

Zeichnerische Dokumentation von verstürzten Mauern

Vergleich verschiedener Vermessungsmethoden an einem speziellen archäologischen Befund

Tilman Wanke

Im Verband umgekippte oder eingestürzte Mauern stellen besondere Anforderungen an die zeichnerische Dokumentation auf archäologischen Ausgrabungen. Um die praktische Eignung verschiedener Messverfahren beurteilen zu können, führte der Verfasser im Rahmen einer Diplomarbeit einen Vergleich zwischen verschiedenen Methoden durch. Dabei wurden der Zeitaufwand bis zur fertigen Kartierung, die erzielte Genauigkeit und die Qualität der Darstellungsweise betrachtet. Die praktische Erprobung fand an einer Testfläche auf der Ausgrabung der villa rustica von Nassenfels, Lkr. Eichstätt, statt. In den folgenden Ausführungen werden das Konzept und die Ergebnisse des Vergleiches wiedergegeben sowie daraus Empfehlungen für die Feldarbeit abgeleitet.

Diagrams to Document Walls which have Collapsed – a Comparison of Different Survey-Methods for a Special Archaeological Feature

On an excavation site drawings to document walls which have collapsed or fallen over in coherent units pose particularly demands. To assess the suitability of different survey-methods in practice, the author compared various proceedings in his paper. The time spent for completing the drawing of a plan, the accuracy achieved and the quality of the obtained graphical model were taken into consideration. The field examination took place on a test area at the excavation of the villa rustica of Nassenfels, Lkr. Eichstätt/Bavaria. The following contribution describes the concept and the results of this comparison leading to recommendations for the practical work.

1 Einleitung

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der FHTW-Berlin führte der Autor einen Methodenvergleich zwischen verschiedenen auf archäologischen Ausgrabungen üblichen Vermessungsverfahren durch.¹ Dabei ging es speziell um die Dokumentation verstürzter und *en bloc* umgekippter Mauern, sowie von *in situ* erhaltenen Mauerstümpfen. Solche Befunde sind zwar selten, jedoch in jüngerer Zeit bei Mittelaltergrabungen und vor allem bei Ausgrabungen römischer Bauten in Süddeutschland häufiger dokumentiert worden.² Ihre besondere Bedeutung liegt in der Möglichkeit, über den zweidimensionalen Grundriss hinaus Aussagen zur aufgehenden Architektur treffen zu können. Dass dies nicht nur anhand *en bloc* umgekippter Wände möglich ist, sondern auch an losem Versturzschnitt, zeigen jüngere Publikationen.³

Die Vermessung und Darstellung solcher Befunde stellt den Ausgräber vor besondere Probleme: Neben hohen Genauigkeitsanforderungen, erfordert deren komplizierte Geometrie eine hohe Anzahl an Einzelmessungen. Dies führt zu einem extrem erhöhten Zeitaufwand, der die herkömmlichen Aufnahmeverfahren auf größeren Flächen an ihre Grenzen stoßen lassen kann. Wie für jede archäologische Dokumentation muss sich der Bearbeiter vor der Aufnahme sehr genau mit dem Befund auseinander setzen und sich überlegen, was am besten und in welcher Art zu dokumentieren ist. So sollten im Verband erhaltene Bauteile, wie aufgehende Mauern, Fundamente oder umgekippte Mauern, steingerecht aufgenommen werden. Der hohe Aufwand, den eine präzise und steingerechte Aufnahme von ungeordnetem Versturzschnitt mit sich bringt, lässt sich dagegen in der Regel kaum mit den zu erwartenden Ergebnissen rechtfertigen.⁴

Die vorliegende Untersuchung prüft die praktische Eignung verschiedener Verfahren für die zeichnerische Dokumentation komplizierter Baubefunde. Zunächst werden das Konzept und die Durchführung dargestellt sowie anschließend die Ergebnisse zusammengefasst.

2 Konzept und Durchführung des Methodenvergleichs

Für diesen Methodenvergleich wurden auf Ausgrabungen gängige Verfahren (mit Ausnahme des 3D-Laserscans) ausgewählt und diese auf einer Testfläche angewendet. Es kamen folgende Verfahren zur Anwendung:

- Zeichenrahmen (Handzeichnung im Maßstab 1:20)
- Feldpantograf (Aufnahmemaßstab 1:20)
- Trigomatssystem mit drei Wegaufnehmern
- Tachymetrische Aufnahme
- Fotogrammetrische Einbildauswertung und Darstellung als Bildplan (verschiedene Programme und Aufnahme-konfigurationen)
- Fotogrammetrische Mehrbildauswertung
- 3D-Laserscan

Die Testfläche befand sich auf der Ausgrabung der villa rustica von Nassenfels, Landkreis Eichstätt. In dieser lagen die Südwestecke eines steinernen Nebengebäudes, bestehend aus den Absätzen der aufgehenden West- und Südwand des Gebäudes sowie deren ungeordnetem Versturzschnitt. Der Zustand der Befunde entsprach weitgehend dem Zustand auf der Grabung nach Abnahme der kolluvialen Deckschichten. Der Untersuchungsbereich maß

bei einer Ausdehnung von ungefähr 8 m x 9,5 m, insgesamt 76 m² (Abb. 1).

Für die Beurteilung der Verfahren wurde in dieser Untersuchung das Verhältnis von Arbeitszeit und erzielter Messgenauigkeit betrachtet. Zudem wurde auch die erzielbare Qualität der Darstellungsweise beurteilt. Die Arbeitszeit wurde für die einzelnen Arbeitsschritte jeweils getrennt protokolliert, so dass sich neben Feldarbeit und Nachbearbeitung auch der zeitliche Arbeitsaufwand für zwei verschiedene Detaillierungsgrade eines fertigen Planes unterscheiden ließ – nämlich die steingerechte Aufnahme nur der Mauer und der gesamten Testfläche.⁵ Um die Messgenauigkeit statistisch beurteilen zu können, wurden die Abweichungen in der Ebene zwischen der jeweiligen Prüfungsmessung und einer Verifikationsmessung verglichen. Als Verifikationsmessung dienten 166 tachymetrisch eingemessene Referenzpunkte, die in der Fläche mit kleinen Plastiketiketten vermarktet wurden. Aus den grafisch ermittelten einzelnen Abweichungen (ϵ) wurde eine Standardabweichung (s) ermittelt.⁶ Diese beschreibt speziell die Genauigkeit des getesteten Verfahrens an der Testfläche und beinhaltet bewusst alle systematischen und zufälligen Fehler. Es wurde folgende Formel angewendet

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}$$

n : Anzahl der Probemessungen

ϵ : wahrer Fehler (horizontaler Fehlervektor) = Messwert (Prüfungsmessung) – Sollwert (Verifikationsmessung)

Die Darstellungsweise, also die mit einem spezifischen Verfahren erzielbare Darstellung der Messergebnisse, ist nicht

quantitativ zu fassen. Für deren Beurteilung sind neben der – nur subjektiv zu beurteilenden – Qualität vor allem die Kombinations- und Modellierungsmöglichkeiten von Bedeutung, mit denen weitere Informationen in der Dokumentation festgehalten werden können. In der Regel werden bei der Aufnahme archäologischer Befunde orthogonale Konturlinienpläne erstellt, die zusätzlich kotiert,⁷ koloriert und mit abstrakten Signaturen – beispielsweise für verschiedene Materialgruppen – versehen werden können.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Darstellungsweise

