

Hyperspektrale und photogrammetrische Datenaufnahme am ehemaligen Zisterzienserkloster Wörschweiler

JENS BRAUNECK¹ & HERIBERT FELDHAUS²

Zusammenfassung: Für vergleichbare Restaurierungsmaßnahmen werden an einem überschaubaren Bauteil des Klosters Wörschweiler die Möglichkeiten der zwischenzeitlich neu entwickelten digitalen Aufnahmemethoden verglichen. Hintergrund ist darüber hinaus der Wunsch eines vollständigen Rekonstruktionsmodells des Klosters, das zwischen Bestand und Rekonstruktion unterscheiden soll und bei dem die vorhandene Bestandsaufnahme an ihre Grenzen stößt. Ausgewählt wurde die ca. 5 m aufrecht stehende Südwand des südlichen Seitenschiffs. An ihr sind seit dem 19. Jahrhundert zahlreiche mittelalterliche Grabsteine aus dem Kloster aufgestellt, die 2003 bis 2005 umfangreich restauriert wurden. Diese dienen als Experimentierfeld für hyperspektrale Untersuchungen im Nahbereich. Dabei stehen zunächst die Erfassung der aktuellen Situation sowie die Klassifizierung der verwendeten Baumaterialien aufgrund der Aufnahmen im Vordergrund.

1 Einleitung

Seit jeher beäugen historische Fachdisziplinen neue Techniken zunächst einmal mit Neugier, aber auch einer gewissen Skepsis. Das betrifft auch das Verhältnis zwischen Bauforscher und Vermessern resp. Vermessungsingenieuren. Die Mitte/Ende der 1980er Jahre aufkommenden berührungsfrei messenden Tachymeter wurden zunächst despektierlich als „moderne Zauberbesen“ bezeichnet, und doch haben sie die Bauaufnahmepraxis entscheidend verändert und bei richtigem Einsatz zu einer Qualitätssteigerung der Bauaufnahmen geführt. Besonders unversöhnlich schienen die Positionen angesichts der in den 1990er Jahren anwendungsreifen 3D-Scanner, die im Wesentlichen wohl auf einem gegenseitigen Missverstehen der Anforderungen bzw. Möglichkeiten und Grenzen beruhten. In Hinblick auf die Möglichkeiten der schnellen und vermeintlich umfassenden Datenerfassung durch 3D-Scanner forderte Manfred Schuller im Jahr 2000 „Mehr denken, statt nur messen“ (SCHULLER 2001). Wenig später bestand weitgehender Konsens darüber, dass sich auch die historische Bauforschung nicht den neuen Aufnahmeverfahren verschließen kann und sollte, wie zahlreiche in Kooperation ausgeführte Anwendungsbeispiele belegten. Die Versprechungen hinsichtlich der Qualitätssteigerung und Ökonomisierung müssen jedoch immer wieder einer kritischen Prüfung unterzogen werden. Die Frage ist nicht *ob*, sondern *wie* die Methoden in den Prozess der Bauforschung einbezogen werden können, wo sie Sinn machen und wo ihre Grenzen liegen.

Vor diesem Hintergrund werden aktuell Forschungen an der Klosterruine Wörschweiler (Abbildung 1) bei Homburg/Saar durchgeführt, die in den Jahren 2009-14 umfassend instand gesetzt wurde (LANDESDENKMALAMT SAARLAND 2015). Neue Aufnahmemöglichkeiten werden am konkreten Objekt erprobt und mit der bisherigen Praxis verglichen, um Erkenntnisse für

¹ TU Kaiserslautern, FB Bauingenieurwesen, Lehrgebiet Vermessungskunde und Geoinformation, Paul-Ehrlich-Str. 14, D-67663 Kaiserslautern, E-Mail: jens.brauneck@rhrk.uni-kl.de

