht erforderlich.

4.3.3. Epipolargeometrie

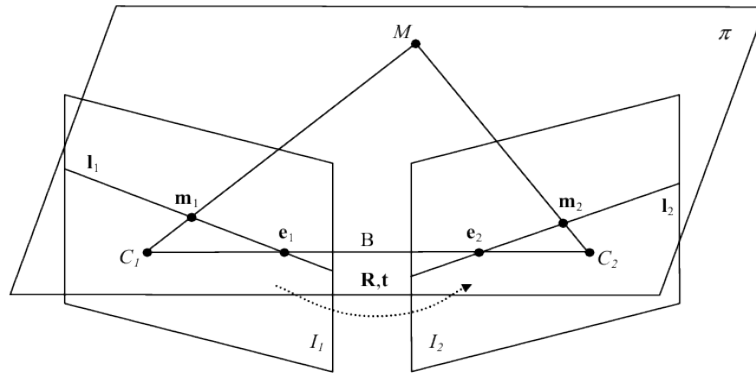


Abb. 4.9.: Epipolargeometrie (Quelle: Scheer 2005)

Das mathematische Modell der Geometrie, das die Beziehungen zwischen zwei unterschiedlichen fotografischen Abbildungen des gleichen Objektes beschreibt, ist die *Epipolargeometrie*. In Abb. 4.9 ist ein solches Szenario abgebildet, anhand dessen eine kurze Erläuterung erfolgen soll.

Die Punkte C_1 und C_2 stellen die hinter den jeweiligen Bildebenen I_1 und I_2 liegenden optischen Zentren der beiden Kameras dar. Sie sind durch die *Basislinie* B miteinander verbunden, die, bedingt durch die Drehung der Kameras zueinander, beide Bildebenen durchdringt, und zwar in den Punkten e_1 und e_2 . Diese Punkte werden *Epipole* genannt, ihre Lage auf den Bildebenen ist nur durch die Lage der Kameras zueinander bestimmt.

Der 3D- Punkt M und die beiden optischen Zentren C_1 und C_2 definieren eine Ebene, die sogenannte *Epipolarebene* π . Die Abbildungen des 3D - Punktes M auf den Bildebenen liegen auf den optischen Strahlen zwischen C_1 und M bzw. C_2 und M und somit auch auf der Epipolarebene π , die die beiden Bildebenen in jeweils einer Geraden schneidet, nämlich den *Epipolarlinien* l_1 und l_2 . Bewegt man den Punkt M innerhalb der Epipolarebene, so führt dies zwar zu unterschiedlichen Abbildungen auf den Bildebenen I_1 und I_2 , allerdings liegen diese Abbildungen immer auf den Epipolarlinien l_1 und l_2 . Bewegt man den Punkt M in Richtung des Optischen Zentrums C_1 , so bleibt die Abbildung m_1 gleich, während sich die Abbildung m_2 bewegt, allerdings immer auf der Epipolarlinie l_2 .

Da die Basislinie Teil der Epipolarebene π ist, kann durch die Rotation der Ebene um die Basislinie jeder mögliche Punkt im Raum erreicht werden, für jede Position entsteht allerdings ein neues Paar von Epipolarlinien l_1 und l_2 . Die Summe aller Epipolarlinien wird *Epipolarlinienbüschel* genannt (Scheer 2005).

Durch die mathematische Herleitung der angeführten Prinzipien ist es möglich, die korrekte Lage des 3D - Punktes M im Raum zu berechnen, was die mathematische Basis von *Structure from Motion* ist. Aber auch für die praktische Anwendung ist das Verständnis der Prinzipien der Epipolargeometrie wichtig, da klar wird, warum die Rekonstruktion einer 3D - Szene mit einem Kamerastandpunkt im Zentrum und Blick nach außen nicht funktioniert: In so einem Fall schneidet die Basislinie zwischen den optischen Zentren C_1 und C_2 zweier Kamerastandpunkte die Bildebenen I_1 und I_2 nicht, die gesamte Basis der Epipolargeometrie bricht weg und eine Berechnung ist nicht mehr möglich.

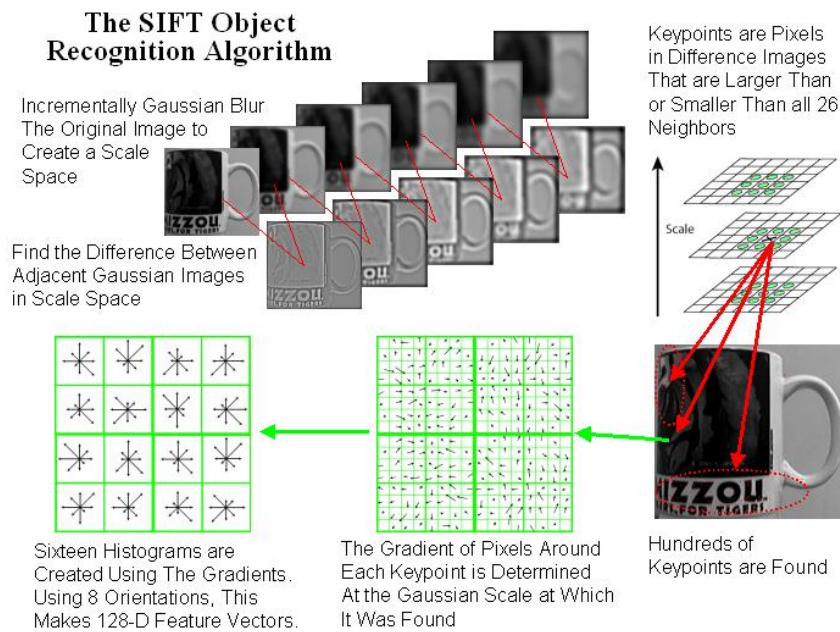


Abb. 4.10.: Der SIFT - Algorithmus (Quelle: <http://eecs.vanderbilt.edu/cis/crl/wm.shtml>)

4.4. Der SIFT - Algorithmus

Aus den geometrischen Grundlagen der Epipolargeometrie ergibt sich die Notwendigkeit, den gleichen Punkt eines Objektes in verschiedenen Bildern zu erkennen, da nur so eine dreidimensionale Rekonstruktion dieses Punktes möglich ist. Das derzeit zu diesem Zweck im Bereich von *Structure from Motion* am meisten angewendete Verfahren ist *Scale Invariant Feature Transformation* (Abk. SIFT = *größenunabhängige Merkmalsabbildung/Erkennung*). Dieser von David Lowe an der kanadischen *University of British Columbia* entwickelte Algorithmus (Lowe 1999) erkennt in einem zu analysierenden Bild Schlüsselpunkte, sogenannte *keypoints* oder *features*, die in anderen Aufnahmen mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls zu erkennen sind. Die Erkennung dieser *features* ist weitestgehend unempfindlich gegenüber Skalierung und Rotation sowie zumindest zum Teil gegenüber Änderungen der Belichtung und des Kamerastandpunktes. Der hohe Rechenaufwand für

das Erkennen dieser *features* wird durch verschiedene Mechanismen minimiert, durch die nur Punkte für die weiteren Berechnungen in Betracht gezogen werden, die gewissen Eingangsvoraussetzungen entsprechen.

Im folgenden werden die wichtigsten Stufen des Erkennens von *features* aufgezählt.

4.4.1. Erkennen von Maxima/Minima - Werten

Im ersten Schritt wird versucht, *features* zu finden, die in verschiedenen Ansichten eines Objektes mit hoher Wahrscheinlichkeit immer zu finden sind. Durch die Suche im gesamten Skalenraum können Bildstellen bestimmt werden, die invariant gegenüber Skalierungen sind. Die verschiedenen Skalierungsstufen werden einerseits durch Glättung („*Blurring*“) mittels eines *Gauß - Filters*, andererseits durch Skalierung um jeweils die Hälfte berechnet.

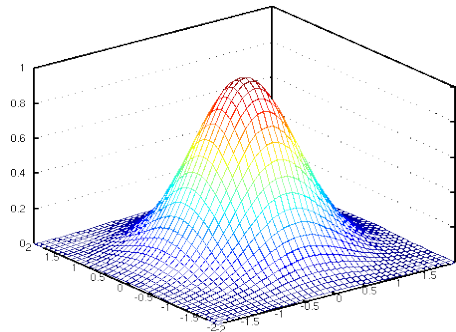


Abb. 4.11.: Gauß'scher Glockenbecher, berechnet und geplottet mit GNU Octave

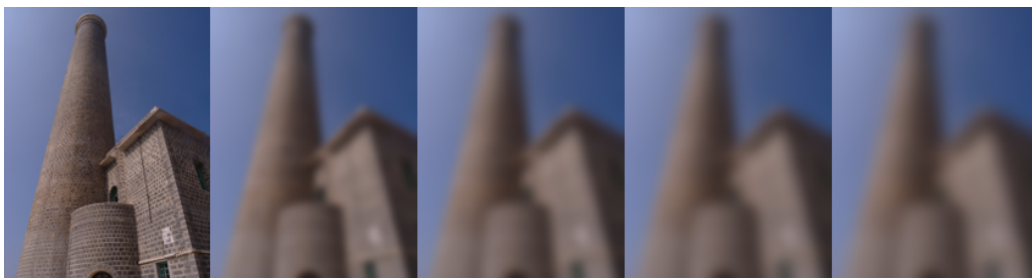


Abb. 4.12.: Glättung (*Blurring*) mit Gauß - Filter: Links das Originalfoto, nach rechts fortlaufend jeweils das vorherige Bild mittels Gauß - Filter geglättet. Berechnung der Bilder mit dem Bildbearbeitungsprogramm GIMP (<http://www.gimp.org>).

Die Anwendung eines Gauß- Filters⁵ ist erforderlich, da, um die Rotationsinvarianz der *features* zu gewährleisten, ein isotroper⁶ Kern benötigt wird, was durch die Anwendung einer zweidimensionalen Gauß'schen Funktion (siehe Abb. 4.11) gewährleistet ist.

Im nächsten Schritt wird das Bild um den Faktor 0.5 skaliert und mit diesem Bild ebenfalls das Bluring mittels Gauß - Filter durchgeführt. Man spricht hier vom nächsten *Skalenraum* (oder, in Anlehnung an die Musikwissenschaft, von der nächsten *Oktave*). Dieser Vorgang wird solange fortgeführt, bis das zu analysierende Bild nur mehr eine Größe von 1 Pixel hat. Die Gesamtheit dieses Bilderstapels wird *Gauß'sche Pyramide* genannt.

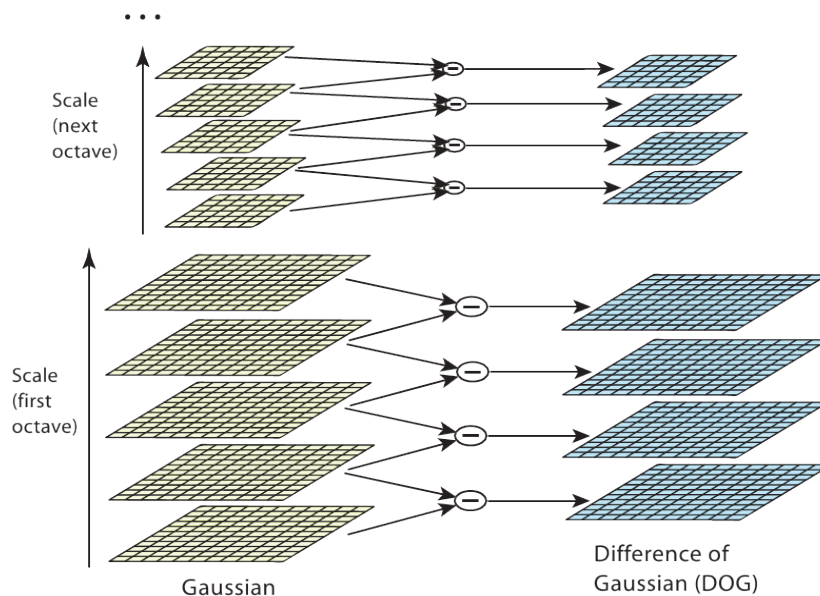


Abb. 4.13.: Für jede Oktave des Skalenraums wird das Ursprungsbild immer wieder mit Gaußglocken gefaltet, um die Menge an Bildern auf der linken Seite zu erstellen. Nebeneinander liegende werden voneinander subtrahiert, um die DoG-Bilder der rechten Seite zu errechnen. Am Ende jeder Oktave wird das letzte Gaußbild durch resampling halbiert und dient als Ursprungsbild für die nächste Oktave (Quelle: Lowe 2004, 6).

5. Bei einem Gauß - Filter werden die benachbarten Pixel bei der Berechnung in Abhängigkeit von ihrem Abstand entsprechend der Gauß'schen Verteilungskurve gewichtet

6. Isotropie: griech.: *isos* gleich, *tropos* Drehung

Um Pixel mit Minima- bzw. Maxima - Werten zu finden, wird nun jedes einzelne Pixel mit seinen 26 Nachbarn verglichen, nämlich 8 in derselben Ebene und jeweils 9 in der Skalierungsebene darüber und darunter. *Per definitionem* werden nur solchen Punkte als potentielle Kandidaten ausgewählt, deren Werte größer oder kleiner als die all ihrer Nachbarn sind.

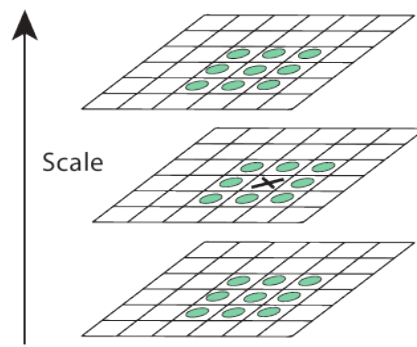


Abb. 4.14.: Erkennen von Maxima- und Minima - Werten (Quelle: Lowe 2004, 7)

4.4.2. Der Deskriptor

Ein *feature* wird definiert durch die exakte Lokalisierung seiner x und y - Koordinate, seine *Hauptorientierung* und einen *Merkmalsvektor*.

Exakte Lokalisierung der Schlüsselpunkte

Wurde durch den Vergleich mit seinen Nachbarn ein Kandidat für einen *keypoint* gefunden, so besteht der nächste Schritt darin, diesen Punkt nun hinsichtlich der ihn umgebenden Daten zu untersuchen, um Punkte mit geringem Kontrast oder solche, die ungünstig an Kanten liegen, auszuschließen, was zu einer erhöhten Stabilität der Merkmalserkennung führt.

Die ursprüngliche Lösung dieser Aufgabe bestand einfach darin, den *keypoint* anhand der Feststellung der Maxima und Minima und dem Ausschluss ungünstiger Punkte zu lokalisieren und zu skalieren (Lowe 1999). Allerdings entwickelte Brown eine Methode, bei der durch die Anwendung einer dreidimensionalen, quadratischen Funktion die Position der *keypoints* noch genauer bestimmt werden

kann. Seine Experimente zeigten eine wesentliche Erhöhung der Stabilität bei der Merkmalerkennung (Brown und Lowe 2002).

Feststellung der Hauptorientierungen

Die *Hauptorientierung* eines Punktes wird durch einen *Gradienten* ausgedrückt. Ein Gradient kennzeichnet die Richtung des größten Werteanstiegs einer definierten Wertekategorie (z. Bsp. Temperatur, Z - Koordinate, räumliche Steigung). Wird beispielsweise in einem *GIS*⁷ aus einem *DEM*⁸ eine Karte erstellt, in der Farbwerte entsprechend der Geländesteilheit vergeben werden sollen, so muss das Programm den Gradienten jedes einzelnen Punktes errechnen. Nimmt man an, dass die Funktion $h_{(x,y)}$ jedem Punkt seine Z - Koordinate zuweist, dann ist der Gradient von $h_{(x,y)}$ ein Vektor in der xy - Ebene mit dem Ursprung in $h_{(x,y)}$, der in die Richtung des nächsthöheren Punktes zeigt und dessen Länge ein Maß für die Steilheit bzw. den Höhenunterschied der beiden Punkte darstellt.

Bei der Erkennung von *keypoints* ist die Kategorie, die durch den Gradienten definiert wird, der größte Helligkeitsanstieg. Für die Ermittlung werden alle Gradienten von Punkten der näheren Umgebung berücksichtigt und nach verschiedenen Kriterien gewichtet. Das erste Kriterium ist die Länge der Vektoren, das zweite die Entfernung vom *keypoint*, nähere Gradienten werden stärker gewichtet als weiter entfernte (Lowe 1999).

7. GIS = Geografisches Informationssystem

8. DEM = Digital Elevation Model (Geländemodell)

Die Erzeugung des Merkmalvektors

Der Merkmalsvektor ist die dritte und letzte Information, die zur vollständigen Beschreibung eines robusten *keypoints* erforderlich ist. Lowe verwendet einen 128-dimensionalen Vektor, der Erkenntnisse über die Umgebung des *keypoints* enthält. Berechnet wird er relativ zur Hauptorientierung des *keypoints*, damit ist er unempfindlich gegenüber Drehungen des Bildes, da die Hauptorientierung eines Punktes in so einem Fall ebenfalls rotiert. Außerdem ermöglicht der Merkmalsvektor durch die Art seiner Berechnung eine Invarianz gegenüber Beleuchtungs- und Kontrastveränderungen.

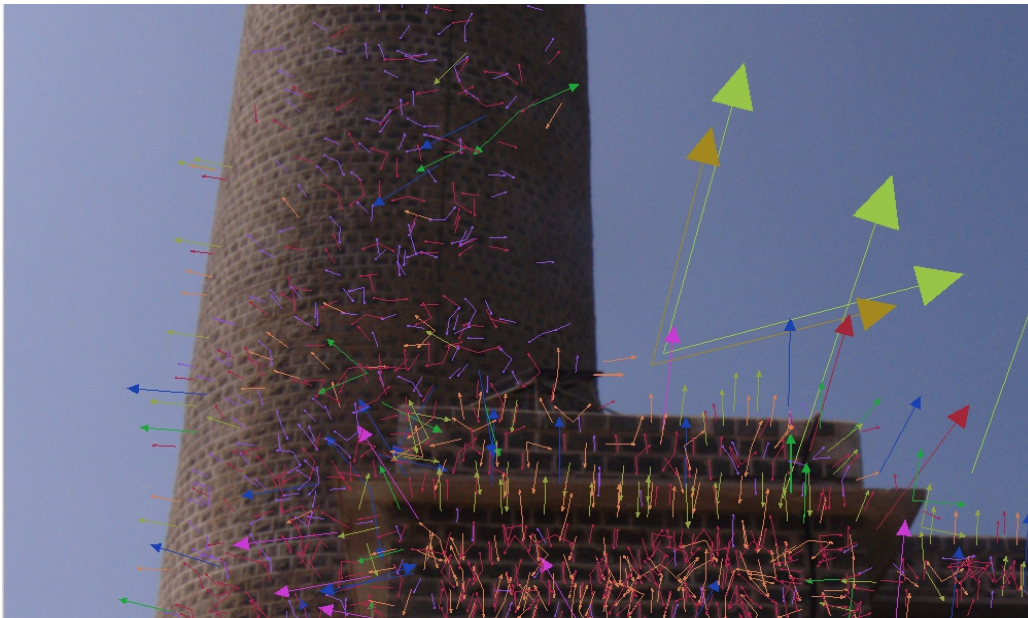


Abb. 4.15.: Darstellung der gefundenen features in einem Bild als Gradienten. Berechnung mit *SiftGPU*, Darstellung in *VisualSFM*. Foto: ©2007 Viktor Jansa

4.4.3. Feature Matching

Das sogenannte *feature matching*, also der Vorgang, bei dem letztendlich festgestellt wird, welche *keypoints* übereinstimmen, ist im Vergleich zu den bisherigen

Aufgaben vergleichsweise simpel. Da der Merkmalsvektor ja invariant gegenüber Rotation und Belichtungs- sowie Kontraständerungen ist, muss lediglich der euklidische Abstand zwischen den Vektoren bestimmt werden. Bei weitgehender Übereinstimmung der Werte kann davon ausgegangen werden, dass es sich um den gleichen Punkt handelt. Die Berechnung des euklidischen Abstandes kann mit einer Abwandlung des *Satzes von Pythagoras* erfolgen.