Die verschiedenen Darstellungsweisen und deren Ergänzungs- und Modellierungsmöglichkeiten, die mit den getesteten Verfahren möglich sind, sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

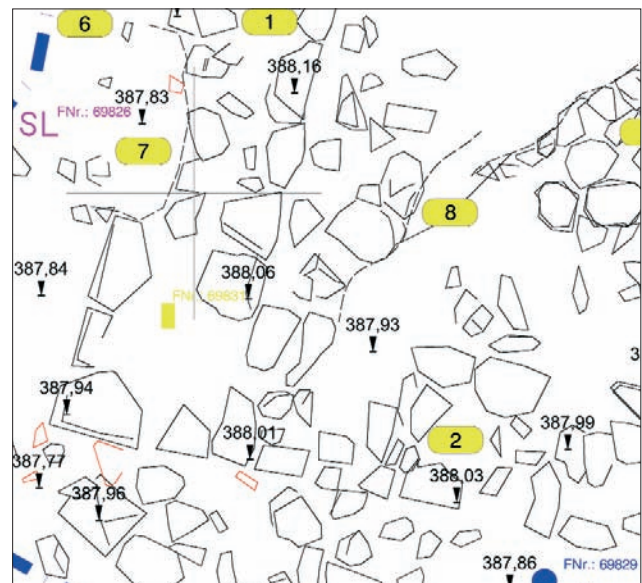
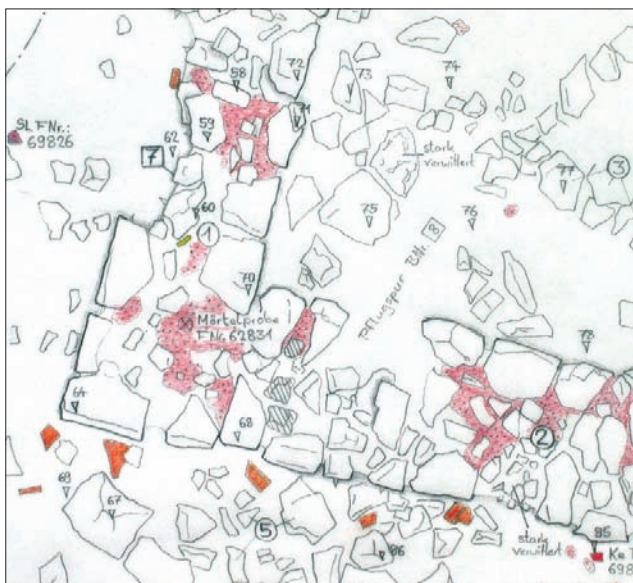
Mit Ausnahme des digitalen 3D-Modells beim Laserscan und den bei der Einbildfotogrammetrie angefertigten Bildplänen lassen sich mit allen anderen getesteten Verfahren Konturlinienpläne direkt erstellen. Diese unterscheiden sich allerdings je nach Verfahren zum Teil beträchtlich voneinander: Für die Wiedergabe der komplexen Formen von Bruchsteinmauerwerk, wie es auf der Testfläche vorhanden war, können analog gezeichnete Pläne wesentlich bessere Ergebnisse liefern als digitale Vektorpläne. Durch einen Bleistiftstrich lassen sich bei vergleichbarem Arbeitsaufwand detaillierte Formen besser erfassen als durch gerade Verbindungslinien zwischen digital gemessenen Koordinatenpunkten (Abb. 2a und b). Allerdings spielt dieser Umstand nur bei höchsten Genauigkeitsanforderungen mit einer

Tabelle 1
Darstellungsweise und
Modellierungsmöglichkeiten

Methode	Darstellungsmodell	Modellierungsmöglichkeiten
Zeichenrahmen	analoger Punkt- und Konturenplan (2D)	händische Signatur und Kolorierung, kotierbar
Pantograf (1:20)	analoger Punkt- und Konturenplan (2D)	händische Signatur und Kolorierung, kotierbar
Trigomat, Maßbandsystem	digitaler Punkt- und Konturenplan (3D)	automatisierte digitale Signatur
	Planausdruck: analoger Punkt- und Konturenplan (2D)	händische Signatur und Kolorierung, automatisiert kotierbar
Tachymeter, mit autom. Planzeichnung	digitaler Punkt- und Konturenplan (3D)	automatisierte digitale Signatur
	Planausdruck: analoger Punkt- und Konturenplan (2D)	händische Signatur und Kolorierung, automatisiert kotierbar
Bildplan	digitaler fotografischer Bildplan (2D)	kombinierbar mit digitalen Punkt- und Konturenplänen: (automatisierte digitale Signaturen und Koten)
	Planausdruck: analoger fotografischer Bildplan (2D)	
Mehrbildauswertung	digitaler Punkt- und Konturenplan (3D)	digitale Signatur (durch Layersteuerung) und kombinierbar mit digitalen Punkt- und Konturenplänen: (Koten durch Kodierung)
	Planausdruck: analoger Punkt- und Konturenplan (2D)	händische Signatur und Kolorierung, kotierbar (durch Layersteuerung)
Laserscan	verschiedene digitale Darstellungsmodelle (3D) mit und ohne Textur – abhängig von verwendeter Software	stark abhängig von verwendeter Software
	verschiedene Planausdrucke von Orthoansichten oder Schnitten – abhängig von verwendeter Software	digitale Signatur (durch Layersteuerung)

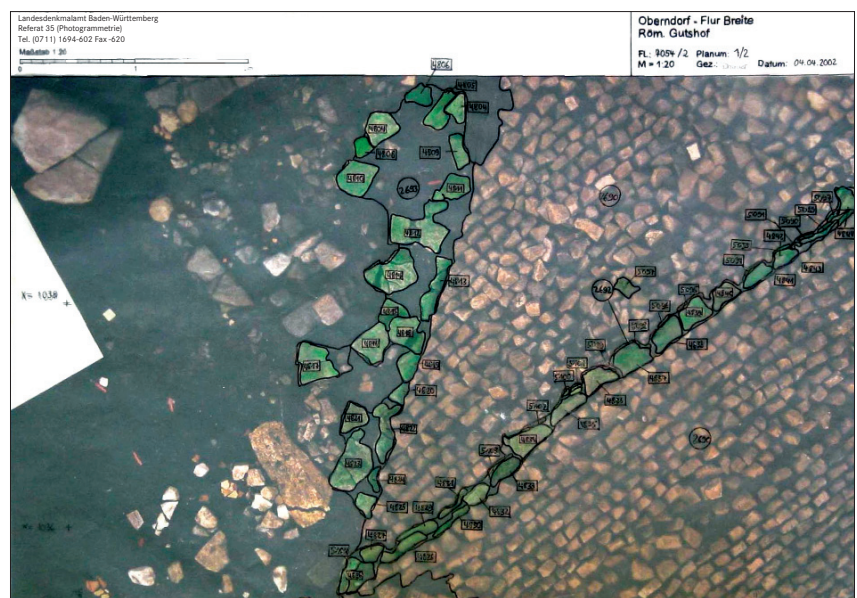
1

Die Testfläche von Süden



2a und b
Gegenüberstellung von analogem
und digitalem Konturlinienplan
(beide im Maßstab 1:30)