² Büro für Bauaufmaß und Bauforschung, Auf Sprung 15, D-54292 Trier, E-Mail: info@bauaufmass.eu

vergleichbare Restaurierungsmaßnahmen zu erhalten. Dabei werden auch die möglichen Verknüpfungen mit der Bauforschung und Restaurierung betrachtet. Für den Methodenvergleich wurde zunächst als überschaubares Bauteil die ca. 5 m aufrecht stehende Südwand des südlichen Seitenschiffs ausgewählt. Sie weist zum einen zahlreiche Befunde des ehemals vorgelagerten Kreuzgangs auf und ist damit von besonderem Interesse für die Bauforschung. Zum anderen sind an ihr seit dem 19. Jahrhundert mittelalterliche Grabsteine aus dem Kloster aufgestellt, die 2003 bis 2005 umfangreich restauriert wurden. Diese dienen als Experimentierfeld für ebenfalls durchgeführte hyperspektrale Untersuchungen im Nahbereich. Hintergrund ist darüber hinaus die Anfrage eines Rekonstruktionsmodells der Gesamtanlage für eine museale Präsentation, das zwischen Bestand und Rekonstruktion unterscheiden soll und bei dem die vorhandene Bestandsaufnahme an ihre Grenzen stößt. Zu diesem Zweck werden mehrere Methoden miteinander kombiniert, um einen konsistenten und effizienten Arbeitsablauf zu entwickeln, der im finalen Schritt zur Erstellung des Modells per 3d-Druck führen soll.

Kloster Wörschweiler wurde im frühen 12. Jahrhundert zunächst als benediktinisches Priorat