Zwar handelt es sich beim *feature matching* um einen einfachen Vorgang, die Tücken liegen jedoch in der Masse der Berechnungen. Pro Bild werden, je nach Auflösung, bis zu 50 000, in manchen Fällen sogar noch mehr, keypoints gefunden, von denen jeder durch einen 128 - dimensional Merkmalsvektor definiert ist. Da jeder einzelne *keypoint* eines Bildes mit allen anderen gefundenen *keypoints* in den restlichen Bildern des Datensatzes verglichen werden muss, kann die Berechnungsdauer auf einem durchschnittlichen Computer, abhängig von Größe und Auflösung der zugrunde liegenden Bilder, durchaus mehrere Stunden in Anspruch nehmen.

4.4.4. SiftGPU

Bedingt durch die hohen Anforderungen moderner Computerspiele verfügen moderne Grafikkarten über bis zu 128 Kerne, die grafische Berechnungen parallel ausführen und so auch aufwändig gerenderte Szenen mit flüssigen Bewegungen am Bildschirm erzeugen. Mit der Entwicklung von *CUDA*, einer programmierbaren, parallelen Berechnungsarchitektur, hat der Grafikkartenhersteller *NVIDIA* die Möglichkeit geschaffen, die Rechenleistung der Grafikkarten auch für andere Zwecke zu nutzen. Diese Technologie nutzt das Programm *SiftGPU* (Wu 2007).

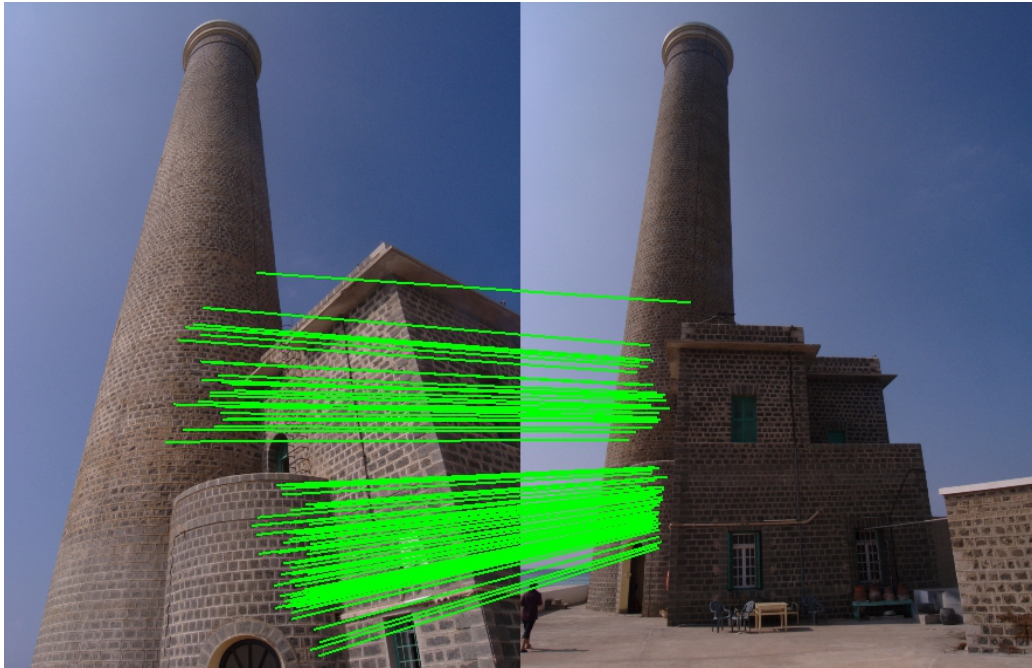


Abb. 4.16.: Tatsächlich übereinstimmende features in einem Bilderpaar. Die grünen Linien verbinden die features der beiden Bilder. Berechnung mit *SiftGPU*, Darstellung in *VisualSFM*. Fotos: Leuchtturm Sanganeb/Sudan, ©2007 Viktor Jansa

SiftGPU ist eine Implementierung von *SIFT* für Berechnungen auf der GPU⁹. *SiftGPU* prozessiert Pixel parallel, um die Gauß'schen Pyramiden zu erzeugen und die *keypoints* zu finden. Danach nutzt *SiftGPU* eine Methode, die sowohl die CPU als auch die GPU nutzt, um kompakte *keypoint* - Listen zu erzeugen, die effizient durchsucht werden können. Letztendlich werden die *keypoints* parallel prozessiert, um die Hauptorientierungen und Merkmalsvektoren zu erzeugen.

Weiters beinhaltet *SiftGPU* eine GPU - basierte *matching software* namens *Sift-MatchGPU*, die im Wesentlichen die Merkmalsvektoren auf der GPU parallel vergleicht, um so möglichst effizient Übereinstimmungen festzustellen.

9. GPU = Graphics Processing Unit

4.5. Bündelausgleich

4.5.1. Allgemeines

Der *Bündelausgleich* (engl. *Bundle Adjustment*) wird in vielen fotogrammetrischen Anwendungen eingesetzt. Im Grunde handelt es sich um ein komplexes Schätzverfahren, das bei *Structure from Motion* dazu verwendet wird, um aus den durch *SIFT* gewonnenen Daten (*features* und Übereinstimmungen von *features* in Bildpaaren) möglichst optimale Kameraparameter (extrinsisch und intrinsisch) sowie die dreidimensionale Position der Punkte der aufgenommenen Szene zu schätzen. Der Name wurde abgeleitet aus den Bündeln von Lichtstrahlen, die jedes Objekt reflektiert und die ausgeglichen (in Abhängigkeit von Kameraposition und Parametern) in das optischen Zentrum der Kamera gelangen (Triggs u. a. 1999). Die Komplexität der Aufgabe besteht darin, viele Sub - Koordinatensysteme (jedes Bild hat ja sein eigenes Koordinatensystem) möglichst genau in ein großes, sozusagen „globales“ Koordinatensystem einzubringen. Eine ähnliche Aufgabe ist auch die in der Geodäsie oft erforderliche Konvertierung zwischen verschiedenen Koordinatensystemen, die mittels der sogenannten *Helmert - Transformation* durchgeführt wird, oder die Auswertung von Laserscan - Daten.

4.5.2. Der Levenberg - Marquardt - Algorithmus

In *Structure from Motion* wird für den Bündelausgleich der *Levenberg - Marquardt - Algorithmus* (*LM*) verwendet. Dabei handelt es sich um einen numerischen Optimierungsalgorithmus zur Lösung nichtlinearer Ausgleichsprobleme mit Hilfe der von Karl Gauß entwickelten *Methode der kleinsten Quadrate*. Bei dieser Methode wird zu einer Anzahl an bekannten Punkten eine Kurve gesucht, die möglichst nahe an allen Punkten liegt.

Gauß nahm bei der Entwicklung seiner Methode an, dass die Messfehler (also die Abweichung der Punktkoordinaten von der linearen Funktion) normalverteilt und im Durchschnitt null seien. In den Abweichungen sind also keinerlei relevante Informationen enthalten, sie sind rein zufällig.

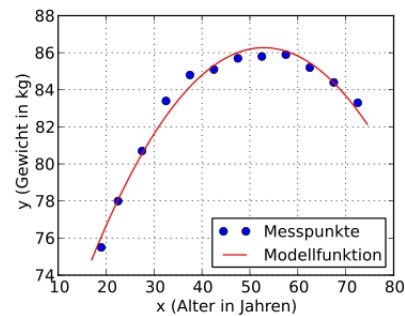


Abb. 4.17.: Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate (Quelle: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/MDKQ3.svg>)

Der *LM* - Algorithmus löst das Optimierungsproblem durch eine Serie linearer Annäherungen an das ursprüngliche nichtlineare Problem. Aufgrund der Komplexität im Falle von *Structure from Motion* kann die Lösung aber nicht mehr analytisch, sondern nur mehr numerisch erfolgen. Aufgrund der Ergebnisse aus *SIFT* wird eine erste Schätzung der Kameraparameter durchgeführt und diese dann durch Iteration verfeinert. Sind die Kameraparameter dann genau bekannt, kann, basierend auf den Grundlagen der Epipolargeometrie (siehe Abschn. 4.3.3), die dreiminisionale Lage der Punkte der aufgenommenen Szene im Raum berechnet werden (Triggs u. a. 1999). Als Ergebnis liefern *Bundle Adjustment* neben den Kameraparametern eine Punktwolke mit relativ wenigen Punkten (in englischsprachigen Publikationen wird deshalb von einer „sparse“ *pointcloud* gesprochen).

4.5.3. Parallel Bundle Adjustment

Die meisten bisherigen Softwaresysteme zur Durchführung des *Bundle Adjustment* sind nicht in der Lage, die heute üblichen Hardwarekomponenten auszunutzen, da die Parallelisierung von *Bundle Adjustment* keine triviale Aufgabe ist. Moderne Computer verfügen aber über 2 bis 16 CPU - und 4 bis 128 GPU - Kerne, die

Nutzung dieses Potentials dürfte der Schlüssel für die zukünftige Anwendung von *Computer Vision* - Technologien sein.

2011 veröffentlichte Changchang Wu ein Software - Paket namens *Parallel Bundle Adjustment (PBA)*, das all diese Hardwarekomponenten für das *Bundle Adjustment*, welches bis zu diesem Zeitpunkt den Flaschenhals im gesamten Workflow von *Structure from Motion* darstellte, nutzen kann (Wu u. a. 2011). Bei paralleler Nutzung von CPU - Kernen ist dieses System 10 mal, bei paralleler Nutzung der GPU - Kerne sogar bis zu 30 mal schneller als vergleichbare Single Core - Software. *PBA* liegt als *OpenSource* - Software vor und ist in die graphische Oberfläche *VisualSFM* integriert, die für diese Arbeit benutzt wurde.

4.6. Multi View Stereo - Software

Mit dem Einsatz einer *Bundle Adjustment Software* ist der typische *Structure from Motion* - Workflow abgeschlossen. Wie bereits erwähnt, ist das Ergebnis eine relativ dürftige Punktwolke, die zwar für die Erstellung von Geländemodellen ausreichend ist, aber nur wenige Details über die aufgenommene Szene liefern kann. Mit der Integration von zwei zusätzlichen Software - Paketen namens *Patch - based Multi - view Stereo - Software* und *Clustering Views for Multi - view Stereo* zur Berechnung dichter Punktwolken kann aber auch dieses Problem mit *OpenSource* - Software gelöst werden.

4.6.1. Patch - based Multi - view Stereo - Software

Patch - based Multi - view Stereo - Software (PMVS) wurde von Yasutaka Furukawa an der *University of Washington* geschrieben. Die Software liegt in der Version 2 vor. *PMVS2* ist eine sogenannte *Multi View Stereo - Software*, die aus

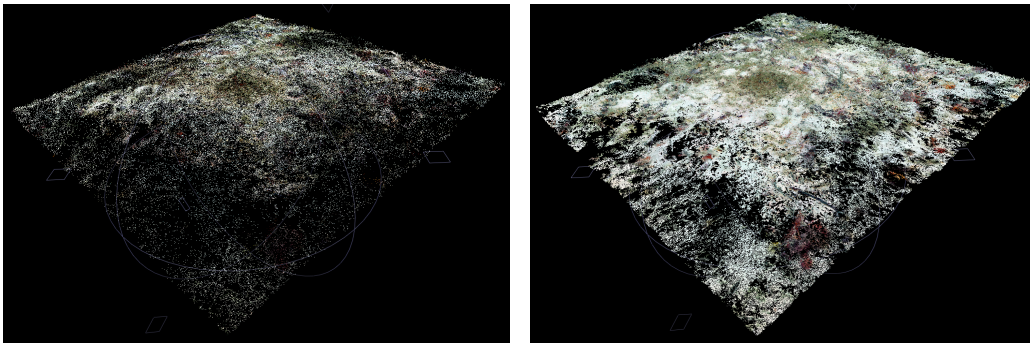
einem Satz von Bildern und den zugehörigen Kameraparametern dreidimensionale Strukturen oder Szenen rekonstruiert und eine dichte Punktwolke generiert. Die Software erkennt und ignoriert automatisch sich bewegendende Objekte wie beispielsweise Fußgänger oder fahrende Autos vor einem Gebäude. Die Punkte verfügen nicht nur über ihre dreidimensionalen Koordinaten, sondern auch über einen Farbwert, durch den die Generierung einer realistischen Textur ermöglicht wird. Die hohe Dichte der generierten Punktwolke wird allerdings mit einer langen Berechnungsdauer erkauft.

4.6.2. Clustering Views for Multi - view Stereo

Viele *Multi View Stereo - Algorithmen* haben aufgrund des hohen Bedarfs an Speicher und Rechenressourcen Probleme mit der Verarbeitung großer Datenmengen. *Clustering Views for Multi - view Stereo (CMVS)*, ebenfalls von Yasutaka Furukawa entwickelt, umgeht das Problem, indem die zu verarbeitenden Bilder in Cluster unterteilt werden, deren Größe in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ressourcen angepasst werden kann. *CMVS* unterteilt den gesamten Datensatz an Bildern in an die Systemressourcen angepasste Cluster, übergibt diese an *PMVS* zur parallelisierten Berechnung und fügt nach Fertigstellung der Cluster diese wieder zusammen (Furukawa u. a. [2010](#)).

Das Ergebnis ist eine Punktwolke im *ply* - Format (*.ply), in dem neben einem Header mit Metadaten die x, y, und z - Koordinaten sowie die RGB - Werte der einzelnen Punkte enthalten sind. Dieses Dateiformat kann praktisch von jeder Software für die Bearbeitung von Punktwolken gelesen werden.

Nach Abschluss dieser Berechnungen kann die Punktwolke dann, entsprechend dem geplanten Anwendungszweck, in geeignete Software zur Weiterbearbeitung importiert werden. In Frage kommt zum Beispiel *Meshlab*, um verschiedene Filter



(a) Ergebnis der Berechnungen mit *SiftGPU* und *PBA*: eine Punktwolke mit 88 155 Punkten auf einer Fläche von ca. 4 m².

(b) Im Vergleich dazu das Ergebnis der abschließenden Berechnung mit *PMVS/CMVS*: eine Punktwolke mit 1 419 053 Punkten auf der gleichen Fläche von rund 4 m².

Abb. 4.18.: Vergleich des Ergebnisses aus *Structure from Motion* (*SiftGPU/PBA*) und der nachfolgenden Berechnung mit *PMVS/CMVS*: *PMVS/CMVS* liefert eine ca. 16 mal dichtere Punktwolke als *SiftGPU/PBA*. Visualisierung in *Meshlab*.

zur Bereinigung anzuwenden und texturierte Oberflächen zu generieren, *Grass GIS* zur georeferenzierten Darstellung und räumlichen Analyse oder *ParaView* zur Visualisierung und dreidimensionalen Präsentation der Ergebnisse.

4.7. Anwendungen

In der Landarchäologie wird *Structure from Motion* als Methode zur digitalen Dokumentation bereits von einigen archäologischen Teams eingesetzt. Mark Willis berichtet im Blog von Nathan M. Craig am *AntSpace@PSU*¹⁰ über die erfolgreiche Dokumentation bzw. das Monitoring von indianischen Felsmalereien in einer Höhle am Pecos River im Westen von Texas (<http://www.personal.psu.edu/>), und Luca Bezzi von der Universität Padua gibt im Blog von *ATOR*¹¹ (<http://arc-team-open-research.blogspot.it/>) immer wieder Tipps zur Anwendung von *Structure from Motion* in der Archäologie, um nur einige zu nennen.

10. Anthropology Analytical Cartography and Geographic Information System Lab at the Pennsylvania State University

11. Arc - Team Open Research

Einige wenige Arbeiten gibt es auch bereits im Bereich der Unterwasserarchäologie. Skarlatosa u. a. 2012 berichten über den Versuch der Dokumentation eines Amphorenfeldes vor der Küste Zyperns in ca. 45 m Tiefe. Der Bericht befasst sich auch ausführlich mit der erreichbaren Genauigkeit, die in einem Bereich zwischen 1,8 und 3,0 cm angegeben wird. Allerdings fehlen bei diesen Angaben die Bezugslängen, außerdem ist das genaue, händische Einmessen von Kontrollpunkten unter Wasser keine einfache Angelegenheit, sodass die Frage durchaus berechtigt ist, ob die Abweichung nun in den fotogrammetrischen Daten oder in den händischen Messungen lag. Peter Holt hat sich intensiv mit der erreichbaren Genauigkeiten von Messungen mittels Maßband unter Wasser beschäftigt und in vielen Testmessungen mit verschiedenen Teams herausgefunden, dass eine durchschnittliche Abweichung von 27 mm vorliegt (Holt 2003). Um händische Messungen mit Maßband in der erforderlichen Genauigkeit zu produzieren, müssten eigentlich mindestens 10, besser noch mehr Messungen desselben Punktes durchgeführt und diese dann mit dem bereits erwähnten *Levenberg - Marquard - Algorithmus* auf einen möglichst plausiblen Wert geführt werden. Dies ist aber praktisch kaum durchführbar, eine Diskussion um wenige Millimeter daher wenig sinnvoll. Es kann aber jedenfalls davon ausgegangen werden, dass die Genauigkeit der mittels *Structure from Motion* rekonstruierten 3D - Modelle mindestens der von händischen Messungen entspricht, naturgemäß aber wesentlich mehr Details umfasst.