3
Bildplan mit transparentem
Deckblatt für die Eintragung
von Signaturen
(aus der Grabungsdokumentation
von Oberndorf Bochingen,
LDA Baden-Württemberg)



	Aufstellungen / Aufnahmen	Aufnahmehöhe (m)	Transformation	Prüfungs- messungen n	Arbeitszeit t für Stufe 1 (min)	Arbeitszeit t für Stufe 2 (min)	Standardabweichung s (mm)
Zeichenrahmen	1	–	–	6	255p	1150p	32,4
Pantograf	4	–	–	103	200	960	(13,2)
Trigomat	1	–	–	100	194	609	9,4
Tachymeter		–	–	–	240p	855p	(6,3)
Bildplan 1	1	13	projektiv	142	–	140	58,4
Bildplan 2	5	10–13	projektiv	152	–	287	44
Bildplan 3	10	10–13	projektiv	131	–	355	28,6
Bildplan 4	5	5	projektiv	144	–	273	55,4
Bildplan 5	10	5	projektiv	129	–	376	53,8
Bildplan 6	1	13	polynom	150	–	198	58
Bildplan 7	1	13	polynom	148	–	221	38,3
Bildplan 8	5	10–13	polynom	164	–	484	31,9
Mehrbildauswertung	24	5	–	10	1555	–	(1,4)
Mehrbildauswertung	6	10	–	–	1092	–	(2,8)
Laserscan (max)	4	–	–	–	–	475p	(6,3)
Laserscan (trianguliert)	4	–	–	–	–	575	(21,9)

Tabelle 2
Zusammenstellung der
ermittelten Daten

Erklärung:
„p“: geschätzte Arbeitszeit
(13,2): theoretisch berechneter Fehlerwert (s. Anhang:
<http://home.arcor.de/tilman.wanke/Anhang.pdf>)

detaillierten, steingerechten Darstellung der Befunde eine Rolle. Für ungeordneten Versturzschnitt ist eine solche detaillierte, steingerechte Konturlinien-Aufnahme in der Regel zu arbeitsaufwändig.

Bildpläne eignen sich sehr gut für die Wiedergabe von Baubefunden wie verstorzten Mauern: Sind die Aufnahmen optisch genügend kontrastreich, werden auch die messbaren Konturen indirekt wiedergegeben. Dabei enthält ein farbiges, fotorealisiertes Messbild viel mehr Informationen als eine auf Konturlinien reduzierte Kartierung. Des Weiteren lassen sich Rasterdaten von Bildplänen problemlos mit anderen Verfahren kombinieren oder ergänzen. So können exakte Kontur- und Einzelpunkteinmessungen (Nivellements, Einzelfunde), beispielsweise einer tachymetrischen Messung, in einer geeigneten CAD-Umgebung mit einem Bildplan in einer hybriden Datei kombiniert werden. Andersherum können auch händische Ergänzungen, wie beispielsweise materialspezifische Signaturen, auf ausgedruckten Arbeitsplänen oder transparenten Deckblättern hinzugefügt werden (Abb. 3).

3.2 Messgenauigkeit und Arbeitsaufwand

Das ermittelte Verhältnis von Arbeitszeit zu Messgenauigkeit wird in den folgenden Punktdiagrammen dargestellt: In diesen sind die Standardabweichungen auf der x-Achse und die benötigten Arbeitszeiten auf der y-Achse eingetragen (Abb. 4 und 5). Eine Methode eignet sich besonders gut, wenn sie dem Ursprung des Diagramms möglichst nahe liegt. Die Standardabweichung einiger Verfahren ließ sich im Feldversuch nicht überprüfen und musste anderweitig ermittelt werden: solche Datenpunkte sind in hellerem Grau wiedergegeben.⁸ Die einzelnen Messergebnisse und Berechnungen finden sich als separater Anhang im Internet unter <http://home.arcor.de/tilman.wanke/Anhang.pdf>.

Um die Eignung einzelner Messverfahren differenzierter beurteilen zu können, werden zwei Stufen der Befundaufnahme unterschieden:

Stufe 1:

Weitgehend steingerechte Aufnahme der Mauer ohne Versturzschnitt: Diese Stufe entspricht den oben aufgestellten Mindestanforderungen für die zeichnerische Befunddokumentation.

Stufe 2:

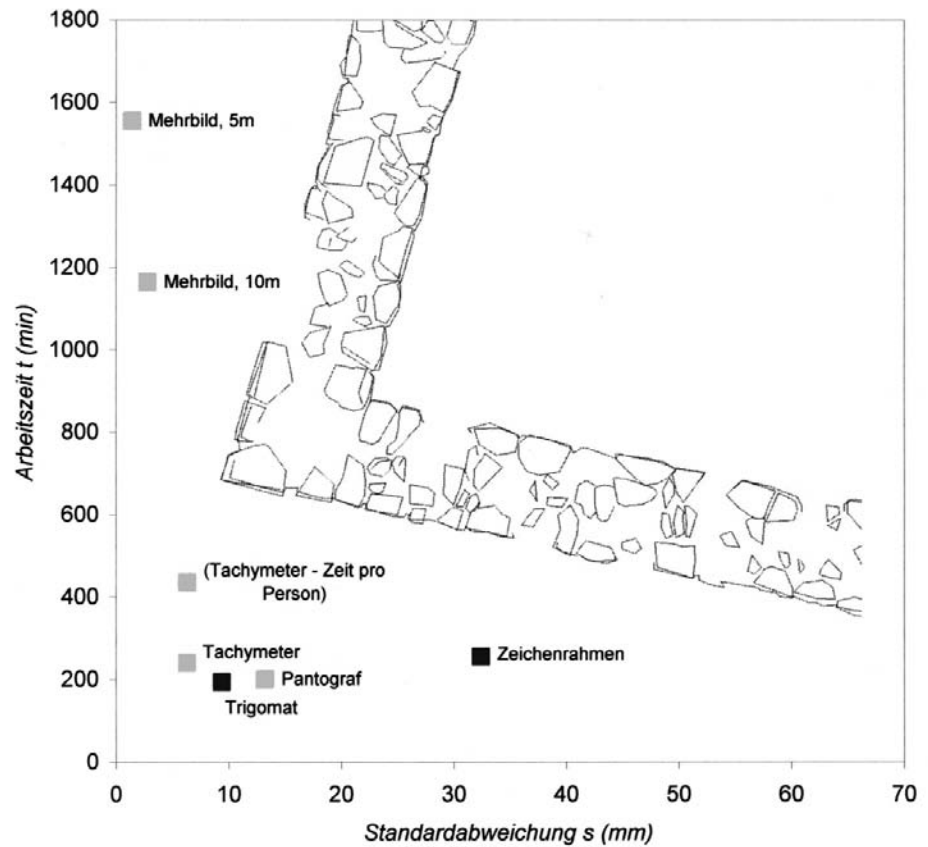
Steingerechte Aufnahme der gesamten Testfläche: Eine Dokumentation in dieser Stufe enthält das Optimum an Information, wobei bei den meisten Verfahren der Arbeitsaufwand extrem groß wird.