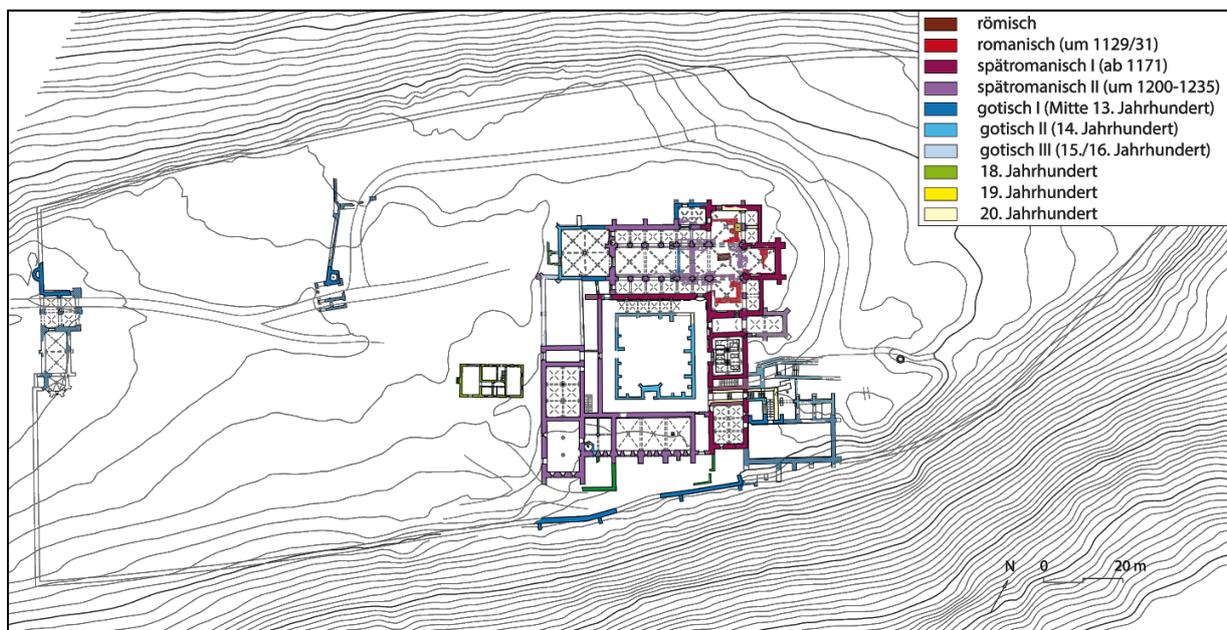


Abb. 1: Grundrissplan mit Bauphasen

gegründet und 1171 dem Orden der Zisterzienser übergeben. Die Mönche errichteten auf dem Bergsporn bis Mitte des 13. Jahrhunderts nach „Idealplan“ ein vollständig neues Kloster, das zum Zentrum des geistlichen, kulturellen und wirtschaftlichen Lebens der Region wurde. Im Zuge der Reformation wurde das Kloster 1558 aufgelöst und als Hofgut der Herzöge von Pfalz-Zweibrücken genutzt. 1614 fielen die Gebäude durch Unachtsamkeit weitgehend einem Brand zum Opfer und wurden nicht wieder aufgebaut. Ende des 19. Jahrhunderts (1889) erfolgte die erste Bestandsaufnahme der damals freiliegenden Bereiche im Maßstab 1:100. Erst durch umfangreiche archäologische Grabungen in den Jahren 1954-58 wurde der gesamte Grundriss freigelegt und ein Gesamtplan der Anlage erstellt. Nach zahlreichen punktuellen, nicht immer fachgerecht ausgeführten Sanierungsmaßnahmen, erfolgte in den Jahren 2009-2014 eine

Generalinstandsetzung. Die Maßnahmen umfassten neben statischen Sicherungen im Wesentlichen die Instandsetzung des Natursteinmauerwerks sowie die Konservierung der Putz- und Farbbefunde. Vorbereitend für die Maßnahme wurde in Kooperation des Landesdenkmalamts Saarland und der TU Kaiserslautern eine steingerechte Bestandsaufnahme der Ruine in Grundriss Ansichten und Schnitten angefertigt. Baubegleitend erfolgten archäologische Grabungen, Untersuchungen des Instituts für Steinkonservierung Mainz (IfS), restauratorische und bauhistorische Untersuchungen, d.h. es gibt eine Vielzahl an Referenzwerten für die aktuelle Forschung.

2 Material und Methoden

2.1 Photogrammetrische Aufnahmen

2.1.1 Bestandsaufnahme 2006-09

Die Aufnahme erfolgte durch angehende Architekten im Fach Denkmalpflege in Kooperation mit dem Lehrgebiet Vermessung/Kartographie der TU Kaiserslautern, vertreten durch seinen damaligen Leiter, Herrn Dr.-Ing. Klaus Trumpke. Wunsch der Landesdenkmalpflege war die steingerechte Erfassung sämtlicher Maueraufsichten sowie wesentlicher Wandansichten im Maßstab 1:50 in digitaler Form. Die gewählte Aufnahmemethode spiegelt sowohl die technischen Möglichkeiten der Zeit als auch die damalige technische Ausstattung der Universität wieder und wird daher kurz vorgestellt: Unabdingbare Voraussetzung bildete ein dauerhaft vermarktes Festpunktfeld im Ruinengelände, auf das sich die über vier Jahre verteilten Messkampagnen sowie spätere Folgemessungen beziehen konnten und das die Maßhaltigkeit der Einzelmessungen garantierte. Aus didaktischen Gründen wurden zur Aufnahme der Maueraufsichten unterschiedliche Methoden angewandt: Vom Feldpantographen, der nach dem Prinzip des Storchenschnabels unmittelbar eine maßstäbliche (1:20), jedoch stark bearbeitungsbedürftige Zeichnung liefert, über die „klassische“ Dreiecksmessung im Handaufmaß auf Karton bis hin zu Fotoentzerrungen einzelner Mauerabschnitte (Programm PhotoPlan der Firma kubit). Die zeichnerisch besten Ergebnisse wurden mit der händischen Verdichtung eines maßstäblich ausgedruckten, zuvor tachymetrisch eingemessenen Festpunktnetzes (markante Steinkanten) erzielt, da hier mit wenigen, mit dem Zollstock abgegriffenen Maßen und gesundem Augenmaß sehr schnell ausdifferenzierte Bleistiftzeichnungen möglich sind, deren Aussage bei entsprechender Erfahrung und Übung über ein reines Konturenaufmaß hinausgeht. Sehr aufwändig war jedoch die abschließend erforderliche Digitalisierung der Zeichnungen, die zudem eine weitere Interpretation bzw. Fehlerquelle darstellte.