Da *Structure from Motion* also in der Landarchäologie etabliert ist und auch im Meer offensichtlich funktioniert, stellt sich die Frage nach der Anwendung im Süßwasser. Unterwasserarchäologische Fundstellen in mitteleuropäischen Seen unterscheiden sich in einigen Punkten ganz massiv von solchen im Meer. Durch die meist sehr seichte Lage ist die Gefahr eines Tauchunfalles gering, und die geringen Tiefen ermöglichen oft die Vermessung mittels Tachymeter vom Ufer aus. Allerdings werden durch Lichtreflexionen an der Wasseroberfläche harte Schatten am Seegrund erzeugt, die in geringen Tiefen die fotografische Arbeit wesentlich erschweren. Die Sichttiefen betragen nur einen Bruchteil der im Mittelmeer meist herrschenden

Verhältnisse, und in den Sommermonaten, in denen die Wassertemperaturen das Arbeiten wesentlich erleichtern würden, ist die Sicht überhaupt so schlecht, dass ein sinnvolles Arbeiten nicht möglich ist. Außerdem ist der Seegrund über weite Bereiche im Sommer bewachsen, sodass die darunter liegenden Strukturen gar nicht sichtbar sind. Die beste Zeit für Monitoring - Arbeiten jeder Art ist also der Winter, aber 4° C Wassertemperatur und Außentemperaturen von 0° C oder weniger erschweren die Arbeit naturgemäß, da mit umfangreicher Kälteschutz - Ausrüstung getaucht werden muss.

5. Praktische Anwendung - Fallstudie

Seewalchen am Attersee

5.1. Allgemeines

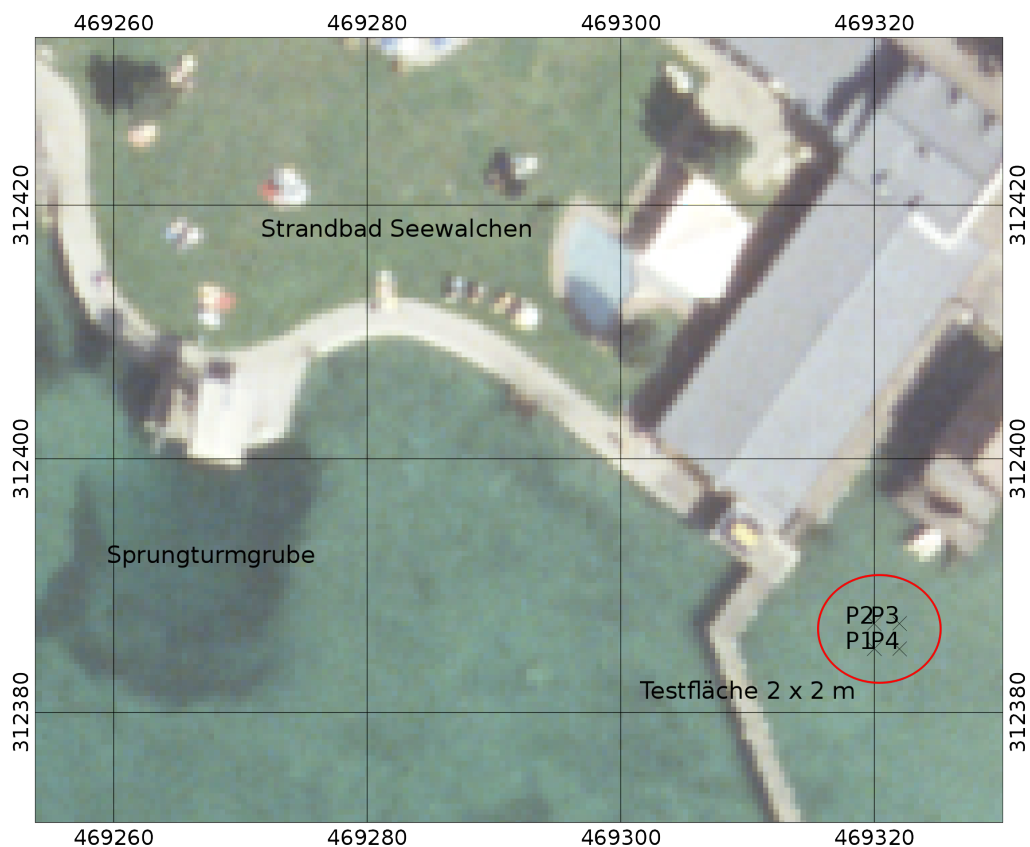


Abb. 5.1.: Das Testgebiet vor dem Bootsverleih neben dem Strandbad Seewalchen/Attersee. Auch viele der in dieser Arbeit verwendeten Fotos entstanden in diesem Gebiet. Im linken Bildbereich ist deutlich die Grube im Seegrund vor dem Sprungturm zu erkennen.

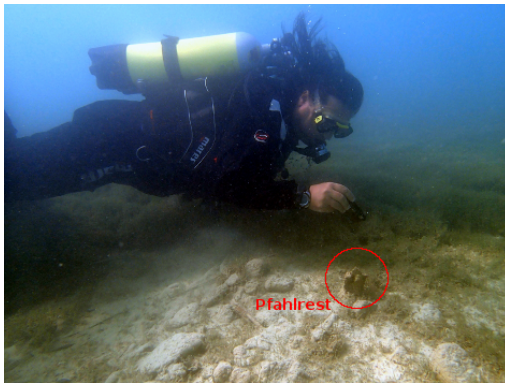
Die Wahl des Testgebietes fiel aus mehreren Gründen auf Seewalchen am Attersee. Für dieses Gebiet lag eine Ausnahmegenehmigung vom herrschenden Tauchverbot vor. Durch die Mitarbeit bei einem vom Bundesdenkmalamt in Auftrag gegebenen Projekt zur Vermessung der Pfahlbaustationen Seewalchen I und II sowie Kammer I im Oktober 2011 kennt der Verfasser das Gebiet sehr gut, und letztendlich war durch persönliche Kontakte in die Region die Frage der Unterkunft während mehrerer Wochenenden im 2. Halbjahr 2012 für die Durchführung der Feldarbeit gelöst. Auch die Tatsache, dass aus zeitlichen Gründen (Fertigstellungstermin für die Diplomarbeit) die beste Zeit im Winter nicht abgewartet werden konnte, spielte bei der Entscheidung eine Rolle, da der Attersee auch im Herbst bereits akzeptable Sichtbedingungen aufweist, von denen der Mondsee in dieser Jahreszeit noch weit entfernt ist.

5.2. Projektvorbereitung

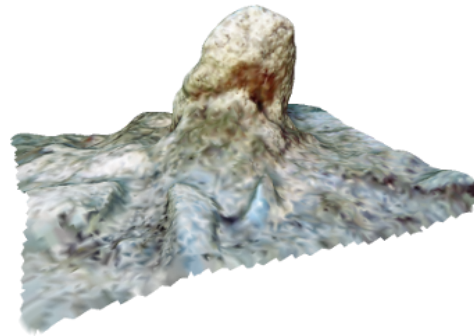
5.2.1. Vorarbeiten

Um ein Gefühl für die Möglichkeiten von *Structure from Motion* unter Wasser zu bekommen, wurde bereits im Sommer 2012 damit begonnen, bei Tauchgängen an der Pfahlbaustation *See/Mondsee* Objekte zu erfassen. Da kaum Erfahrungen auf diesem Gebiet vorhanden waren, wurden diese ersten Versuche eher unsystematisch durchgeführt. Aufgrund der äußerst schlechten Sichtbedingungen konnten keine Flächen bearbeitet werden, aber es zeigte sich, dass mit *Structure from Motion* kleine Strukturen sehr detailliert erfasst werden können.

Auch wurde schnell klar, dass die Aufnahmestrategie, wie sie an Land verwendet wird, unter Wasser nicht funktioniert: Aus tauchtechnischen Gründen ist es äußerst aufwändig, viele Einzelfotos zu produzieren. Da man im Wasser schweben muss (immerhin geht es um archäologische Fundstellen, wo Zerstörungen durch unacht-



(a) Der Verfasser beim Versuch, einen Pfahlrest in der Station See/Mondsee zu dokumentieren.
Foto: ©2012 Gerald Egger



(b) 3D - Modell des dokumentierten Pfahls

Abb. 5.2.: *Im linken Bild ist der dokumentierte Pfahlrest rot markiert. Durch das Größenverhältnis zum Taucher ist gut zu erkennen, wie klein der Rest eigentlich ist. Im rechten Bild ist ein Screenshot des 3D - Modells abgebildet.*

sames Tauchen unbedingt vermieden werden müssen) dauert es relativ lange, bis der Taucher soweit austariert ist, um Bilder entsprechender Schärfe aufnehmen zu können. Daher wurde dazu übergegangen, Videos zu drehen, aus denen dann Bilder in gewünschter Anzahl extrahiert werden können. Diese Vorgehensweise hat aber einige Auswirkungen auf die erforderlichen Schritte zur Datenbearbeitung, worauf im entsprechenden Abschnitt (siehe Abschn. 5.4) näher eingegangen wird.

5.2.2. Verfügbares Equipment

Folgende Hardware stand für das Projekt zur Verfügung:

- Computer: Dimotion Notebook, Intel i7 - Quadcore Prozessor 2,13 GHz 64 bit, 8 GB RAM, 240GB SSD, Nvidia Geforce GTX 285M Grafikkarte mit 128 GPU - Kernen und 1 GB RAM.

- Kamera: Nikon Coolpix AW100 Kompakt - Digicam, Auflösung im Video-modus: Full HD 1920 x 1080 Pixel.

Auf die zum Einsatz gekommene Software wird im Punkt Datenbearbeitung (siehe Abschn. 5.4) näher eingegangen.

5.3. Feldarbeit

Nach mehreren Wochenenden, an denen versucht wurde, einen praktikablen und funktionierenden Workflow zu entwickeln, fand am Wochenende von 9. bis zum 11.11.2012 die letzte Feldarbeitskampagne statt, die im Folgenden etwas näher beschrieben werden soll.

5.3.1. Das Testgebiet

Die gesamte Bucht von Seewalchen war im Flachwasserbereich Standort einer oder mehrerer Pfahlbausiedlungen; Grenzen zwischen einzelnen Siedlungen, wie sie oft behauptet werden und auch in den Bezeichnungen Seewalchen I und II oder Kammer I und II manifestiert sind, konnten durch die Vermessungsarbeiten im November des Vorjahres nicht bestätigt werden. Abb. 5.1 zeigt einen kleinen Teil der Bucht, nämlich den Bereich des Strandbades und des Bootsverleihs. In diesem Bereich findet man zwar immer wieder Pfahlreste und Scherben, bedingt durch das hohe Aufkommen an Badegästen, die sich hier Sommer für Sommer tummeln und entsprechende Zerstörungen verursachen, war dieser Bereich aber die beste Region für die geplanten Versuche, da selbst durch extrem achtloses Tauchen keine Zerstörungen über das durch die Badegäste ohnehin vorhandene Ausmaß verursacht worden wären.

5.3.2. Die Monitoring - Strategie

Die grundsätzliche Idee beim Einsatz von *Structure from Motion* für Monitoring-zwecke beruht darauf, zu verschiedenen Zeiten Modelle eines Objektes oder einer Landschaft zu erstellen und diese Modelle zu vergleichen und auf Veränderungen zu untersuchen. Dazu ist entweder eine genaue Georeferenzierung des fraglichen Objektes oder, in größeren Wassertiefen beispielsweise, wo eine Georeferenzierung derzeit kaum möglich ist, das Anlegen eines lokalen Koordinatensystems, in das die Fixpunkte eingehängt werden, erforderlich. Auf jeden Fall muss sichergestellt sein, dass die verwendeten Fixpunkte auch langfristig entsprechend lagesicher montiert sind. Ähnliche Voraussetzungen gelten aber auch für die Erosionsmarker, wie sie in der Schweiz und in Deutschland verwendet werden (siehe Abschn. 3.4.3) und sollten leicht zu erfüllen sein.

Die lagemäßig genau bestimmten Modelle der Objekte können dann in eine entsprechenden Software, entweder ein GIS - System oder eine 3D - Visualisierungssoftware, importiert und analysiert werden.

5.3.3. Die Unterwasserarbeit

Um eine genau definierte Fläche zu erhalten, wurde mit Gewindestangen mit einem Durchmesser von 8 mm ein Quadrat mit einer Seitenlänge von 2 m ausgesteckt. Die Kontrollmessung anhand der Länge der Diagonalen ergab eine Abweichung der Werte, die ja bei einem Quadrat gleich lang sein müssten, von 1,5 cm, was, speziell bei den erschwerten Bedingungen unter Wasser, ein akzeptabler Wert ist. Die Höhenlage wurde durch Messung der Wassertiefe mit einem Tauchcomputer jeweils direkt am Seegrund durchgeführt. Eine georeferenzierte Vermessung wurde nicht durchgeführt, da der nächste Katasterpunkt weit entfernt war und der erforderliche Polygonzug daher viel Zeit in Anspruch genommen hätte. Da es sich

um keine archäologisch relevante Fläche handelt, war eine Georeferenzierung auch nicht erforderlich.

Da unter Wasser die Sicht beschränkt und auf den einzelnen Bildern jeweils nur ein kleiner Ausschnitt der gesamten Szene zu sehen ist, ist nicht gewährleistet, dass man im Zuge des Georeferenzierens am Computer auf einem Bild erkennt, um welchen der eingemessenen Fixpunkte es sich handelt, daher wurden die Gewindestangen durch eine jeweils andere Anzahl an Sechskantmuttern markiert und unterscheidbar gemacht (siehe Abbildung 5.3) und die lokalen Koordinaten jedes Punktes notiert. Nachdem die Markierungs- und Vermessungsarbeiten beendet waren, musste eine Pause gemacht werden, da Sediment aufgewirbelt worden und an Filmaufnahmen unter diesen Bedingungen nicht zu denken war.

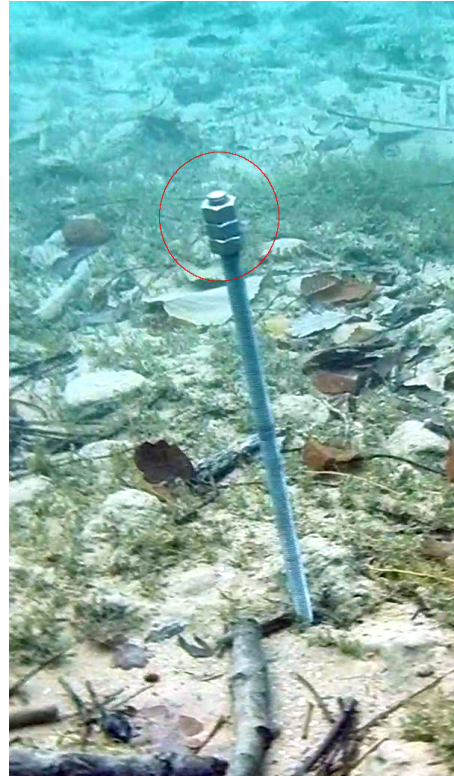


Abb. 5.3.: Positionsmarker, bestehend aus einer Gewindestange und unterschiedlicher Anzahl von Sechskantmuttern, um die Punkte unterscheidbar zu machen.

Für die Durchführung der Videoaufnahmen im nachfolgenden Tauchgang wurde zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Zuerst wurde die Fläche in einem Raster von ca. 50 cm mit senkrecht nach unter gerichteter Kamera abgeschwommen, was ungefähr der Aufnahmestrategie bei Luftbildaufnahmen entspricht. Als zweite Methode wurde die Fläche im Uhrzeigersinn spiralförmig mit in das Zentrum orientierter Kamera abgeschwommen. Den Überlegungen der Epipolargeometrie zufolge (siehe Abschn. 4.3.3) erschien diese Aufnahmestrategie eher erfolgversprechend.

Die entstandenen Videoclips haben jeweils eine Dauer von rund 3:20 Minuten. Sie wurden im *.mov - Format, einem Containerformat der Multimedia - Architektur *Quicktime*, gespeichert und haben beide eine Dateigröße von rund 370 MB.

Um eine Veränderung zu simulieren, wurde am nächsten Tag ein Stein in die Mitte der Testfläche gelegt. Bei der am Vorabend durchgeführten Datenbearbeitung wurde festgestellt, dass die spiralförmige Aufnahmestrategie die erwarteten besseren Ergebnisse lieferte. Es wurde also wieder ein ähnlicher Weg abgeschwommen, diesmal jedoch gegen den Uhrzeigersinn, um möglichst unterschiedliche Aufnahmen zu erzielen.

Bevor die Fixpunkte demontiert wurden, wurde eine Datenbearbeitung mit geringer Auflösung, die entsprechend schnell möglich ist, durchgeführt, um sicher zu gehen, dass auch eine entsprechende Datenbasis für die weiterführende Bearbeitung vorhanden ist.

5.3.4. Zusammenfassung Feldarbeit

Bei den im Sommer durchgeführten Tauchgängen handelte es sich im Grunde um „Übungstauchgänge“, um ein Gefühl für die Anwendung von *Structure from Motion* in der Unterwasserarchäologie zu bekommen. Die tatsächliche Feldarbeit fand am Wochenende vom 9.11. - 11.11.2012 statt. Für das Sammeln der in dieser Arbeit verwendeten Daten waren insgesamt 4 Tauchgänge mit einer Dauer von jeweils ca. 30 Minuten erforderlich: Im ersten Tauchgang wurde die Testfläche vermessen und markiert, der zweite und dritte Tauchgang dienten dazu, um unter simulierten Bedingungen die Daten zu erfassen, und im vierten Tauchgang wurde das Testgebiet wieder gesäubert. Durch Versuche mit verschiedenen Aufnahmestrategien wurden mehrere GB an Videodaten generiert, von denen letztlich die den Prinzipien der

Epipolargeometrie am ehesten entsprechenden auch die erwartungsgemäß besten Ergebnisse lieferte.

5.4. Datenbearbeitung

Die Datenbearbeitung wurde auf der bereits in Abschn. 5.2.2 beschriebenen Hardware durchgeführt. Als Betriebssystem wurde *Linux Debian Wheezy 64 Bit* eingesetzt, alle verwendeten Programme sind frei zum Download verfügbar. Naturgemäß bietet freie Software weniger Komfort als kommerzielle Produkte, die meist viele Eigenschaften und Funktionen unter einer Oberfläche vereinen, für die bei freier Software auf verschiedene Programme zurück gegriffen werden muss. Sowohl aus Kostengründen als auch aus Gründen der Nachvollziehbarkeit (offener Quellcode) hat Opensource - Software vor allem in der Wissenschaft aber auf jeden Fall ihre Berechtigung.