Während die festgestellten Abweichungen bei den meisten Methoden primär von den verwendeten Geräten abhängig sind, ist bei der Erstellung von Bildplänen vor allem die Aufnahmekonfiguration (insbesondere das Verhältnis von Aufnahmehöhe zu Objektbreite) relevant. Daher sind in Abbildung 5 Datenpunkte für acht Bildpläne wiedergegeben, die mit verschiedenen vielen Aufnahmen aus verschiedenen Höhen mit zwei unterschiedlichen Entzerrungsprogrammen erstellt wurden (Tab. 2).

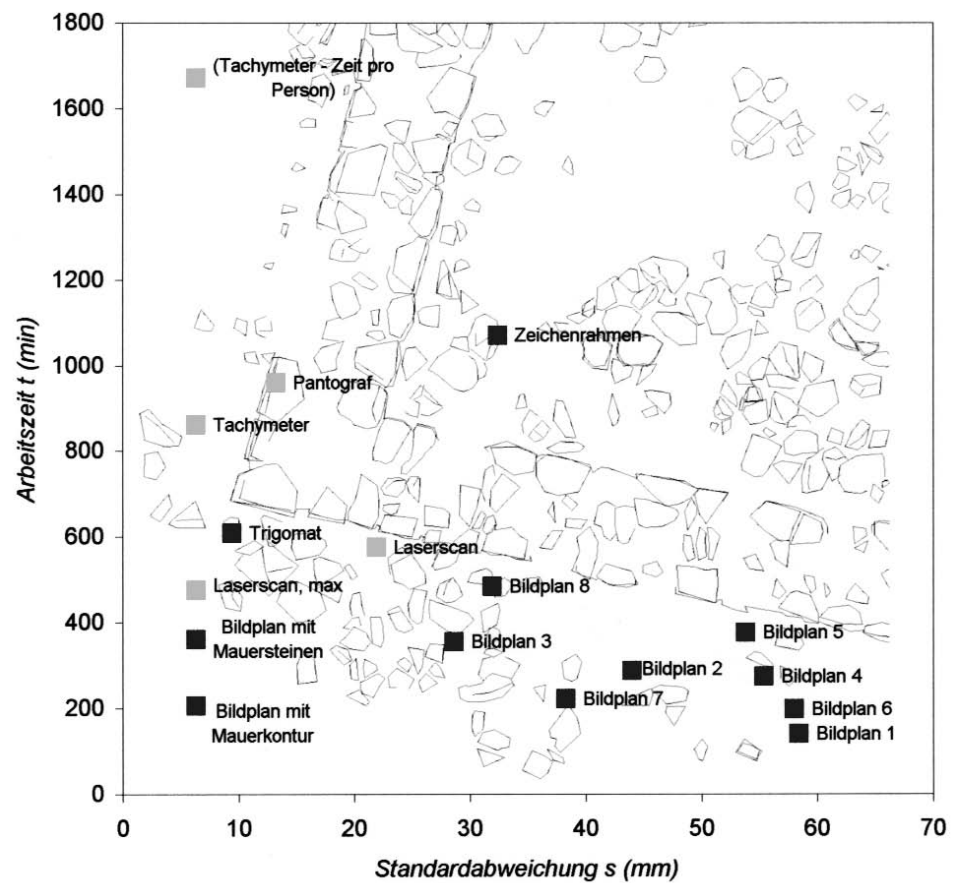
3.3 Beurteilung der einzelnen Verfahren

Der Zeichenrahmen (auch „Messrahmen“) ist eher eine Zeichenhilfe als ein eigenes Verfahren. Bei der Untersuchung zeigte sich, dass zwar der Zeitaufwand bei der Aufnahme der *in situ* erhaltenen Mauer (Stufe 1) vergleichbar mit den anderen Verfahren ist, jedoch die festgestellten Messfehler recht hoch sind. Der Messfehler beruht im Wesentlichen in der optischen Verschiebung zwischen dem Befund und dem

4
Zeit und Genauigkeitsdiagramm
Stufe 1 – Mauer steingerecht
ohne Versturzschtutt



5
Zeit und Genauigkeitsdiagramm
Stufe 2 – Mauer und Versturzschtutt steingerecht



darüber schwebenden Messgitter bei einer schrägen Betrachtungsposition (Schrägpeilung). Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist primär vom Höhenunterschied zwischen Zeichenrahmen und Messpunkt und damit dem Relief des Befundes abhängig. Für die flächenhafte, steingerechte Aufnahme des Schuttes (Stufe 2) wäre zudem die Arbeitszeit unverhältnismäßig hoch. Für die stärker reliefierten Befunde auf der Testfläche war der Zeichenrahmen insgesamt eher ungeeignet. Dieses Ergebnis muss allerdings relativiert werden: Der getestete Rahmen war nur einfach bespannt und war mit 2 m x 1 m recht unhandlich. Bei einem doppelt bespannten Rahmen wäre die erzielbare Genauigkeit höher und durch höhenverstellbare Standbeine ließe sich die Einrichtung somit auch die Gesamtarbeitszeit merklich beschleunigen.

Dreidimensional messende Fotogrammetriesysteme sind insgesamt schwer zu beurteilen: Zumindest das hier getestete System zur Mehrbildauswertung erwies sich als ungeeignet. Von der theoretisch erreichbaren Genauigkeit ausgehend genügt die Mehrbildauswertung zwar den höchsten Ansprüchen. Bei der Computerauswertung der Untersuchungsmessung zeigte sich jedoch ein großer Nachteil: Nachdem die Messbilder direkt über den am Objekt gemessenen Passpunkten orientiert sind, finden die eigentlichen Messungen indirekt am Rechner statt. Dabei kann es zu Problemen bei der Signalisierung⁹ eines Messpunktes in den verschiedenen Messbildern kommen. Die Konturkante eines Bruchsteines kann auf einem Messbild eindeutig erscheinen und auf dem nächsten nicht wieder auffindbar sein, wodurch die Messung unmöglich wird. Außerdem mag zwar die Arbeitszeit auf der Fläche gering sein, diese Zeiterparnis wird jedoch durch eine vielfach längere Arbeitszeit bei der Auswertung zunichte gemacht. Vor der Anwendung eines solchen Systems sollte also gründlich überlegt werden, ob die Arbeitskraft nicht doch besser vor Ort am Befund einzusetzen ist. Andere Erfahrungen hat das nun aufgelöste Landesdenkmalamt Baden-Württemberg bei der Dokumentation der Befunde von Oberndorf-Bochingen gemacht. Hier wurde in den vergangenen Jahren eine Kombination aus stereofotogrammetrischer Auswertung und Bildplänen entwickelt.¹⁰ Der große Vorteil wurde hier im Zeitgewinn auf der Fläche gesehen.¹¹ Allerdings war in diesem Fall – durch die Zusammenarbeit der Abteilung Archäologische Denkmalpflege mit dem Referat 35, Fotogrammetrie – die besondere arbeitsorganisatorische Voraussetzung gegeben, dass der Aufgabenbereich Messung und Auswertung weitgehend von der Arbeit auf der Fläche separiert war und damit die Feldarbeit stark entlastet wurde.