Die Aufnahme der aufrecht stehenden Mauerscheiben erfolgte im Fall der weitgehend in einer Bildebene liegenden Seitenschiffwände mit Fotoentzerrungen, im Bereich der Grabplatten in zwei Entzerrungsebenen. Auf Grund der Tiefenstaffelung von Kirchenwestwand und Querhauswand wurden diese stereoskopisch mit einem analogen System (Zeiss Planicomp P3 und Rollei metric 6006, Format 6x6) erfasst. Für das Anbringen der Passpunkte und das Fotografieren der jeweiligen Bildpaare stand für einen Tag eine Arbeitsbühne zur Verfügung. Die Auswertung erfolgte unter CAD durch die Studierenden an der Universität in Kaiserslautern und erforderte – wie bei der Stereoskopie üblich – eine Kontrolle vor Ort und Verdichtung verschatteter Bildbereiche. Im

unmittelbaren Umfeld der Ruine wurde durch Studierende der Fachrichtung Bauingenieurwesen eine Geländeaufnahme durchgeführt. Das Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung (LVermGeo Saarland) stellte für den Bergrücken die aus einer landesweiten Befliegung gewonnenen Höhenlinien zur Verfügung. Als Ergebnis lag vor Beginn der Instandsetzungsarbeiten eine vollständige, zweidimensionale Bestandsaufnahme der Ruine vor, die – angesichts der unterschiedlichen Bearbeiter nicht anders zu erwarten – in einigen Bereichen überarbeitungsbedürftig war. Überarbeitung und Ergänzungen erfolgten im Rahmen der Bauforschung.

2.1.2 Bestandsaufnahme 2016

Die aktuellen Aufnahmen erfolgten im Rahmen eines mehrtägigen Geländepraktikums von Masterstudierenden der TU Kaiserslautern/FB Bauingenieurwesen im Jahr 2016, wobei sämtliche Daten der Klosteranlage innerhalb eines Tages aufgenommen wurden.

Als Referenzmessung wurde zunächst ein Laserscan der kompletten Wand mit einer scanfähigen Leica Multistation (MS60) durchgeführt. Diese relativ neue Geräteklasse stellt die Verbindung von Tachymeter und terrestrischen Laserscannern (TLS) dar. Die Scangeschwindigkeit liegt bei vergleichsweise wenigen 1000 Punkten/Sekunde, dafür erhalten sämtliche Punkte bei zuvor erfolgter Stationierung des Geräts direkt bei der Aufnahme Koordinaten im Landeskoordinatensystem. Damit entfällt die nachträgliche Bearbeitung des sonst notwendigen meshings. Darüber hinaus kann im Feld auch nach einem Positionswechsel und erneuter Stationierung direkt erkannt werden, welche Bereiche bereits gescannt wurden. Dadurch werden weniger Flächen mehrfach erfasst, was den Arbeitsablauf zusätzlich optimiert. Zur Referenzierung der Aufnahmen wurden zusätzlich 13 digitale Markierungen (12 bit Codierung, auf festem Untergrund verklebt) an der Wand angebracht und mit der Multistation aufgemessen.