5.4.1. Auswahl der SfM - Software

Structure from Motion hat in den letzten Jahren eine große Popularität erreicht. Während die SfM - Community mehr Wert auf die Automatisierung der einzelnen Prozesse legt, ist die Genauigkeit ein weniger wichtiges Thema, da der Hauptzweck dieser Systeme nicht in der exakten Vermessung in geodätischem Sinne liegt, sondern eher als Basis für automatisierte Navigation von Robotersystemen o. ä. gedacht ist. Eine Überprüfung der erreichbaren Genauigkeit bzw. ein Vergleich, mit welchen der zahlreichen Software - Paketen welche Genauigkeit zu erreichen ist, ist daher erforderlich.

Neben kommerziellen Produkten wie Photoscan ist eine ganze Reihe von Opensource - Software Paketen verfügbar. Remondino u. a. 2012 haben eine Test durch-

geführt, in dem verschiedene *Structure from Motion* - Pakete verglichen wurden, die gemessenen Parameter waren die Genauigkeit der Rekonstruktion des Kamerastandpunktes, die Genauigkeit der rekonstruierten 3D - Punkte sowie die Abweichung gegenüber einem kalibrierten Maßstab anhand von zwei Körpern, einer Kugel und eines Kubus. Diese wurden mit einer Photogrammetrie - Software vermessen und in ein Koordinatensystem eingebunden, um den Vergleich mit den aus *Structure from Motion* erstellten Modellen zu ermöglichen.

Tabelle 5.1.: Software - Vergleich Kubus

	Apero	Bundler	Photoscan	Photosynth	VisualSFM
Δ Maßstab (mm)	-0,379	0,220	0,301	-0,547	0,258
Δ Kamera (px)	3,440	3,961	2,212	7,149	0,597
Δ xyz (mm)	0,141	0,365	0,143	0,611	0,047

Quelle: Remondino u. a. [2012](#)

Tabelle 5.2.: Software - Vergleich Kugel

	Apero	Bundler	Photoscan	Photosynth	VisualSFM
Δ Maßstab (mm)	-0,127	0,220	-0,070	-0,547	0,156
Δ Kamera (px)	3,440	3,961	0,372	7,149	0,860
Δ xyz (mm)	0,141	0,365	0,031	0,611	0,071

Quelle: Remondino u. a. [2012](#)

Δ Maßstab bezeichnet die Abweichung vom kalibrierten Maßstab in mm, Δ Kamera (px) die Abweichung des errechneten Kamerastandpunktes in Pixel und Δ xyz (mm) die durchschnittliche Abweichung der rekonstruierten 3D - Punkte, jeweils verglichen mit den Referenzwerten der Photogrammetrie - Software. Unter Berücksichtigung aller drei Messwerte liegt *VisualSFM* bei der Kugel hinter dem kommerziellen Produkt *Photoscan* an 2. Stelle und beim Kubus sogar an 1. Stelle.

Die Eckpfeiler dieses Software - Paketes wurden bereits in Abschnitt 4.4.4 und 4.5.3 erläutert. Sowohl *Photoscan* als auch *VisualSFM* sind in der Lage, durch Parallelisierung der Prozesse und Zugriff auf die GPU die gesamte vorhandene Rechenleistung sowohl der CPU als auch der Grafikkarte zu nutzen, was einen erheblichen Geschwindigkeitsvorteil bietet. Da es sich jedoch bei *Photoscan* um ein kommerzielles Produkt handelt und über die verwendeten Algorithmen wenig bekannt ist, wurde, im Sinne der Nachvollziehbarkeit, dem Opensource - Paket *VisualSFM* der Vorzug gegeben.

Ein Nachteil von *VisualSFM* soll allerdings nicht verschwiegen werden. Die Software scheint instabil und deutlich empfindlicher als die anderen Programme zu sein, wenn die Grundlagen der Epipolargeometrie (siehe Abschnitt 4.3.3) nicht ausreichend berücksichtigt werden. Während der Aufnahmen sollte immer ein zentraler Punkt anvisiert werden, um die Bildebenen der einzelnen Bilder möglichst deutlich zueinander zu neigen, andernfalls kann es zu überraschenden bzw. unbrauchbaren Ergebnissen kommen. Unter Berücksichtigung dieser Regel funktioniert die Software allerdings problemlos.

In Anhang A.4 befindet sich eine Auflistung aller verwendeten Programme inklusive Linkliste.

5.4.2. Vorbereitung der Daten

Structure from Motion - Programme erwarten den Input in Form von Bilddateien mit bestimmten Eigenschaften. Um diese zu generieren, ist folgende Vorgehensweise erforderlich:

- Extraktion von einzelnen Bildern aus Videoclips
- automatischer Weißabgleich der extrahierten Bilder

- Versetzen der Bilder mit einem *EXIF* - *Header*

Extraktion von Einzelbildern

Für diesen Schritt wurde die Software `ffmpeg` verwendet. `ffmpeg` ist ein Kommandozeilentool, das die Basis vieler graphischen Videobearbeitungsprogramme auf Unix - Plattformen bildet und mächtige und schnelle Funktionen für die Bearbeitung von Videos bereitstellt. Mit der Befehlssequenz `ffmpeg -i <Eingabedatei> -sameq -r <Anzahl Bilder/Sekunde> <Ausgabedateien>_%3d.jpg` kann mit wenig Aufwand eine beliebige Anzahl von JPGs aus einer Videodatei extrahiert werden. Für das gegenständliche Projekt wurde beispielsweise aus einer Videodatei mit einer Größe von 351,2 MB und einer Dauer von 3:23 Minuten 408 Bilder in 1:59,925 Minuten¹² extrahiert.

Automatischer Weißabgleich

Der Weißabgleich (*White Balance* - *WB*) ist der Schlüssel für die korrekte Farbwiedergabe auf den Bildern. Er muss die direkten Lichtquellen und lichtreflektierenden Quellen berücksichtigen. Es gibt allerdings einen erheblichen Unterschied zwischen korrekten und ansprechenden Farben. Während korrekte Farbwiedergabe vor allem bei der Wiedergabe von Farb- oder Stoffmustern wichtig ist, kommt es in den meisten anderen Fällen eher auf eine gefällige Farbwiedergabe an (Steinmüller und Steinmüller 2007, 18).

Durch die Filterwirkung des Wassers (die warmen Farben werden als erstes aus dem Lichtspektrum gefiltert, vgl. Hübner 2005, 85) haben die Bilder eine sehr niedrige Farbtemperatur, was den massiven Grünstich erklärt. Da keine entspre-

12. Unter Linux kann durch voranstellen des Wortes `time` jeder beliebige Kommandozeilenbefehl mit einer Stoppuhr - Funktion ausgeführt werden



(a) Foto ohne Weißabgleich: Der Grünstich des Bildes ist deutlich zu erkennen.



(b) Foto mit Weißabgleich: Die Farben entsprechen nun weitestgehend den tatsächlich vorhandenen.

Abb. 5.4.: Vergleich desselben Bildes vor und nach der Durchführung des Weißabgleiches. Im rechten Bild sind die Kontraste deutlich stärker, ebenso wie der Farbumfang. Die führt aber auch zu einer deutlichen Steigerung der Dateigröße: Während das linke Bild eine Größe von 794,2 kB hat, weist das rechte Bild ein Größe von 1,1 MB auf. Die Auswirkung dieses Anstieges auf die Berechnungszeiten für *Structure from Motion* werden im Abschnitt 5.5 untersucht.

chend starke Lichtanlage zur Verfügung stand, war die einzige Möglichkeit einer einigermaßen realistischen Farbgebung die Durchführung des Weißabgleiches. In größeren Wassertiefen funktioniert dies aber nicht mehr, da die Lichtmenge, vor allem im Süßwasser, einfach zu gering wird, um überhaupt Filme oder Fotos aufnehmen zu können.

Ein Weißabgleich kann entweder manuell oder automatisch durchgeführt werden. In beiden Fällen geht es darum, im Bild eine Stelle zu identifizieren, die annähernd der Farbe Weiß entspricht. Diese dient dann als Basis für die Anpassung der Farbtemperatur des gesamten Bildes. Beim manuellen Verfahren wird die Auswahl dieser Stelle durch den Benutzer anhand eines Mausklicks durchgeführt, beim automatischen Weißabgleich erledigt dies das Computerprogramm (Steinmüller und Steinmüller 2007, 18). Da bei *Structure from Motion* hunderte Bilder bearbeitet werden müssen, kommt ein manueller Weißabgleich nicht in Frage. Beim vorliegenden Projekt wurde der Weißabgleich mit dem „Batch Image Ma-



Abb. 5.5.: *In größeren Tiefen können ohne Kunstlicht im Süßwasser zwar noch stimmungsvolle Fotos gemacht werden, die Aufnahme von Bildern, die auswertbare Details enthalten, ist allerdings, wie hier im Neufeldersee in ca. 15 m Tiefe, normalerweise nicht mehr möglich. (Foto: ©2011 Viktor Jansa)*

„*nipulation Plugin*“ für das Grafikprogramm *GIMP* durchgeführt, das es erlaubt, beliebige Filterungen an einer großen Anzahl von Bildern automatisiert durchzuführen.

Der Exif - Header

Beim *Exif - Header* handelt es sich um einen Datenbereich am Beginn einer Bilddatei (JPEG oder TIF), in dem in einem standardisierten Format, eben dem Exif-Format (*Exchangeable Image File Format*) Metadaten abgespeichert werden. Die Daten, die abgespeichert werden, sind von der Applikation, die in die Kamera integriert ist, abhängig und nicht immer gleich. Die meisten Kameras speichern aber zumindest das Kameramodell, Datum und Uhrzeit, Brennweite, Belichtungszeit, Blendenzahl und Bildgröße ab. Darüber hinaus können auch GPS - Daten, Image

- Thumbnails, Copyrighthinweise u. ä. gespeichert werden (Steinmüller und Steinmüller 2007). Für *Structure from Motion* sind die Exif - Daten deshalb wichtig, weil in ihnen Parameter enthalten sind, die zur Online - Kalibrierung der einzelnen Bilder erforderlich sind, nämlich die Brennweite, der *Bildwinkel- oder Cropfactor*¹³ und die Bildauflösung in X - und Y - Richtung. Sind diese Daten nicht vorhanden, werden von der Software Standardwerte verwendet, die, je nach tatsächlich vorhandenen Werten, zu unerwünschten Ergebnissen führen können.

Leider werden beim Extrahieren von Bildern aus Videosequenzen keine Exif - Daten geschrieben. Um trotzdem eine möglichst hohe Genauigkeit in der Reproduktion zu gewährleisten, müssen diese also nachträglich in die Bilddateien eingefügt werden. Dies ist am einfachsten möglich, indem man vor Beginn der Dreharbeiten ein Foto mit den gleichen Einstellungen, mit denen dann gefilmt wird, macht. In diesem Bild sind dann die Exif - Daten enthalten, die man leicht mit Hilfe eines Kommandozeilentool namens `exiftools` in die extrahierten Bilddateien kopieren kann. Im vorliegenden Fall ist dazu die Befehlssequenz `exiftool -FocalLength=5 -FocalLengthIn35mmFormat=28 -XResolution=72 -YResolution=72 -ExifImageWidth=1920 -ExifImageHeight=1080 AW100 *.jpg` erforderlich, die in wenigen Sekunden die Daten in hunderte Dateien schreibt. Berücksichtigt werden muss allerdings, dass keinesfalls die Zoom - Funktion der Kamera während der Filmaufnahmen betätigt werden darf, dass würde zu extremen Verfälschungen und unbrauchbaren Ergebnissen führen.

Optional besteht auch die Möglichkeit, das Kameramodell und das Objektiv in den Exif - Daten zu speichern. Dies ist dann sinnvoll, wenn die Kalibrierung der Kamera mit einem Programm erfolgt, das Korrekturwerte für bekannte Kameramodelle aus einer Datenbank abrufen, wie beispielsweise *Lensfun*.

13. Durch die unterschiedlichen Größen von Bildern auf analogen Medien und den Speicherchips in Digitalcameras entsprechen gleiche Brennweiten unterschiedlichen Bildausschnitten. Der Cropfactor vergleicht den Wert der Digitalkamera mit dem klassischen 35 mm - Filmformat, in den Exif - Daten steht dann: `-FocalLength=5 -FocalLengthIn35mmFormat=28`, was einem Cropfactor von 5.6 ergibt.

5.4.3. Erzeugung der Punktwolke

Structure from Motion

Die Bilder liegen nun in einem Format vor, in dem sie von einem *Structure from Motion* - Programm verarbeitet werden können. Wie bereits erwähnt, wird bei diesem Projekt das Paket *VisualSFM* verwendet, das die Opensource - Programme *SiftGPU*, *PBA* und *CMVS/PMVS2* unter einer grafischen Oberfläche vereint. Wenn die Installation korrekt erfolgt ist, ist das Processing der vorbereiteten Bilder mit nur 4 Mausklicks möglich: Laden der Bilder in das Programm, starten von *SiftGPU*, nach Beendigung starten von *PBA* und danach starten von *CMVS/PMVS2*. Der Zeitaufwand für die einzelnen Schritte ist unterschiedlich und wird in Abschnitt 5.5 genauer untersucht, grob kann aber gesagt werden, dass für das Laden der Bilder wenige Sekunden, das *feature detection and matching* (*SiftGPU*) mehrere Stunden, das *PBA* wenige Minuten und *CMVS/PMVS* wieder mehrere Stunden veranschlagt werden können.

Falls sich herausstellt, dass zu wenige Bilder vorhanden sind, können jederzeit zusätzliche Bilder geladen werden. Die Software erkennt automatisch, welche Bilder bereits auf *keypoints* und welche Bildpaare auf Übereinstimmungen untersucht wurden, sodass wirklich nur mehr die zusätzlichen Bilder und sich daraus ergebenden Bildpaare prozessiert werden müssen.

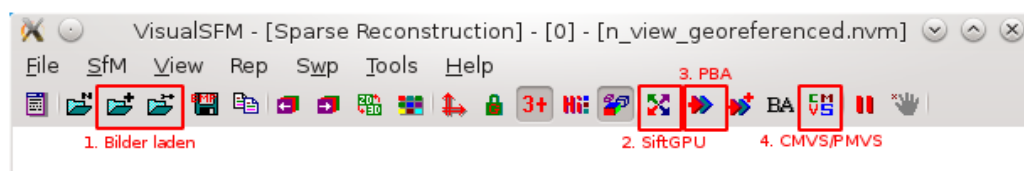


Abb. 5.6.: Die Toolbar von VisualSFM mit den Buttons, mit denen die wichtigsten Funktionen aufgerufen werden können.

Das Ergebnis dieses Prozesses ist eine dichte Punktwolke, die allerdings nicht georeferenziert ist. Dies ist unter dem Menüpunkt *SfM* → *more Functions* → *GCP based Transform* möglich. Nach der Aktivierung dieses Modus' können in den Bildern Fixpunkte, sogenannte *Ground Control Points (GCPs)* markiert und ihre Koordinaten eingegeben werden. Es sind mindestens 3 Punkte erforderlich von denen jeder auf mindestens 2 Bildern markiert werden muss, je mehr Punkte und je öfter diese auf verschiedenen Bildern markiert werden, desto genauer ist naturgemäß das Ergebnis. Sobald genügend Punkte in genügender Anzahl markiert sind, meldet das Programm, dass eine Transformation möglich wäre und gibt auch gleich an, mit welchem Fehler zu rechnen ist. Die Transformation selbst erfolgt in wenigen Sekundenbruchteilen. Das Ergebnis ist eine ASCII - Datei im *Stanford - ply* - Format. Dabei handelt es sich um ein sogenanntes *selbstbeschreibendes Dateiformat*. Im Header werden in Klartext die Informationen bzw. deren Form und Anordnung beschrieben, die nach dem Header folgen.

Beispiel für den Header einer ply - Datei mit nachfolgenden Daten:

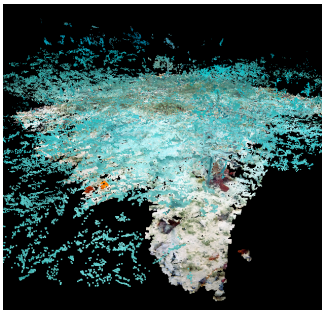
```
ply
format ascii 1.0
element vertex 298676
property float x
property float y
property float z
property uchar diffuse_red
property uchar diffuse_green
property uchar diffuse_blue
property int32 number_of_camera_sees_this_point
property float vsfm_cnx
property float vsfm_cny
property float vsfm_cnz
end_header
-2.04618321503 21.2497187197 .....
...
```

Filterungen

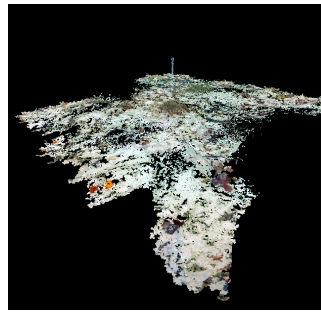
Die vorliegende, georeferenzierte Punktwolke kann nun in einem geeigneten Programm weiterbearbeitet werden. Eines der führenden Programme auf diesem Gebiet im Bereich der Opensource - Software ist *Meshlab*. *Meshlab* verfügt über umfangreiche Filtermöglichkeiten, die das Editieren der Punktwolke erleichtern, sowie Plugins zum Generieren einer texturierten Oberfläche.

Ein besonders störender Effekt, der Filterung nötig macht, ist *noise*. Versuche haben ergeben, dass mit identer Ausrüstung beim Versuch, ein Modell an Land zu rekonstruieren, zwar ebenfalls *noise* auftrat, aber in einem kaum zu bemerkendem Ausmaß, während unter Wasser mehr als die Hälfte der generierten Punkte *noise* ist, der herausgefiltert werden muss. Die Ursachen sind nicht klar, in der Literatur gibt es keine Hinweise zu diesem Thema. Eine mögliche Erklärung ist Folgende: Analog zum Verhalten klassischen Filmmaterials ist es auch bei den in Digitalkameras eingebauten Bildsensoren so, dass mit der Empfindlichkeit (Iso) auch das Rauschen steigt. Im Bild ist das nur für ein geschultes Auge zu erkennen. Da die Aufnahmen unter Wasser ohne Kunstlicht und damit praktisch immer bei Lichtverhältnissen, die an Land bereits der Dämmerung entsprechen, durchgeführt wurden, schaltet die Kamera automatisch auf eine hohe Empfindlichkeit, was zu einem vermehrtem Bildrauschen führt. Möglicherweise führt diese Bildrauschen dazu, dass derart viele Punkte rekonstruiert werden, die real nicht existieren. Bei einem Testprocessing mit wenigen Bildern wurden 2.472.749 Punkte rekonstruiert, von denen sich nach der Filterung lediglich 739.882 als Rekonstruktionen real existierender Punkte erwiesen (siehe Abb. 5.7).