Obwohl die Messzeit vor Ort, die resultierende Messdatendarstellung im farbigen 3D-Modell und die erreichbare Genauigkeit beeindruckend sind, bieten sich 3D-Scanverfahren bisher nicht als ausschließliche Dokumentationsmethode auf archäologischen Grabungen an. Neben den hohen Anschaffungskosten und der recht langen Computerarbeitszeit bei der Auswertung spricht vor allem die eingeschränkte Modellierbarkeit der Messergebnisse dagegen: Der automatisierte Messvorgang bietet keine Möglichkeit notwendige, zusätzliche Informationen (materialspezifische Signaturen, verdeutlichende Konturlinien, Befund- und Fundnummern

etc.) aufzunehmen. Das Einfügen dieser Informationen oder die Kombination mit entsprechenden anderen Methoden ist verhältnismäßig arbeitsaufwändig. Zudem wäre dieser Arbeitsschritt erst nach Abschluss der Auswertung und keinesfalls direkt am Befund möglich. Allerdings gibt es mittlerweile erste Softwareprodukte auf dem Markt, mit denen eine Modellierung von Scandaten speziell für die Anwendungen in der Denkmalpflege ermöglicht wird. Wenn die reine Geometriedarstellung genügt, sind Scanverfahren optimal geeignet. Die sich aus einer Scanaufnahme ergebenden Möglichkeiten der Visualisierung und Präsentation eröffnen beispielsweise für die Öffentlichkeitsarbeit neue Wege.¹²

Für die steingerechte Aufmessung der Mauerkrone (Stufe 1) haben sich bei der Untersuchung vor allem der Tachymeter, der Pantograf und der Trigomat bewährt. Den mit diesen Verfahren erstellten Konturlinienplänen lassen sich zudem gut zusätzliche Informationen wie Kodierungen oder Signaturen hinzufügen, indem diese entweder direkt bei der Messung aufgenommen werden oder anschließend auf einem Arbeitsplan manuell eingetragen werden (Abb. 3). Ein wichtiger Arbeitsschritt bei diesen Verfahren ist die Überprüfung der Messergebnisse am Objekt: Gerade wenn die Darstellung der Messung nicht direkt vor Augen des Messenden erzeugt wird, lassen sich in der praktischen Arbeit Fehlstellen bei der Aufnahme kaum vermeiden. „Weiße Flecken“ auf der Kartierung können nur am Befund entdeckt und getilgt werden.

Bei der tachymetrischen Aufnahme muss für eine ausreichende Genauigkeit ein Miniprisma auf einem möglichst kurzen Halter (Empfehlung: unter 20 cm) mit Dosenlibelle verwendet werden, da sonst der Lotungsfehler zu groß werden kann. Die Arbeitszeit mit dem Tachymeter steigt im Vergleich zu den anderen Methoden bei einer höheren Anzahl von Messpunkten beträchtlich an: Nach den Ergebnissen auf der Testfläche wird der Tachymeter schon bei Messungen ab 1000 Punkten (die Maueraufnahme bestand aus ca. 1800 Einzelmessungen) im Verhältnis zu Trigomat und Pantograf unökonomisch. Für die steingerechte Aufnahme der gesamten Testfläche (Stufe 2 – hier wären knapp 10000 Einzelmessungen notwendig gewesen) ist das Verfahren aufgrund der hohen Arbeitszeit sogar ungeeignet. Unerlässlich für die Aufnahme detaillierter Befunde ist eine Software, die eine automatisierte Planerstellung unterstützt. Bei der Arbeitszeit ist zudem zu beachten, dass für die Messung am Objekt zwei Personen notwendig sind. Eine reflektorlose Messung ohne zweite Person wäre auf der Testfläche zumindest problematisch gewesen: Bei stärker reliefierten Befunden ist ein großer Teil der notwendigen Messpunkte durch andere Befunde verdeckt. Da bei einer solchen Aufnahme jedoch eine automatisierte Planzeichnung notwendig ist, wäre eine Messung von verschiedenen Gerätestandpunkten aus nicht möglich. Die andere Möglichkeit, die zweite Person zu sparen, wäre die Verwendung eines motorisierten Tachymeters mit automatischer Zielerfassung. Diese sinnvolle Variante ist allerdings mit erheblich höheren Anschaffungskosten verbunden. Ein weiterer Nachteil der tachymetrischen Aufnahme besteht in der Unsichtbarkeit der Messung während des Messvorganges: Fehlstellen und Doppelmessungen fallen erst bei der Auswertung am Rechner auf. Abhilfe bieten hier

Online-CAD-Programme, bei denen die Messungen direkt vom Tachymeter auf ein angeschlossenes Notebook gespielt und in CAD dargestellt werden, sowie die neueren Geräte mit grafischer Anzeige. Trotz dieser Einschränkungen eignet sich der Tachymeter noch für die steingerechte Aufnahme der Mauer entsprechend Stufe 1.

Der Pantograf lieferte sowohl für die Aufnahme der Mauer als auch der gesamten Testfläche brauchbare Ergebnisse: Die Arbeitszeit lag unter der des Tachymeters, allerdings auch die Genauigkeit. Bei einem gut justierten Gerät kann der mechanische Messfehler vernachlässigt werden. Nach Herstellerabgabe liegt dieser unter 0,2 mm.¹³ Allerdings ist eine Dejustierung selten feststellbar, so können sich trotz korrekt eingestelltem Eichstrich beispielsweise durch Änderungen der Schnurlängen schnell und unerkannt Fehler einstellen, wie sich leider auch bei diesem Feldversuch zeigte. Ebenso können beim Abfahren der Objektkonturen (Lotungsfehler) und durch Abweichungen von der Zeichenebene (Fehlerdreieck) Fehler entstehen. Eine stumpfe Bleistiftmine und ein entsprechend breiter Strich in der Darstellung verursachten weitere Ungenauigkeiten.¹⁴ Die Überarbeitung der Rohzeichnungen muss am Befund stattfinden, da diese sonst stark verfremdet werden. Mit einem gut justierten Gerät und einer sehr sorgfältigen Aufnahme und Überarbeitung lassen sich auch mit einem Gerät im Maßstab 1:20 ausreichend genaue, weitgehend steingerechte Aufnahmen in angemessener Zeit anfertigen.