Die photogrammetrische Datenaufnahme erfolgte mit drei unterschiedlichen aber weit verbreiteten Kamerasystemen, die zwar jeweils eine eigene Geräteklasse repräsentieren, allerdings alle in einer ähnlichen Preiskategorie angesiedelt sind:

- Olympus OM-D-M1 Systemkamera mit 17 mm Festbrennweitenobjektiv
- iPhone5s Smartphone mit 4,15 mm Brennweite
- DJI Phantom 3 Professional UAV-Modell (Einstiegssegment)

Die Punktwolkenmodelle wurden per Structure-From-Motion-Verfahren in AgiSoft Photoscan erstellt und anhand der Marker auf DHDN-GKZ2 referenziert. Für einen direkten Vergleich der Punktdaten von iPhone und Olympuskamera wurden die Aufnahmen auf jeweils 100 Stück reduziert. Die Prozessierung der Daten bis zur dichten Punktwolke erfolgte per Stapelverarbeitung in Photoscan mit identischen Parametern. Die Punktwolken wurden anhand der Marker georeferenziert, in das E57-Format exportiert und in die Software CloudCompare geladen. Dabei erfolgte eine Reduzierung der Koordinatenwerte auf vier Vorkommastellen.

Da die Datenaufnahme auf die Erfassung eines flächendeckenden Modells ausgerichtet war, wurde auch eine unbemannte Flugplattform (engl. Unmanned Aerial Vehivles/UAV) aus dem Einstiegssegment eingesetzt (DJI Phantom 3 Professional). Der vermehrte Einsatz dieser Systeme hat in den letzten Jahren immer wieder das große Potential dieser Systeme aufgezeigt, insbesondere wenn es um einen Skalenmaßstab geht, der zwischen der Vermessung im Nahbereich und der satelliten- oder flugzeuggestützten Datenaufnahme liegt (NEX & REMONDINO 2014). Die

Fehleranfälligkeit bei der Modellierung aufgrund der Sensorgröße und Objektivqualität verursacht bei den kostengünstigen UAV-Modellen Abweichungen, die über die Qualität der vorher erwähnten Kameramodelle hinausgehen. Hinsichtlich des angestrebten Modellmaßstabs von 1:200 sind diese Abweichungen aber zu vernachlässigen. Darüber hinaus eignen sich diese Systeme für flächendeckende Luftbildaufnahmen und erlauben durch die direkte Steuerung des Gimbals weitgehend freie Wahl der Aufnahmegeometrie.

Das so erstellte Modell des Klosterbergs wurde zur besseren Vergleichbarkeit auf die Fläche der Klosterruine reduziert. Innerhalb von Agisoft Photoscan erfolgte zunächst eine Koordinatentransformation von WGS84 zu DHDN GK Zone 2 anhand von 10 markanten Punkten. Nach einem Export der Punktwolke in das E57-Format wurde zusätzlich in CloudCompare eine Registrierung der UAV-Daten auf den Laserscan über identische Punktpaare durchgeführt, um die Lagegenauigkeit des per Drohne erstellten Modells noch zusätzlich zu erhöhen.

2.2 Hyperspektrale Aufnahmen

Die Kombination eines photogrammetrischen mit einem multi- oder hyperspektralen Aufnahmesystems ermöglicht es, zusätzlich zu den räumlichen Koordinaten Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit und das erfasste Material zu gewinnen. Mittels dieser zusätzlichen spektralen Signatur können unterschiedliche Objekteigenschaften abgeleitet werden, die über die rein visuelle Interpretation hinausgehen. Dieser Ansatz wird seit Jahrzehnten in der satellitengestützten Fernerkundung (z.B. LANDSAT-TM) verfolgt, um berührungslos Informationen zur Oberflächenbeschaffenheit und das erfasste Material zu gewinnen. Somit können die Klassifizierungsansätze aus diesem Bereich angepasst und genutzt werden. Eine neu entwickelte Geräteklasse bildgebender hyperspektraler Kameras ermöglicht die Aufnahme entsprechender Daten im Nahbereich, ähnlich einer konventionellen Digitalkamera. Die leichte und kompakte Bauweise ermöglicht sowohl den Betrieb auf Stativen als auch an Bord von Multikopterplattformen. Mittels der pro Pixel registrierten spektralen Signatur können unterschiedliche Objekteigenschaften abgeleitet werden, die über die rein visuelle Interpretation hinausgehen. Der Spektralbereich der eingesetzten Kamera Cubert UHD 185/UAV reicht von 450 bis 950 nm und deckt somit das sichtbare Licht und das nahe Infrarot ab. Dieser Ausschnitt des Spektrums eignet sich primär für die Erfassung und Analyse photosynthetisch aktiver Vegetation (ZARCO-TEJADA et al. 2009), allerdings weisen auch Baumaterialien und Werkstoffe nennenswerte Unterschiede im Verlauf der spektralen Signatur auf (SHABAN 2013). Insbesondere bei Untersuchungen von Beton wurde das Potential dieses Verfahrens zur Detektion von Schäden durch Carbonatisierung, biogenen Bewuchs und Aussalzung an der Materialoberfläche nachgewiesen (ARITA et al. 2001).