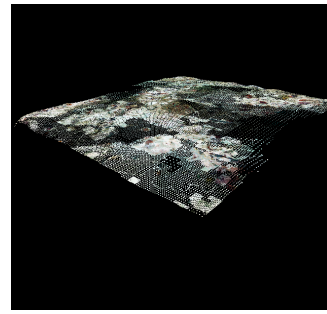
Glücklicherweise kennzeichnen sich diese nicht real existierenden Punkte dadurch aus, dass sie alle einem Farbraum angehören, der sonst in den Bildern nicht existiert. Diese Punkte sind daher durch einen Filter, der es ermöglicht, Punkte entsprechen ihres Farbwertes zu selektieren, relativ leicht zu filtern. Meshlab verfügt



(a) unbearbeitete Punktwolke als Ergebnis eines Processings mit 2 extrahierten Bildern je Sekunde Videoclip. Gesamtanzahl Punkte: 2.472.749



(b) Nach der Filterung und dem Cleaning blieben lediglich 739.882 Punkte übrig.



(c) Die interpolierte Oberfläche, die entsprechend dünn ist, da bereits die zugrunde liegende Punktwolke sehr unzulänglich war.

Abb. 5.7.: Gegenüberstellung der ungefilterten und der gefilterten Punktwolke sowie der daraus interpolierten Oberfläche

über einen solchen Filter, er ist zu erreichen unter *Filters* → *Selection* → *Select Faces by Color*. Im folgenden Dialogfeld kann dann ein Farbpicker benützt werden, um direkt in der Punktwolke einen Punkt auszuwählen und alle Punkte mit dem selben Farbwert (mit einem einzustellenden Schwellenwert zu benachbarten Farbwerten) ebenfalls auszuwählen. Nach dem Löschen der Punkte muss die Datei gesichert und neu geladen werden, da, wohl aufgrund eines Bugs, alle Punkte unsichtbar werden.

Eine weitere sinnvolle Möglichkeit, die Punktwolke zu bereinigen, findet man unter den selbsterklärenden Menüpunkten *Filters* → *Cleaning and Repairing* → *Merge Close Vertices* and *Filters* → *Cleaning and Repairing* → *Remove Duplicate Vertices*, die jeweils einige Tausend Punkte entfernen und dadurch die Berechnungen beschleunigen, ohne dass die Geometrie dadurch beeinträchtigt werden würde.

5.4.4. Rekonstruktion und Texturierung der Oberfläche

Im nächsten Schritt müssen die Oberflächennormalen jedes einzelnen Punktes bestimmt werden. Dazu muss jeder einzelne Punkt mit einer zu definierenden Anzahl an Nachbarpunkten gemeinsam untersucht werden, um herauszufinden, welche Orientierung die Oberflächennormale der zukünftigen Oberfläche in diesem Punkt haben wird. Diese Funktion findet sich unter dem Menüpunkt *Filters → Normals, Curvatures and Orientation → Compute normals for pointsets*. Als Parameter kann die Anzahl der Nachbarpunkte, die bei der Berechnung berücksichtigt werden sollen, angegeben werden, als Standard wird 10 vorgeschlagen. Eine höhere Anzahl erhöht natürlich die Rechenzeit, aber auch die Genauigkeit der zukünftigen Oberfläche, allerdings war auch bei 50 berücksichtigten Nachbarpunkten keine Änderung an der interpolierten Oberfläche festzustellen.

Nachdem die Punktwolke gefiltert und gereinigt ist und auch die Oberflächennormalen bestimmt wurden, kann die Oberfläche interpoliert werden. Auch dazu verfügt Meshlab über eine Vielzahl unterschiedlicher Plugins, die die verschiedensten Algorithmen verwenden. Für die Rekonstruktion flächiger Strukturen hat sich die *Poisson Reconstruction* als am besten geeignet erwiesen. Sie ist unter dem Menüpunkt *Filters → Remeshing, simplification and reconstruction → Surface Reconstruction: Poisson* zu finden. Im darauf folgenden Dialogfeld können mehrere Parameter eingegeben werden, die die Qualität der Rekonstruktion beeinflussen. Im Hilfetext sind empfohlene Standardwerte angegeben, die gut funktionieren. Eine Erhöhung mancher Werte erhöht die Qualität der Oberfläche, allerdings ist *Meshlab* in diesem Bereich manchmal instabil und stürzt ab, wenn nicht genug RAM zur Verfügung steht. Auf der verwendeten Hardware wurden folgende Werte erfolgreich verwendet: *Octree Depth*: 14 - 16, *Solver Divide*: 10 - 12, *Samples per Node*: 15 - 20 und *Surface Offsetting*: 1. Das Ergebnis ist ein Mesh, auf dem die Oberfläche sozusagen aufliegt und dass sich seitlich im Bereich, in dem keine Da-

ten mehr vorhanden sind, nach unten fortsetzt. Diese überflüssigen und falschen Flächen zu löschen ist allerdings eine Sache weniger Minuten.

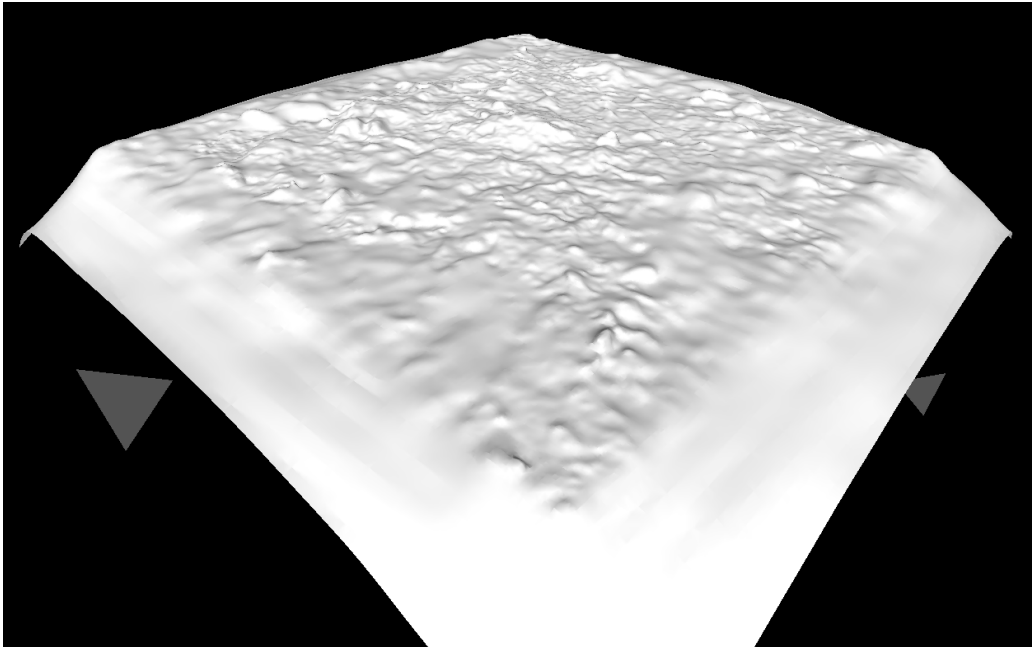


Abb. 5.8.: *Mesh ohne Textur und unbeschnitten*

Um die Analyse der erstellten Oberfläche zu erleichtern, muss diese nun mit einer Textur versehen werden. Dazu werden die Farbwerte der Punkte, die ja vorhanden sind, auf die Oberfläche projiziert. Dies geschieht mit dem Menüpunkt *Filters* → *Sampling* → *Vertex Attribut Transfer*. Im Dialogfeld kann eingestellt werden, welche Zwischenräume zwischen den Punkten mit interpolierten Werten gefüllt werden. Für wissenschaftlichen Analysen ist es von Vorteil, diesen Wert möglichst gering einzustellen. Dadurch ist gut zu erkennen, in welchen Bereichen die Oberfläche mangels vorhandener Punkte nur interpoliert wurde, diese Daten müssen also nicht der Realität entsprechen und sind daher mit Vorsicht zu genießen. Wird die Oberfläche für Präsentationszwecke erstellt, kann dieser Wert größer eingestellt werden, dadurch entsteht eine anschaulichere Fläche.

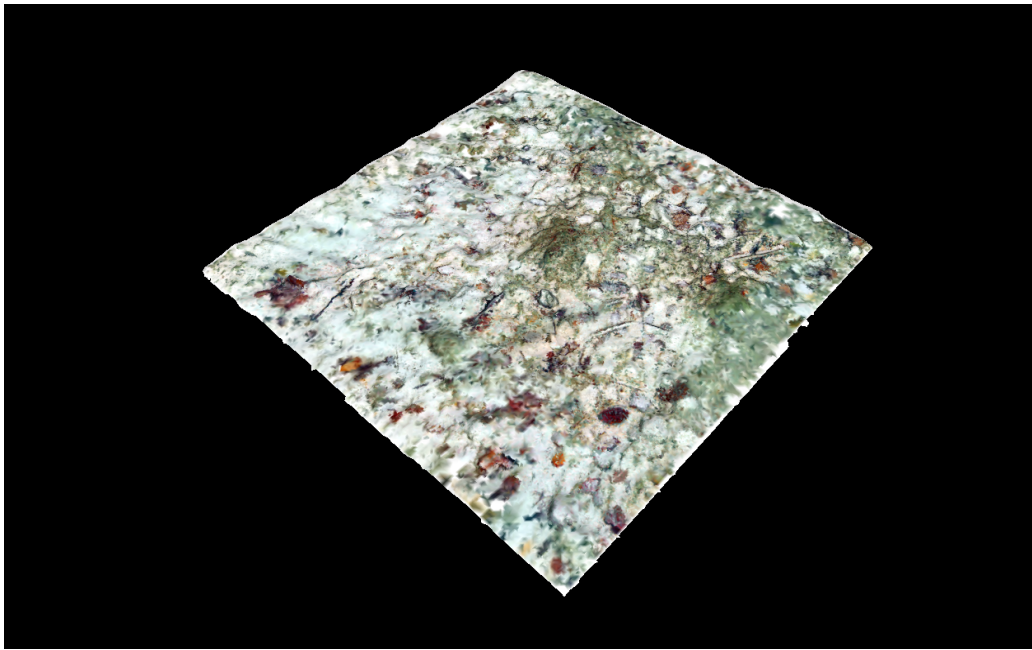


Abb. 5.9.: Fertig bearbeitetes Mesh

5.4.5. Auswertung der Daten

Nachdem die Oberflächen erstellt wurden, müssen sie verglichen werden, um Veränderungen feststellen zu können. Dafür kommen mehrere Programme in Frage, beispielsweise ein 3D - fähiges *GIS* wie *GRASS GIS* oder *ArcGIS* oder eine 3D - fähige Software, die es erlaubt, Objekte zu schneiden und andere Manipulationen durchzuführen. Für diese Arbeit wurde das Programm *Paraview* verwendet, mit dem neben diversen Manipulationen die Daten auch für Präsentationen sehr gut aufbereitet werden können. Außerdem können auch Koordinatensysteme in verschiedenster Form und Gestaltung eingeblendet werden, was die Übersicht der Ausgaben deutlich erhöht.

Abbildung 5.10 zeigt das Modell der Testfläche im Ursprungszustand, in Abbildung 5.11 ist die Veränderung, ein Stein mit einer Höhe von ca. 7 cm, rot markiert und deutlich zu erkennen. Die räumliche Abbildung ist, aufgrund der Vielzahl von

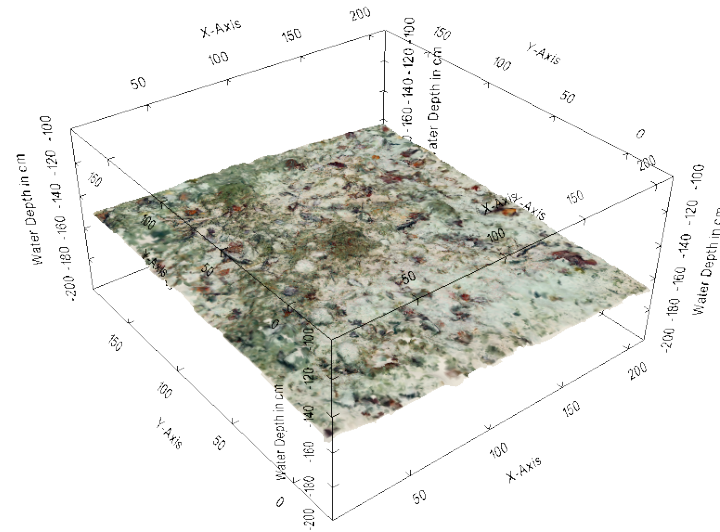


Abb. 5.10.: Die Testfläche im Ursprungszustand

Details und Farben, sehr verwirrend, sinnvoll ist also eine vereinfachte Darstellung der Situation. Dazu wurde im Bereich der Steindeponierung eine Schnittebene erstellt, die beide Oberflächen schneidet. Die Schnittkanten wurden zweidimensional in verschiedenen Farben ausgegeben und übereinander gelegt.

In Abbildung 5.12 ist die Anordnung der Schnittfläche dargestellt. Natürlich wurde der Schnitt im Bereich des Steines angelegt, bei einem realen Monitoring - Projekt, dass eine größere Fläche umfasst, müsste ein Automatismus entwickelt werden, der Oberflächendifferenzen, die eine bestimmte Toleranzschwelle überschreiten, erkennt, markiert und eine entsprechende Schnittebene anlegt. Eine kleine Fläche ist manuell durchaus zu bearbeiten, größere Flächen dürften aber ohne Software - Unterstützung kaum zu überprüfen sein. Bei großen Flächen muss auch berücksichtigt werden, dass ein Rechner mit entsprechender Leistungsfähigkeit zur Verfügung stehen muss, auf einem durchschnittlichen Rechner dauern die Berechnung sonst unter Umständen mehrere Tage.

Nach der Positionierung der Schnittebene können die Schnittlinien der zwei Oberflächen ausgegeben werden. In Abb. 5.13 sind die beiden Schnittlinien dargestellt

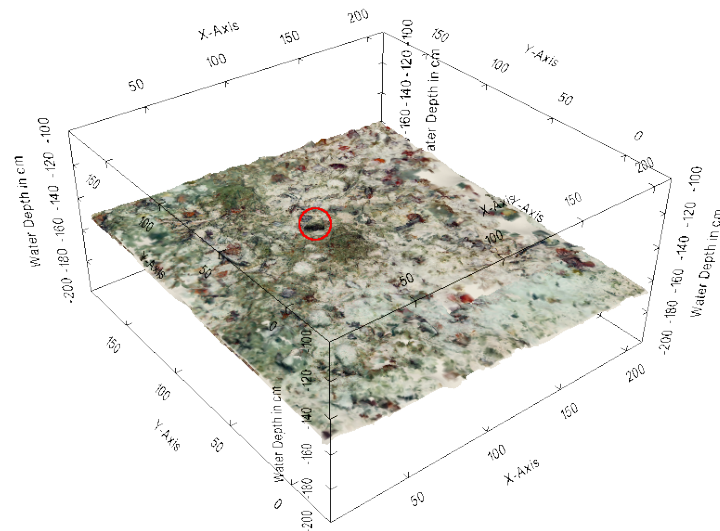


Abb. 5.11.: Die Testfläche verändert: ungefähr in der Mitte wurde ein Stein mit einer Höhe von 7 cm deponiert (rot eingekreist).

(rot und blau). Der Stein ist hier deutlich zu erkennen, eine Messung hat eine Höhe von 7,23 cm ergeben, was mit der tatsächlichen Höhe übereinstimmt.

Die Differenzen zwischen den beiden Modellen betrugen im Kernbereich (50 cm bis 150 cm auf der Y - Achse) weniger als 1 cm, in den Randbereichen der Fläche, wo auch weniger Daten verfügbar waren, gibt es allerdings Schwankungen bis zu 2 cm. Im Kernbereich wurde, bedingt durch die immer enger werdende Spirale, in der die Fläche abgeschwommen wurde, die Schwimmgeschwindigkeit immer geringer, bei der gleichen Anzahl an Bildern, die pro Sekunde Videoclip extrahiert wurden, sind hier also mehr Daten vorhanden als in den Randbereichen. Neben einer höheren Punktdichte in diesem Bereich erhöht sich offensichtlich auch die geometrische Genauigkeit, da die Punkte auf einer größeren Anzahl der Bilder zu sehen sind.

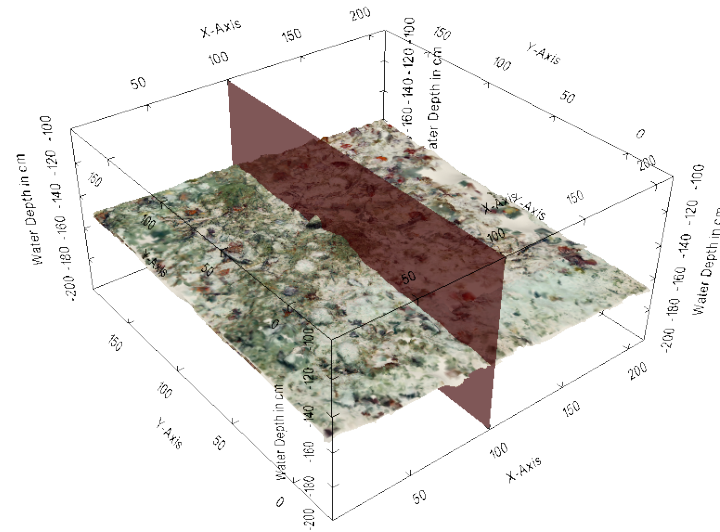


Abb. 5.12.: Schnittebene durch die Testfläche

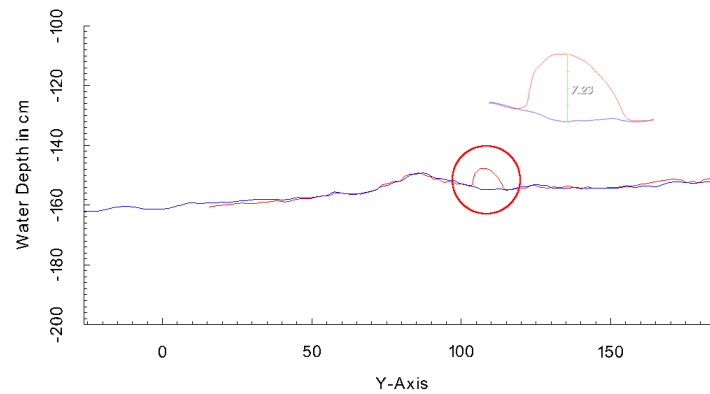


Abb. 5.13.: Schnittlinien der Testflächen

5.5. Analyse

Aus den bisherigen Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass mit *Structure from Motion* der Aufbau eines Monitoring - Systems denkbar ist. Für die praktische Anwendung ist aber neben dem Ergebnis auch der Aufwand, der benötigt wird, um dieses Ergebnis zu erzielen, ein relevanter Faktor bei der Beurteilung der Praxistauglichkeit eines Verfahrens. Im folgenden Abschnitt sollen daher einige Vergleich-

che angestellt und Zusammenhänge zwischen der Größe der Datenbasis, dem erzielten Resultat und der benötigter Rechenzeit hergestellt werden.