Ein sehr gutes Ergebnis bei der steingerechten Maueraufnahme lieferte das Trigomatsystem: Bei der geringsten Arbeitszeit lag die Genauigkeit nur knapp hinter der des Tachymeters. Allerdings ist die erzielbare Darstellung als digitaler Vektorplan nicht so detailliert, wie eine überarbeitete Pantografaufnahme. Systemeigene Messfehler sind bei diesem Gerät minimal. Abweichungen, die durch ein zusätzliches Ausziehen der Maßbänder bei Wind entstehen, sind entsprechend der Ergebnisse bei leichtem Wind ebenfalls zu vernachlässigen. Die größten Abweichungen dürften auch hier durch Lotungsfehler und unsauberes Abgreifen der Messpunkte entstehen. Ein Schwachpunkt des Systems für den Feldeinsatz stellt das notwendige Notebook dar: Bei normalem Tageslicht kann ein LCD-Bildschirm schlecht lesbar sein, ferner ist ein normaler Laptop sehr feuchtigkeitsanfällig. Zudem wurde das DOS-basierte Trigomatprogramm zu einem Opfer der Softwareentwicklung. Unter Windows XP läuft es aufgrund von Problemen mit der seriellen Schnittstelle nicht mehr und eine Windowsversion ist laut Hersteller zwar in der Entwicklung, eine marktfähige System aber gegenwärtig nicht in Aussicht.¹⁵ Gegen deren Verwendung auf älteren Betriebssystemen spricht jedoch nichts, solange die Geräte noch vorhanden sind. Die Ausgabe der kodierten Messdaten in DXF-Format für eine Weiterverarbeitung und Speicherung in CAD ist problemlos möglich.

Für die steingerechte Darstellung der gesamten Testfläche (Stufe 2) ist, soweit eine ausreichende Genauigkeit erreicht wird, die fotogrammetrische Einbildauswertung und deren Darstellung als Bildplan mit Abstand am besten geeignet. Dies liegt an der geringen Gesamtarbeitszeit und dem Detaillierungsgrad der erzielbaren Darstellung. Die Arbeitszeit

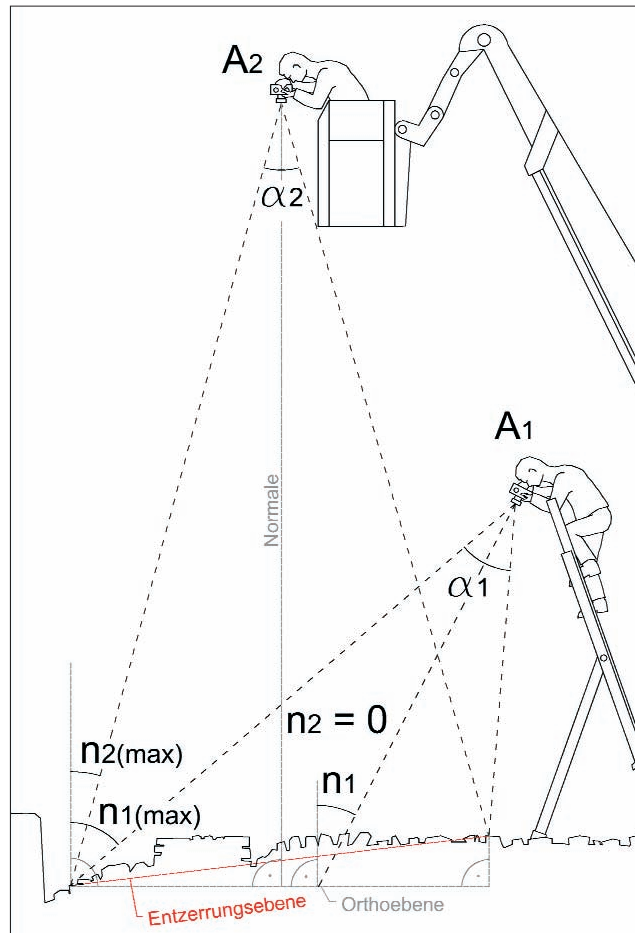


6
Hybrider Plan. Kombination
aus Bildplan und Vektordaten
im Maßstab 1:30)

hängt primär von der Anzahl der angefertigten Messaufnahmen ab, da bei der Auswertung für jedes Bild die Entzerrung und Referenzierung separat durchgeführt werden muss. Der technische Aufwand einer Aufnahme aus größerer Höhe und damit einer größeren Aufnahmefläche pro Bild lohnt sich aufgrund der wesentlich geringeren Arbeitszeit bei der Computerauswertung. Bei der Untersuchung erzielten einzelne Messbilder innerhalb der aus mehreren Aufnahmen zusammengesetzten Bildpläne recht hohe Genauigkeiten. Da die Genauigkeit von der Aufnahmekonfiguration und den Eigenschaften der Befunde abhängig ist, lässt sich diese einschätzen und durch geeignete Maßnahmen regulieren. Wie oben schon angedeutet, lässt sich auch durch die Kombination mit anderen Messungen die Genauigkeit eines Bildplanes verbessern: Einzelmessungen relevanter Objektbereiche, wie zum Beispiel eine steingerechte Maueraufnahme oder nur die genaue Messung der Mauerkontur, lassen sich in einem hybriden Plan einfach über den ungenaueren Bildplan legen. Auf einem solchen Plan sind alle Befunde fotografisch genau wiedergegeben und zusätzlich relevantere Bereiche durch präzise Konturmessungen erfasst (Abb. 6). Neben der möglichen Zeitersparnis liegt der große Vorteil der Einbildauswertung in der flächenhaften und steingerechten Darstellung der Befunde auf Bildplänen. Anders als mit den nachzeichnenden Methoden lassen sich auf diesen sehr komplexe Befunde in kürzester Zeit dokumentieren. Das Messverfahren ist dabei grundsätzlich verschieden: Die Oberflächentextur – und dadurch bei ausreichendem Kontrast auch indirekt die Konturlinien – wird durch eine fotografische Aufnahme vollständig erfasst. Dadurch ist die Darstellungsweise immer sehr detailliert, steingerecht und enthält wesentlich mehr Informationen als ein Konturenplan.¹⁶

4 Genauigkeit der Einbildauswertung

Wegen der guten Eignung der Einbildauswertung für die Dokumentation soll hier etwas genauer auf Fehlerursachen und deren Minimierung in der Arbeitspraxis eingegangen werden. Theoretisch ist die Einbildauswertung nur für die Vermessung ebener Objekte geeignet, allerdings lässt sich die Genauigkeit bei Aufnahmen nicht-ebener Objekte anhand der Aufnahmekonfiguration abschätzen und regulieren: Das Problem sind die hohen zu erwartenden Messabweichungen bei der Aufnahme von unebenen Objekten. Gegenüber diesen als „Lageversatz nicht-ebener Punkte“ bezeichneten Abweichungen fallen andere Fehlerursachen wie Linsenfehler oder Objektmessgenauigkeit kaum ins Gewicht. Dieser Lageversatz sowie die Kippung der Befunde auf dem Bildplan lassen sich durch die Annäherung an die optimale Entzerrungsebene, eine ausreichende Aufnahmehöhe (Verhältnis von Aufnahmehöhe zu Bildbreite) und vor allem eine senkrechte Aufnahmeposition minimieren (Abb. 7, 8a und b). Der Lageversatz nicht-ebener Punkte wird durch zwei Parameter bestimmt: zum einen durch die Abweichung Δh des Messpunktes von der Entzerrungsebene und zum anderen durch den Abweichungswinkel η zwischen dem Bildstrahl und der Abbildungsnormalen. Die Summe aller Abweichungen Δh ist minimal, wenn die Entzerrungsebene dem mittleren Niveau der Befunde entspricht. Deshalb müssen die Kontroll- oder Fotogrammetriepunkte, mit denen die Entzerrungsebene definiert wird, auf die mittlere Höhe der Befunde gelegt werden. Weichen sie von dieser ab, so wird die gesamte Messung dadurch verfälscht. Gegebenenfalls müssen für verschiedene Niveaus auch verschiedene Entzerrungsebenen angelegt werden. Der Abweichungswinkel η kann durch die Wahl des Bildausschnittes verringert werden: Die Aufnahmeachse soll möglichst der „Normalen“ – der Mittelsenkrechten auf der Orthoebene – entsprechen und der Abbildungswinkel α – der Winkel zwischen den äußeren Bildstrahlen am Objektiv – möglichst gering sein. Dies lässt sich durch die Verwendung eines Objektivs mit hoher Brennweite (Telebereich – zur Verringerung des Abbildungswinkels) sowie einer Hebebühne mit ausgreifendem Arm (Aufnahmeposition auf der Normalen) mit entsprechend größerer Arbeitshöhe (damit trotz kleinen Abbildungswinkels der Bildausschnitt nicht zu klein wird) bewerkstelligen.