Es wird daher im Rahmen von Feld- und Laboruntersuchen geprüft, unter welchen Bedingungen verlässliche Aussagen aufgrund hyperspektraler Objekteigenschaften erreicht werden können. Da dieses Verfahren auf eine direkte Beleuchtungsquelle angewiesen ist, wurde die Südwand mit direkter Sonneneinstrahlung untersucht. Die Kamera wurde auf einen Weißstandardreflektor (50 %) sowie auf eine Schwarzreferenz kalibriert.

3 Ergebnisse

3.1 Photogrammetrie

In Abbildung 2 A & B sind die Ergebnisse der photogrammetrisch erstellten Modelle der Kamera und des Smartphones in Bezug zum Laserscan aufgeführt. Zur Überraschung sämtlicher Kursteilnehmer zeigte das iPhone-Modell geringfügig bessere Ergebnisse als das Olympusmodell, wobei die Abweichungen beider Modelle in aller Regel deutlich unter 2 cm liegen.

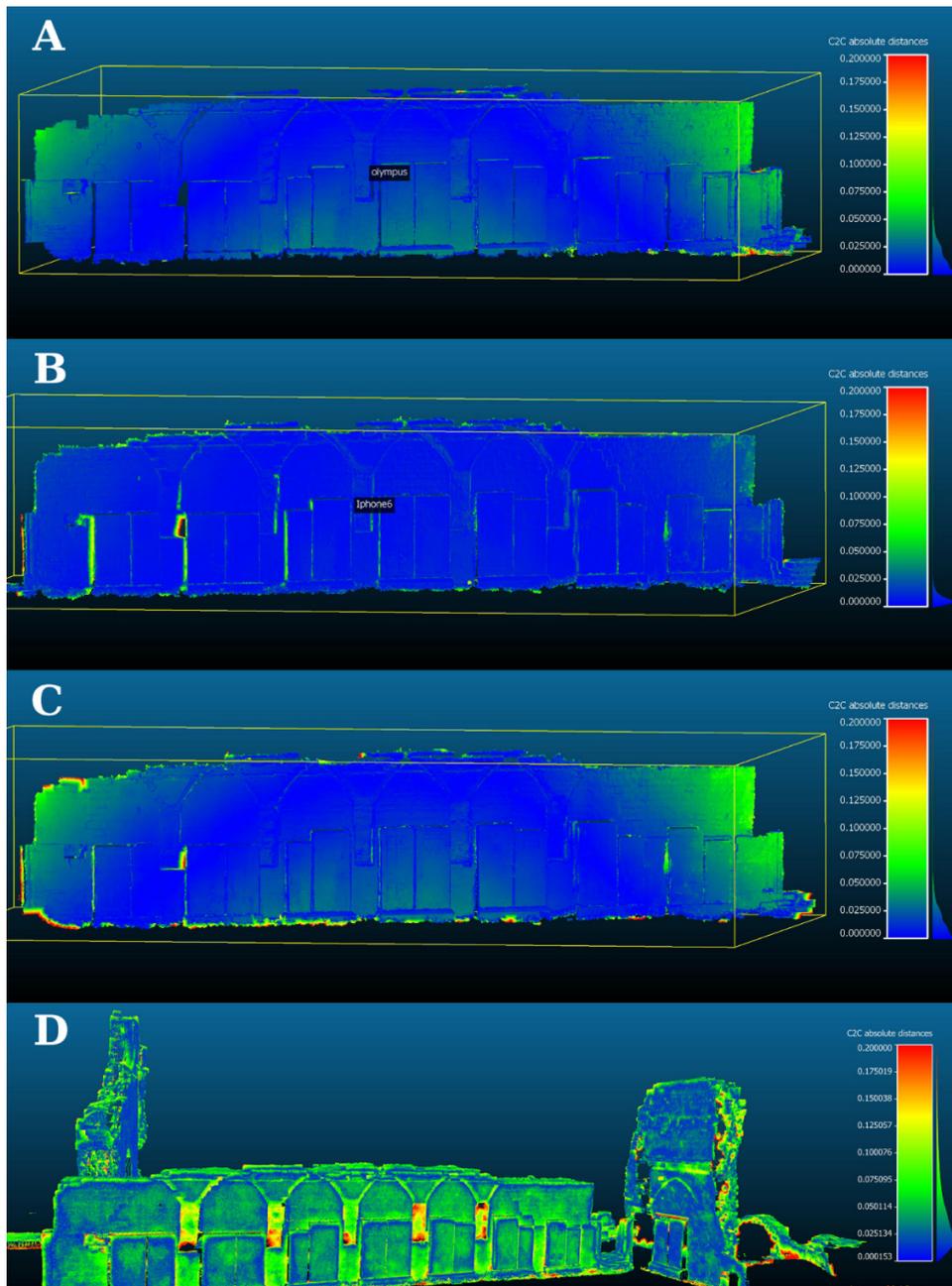


Abb. 2: Vergleich der Punktwolkenmodelle in CloudCompare (A Laserscan/Olympus, B Laserscan iPhone, C Olympus/iPhone, D Laserscan erweitert/Dji Phantom 3)

Abbildung 2C zeigt den direkten Vergleich der photogrammetrisch erstellten Modelle miteinander. Die Olympuskamera zeigt einen deutlichen radialen Versatz resp. ein im Randbereich kippendes Modell sowohl mit als auch ohne Kalibrierung der Kamera. Das Smartphone zeigt hingegen eine geringfügige Abweichung, die sich auf die gesamte Fläche verteilt.