5.5.1. Testdatensatz

Als Basis für die Vergleiche wurde ein Videoclip herangezogen, der am 09.09.2012 in der Pfahlbaustation *See/Mondsee* entstand. Der Clip hat eine Dauer von 52 sec. und eine Dateigröße von 89,5 MB bei einer Auflösung von 1920 x 1080 px (Full HD). Die Anzahl der extrahierten Bilder wurde jeweils verdoppelt, beginnend bei 1 Bild/Sekunde bis 8 Bilder/Sekunde. Die Eckdaten der daraus entstandenen Datensätze sind Tabelle 5.3 zu entnehmen.

Tabelle 5.3.: Testdatensätze für die Vergleichsberechnungen

extrahierte Bilder/Sekunde	1	2	4	8
Anzahl Bilder	53	106	210	420
Datensatzgröße ohne Weißabgleich	17 MB	33 MB	66 MB	130 MB
Datensatzgröße mit Weißabgleich	87 MB	173 MB	341 MB	677 MB

VisualSFM generiert für jedes Berechnungsprojekt ein Log - File, in dem neben Fehlermeldungen auch Informationen über die Dauer der einzelnen Berechnungsschritte sowie die dabei generierten Ergebnisse enthalten sind. Die Informationen in diesen Log - Files wurden als Basis für die Vergleiche herangezogen und in Abschn. 5.5.2 in tabellarischer Form zusammengefasst.

Für die Analyse der Berechnungen wurden weder die Vorbereitungsarbeiten, also das Extrahieren der Einzelbilder, das Durchführen des Weißabgleiches sowie das Erstellen des Exif - Headers noch die Arbeiten in *Meshlab* berücksichtigt, weil diese einerseits lediglich einen vernachlässigbaren Anteil am gesamten Zeitaufwand haben und andererseits die Dauer dieser Tätigkeiten nicht nur von der

Rechenleistung des Computer oder der Software, sondern auch der Übung und Konzentration des Anwenders abhängt und daher in quantitativer Hinsicht nicht wirklich vergleichbar ist.

5.5.2. Berechnungsergebnisse - Überblick

Die Bilder jedes Datensatzes wurden mit dem bereits beschriebenen Weißabgleich nachbearbeitet, die Berechnungen sowohl mit den Originaldatensatz als auch mit dem nachbearbeiteten Datensatz durchgeführt. Interessant in diesem Zusammenhang war die Frage, wie sich der enorme Anstieg der Dateigrößen durch den Weißabgleich einerseits auf die Berechnungsdauer und andererseits auf das Ergebnis, nämlich auf die in den Bildern gefundenen Features, aber natürlich auch auf die im Endeffekt tatsächlich rekonstruierten 3D - Punkte auswirkt. In den Tabellen 5.4 und 5.7 sind die Ergebnisse der Rechendurchgänge aufgelistet.

Tabelle 5.4.: *Berechnungsergebnisse Datensätze ohne Weißabgleich - Überblick*

extrah. Bilder/Sekunde	1	2	4	8
Anzahl Bilder	53	106	210	420
Image Loading	7 sec	14 sec	28 sec	56 sec
Feature Detection	27 sec	52 sec	94 sec	199 sec
Feature Matching	364 sec	1397 sec	5757 sec	21257 sec
Bundle Adjustment	34 sec	72 sec	167 sec	404 sec
Summe	432 sec (7,2 min)	1535 sec (56,9 min)	6046 sec (100,8 min)	21916 sec (365,3 min)
Dense Reconstruction	1346 sec	1881 sec	2864 sec	3571 sec
	1778 sec (29,6 min)	3416 sec (56,9 min)	8910 sec (148,5 min)	25487 sec (424,8 min)
Datenmenge	17 MB	33 MB	66 MB	130 MB

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Berechnungsergebnisse Datensätze ohne Weißabgleich - Fortsetzung

gefundene Features	536843	1033726	2039634	4078348
rekonstruierte Punkte	227809	244870	238776	306147

Tabelle 5.5.: *Berechnungsergebnisse Datensätze mit Weißabgleich - Überblick*

extrah. Bilder/Sekunde	1	2	4	8
Anzahl Bilder	53	106	210	420
Image Loading	14 sec	29 sec	56 sec	113 sec
Feature Detection	30 sec	60 sec	120 sec	221 sec
Feature Matching	385 sec	1524 sec	6357 sec	22745 sec
Bundle Adjustment	31 sec	68 sec	146 sec	400 sec
Summe	460 sec (7,7 min)	1681 sec (28 min)	6679 sec (111,3 min)	23479 sec (391,3 min)
Dense Reconstruction	1148 sec	1581 sec	2473 sec	3057 sec
	1608 sec (26,8 min)	3262 sec (54,4 min)	9152 sec (152,5 min)	26536 sec (442,3 min)
Datenmenge	87 MB	173 MB	341 MB	678 MB
gefundene Features	602286	1157074	2282623	4502923
rekonstruierte Punkte	209993	220918	232021	323426

5.5.3. Zusammenhang Datensatzgröße - Berechnungsdauer

Eine der wesentlichen Fragen ist jene nach der Dauer der Datenprozessierung. Da bei *Structure from Motion* die gesamte Berechnung viele Stunden dauern kann, ist es wichtig, abschätzen zu können, welche Datensatzgröße ungefähr welchen Zeitaufwand verursacht.

Die Größe des Datensatzes hängt von drei Faktoren ab:

1. der Auflösung der Bilder: Die Auflösung war für alle Datensätze die gleiche (1920 x 1080 Full HD), da aufgrund der verfügbaren Hardware eine höher Auflösung nicht möglich war und mit einer geringeren Auflösung keine brauchbaren Ergebnisse erzielt werden konnten.
2. der Anzahl der Bilder: wie bereits beschrieben, wurden 4 Datensätze generiert, bei denen jeweils 1, 2, 4 und 8 Bilder je Sekunde aus dem vorhandenen Videoclip extrahiert wurden. Dadurch entstanden Datensätze mit 53, 106, 210 und 420 Bildern.
3. der Dateigröße der Bilder: Die Datensätze wurden einem Weißabgleich unterzogen. Dadurch stieg die Gesamtgröße der Daten jeweils um rund das fünffache an.

Tabelle 5.6.: *Zusammenhang Datensatzgröße - Berechnungsdauer*

extrah. Bilder/Sekunde	1	2	4	8
Anzahl Bilder	53	106	210	420
Datensatzgröße o. W.	17 MB	33 MB	66 MB	130 MB
Berechnungsdauer	29,6 min	56,9 min	148,5 min	424,8 min
Datensatzgröße m. W.	87 MB	173 MB	341 MB	677 MB
Berechnungsdauer	26,8 min	54,4 min	152,5 min	442,3 min

Während die Anzahl der Bilder den erwarteten Effekt bewirkte, nämlich einen steilen Anstieg der Berechnungsdauer, führte der Vergleich bezüglich der durch den Weißabgleich erhöhten Dateigrößen zu einer überraschenden Erkenntnis: Obwohl die Datensätze im Schnitt 5 mal so groß waren wie die Datensätze ohne Weißabgleich, veränderte sich die Berechnungsdauer praktisch nicht.

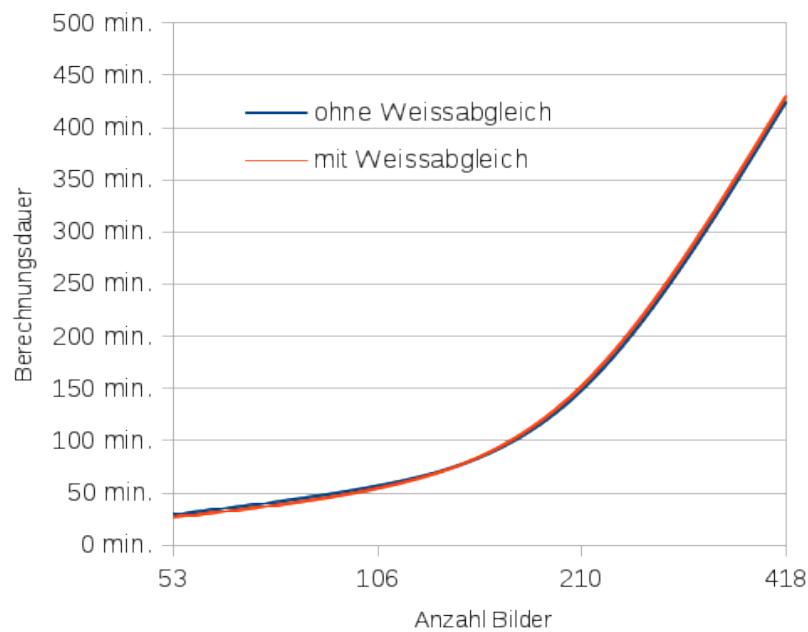


Abb. 5.14.: Zusammenhang zwischen Datensatzgröße und Berechnungsdauer: Während die Vergrößerung der Anzahl an Bildern den erwarteten Effekt bewirkt, nämlich eine massive Zunahme der Rechenzeit, wirkt sich die Vergrößerung der Dateien durch den Weißabgleich praktisch nicht aus, die Graphen überlagern sich nahezu.

Da sich der Weißabgleich ohnehin nicht auf die Berechnungsdauer auswirkt, sollte er unbedingt durchgeführt werden, da dies zu einer wesentlich naturgetreueren Texturierung der modellierten Oberfläche führt.

5.5.4. Zusammenhang Anzahl Bilder - gefundene Features - rekonstruierte Punkte

Neben der Berechnungsdauer ist vor allem das Ergebnis, nämlich die generierten 3D - Punkte, von größtem Interesse. Wie wirkt sich eine Erhöhung der Bilderanzahl aus, und gibt es einen Punkt, ab dem es nicht mehr sinnvoll ist, die Anzahl der Bilder zu erhöhen?

Tabelle 5.7.: Zusammenhang Datensatzgröße - Features - Points

extrah. Bilder/Sekunde	1	2	4	8
Anzahl Bilder	53	106	210	420
Features o. W.	536843	1033726	2039634	4078348
Points o. W	227809	244870	238776	306147
Features m. W.	602286	1157074	2282623	4502923
Points m. W.	209993	220918	232021	323426

Wieder fällt auf, dass der Unterschied zwischen den Datensätzen mit und jenen ohne Weißabgleich nur geringfügig ist. In den Datensätzen mit Weißabgleich werden zwar um rund 10 % mehr Features gefunden, was sich allerdings nicht in einer erhöhten Zahl an rekonstruierten Punkten niederschlägt, sondern ganz im Gegenteil die Anzahl der rekonstruierten 3D - Punkten sogar noch leicht verringert.

Extrem auffällig sind die Messwerte bezüglich der erhöhten Anzahl an Bildern, die zur Berechnung herangezogen wurden. Während sich die Anzahl an gefundenen Features naturgemäß entsprechend der Anzahl der Bilder erhöht, wirkt sich dies praktisch nicht auf die Anzahl der rekonstruierten 3D - Punkte aus. Bezogen auf den kleinsten Datensatz als Basis, bewirkt erst die achtfache Menge an Features einen Anstieg der 3D - Punkte um ca. 50 %, was aber gleichzeitig auch eine rund 14 - fach höhere Berechnungszeit erfordert.

5.5.5. Interpretation der Messungen

Wie sind diese Ergebnisse nun zu interpretieren? Die Tatsache, dass die massive Vergrößerung des Datensatzes durch den Weißabgleich praktisch keine Auswirkungen auf die Berechnungsdauer hat, wurde bereits kommentiert: Im Sinne einer

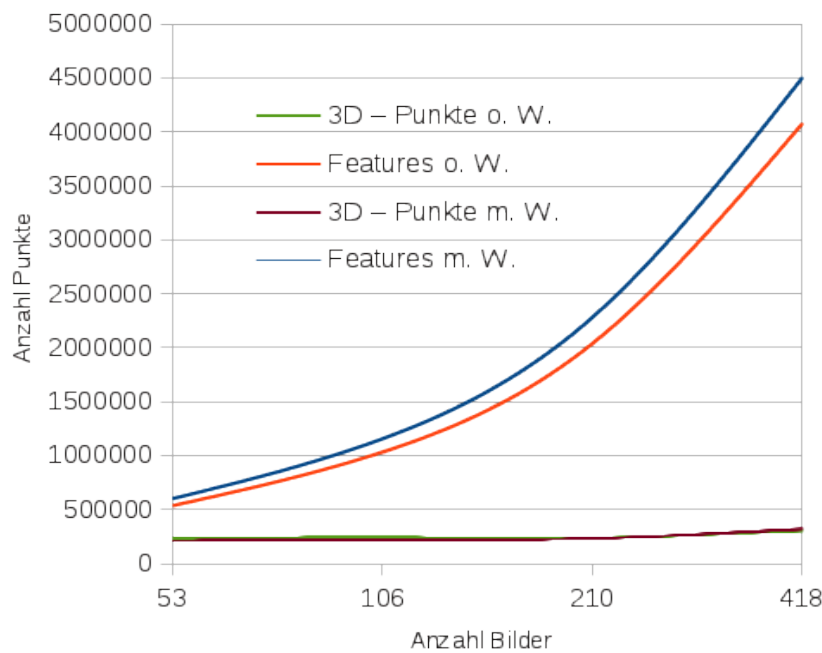


Abb. 5.15.: Zusammenhang zwischen der Anzahl der Bilder, den gefundenen Features in den einzelnen Bildern und den tatsächlich rekonstruierten 3D - Punkten: Während durch die steigende Anzahl der Bilder auch die Anzahl der gefundenen Features steigt, bleibt die Summe der rekonstruierten 3D - Punkte weitestgehend gleich.

Erhöhung der visuellen Qualität des 3D - Modells sollte der Weißabgleich unbedingt durchgeführt werden.

Die Tatsache, dass eine Erhöhung der Bilderanzahl kaum zu einer Erhöhung der rekonstruierten 3D - Punkte führt, im Gegenzug aber eine massive Verlängerung der Berechnungszeit verursacht, verleitet auf den ersten Blick zu der Annahme, dass eine größere Anzahl an Bildern unnötige Zeitverschwendung sei. Bei genauerer Betrachtung ergibt sich jedoch ein anderes Szenario: durch die gestiegene Anzahl an Bildern ist auch die Gesamtanzahl an gefundenen Features in diesen Bildern entsprechend größer. Da aber die Anzahl der daraus rekonstruierten 3D -Punkte nicht größer wird, ist anzunehmen, dass viele Features denselben Punkt abbilden. Jeder Punkt muss auf mindesten 3 unterschiedlichen Bildern zu erkennen sein, um

seine Lage im dreidimensionalen Raum errechnen zu können, je höher allerdings die Anzahl an Bildern ist, auf denen ein Punkt erkannt wird, desto genauer ist auch die Berechnung seiner Position. Eine hohe Anzahl an erkannten Features ohne Rekonstruktion einer signifikant dichteren Punktwolke weist also darauf hin, dass die geometrische Qualität der Punkte eine Höhere ist.

Für eine einfache Überprüfung eines Datensatzes bezüglich der Möglichkeit, daraus überhaupt ein Modell erstellen zu können, ist eine Berechnung mit möglichst wenigen Bildern durchaus zu empfehlen, da die Berechnungszeiten sich dann im akzeptablen Rahmen bewegen. Für das Monitoring, für das ja eine möglichst hohe Genauigkeit gewünscht wird, ist eine Berechnung mit möglichst vielen Bildern, entsprechend den Möglichkeiten der vorhandenen Hardware, aber trotzdem vorzuziehen.

6. Conclusio - Ausblick

6.1. Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse lassen eine Anwendung von *Structure from Motion* als Monitoring - Methode als sinnvoll erscheinen. Die Genauigkeit liegt in Bereichen, die der von manuellen Messungen mindestens gleichkommt, und durch die Aufnahme einer gesamten Fläche sind wesentlich mehr Details dokumentiert, als dies bei händischen Messungen jemals möglich wäre. Auch für die Aufnahme von einzelnen Pfählen oder anderen Befunden ist *Structure from Motion* gut geeignet, da organische Formen händisch ohnehin schwer zu dokumentieren sind. Aus einer Videosequenz von 50 Sekunden Dauer kann in wenigen Minuten ein äußerst detailliertes Modell generiert werden, das jede Handzeichnung an Genauigkeit weit übertrifft. In Verbindung mit einer genauen Lagevermessung kann in einem GIS eine Verknüpfung zu einer Datenbank erstellt werden, in der die Modelle gespeichert und entsprechend ihrer Lage jederzeit abgerufen und hinsichtlich verschiedener Parameter analysiert werden können.

6.2. Monitoring - Strategie

Da es sich bei *Structure from Motion* um eine, zumindest in der Unterwasserarchäologie im Süßwasser, neue Technologie handelt, sollte sie vorerst nur parallel zu bereits bestehenden Methoden angewendet werden. Auch ist eine vollflächige Erfassung einer Fundstelle mit einer Grundfläche von mehreren tausend Quadratmetern mit den derzeit üblichen Rechenkapazitäten nicht vorstellbar. Daher sollte

an jeder Fundstelle eine Auswahl exponierter, repräsentativer Flächen bestimmt werden, die in regelmäßigen Abständen dokumentiert werden und deren Zustand dann verglichen werden kann. Flächen mit einem Ausmaß von 5 x 5 m sind in wenigen Minuten aufzunehmen, sodass der Aufwand an Feldarbeit vertretbar ist. Allerdings sollte jede Fundstelle mit einem dichten Netz an fest verankerten Fixpunkten versehen werden, da das Einmessen der Punkte einen erheblichen Aufwand bedeutet. Außerdem ist eine genaue, georeferenzierte Vermessung unter Wasser in vielen Fällen gar nicht möglich, sodass ohnehin ein lokales Koordinatensystem angelegt werden muss, dass im Idealfall von dauerhaftem Bestand ist.

6.3. Offene Fragen

Aus zeitlichen und finanziellen Gründen konnten im Rahmen dieser Arbeit einige Punkte nicht untersucht werden, die jedoch durchaus einer näheren Betrachtung wert wären. Beispielsweise finden sich in der Literatur zwar Untersuchungen, in denen die Ergebnisse anhand der gleichen Datenbasis mit verschiedenen Software - Paketen untersucht werden. Da aber, speziell beim Monitoring, das ja einen sehr langfristigen Prozess darstellt, anzunehmen ist, dass auch die Kameraausrüstung wechselt, wären Untersuchungen und Vergleiche auch in dieser Hinsicht interessant. Es müsste also das gleiche Gebiet mit verschiedenen Kamerasystemen aufgenommen und die unterschiedlichen Bild - Datensätzen dann auch mit unterschiedlichen Software - Systemen prozessiert werden, ein Verfahren, das einen erheblichen Zeitaufwand bedeuten dürfte.