7
Verschiedene Aufnahmekonfigurationen bei der Einbildauswertung

Die für eine bestimmte Genauigkeit notwendige Höhe für eine Orthoaufnahme lässt sich anhand des Aufnahmebereiches und der im Befund vorhandenen Höhenunterschiede sogar annäherungsweise berechnen.¹⁷ Bei einer angenommenen maximalen Höhenabweichung Δh der Befunde von der Entzerrungsebene von ± 20 cm lässt sich die Standardabweichung bei einer Orthoaufnahme mit einem 100 mm-Teleobjektiv auf ≤ 25 mm reduzieren. Dies entspricht einer



8a und 8b
Kippung und Lageversatz nicht ebener Punkte. Links ein entzerrtes Foto aus annähernd Orthoposition. Rechts der selbe Ausschnitt aus einer entzerrten Schrägaufnahme

Megapixel	Pixel	Bildmaße (cm) bei 300dpi	M 1:10	Objektgröße (m) M 1:20	M1:50
3,1	2048 x 1536	17,3 x 13,0	1,7 x 1,3	3,5 x 2,6	8,7 x 6,5
3,8	2270 x 1700	19,2 x 14,4	1,9 x 1,4	3,8 x 2,9	9,6 x 7,2
4,3	2400 x 1800	20,3 x 15,2	2,0 x 1,5	4,1 x 3,0	10,2 x 7,6
5,0	2592 x 1944	21,9 x 16,5	2,2 x 1,6	4,4 x 3,3	11,0 x 8,2
5,8	2990 x 1940	25,3 x 16,4	2,5 x 1,6	5,1 x 3,3	12,7 x 8,2
6,2	3008 x 2000	25,5 x 16,9	2,5 x 1,7	5,1 x 3,4	12,7 x 8,5

Tabelle 3
Zusammenhang von Bildgröße,
Maßstab und Objektgröße

notwendigen Aufnahmehöhe von knapp dem dreifachen (2,83fachen) der Breite des auf dem Messfoto abgebildeten Objektes.¹⁸

Als Linsenfehler (auch „radial symmetrische Verzeichnung“) wird die kissenförmige Verzeichnung der Aufnahme durch das Objektiv bezeichnet.¹⁹ Generell gilt, dass höherwertige Objektive (Wechselobjektive mit festen Brennweiten sind besser als Zoom-Objektive) und vor allem Aufnahmen im Telebereich einen geringeren Linsenfehler aufweisen. Bessere Entzerrungsprogramme ermöglichen eine Verzeichnungskorrektur, mit der sich der Linsenfehler zumindest reduzieren lässt.

Die Messgenauigkeit im Messbild ist bei scharfen Aufnahmen von der Auflösung der Aufnahme abhängig. Diese wiederum muss für die Wiedergabe als Bildplan bestimmten Anforderungen entsprechen. Für publizierbare Druckvorlagen von Pixelgrafiken muss mindestens eine Auflösung von 300 dpi erreicht werden.²⁰ Für einen Tintenstrahldruck von Arbeitsplänen genügen auch 75 dpi. Der Zusammenhang von Auflösung und Objektgröße (Größe des fotografierten Bereiches am Objekt) ist in der Tabelle 3 zusammengestellt: Bei Bildplänen mit einer Auflösung von 300 dpi kann der Bildmessgenauigkeit beruhende Fehler vernachlässigt werden: Bei einer scharfen Aufnahme liegt dieser im Subpixelbereich, was im Wiedergabemaßstab 1:20 einer Abweichung von $\leq 1,6$ mm entspricht.

5 Zusammenfassung

Für die zeichnerische Dokumentation der detaillierten, dreidimensionalen Baubefunde der Testfläche lieferten die Bildpläne das beste Ergebnis: Diese lassen sich in kürzester Arbeitszeit erstellen, sind gut handhabbar und liefern die detaillierteste Darstellungsweise. Die Messgenauigkeit eines Bildplanes von dreidimensionalen Befunden lässt sich aufgrund der Aufnahmebedingungen einschätzen und regulieren. Falls nötig, können dem Bildplan notwendige Zusatzmessungen hinzugefügt und so die Genauigkeit an relevanten Bereichen verbessert werden. Bei Beschränkung auf die steingerechte Aufnahme der *in situ* erhaltenen Baubefunde (und dem Verzicht auf den ungeordneten Versturzschnitt) erwiesen sich – in dieser Reihenfolge – der Trigomat, der Pantograf (Aufnahmemaßstab 1:20) und mit deutlich höherer Arbeitszeit auch noch der Tachymeter als geeignete Verfahren. Dieses Ergebnis gilt allerdings primär für die komplexen Befunde der Testfläche und lässt sich nicht ohne weiteres auf andere Situationen übertragen: So wird es auf großflächigen Siedlungsgrabungen mit Erdbefunden kaum eine Alternative zur tachymetrischen Aufnahme geben. Grundsätzlich gilt, dass vor jeder Dokumentationsaufgabe überlegt werden muss, welche relevanten Informationen wie am besten aufgenommen und dargestellt werden können. Für eine solche Beurteilung liefert der hier vorgestellte Vergleich anhand eines ausführlichen Beispiels eine methodische Grundlage.