Insgesamt können die Abweichungen aber als gering bezeichnet werden. Dies ist insbesondere für die Praxis relevant, da eine einfache und insbesondere schnelle Schadensdokumentation mit zusätzlichen Kalibrierungswerkzeugen und/oder Passpunkten auch mithilfe eines Smartphones durchgeführt werden kann.

Abbildung 2D zeigt im Detail die Abweichung des UAV-Punktwolkenmodells vom Laserscan auch in Bezug zu anderen Mauerteilen. Dabei zeigt sich wie erwartet eine insgesamt größere Abweichung als bei den zuvor aufgeführten Kameramodellen. Insbesondere sind kleinere Details weniger gut dargestellt, flächige Elemente zeigen Fehler, die unterhalb von 10 cm liegen.

3.2 Hyperspektrale Daten

Aufgrund der unvollständigen Datengrundlage, insb. vergleichbarer spektraler Signaturen, können die bisher durchgeführten hyperspektralen Aufnahmen nicht direkt zur Bestimmung der im Bild erfassten Materialien dienen. Allerdings zeigen die in Abbildung 4 exemplarisch dargestellten Spektren das Potential dieses Verfahrens. Der Kurvenverlauf der photosynthetisch aktiven Vegetation erscheint nahezu ideal. Sowohl der typische Knick im red edge Bereich als auch das Plateau im nahen Infrarot sind auch mit einer eher ungünstigen Aufnahmegeometrie und ohne weitere radiometrische Korrektur deutlich zu erkennen.