Damit im Zusammenhang steht auch die Frage nach der Kalibrierung der extrinsischen und intrinsischen Kameraparameter. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die in die Software implementierten Standardverfahren angewendet, allerdings ist die Kalibrierung von Kameras unter Wasser auf diese Weise nicht optimal gelöst (Drap [2012](#)), mit einer speziell an die Verhältnisse unter Wasser angepas-

ten Kalibrierung wäre die erreichbare Genauigkeit möglicherweise noch zu erhöhen.

Eine weitere Frage stellt sich bezüglich der verwendeten Kamera. Es wurde ein recht billige Kompakt - Digitalkamera verwendet. Die Ergebnisse sind angesichts dieser Hardware erstaunlich gut, aber wären sie noch besser, wenn eine professionelle UW - Fotoausrüstung mit Spiegelreflexkamera, hochwertiger Optik und entsprechender Lichtanlage verwendet worden wäre?

6.4. Ausblick

Structure from Motion ist ein Gebiet, dass in den letzten Jahren intensiv erforscht wurde. Es wurden enorme Fortschritte erzielt, und es ist davon auszugehen, dass diese Entwicklung noch lange nicht abgeschlossen ist. Auch für die Unterwasserarchäologie bietet *Structure from Motion* ein großes Potential, sei es in der Anwendung als kostengünstige Monitoring - Methode, wie in dieser Arbeit angedacht, oder zur digitalen Dokumentation unterwasserarchäologischer Fundstellen.

Bedauerlicherweise wurden die österreichischen, unter Wasser liegenden archäologischen Fundstellen bisher von der Wissenschaft weitgehend ignoriert. Abgesehen von der zumindest teilweisen Aufarbeitung von Material, das zum Teil schon vor vielen Jahrzehnten geborgen wurde, wurden kaum Initiativen gesetzt, um diese herausragenden archäologischen Fundstellen zu erforschen. Zwar bemühte sich J. Offenberger in den 70er und 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts darum, zumindest eine Inventarisierung und Vermessung der bekannten Fundstellen durchzuführen, tatsächliche Forschungsarbeit passierte aber nur in Ausnahmefällen.

Inzwischen sind mehrere Jahrzehnte vergangen, seit die letzten, wissenschaftlich relevanten Arbeiten an Pfahlbaustationen durchgeführt wurden. Der technische und methodische Fortschritt lässt hoffen, dass neue Forschungen auch neue Erkenntnisse bringen werden. Im Rahmen des Projektes „Weltkulturerbe Pfahlbauten“ sind auch tatsächlich Pläne geschmiedet worden, wie dieses Projekt genutzt werden könnte, um auch die Forschung voranzubringen. Dazu ist es, neben der Verankerung dieser Fundstellen im öffentlichen Bewusstsein und der Ausbildung unterwasserarchäologisch geschulter Wissenschaftler, unerlässlich, neue, kostengünstige Methoden zu entwickeln, um trotz des chronischen Geldmangels, dem die archäologische Forschung unterworfen ist, effektive Forschung zu betreiben. *Structure from Motion* ist eine dieser Methoden, die den gesamten Vorgang des Monitorings und der Dokumentation unterwasserarchäologischer Fundstellen revolutionieren und nebenbei auch die Präsentation von Forschungsergebnissen auf ein völlig neues Qualitätsniveau heben wird.

Die Entwicklung sowohl der Hard- als auch der Software wird dazu führen, dass in wenigen Jahren auch großflächige Aufnahmen von Flächen unter Wasser möglich sein werden. Da die Software - Entwickler aber andere Zielsetzungen haben als Archäologen, wird es auch zukünftig unerlässlich sein, dass sich technik - affine Archäologen mit dieser Technologie auseinandersetzen, um so eine Anpassung an die Bedürfnisse in der Unterwasserarchäologie zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- Abbot, M. F., R.H. and Penny, 1975. *Air trials of an experimental laser bathymeter*, Tech. Note WRE-TN-1509. Technischer Bericht. Salisbury, South Australia: Weapons Research Establishment, Dept. of Defence (Australia).
- Anderson, N., Bellemare, P., Casey, M., Malone, K., MacDougall, R., Monahan, D., O'Neil, R. und Till, S. 1983. „Beginning the second hundred years — the laser sounder“. In *Proc. Centennial Canadian Hydro. Conf.* Bd. Spec. Pub 67. Ottawa, Ont.: Fisheries und Aquatic Services.
- Antl - Weiser, W. 2006. „Silexplatten als Grundform für Geräte der Station See/Mondsee“. *Ein Lächeln für die Jungsteinzeit. Ausgewählte Beiträge zum Neolithikum Ostösterreichs. Festschrift für Elisabeth Ruttkay. Arch. Österreichs* 17/2:96–103.
- Bachner, M. 2002. „Die Keramik der Seeferstation See/Mondsee - Sammlung Much, Institut für Ur- und Frühgeschichte“. Diss., Universität Wien.
- Blondel, P. 2009. *The Handbook of Sidescan Sonar*. Chichester, UK.
- Bolles, R. C., Baker, H. H. und Marymont, D. H. 1987. „Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion“. *International Journal of Computer Vision* 1:7–55.
- Breitwieser, R. und Jansa, V. 2012. „Der „römische Hafen“ von Weyregg - ein Arbeitsbericht“. In *Schriften zur Archäologie und Archäometrie der Paris Lodron - Universität Salzburg*, herausgegeben von F. Lang, S. Traxler und W. Wohlmayr, 9–14. Bd. Band 3. Salzburg.
- Brown, M. und Lowe, D. 2002. „Invariant Features from Interest Point Groups“. In *British Machine Vision Conference*, herausgegeben von B. M. V. Conference, 656–665. Cardiff, Wales.
- Callow, H. 2003. „Signal Processing for Synthetic Aperture Sonar Image Enhancement“. Diss., University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Cichocki, O. und Dworsky, C. 2006. „Unterwasserarchäologie in Kärntner Seen“. Herausgegeben von A. Krenn-Leeb, K. Grömer und P. Stadler. *Ein Lächeln für die Jungsteinzeit. Ausgewählte Beiträge zum Neolithikum Ostösterreichs. Festschrift für Elisabeth Ruttkay. Arch. Österreichs* (Wien) 17/2:90–95.
- Collier, J. und Brown, C. 2005. „Correlation of sidescan backscatter with grain size distribution of surficial seabed sediments“. *Marine Geology - International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics* 214:431–449.
- Compton, J. und Hudson, M. A. 1988. „New charting technology in Australia: the Laser Airborne Depth Sounder“. *International Hydrographic Review* LXV(2):145–157.
- Cuschieri, J. M. und Hebert, M. 1990. „Three-Dimensional Map Generation From Side-Scan Sonar Images“. *Journal of Energy Resources Technology* 112:96–102.
- Daum, M. und Dudek, G. 1998. „On 3-D Surface Reconstruction Using Shape from Shadows“. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1998. Proceedings. 1998 IEEE Computer Society Conference*.

- Doneus, M., Pregesbauer, M., Briesse, C. und Doneus, N. 2012. „ALB - Airborne laser bathymetry: surveying underwater topography“. In *Aerial Archaeology, Remote Sensing and the Archaeological Process (AARG 2012)*, 13.09-15.09.2012, Programme and Abstract volume, 3. Budapest.
- Drap, P. 2012. „Underwater Photogrammetry for Archaeology“. Kap. Underwater Photogrammetry for Archaeology in *Special Applications of Photogrammetry*, herausgegeben von D. C. da Silva, 113–136. <http://www.intechopen.com/books/special-applications-of-photogrammetry/underwater-photogrammetry-for-archaeology>.
- Dworsky, C. und Reitmaier, T. 2003. „„Salzkammergut reloading“ - Ein Arbeitsbericht zur Kurzinventarisierung der prähistorischen Seeufersiedlungen in Mond- und Attersee“. *Nachrichtenblatt Unterwasserarchäologie* 10:51–56.
- . 2004. „Moment, da war doch noch was! Neues zur Pfahlbauarchäologie im Mond- und Attersee“. *Archäologie Österreichs* 15/2:4–15.
- Franz, L. 1928. „Die Funde aus dem Keutschacher See“. *Carinthia* I/118:91–94.
- Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M. und Szeliski, R. 2010. „Towards Internet-scale Multi-view Stereo“. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, herausgegeben von IEEE. San Francisco.
- Gassner, H., Jagsch, A., Zick, D., Bruscek, G. und Frey, I. 2002. *Die Wassergüte ausgewählter Seen des oberösterreichischen und steirischen Salzkammergutes*. Wien.
- Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH. 2005. *Das Georadar*. Technischer Bericht.
- Gleason, A. C. R., Cantwell, K., Gracias, N., Gonzales, M. und Reid, P. R. 2012. „Third-Generation Underwater Landscape Mosaics for Coral Reef Mapping and Monitoring“. In *Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia, 9-13 July 2012 5A Remote sensing of reef environments*.
- Guenther, G. C. 2007. *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. Herausgegeben von D. Maune.
- Haager Konvention. 1954. *Convention for the Protection of Cultural Property in the Event of Armed Conflict. The Hague, 14. May 1954*. Den Haag.
- Hafner, A. und Harb, C. 2008. „Die Unesco-Welterbe-Kandidatur "Pfahlbauten in Seen und Mooren rund um die Alpen"“. *as. Archäologie Schweiz* 3:2–13.
- Hartley, R. I. und Zisserman, A. 2004. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge.
- Hickman, D. G. und Hogg, J. E. 1969. „Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements“. *Remote Sensing of Environment* 1:47–58.
- Holt, P. 2003. „An assessment of quality in underwater archaeological surveys using tape measurements“. *International Journal of Nautical Archaeology* 32.2:246–251.
- Horn, B. K. 1986. *Robot Vision*. Cambridge.
- Hübner, R. 2005. *Digitale Unterwasserfotografie*. Cham.
- Jerlov, N. G. 1976. „Marine Optics“. In *Elsevier Scientific Pub. Co.* 231. Amsterdam.

- Kim, H. H., Cervenka, P. und Lankford, C. 1975. *Development of an airborne laser bathymeter, NASA Tech. Note TND-8079*. Technischer Bericht. Washington, D. C.: National Aeronautics und Space Administration.
- Koenderink, J. und van Doorn, A. 1991. „Affine structure from motion“. *Journal of the Optical Society of America A* 8:377–385.
- Köninger, J. 2005. „Unterwasserarchäologie im Überlinger See“. *Nachrichtenblatt Unterwasserarchäologie* 11/12:63–70.
- LaRocque, P. und West, G. 1999. „Airborne laser hydrography: an introduction“. In *Proc. ROPME/PERSGA/IHB Workshop on Hydrographic Activities in the ROPME Sea area and Red Sea, October 24-27, Kuwait*, 16 pp. Kuwait.
- Leckebusch, J. 1998. „Georadar in Binnengewässern“. Kap. Georadar in Binnengewässern in *Archäologie unter Wasser 2 - Prospektionstechniken*, herausgegeben von Bayerische Gesellschaft für Unterwasserarchäologie e. V., 51–57. Rahden/Westfahlen.
- Lillicrop, W. und Brooks, M. W. 1996. „Two years of operating the SHOALS airborne hydrographic survey system“. In *Proc. Hydro 96, 10th biennial symposium of the Hydrographic Society, Sept 24-26*, 8pp. Rotterdam, Netherlands.
- Lorenson, A. und Kraus, D. 2009. „3D-Sonar Image Formation and Shape Recognition Techniques“. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Oceanic Engineering, Oceans 09*. Bremen.
- Lowe, D. G. 1999. „Object recognition from local scale-invariant features“. Kap. Object recognition from local scale-invariant features in *International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece*, herausgegeben von ICCV, 1150–1157. Corfu: ICCV.
- . 2004. „Distinctive image features from scale-invariant keypoints“. *International Journal of Computer Vision* 60:2:91–110.
- Mayer, G. und Pilgram, R. 2006. „Überwachung von Bauteilen im Wasser unter Berücksichtigung gültiger Normen“. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 151/2:76–93.
- Möller, B. 2005. „Multi-Mosaikbilder - Ein Ansatz zur ikonischen Repräsentation von Bilddaten aktiver Kameras“. Diss., Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Informatik.
- Moßler, G. 1954. „Neues zum vorgeschichtlichen Pfahlbau im Keutschacher See“. *Carinthia I* 144:76–109.
- Much, M. 1874. „Zweiter Bericht über Pfahlbauforschungen in den oberösterreichischen Seen“. *Mitteilungen der anthropologischen Gesellschaft in Wien IV* 10.
- Nef, M. 2002. „Entwicklung eines Systems zur Simulation eines multi - Kamera - basierten Gesichtsscanners“. Masterarbeit, Computer Graphics Lab, Department Informatik, ETH Zürich.
- Offenberger, J. 1981. „Die „Pfahlbauten“ der Salzkammergutseen“. In *Das Mondseeland. Ausstellungskatalog*, 295–357.
- . 1982. „Der Pfahlbau im Keutschacher See in Kärnten“. *Fundberichte aus Österreich* 21:133–141.
- . 1986. „Pfahlbauten, Feuchtbodensiedlungen und Packwerke. Bodendenkmale in einer modernen Umwelt“. *Archeologia Austriaca* 70:205–236.

- Offenberger, J. 1995. „5000 Jahre Kulturgut unter Wasser. Pfahlbauforschung - der österreichische Weg“. *Arche* 10:4–15.
- Offenberger, J., Schatz, A. und Vymazal, K. 1976. „Die österreichischen Pfahlbauten - ein Arbeitsbericht“. *Jahrbuch des Oberösterreichischen Musealvereines* 121:105–138.
- O’Neil, R. A., Thomson, V., Villiers, J. N. de und Gibson, J. 1978. „The aerial hydrography program at CCRS“. In *Proc. Coastal Mapping Symp., Aug. 14-16, 1978, Rockville, MD*, 125–132.
- Österreichische UNESCO-Kommission. 2012. Besucht am 30. September 2012. <http://www.unesco.at/unesco/index.htm>.
- Ott, L. M. 1965. *Underwater ranging measurements using blue-green laser, NAVARDEVCON Report No. NADC-AE-6519*. Technischer Bericht. Warminster, GB: Naval Air Development Center.
- Ott, L. M. und Krumboltz, A. K., H. Witt. 1971. „Detection of submerged submarine by an optical ranging and detection system and detection of pulses by a submarine“. In *Proc. 8th U.S. Navy Symp. of Military Oceanography, May 18-20*. Bd. II. Monterey, CA.
- palafittes. 2009a. *Executive Summary*.
- . 2009b. *Managementplan*.
- . 2009c. *Nomination File Chapters*.
- Pittioni, R. 1935. „Neue Funde aus dem Keutschacher See“. *Carinthia* I/125:120–125.
- Reitmeier, T. 2007. „KG: Weyregg“. Kap. KG: Weyregg in *Fundberichte aus Österreich*, herausgegeben von Bundesdenkmalamt, Abteilung für Bodendenkmäler, 703. Bd. 46. Wien.
- Remondino, F., Pizzo, S., Kersten, T. P. und Troisi, S. 2012. „Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation - A Critical Overview“. In *Progress in Cultural Heritage Preservation*, herausgegeben von M. Ioannides, D. Fritsch, J. Leissner, R. Davies, F. Remondino und R. Caffo, 40–54. Bd. 7616. Lecture Notes in Computer Science. Berlin/Heidelberg.
- Samonig, B. 2001. „Eine jungneolithische Pfahlbaustation im Keutschacher See“. Diss., Universität Wien.
- Scheer, O. 2005. *Stereoanalyse und Bildsynthese*. Berlin.
- Schlichterle, H. 2001. „Pfahlbauten rund um die Alpen“. Besucht am 22. Oktober 2012. <http://www.archaeologie-online.de/magazin/thema/pfahlbauten-und-seeufersiedlungen/pfahlbauten-rund-um-die-alpen/seite-2/>.
- Schlögel, G. 2007. „Modellierung und Lokalisierung kleinräumiger Einlagerungen (Kriegsrelikte) im Untergrund mit Georadar“. Magisterarbeit, Department Angewandte Geowissenschaften und Geophysik, Lehrstuhl Geophysik, Montanuniversität Leoben.
- Skarlatosa, D., Demestihab, S. und Kiparrissia, S. 2012. „An ‘Open’ Method for 3D Modelling and Mapping in Underwater Archaeological Sites“. *International Journal of Heritage in the Digital Era* 1:1–24.
- Steinmüller, B. und Steinmüller, U. 2007. *Die digitale Dunkelkammer - Vom Kamera - File zum perfekten Print: Arbeitsschritte - Techniken - Werkzeuge*. Heidelberg.
- Steinvall, O., Koppari, K., Lejdebriink, J., U. and. Winell, Nilsson, M., Ellsen, R. und Gjellan, E. 1997. „Theories and

- experience of the Swedish airborne laser system“. In *Proc. XVth International Hydrographic Conference, April 21-22*, 3.1–3.22. Monaco: International Hydrographic Organization.
- Stepnowski, A., Bikonis, K. und Moszynski, M. 2005. „3D seabed reconstruction from 2D side-scan sonar images“. Kap. 3D seabed reconstruction from 2D side-scan sonar images in *ForumAcusticum Budapest 2005 - Proceedings*, L19–L22. Budapest.
- The Nautical Archaeology Society. 2008. *Underwater Archaeology. The NAS Guide to Principles and Practice*. Herausgegeben von A. Bowens. Singapur.
- Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I. und Fitzgibbon, A. W. 1999. „Bundle Adjustment - A Modern Synthesis“. In *Workshop on Vision Algorithms*, herausgegeben von B. Triggs, A. Zisserman und R. Szeliski, 298–372. Bd. 1883. Lecture Notes in Computer Science. Corfu: Springer. ISBN: 3-540-67973-1.
- Tsai, R. Y. 1986. „An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision“. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, 364–374. Miami Beach, USA.
- Tsai, R. Y. 1992. „A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses“. Kap. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses in *Radiometry*, herausgegeben von L. B. Wolff, S. A. Shafer und G. Healey, 221–244. USA.
- Ullepitsch, J. 1864. „Die Pfahlbauten - Reste im Keutschacher See“. *Archiv für vaterländische Geschichte und Topographie* 9:129–132.
- UNESCO. 2012. „List of the 195 Members (and the 8 Associate Members) of UNESCO and the date on which they became members (or Associate Members) of the Organization, as of 23 November 2011“. Besucht am 30. September 2012. <http://www.unesco.org/new/en/member-states/countries/>.
- W. u. K. Organisation der Vereinten Nationen für Bildung. 2005. *Richtlinien für die Durchführung des Übereinkommens zum Schutz des Kultur- und Naturerbes der Welt*. Paris.
- Waite, A. 2005. *Sonar for Practising Engineers*. West Sussex, GB.
- Willvonseder, K. 1963-1968. *Zur Geschichte der österreichischen Pfahlbauforschung: Die jungsteinzeitlichen und bronzezeitlichen Pfahlbauten des Attersees in Oberösterreich*.
- World Heritage Committee. 2011. *Decisions adopted by the World Heritage Committee at its 35th session*.
- Wozencraft, J. und Lillycrop, W. 2003. „Airborne coastal mapping, past, present, and future“. *Journal of Coastal Research* Special Issue, 38:207–215.
- Wu, C. 2007. *SiftGPU: A GPU Implementation of Scale Invariant Feature Transform SIFT*. Besucht am 2. November 2012. <http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu>.
- . 2011. *Multicore Bundle Adjustment Manual*. Online. Besucht am 13. November 2012. <http://grail.cs.washington.edu/projects/mcba/manual.pdf>.
- Wu, C., Agarwal, S., Curless, B. und Seitz, S. M. 2011. „Multicore Bundle Adjustment“. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, herausgegeben von IEEE, 3057–3064. Colorado Springs.