Tilman Wanke, Dipl. Ausgrabungsingenieur (FH)
Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Referat B IV (Ober- und Unterfranken)
Schloss Seehof
D-96117 Memmelsdorf

Anmerkungen

- 1 WANKE 2003
- 2 Neben anderen sind hier die Befunde auf den Ausgrabungen der villa rustica von Oberndorf-Bochingen (vgl. SOMMER 2001b), in Rottweil (vgl. SOMMER 2003) oder in Nassenfels (vgl. HÜSSEN 2003) zu nennen.
- 3 SOMMER 2001b, S. 117–120
- 4 Hier lassen sich vor allem aus „Sondersteinen“ relevante Aussagen ziehen. Gemeint sind damit besonders bearbeitete oder geformte Steine, die auf architektonische Details hinweisen. Diese müssen lagegenau und exakt eingemessen werden. Beispielsweise können Keilsteine im Schutt die Existenz von Bögen anzeigen, aus denen sich die ungefähre Lage und das Aussehen von Türen und Fenstern rekonstruieren lassen, vgl. SOMMER 2003.
- 5 Bei einigen Verfahren wurde nur ein Teil der Gesamtfläche gemessen und die Arbeitszeit anschließend auf die Gesamtfläche hochgerechnet, vgl. Anhang II unter <http://home.arcor.de/tilman.wanke/Anhang.pdf>.
- 6 Die Standardabweichung (Streuungsmaß) s wird in der statistischen Fehlertheorie (sowie bei Genauigkeitsangaben von Herstellern) generell für die Beschreibung der Präzision einer Messung oder eines Verfahrens verwendet. Daher baut die Auswertung auch auf diesem Wert auf. Zum Verständnis des Zahlenwertes: Die zu erwartenden Abweichungsbeträge liegen mit einer Wahrscheinlichkeit von $p = 0,7$ innerhalb des Streumaßes, vgl. HENNECKE et al. 1994, S. 306–309.
- 7 Der Begriff „Kote“ bezeichnet in der Geodäsie einen punktuellen Höhenwert, auf Grabungen wird meist (der nicht ganz korrekte) Begriff „Nivellement“ verwendet.
- 8 Die Tachymetermessung diene als Verifikationsmessung und konnte nicht mit sich selbst verglichen werden. Der verwendete Pantograf war leider stark dejustiert, was sich erst bei der Auswertung nach der Feldarbeit zeigte. Die Bildverbände der Mehrbildauswertung erwiesen sich ebenfalls erst nach der Feldarbeit als ungenügend, und der Laserscan erfasste die Referenzpunkte nicht. Die hier wiedergegebenen Standardabweichungen für diese Verfahren beruhen auf den Genauigkeitsangaben der Gerätehersteller, kombiniert mit einer Fehlerberechnung für die Bedingungen auf der Testfläche (Entfernungsabweichung und Fehler bei der Punktsignalisierung), vgl. Anhang I unter <http://home.arcor.de/tilman.wanke/Anhang.pdf>.
- 9 Mit „Signalisierung“ ist hier das manuelle Anmessen eines Punktes bei der fotogrammetrischen Auswertung am Rechner gemeint.
- 10 Vgl. DENDLER 2001 und SOMMER 2001a
- 11 DENDLER 2001, S. 87
- 12 Die Diskussion über die Anwendung und den Nutzen von auf Scans basierenden 3D-Modellen in der Denkmalpflege und Archäologie ist immer noch in vollem Gange, wie auch jüngst die Tagung von Handaufmaß bis Hightech II vom 24.–26.02.2005 an der BTU Cottbus zeigte.
- 13 Frdl. mündl. Mitteilung von Herrn Eichstädt, 2003
- 14 Eine Strichstärke von 1 mm kann schnell erreicht werden. Im Maßstab 1:20 lässt eine solche Konturlinie einen Spielraum von 2 cm.
- 15 Frdl. mündl. Mitteilung von Herrn Balck, 2005
- 16 Umgekehrt bringt das manuelle Vektorisieren eines Bildplanes einen erheblichen Informationsverlust bei einem stark erhöhten Arbeitsaufwand mit sich. Dieses Verfahren sollte also nur angewendet werden, wenn die Wiedergabe als Bildplan aufgrund einer mangelnden Bildqualität unmöglich ist.
- 17 S. Anhang I, S. 5–6 unter <http://home.arcor.de/tilman.wanke/Anhang.pdf>.
- 18 Entsprechende Ergebnisse wurden bei Einzelbildern, die den Anforderungen an die Aufnahmekonfiguration entsprachen, auch auf dem Feldversuch erzielt – vgl. die Abweichungstabellen im Anhang III unter <http://home.arcor.de/tilman.wanke/Anhang.pdf>. Tabelle A21, S. 19, Tabelle A25, S. 20, Tabellen A28, A32, A33, A34, A35, S. 21 und A36, S. 22 sowie Tabellen A57, S. 27 und A61, S. 28.
- 19 Bei Verwendung einer Messkammer, also einer kalibrierten Kamera mit entsprechendem Objektiv, sind die Verzeichnungsparameter bekannt und können eliminiert werden.
- 20 Diese Anforderung wurde beispielsweise auch für die Abbildungen in dieser Publikation gestellt. Eine Vorlagenauflösung von 300 dpi eignet sich noch für ein 80er-Druckraster (mit 80 Linien pro cm), wie es für Hochglanzmagazine gebräuchlich ist (vgl. GRAEFEN 2001, S. 171–173 und MARCHESI 2003, S. 18).

Literatur

- DENDLER 2001
Martin Dendler, Photogrammetrische Dokumentationsmethoden – Stereoauswertung und digitale Bildpläne. In: Vom Messbild zur Bauanalyse. 25 Jahre Photogrammetrie im Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, hrsg. v. Günter Eckstein, Birgit Hach, Anette Siefert (Arbeitsheft 9 Landesdenkmalamt Baden-Württemberg). Stuttgart 2001, S. 85–94
- GRAEFEN 2001
Daniel Graefen, DTP druckreif. Professionell vom Bildschirm zum Print. o.O. 2001
- HENNECKE et al. 1994
Fritz Wennecke, Gerhard Müller, Hans Werner, Michael Möser, Günther Möbius, Helfried Potthoff, Hans-Ulrich Schulz (Hrsg.), Handbuch Ingenieurvermessung, Bd. 1 Grundlagen, 2. Aufl. Heidelberg 1994
- HÜSSEN 2003
Claus-Michael Hüssen, Eine Villa suburbana in Nassenfels. In: Das archäologische Jahr in Bayern 2002. Stuttgart 2002, S. 63–64
- MARCHESI 2003
Jost J. Marchesi, Digital Photokollegium, Bd. 1: Ein Lehrgang über Theorie und Grundlagen der digitalen Fotografie. Gilching 2003
- SOMMER 2001a
C. Sebastian Sommer, Aufgabenstellung bei der Dokumentation archäologischer Befunde. In: Vom Messbild zur Bauanalyse. 25 Jahre Photogrammetrie im Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Günter Eckstein, Birgit Hach, Anette Siefert (Arbeitsheft 9 Landesdenkmalamt Baden-Württemberg). Stuttgart 2001, S. 79–84
- SOMMER 2001b
C. Sebastian Sommer, Ein großes landwirtschaftliches Nebengebäude in Oberndorf-Bochingen, Kreis Rottweil. Aspekte der römischen Architektur. In: Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 200. Stuttgart 2001, S. 117–121
- SOMMER 2003
C. Sebastian Sommer, Eine umgestürzte Wand mit Tür im Bau M in Rottweil/Municipium Arae Flaviae. In: Fundberichte aus Baden-Württemberg 25, 2001. Stuttgart 2003, S. 479–536
- WANKE 2003
Tilman Wanke, Dokumentation von Mauerverstürzen und Mauerstümpfen. Unveröffentlichte Diplomarbeit, vorgelegt an der FHTW-Berlin 2003

Abbildungsnachweis

- Abb. 1–2b, 4–8b Tilman Wanke
Abb. 3 Mit freundlicher Genehmigung LDA Baden-Württemberg