Zhang, Z. 2000. *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. Technischer Bericht. Microsoft Research.

A. Anhang

A.1. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde versucht, die Anwendbarkeit von *Structure from Motion* als Methode für das Monitoring unterwasserarchäologischer Fundstellen zu überprüfen. Vergleiche verschiedener Software - Pakete zeigten, dass auch Open-source - Software verfügbar ist, die bezüglich Genauigkeit der Rekonstruktion von 3D - Punkten aus Bildern kommerziellen Programmen durchaus ebenbürtig ist.

Die ausschließliche Verwendung von Opensource - Software muss allerdings mit einer weniger bequemen Bedienung erkauft werden. Während kommerzielle Produkte den gesamten Workflow bis zur Generierung der fertig texturierten Oberfläche in einem Programm anbieten, muss bei Opensource - Software auf eine erkleckliche Anzahl unterschiedlicher Programme zurückgegriffen werden, um zu einem vergleichbaren Ergebnis zu gelangen.

Es konnte gezeigt werden, dass die detaillierte Dokumentation einer Fläche von 4 m² in wenigen Minuten machbar ist. Die resultierende Punktwolke besteht, je nach Anzahl der verwendeten Bilder, aus rund 230.000 bis 300.000 Punkten. Die Genauigkeit der Überdeckung von Oberflächenmodellen, die aus unterschiedlichen Datensätzen generiert wurden, liegt zwischen 1 und ca. 1,7 cm, womit diese Methode bezüglich der Genauigkeit zumindest mit manuellen Messungen mithalten kann, während sie an Detailliertheit weit über allem liegt, was händisch mit vertretbarem Aufwand machbar ist.

A.2. Abstract

The purpose of this thesis was to verify the applicability of *Structure from Motion* on the monitoring of underwater-archaeological sites. The comparison of different software-packages has shown that open source-software conceivably equals commercial programmes in matters of precision of reconstruction of 3D - points taken out pictures.

However, the exclusive use of open source-software is bound to a less comfortable handling. When commercial products offer the entire workflow to the generation of the entirely texturized surface within one programme, the open source software has to refer to a considerable number of different programmes in order to receive a comparable outcome.

It was found that the detailed documentation of an area of 4 m² is possible within a few minutes. The resulting point cloud comprises – depending on the number of pictures – around 230.000 to 300.000 points. The precision of lapping of surface models, generated from different data records, lies between 1 and about 1,7 cm. It is therefore that this method can at least keep up with manual measuring due to its precision. At the same time it lies far above all in level of detail that is manually feasible with acceptable effort.

A.3. Lebenslauf

Lebenslauf

Persönliche Daten

Ing. Viktor Jansa
Lobenhauerngasse 1/1
A - 1170 Wien
Tel.: 0680/1291 734
email :viktor.jansa@gmx.net
Geb. am 28.07.1964 in Villach/Kärnten
Familienstand Ledig, Muttersprache deutsch

Ausbildung

1978 - 1984	Höhere Technische Bundes- Lehr- und Versuchsanstalt Villach, Abteilung Hochbau, Abschluss mit Matura
1985 - 1990	Technische Universität Wien, Studium der Architektur, ohne Abschluss
1990 - 2008	Laufende berufsbegleitende Fortbildungen auf den Gebieten Baurecht, Bauphysik, Mitarbeiterführung, Projektmanagement
1994	Ablegen der Befähigungsnachweisprüfung für das Bauträger- gewerbe
2008 - 2012	Studium der Ur- und Frühgeschichte, Universität Wien

Berufliche Tätigkeiten

1985 - 1990	Neben dem Studium freier Mitarbeiter bei verschiedenen Architekturbüros in Wien, Aufgabenbereich Entwurf, Einreich- und Ausführungsplanung
1991	Wehrdienst in Großmittel/Felixdorf bei der Jagdpanzerkompanie
1991 - 1993	Projektleiter im Architekturbüro Dipl. Ing. Paul Richter, Aufgabenbereich: Projektleitung für Kleinprojekte (bis ATS 3 Mio)
1993 - 1994	Projektleiter bei der ÖRAG - Österreichische Realitäten AG, Aufgabenbereich: Instandhaltung der eigenen Immobilien des Unternehmens, Planung, Ausschreibung, Bauaufsicht, Abrechnung
1994 - 2007	selbständiger Unternehmer, Bautränergewerbe

Archäologische Projekte

2009	Geophysikalische Prospektion Falkenstein/St. Gilgen
2010 - 2011	Untersuchung und digitale Dokumentation der Römischen Anlage Weyregg/Attersee
2011	Geophysikalische Prospektion Halbturn, Burgenland
2012	Geophysikalische Prospektion Gokstad, Norwegen
2012	Dokumentation eines römischen Wracks vor der Insel Mljet/Kroatien in 35 m Tiefe
2012	Geophysikalische Prospektion Carnuntum/Niederösterreich

3. Januar 2013

A.4. Verwendete Software

Alle für dieses Projekt verwendeten Programme stehen unentgeltlich unter den angegebenen Links zum Download bereit.

Tabelle A.1.: *Verwendete Software - Linkliste*

Anwendung	Name	Version	Weblink
Betriebssystem	Linux Debian 64 bit	Wheezy	http://www.debian.org
Textsatz	L ^A T _E X	2011	http://www.ctan.org
Textsatz GUI	Kile	2.1.0	http://kile.sourceforge.net
SfM	VisualSfM	0.5.20	http://homes.cs.washington.edu/~ccwu/vsfm
	SiftGPU	V400	http://www.cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu
	PBA	1.0.5	http://grail.cs.washington.edu/projects/mcba
	CMVS/PMVS2	2	http://homes.cs.washington.edu/~furukawa
3D - Modelling	Meshlab	1.3.0	http://meshlab.sourceforge.net

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Verwendete Software - Linkliste - Fortsetzung

3D - Präsentation	Paraview	3.98	http://www.paraview.org
Bildbearbeitung	GIMP	2.8	http://www.gimp.org
Diagramme	LibreOffice Calc	3.5.4.2	http://www.libreoffice.org
GIS	Quantum GIS	1.8.0	http://qgis.org

A.5. UNESCO - Weltkulturerbe Pfahlbauten: Überblick

Tabelle A.2.: UNESCO - Weltkulturerbe Pfahlbauten: Mitglieder

Schweiz	Kantone Aargau, Berne, Friborg, Geneva, Lucerne, Neuchâtel		
Österreich	Bundesland Kärnten	Bezirk Klagenfurt Land	
	Bundesland Oberösterreich	Bezirk Vöcklabruck	
Frankreich	Region Rhône - Alpes	Départements	Savoie, Haute - Savoie, Franche - Comté, Jura
Deutschland	Bundesland Baden - Württemberg	Landkreise Alb - Donau - Kreis, Biberach, Bodenseekreis, Konstanz, Ravensburg	
	Freistaat Bayern	Landkreise Landsberg am Lech, Starnberg	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

UNESCO - Weltkulturerbe Pfahlbauten: Mitglieder - Fortsetzung

Italien	Region Friaul - Julisch	Provinz Pordenone
	Venetien	
	Region Lombardei	Provinzen Varese, Brescia, Mantua, Cremona
	Region Piemont	Provinzen Biella, Turin
	Region Trentino - Südtirol	Autonome Provinz Trentino
	Region Venetien	Provinzen Verona, Padua
Slowenien	Bezirk Ig	

Quelle: palafittes [2009a](#)

Der Managementplan - Kurzzusammenfassung

Alle Information dieses Unterkapitels stammen aus palafittes [2009b](#).

Der Managementplan ist auf mehreren Ebenen aufgebaut. Unterschieden werden

- das *internationale Management*
- das *nationale Management* und
- das *lokale Management*

Auf jeder dieser Ebenen sind spezifische Aufgaben zu bewältigen.

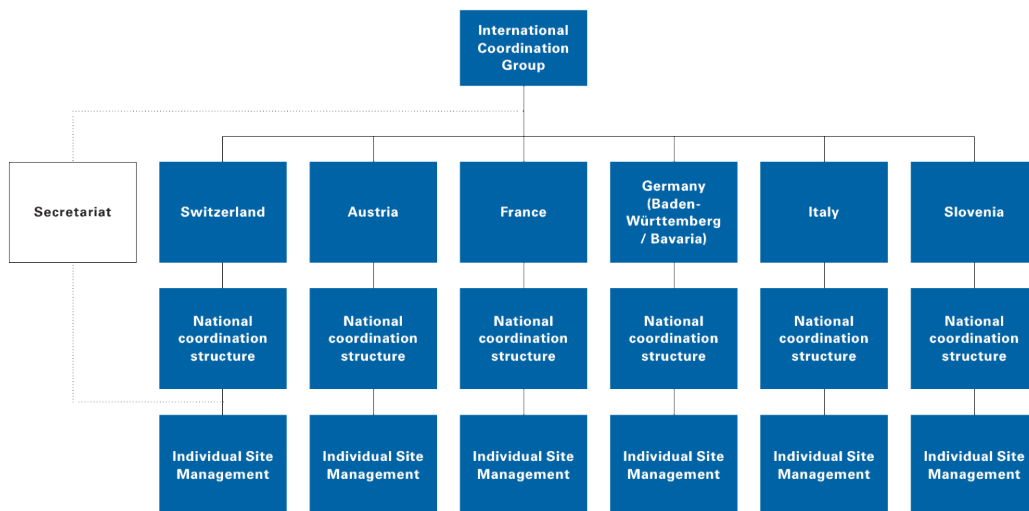


Abb. A.1.: Ebenen des Managements der Pfahlbauten (Quelle: palafittes 2009b)

Die International Coordination Group

Das internationale Management basiert auf den Vereinbarungen zwischen

- dem *Bundesamt für Kultur / Office fédéral de la culture / Ufficio federale della cultura* (Schweiz),
- dem *Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur* (Österreich),
- dem *Ministère de la Culture et de la Communication, Direction générale des patrimoines* (Frankreich),
- dem *Wirtschaftsministerium von Baden-Württemberg* (Deutschland),
- dem *Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst* (Deutschland),
- dem *Ministero per i Beni e le Attività Culturali* (Italien) und
- dem *Ministrstvo za kulturo* (Slowenien)

bezüglich des Managements des gemeinsamen Weltkulturerbes *Pfahlbauten*.

Aufgaben und Kompetenzen

Koordination: Während des Aufnahmeverfahrens fungierte die *International Coordination Group* als Ansprechpartner für das *World Heritage Center* und das *World Heritage Committee* in allen die gemeinsame Bewerbung betreffenden Angelegenheiten.

Erhaltung: Die *International Coordination Group* sammelt laufend Informationen zum Erhaltungszustand der archäologischen Fundstellen. Sie dient als Plattform für die Präsentation, Diskussion und Evaluierung von Problemen bei der Erhaltung, aber ebenso solchen des Managements und des Monitorings. Sie gibt Empfehlungen für anzuwendende Verfahren und garantiert, dass diese dem letzten Stand der Wissenschaft entsprechen.

Präsentation und Erforschung: Die *International Coordination Group* fördert und unterstützt die Präsentation der eingetragenen Fundstellen und fördert Maßnahmen, die zu einer besseren Wahrnehmung des Phänomens Pfahlbausiedlung in der breiten Öffentlichkeit führt. Ebenso unterstützt sie die wissenschaftliche Erforschung der Fundstellen und publiziert einen jährlichen Bericht über ihre Aktivitäten.

Zusammensetzung

Mitglieder: Mitglieder der *International Coordination Group* sind die Delegationen der Vertragsstaaten, jeder Staat hat eine Stimme. Die Delegationen setzen

sich aus Experten für die Archäologie der Pfahlbauten sowie Repräsentanten der Vertragsstaaten zusammen.

Präsidentschaft: Die Präsidentschaft wird jedes Jahr von einem anderen Vertragsstaat ausgeübt, beginnend mit der Schweiz und in der alphabetischen Reihenfolge der Staatsnamen auf Englisch. Die Präsidentschaft organisiert die jährlichen Treffen, ist für die Koordination und Werbung bezüglich verschiedener internationaler Aktionen zuständig und repräsentiert die Weltkulturerbestätten international.

Sekretariat: Die *International Coordination Group* wird bei ihrer Arbeit durch ein Sekretariat unterstützt, diese Aufgabe wird vom Verein *Archäologie Schweiz / Archéologie Suisse / Archeologia Svizzera*, der dies in seiner Vorstandssitzung vom 25. November 2009 beschloss, wahrgenommen.

Das nationale Management

Das nationale Management in Österreich wird vom speziell zu diesem Zweck gegründeten Verein *Kuratorium Pfahlbauten* (www.palafittes.at) wahrgenommen. Der Vorstand des Vereines wird von je einem Vertreter der Landesmuseen Kärnten und Oberösterreich, einem Vertreter der Landesregierungen Kärnten und Oberösterreich und dem Direktor der Prähistorischen Abteilung des Naturhistorischen Museums gebildet, als Vorstand fungiert der Weltkulturerbe - Beauftragte des *BMUKK*. Die Umsetzung obliegt einem Geschäftsführer, ein wissenschaftlicher Beirat dient als externe Kontrollinstanz. Der Geschäftsführer wird von 2 Site - Managern unterstützt, von denen jeweils einer für die oberösterreichischen Fundstellen und einer für den Kärntner Pfahlbau im Keutschacher See zuständig ist.

Im Managementplan wurde ein Vielzahl von Projekten definiert, die vom nationalen Management abzuwickeln sind, lt. Zeitangaben sollten einige davon bereits erledigt, andere zumindest im Gange sein, über den aktuellen Stand der einzelnen Projekte sind allerdings derzeit (Herbst 2012) keine Informationen öffentlich verfügbar.

Projekte (Aufzählung nicht taxativ):

Fund - Raising - Konzept: Entwicklung eines Fund - Raising - Konzeptes und Definition möglicher strategischer Partner

Schutzmaßnahmen: Erfassung von unmittelbar erforderlichen Schutzmaßnahmen

Monitoring: Testen und durchführen von Monitoring - Maßnahmen

Unterschutzstellungskonzept: Entwicklung eines nationalen Unterschutzstellungskonzeptes für unterwasserarchäologischen Fundstellen

Datenbank, GIS, Literatur: Erfassen aller Fundstellen in einer Datenbank, Integration in ein GIS, Gründung einer Bibliothek mit für die Pfahlbauforschung relevanter Literatur

Informationskonzept: Erstellen eines Informations - Konzeptes

Awareness - Konzept: Erstellen eines Konzeptes, um das Weltkulturerbe Pfahlbauten im Bewusstsein der breiten Öffentlichkeit zu verankern.

Das lokale Site - Management

Das lokale Site - Management wird, wie bereits erwähnt, von 2 Site - Managern wahrgenommen, von denen jeweils einer für Oberösterreich und einer für Kärnten zuständig ist. Auch hier wird ein umfangreicher Maßnahmenkatalog vorgestellt, mit dessen Umsetzung 2010 begonnen hätte werden sollen, da aber im Moment (Oktober 2012) gerade erst das Auswahlverfahren für die Stellen als Site - Manager im Gange ist, ist davon auszugehen, dass mit der Durchführung der Maßnahmen noch nicht begonnen wurde. Öffentliche Informationen sind auch in diesem Fall zur Zeit nicht verfügbar.

Maßnahmen auf lokaler Ebene (Aufzählung nicht taxativ):

Dokumentation des Erhaltungszustandes: Unterwasserarchäologische Kontrolle und Überprüfung des Erhaltungszustandes aller Fundstellen durch Tauchgänge, deren Frequenz vom Erhaltungszustand und der Gefährdung der jeweiligen Fundstelle abhängig ist.

Potentielle Gefahrenquellen: Feststellen der potentiellen Gefahrenquellen, wie natürliche Erosion, Schifffahrt, Taucher, Bojen, Tourismus u. ä. durch Methoden der Luftbildarchäologie, Dokumentation von Zerstörungsmustern.

Monitoring: Durch regelmäßiges Monitoring sollen eventuell erforderliche Schutzmaßnahmen für einzelne Sites entwickelt werden. Das Monitoring soll im Abstand

von 3 - 5 Jahren erfolgen, verschiedene Techniken und Maßnahmen sollen an den Sites in unterschiedlichen Uferabschnitten getestet werden, um sowohl Erosions- als auch Ablagerungsraten und deren Intensität zu erfassen.

Schutzmaßnahmen: Entscheidungen über erforderliche Schutzmaßnahmen, wie beispielsweise Abdeckung oder gesetzliche Maßnahmen.

Wissenschaftliche Erforschung: Erforschung mit Methoden, die auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft sind, unter Zuhilfenahme alten Fundmaterials und unpublizierter Grabungs- und Prospektionsberichte, Vergabe von Diplom- oder Dissertationsthemen an den Universitäten Wien und Innsbruck und anderen Forschungseinrichtungen, naturwissenschaftliche Erforschung durch Kooperationen mit den Universitäten Wien und Innsbruck, der Wiener Universität für Bodenkultur und dem Ludwig Boltzmann Institute for Archaeological Prospection and Virtual Archaeology, aber auch anderen geeigneten Institutionen.

Präsentation: Präsentation von dreidimensionalen digitalen Rekonstruktionen der Sites (möglicherweise im Rahmen eines internationalen Projektes), Präsentation von Streufunden, touristische Entwicklung für Individual - Besucher und Schulklassen, spezielle Angebote für Tauchtouristen und lokale Tauchorganisationen (Denkmalgerechtes Tauchen, Vorträge u. ä.).

Museen: Entwicklung neuer Konzepte für die Ausstellung von Funden aus Pfahlbausiedlungen, Einbindung der lokalen Bevölkerung, Informationen über tauchar- chäologische Untersuchungen, beispielsweise durch „archäologische Fenster“ (Pool mit Sichtfenster, in dem Taucher „archäologische Untersuchungen“ durchführen).