Die Differenzierung des angewitterten (historischen) Sandsteins von den restaurierten Bereichen ist im RGB-Bild deutlich auszumachen und dementsprechend weist auch die spektrale Signatur deutliche Unterschiede auf.

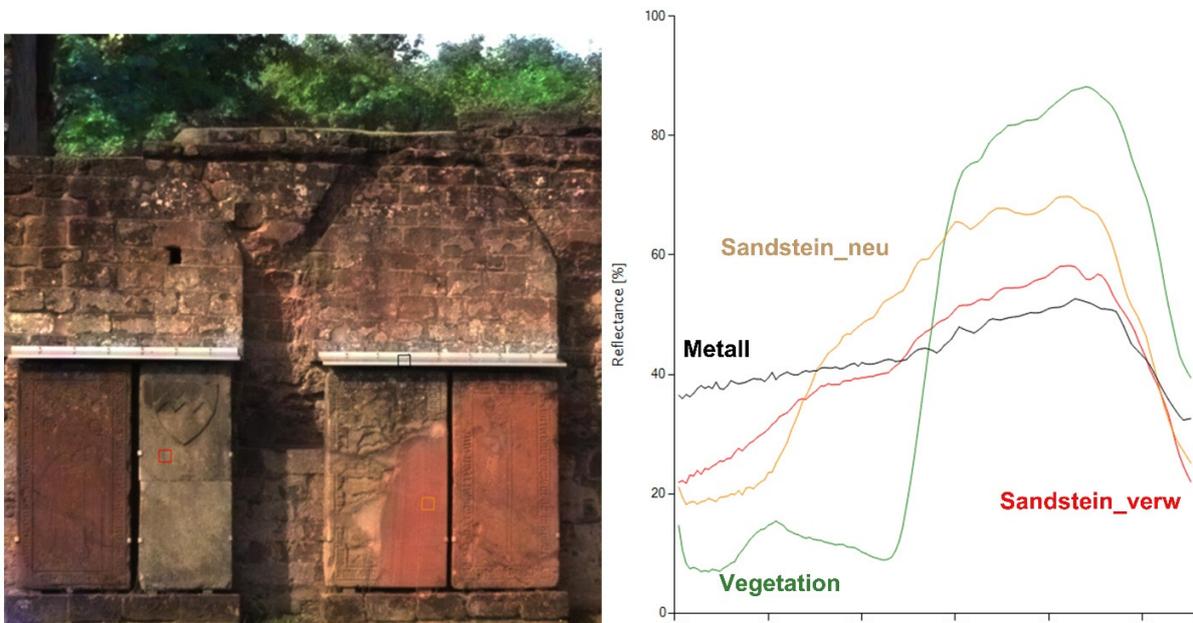


Abb. 3: Hyperspektrale Aufnahme in RGB-Darstellung mit punktuellen Abfragen (links) der Spektren ausgewählter Oberflächen (rechts)

4 Möglichkeiten für die historische Bauforschung

Was bedeutet dies für die Praxis des Bauforschers? Die historische Bauforschung – historisch in Abgrenzung zur ingenieurwissenschaftlichen Materialprüfung – versucht, unter Einbeziehung von Archivalien möglichst umfassend die Baugeschichte eines Gebäudes, seine „Entstehungs- und Lebensgeschichte“ zu rekonstruieren. Sie gleicht einer kriminalistischen Untersuchung, bei der das Bauwerk selbst die Quelle ist. Grundlage bildet seit jeher die maßstäbliche Bauaufnahme des Gebäudes. Weit über die reine wirklichkeitsgetreue Darstellung des Gebäudes hinausgehend ist sie zugleich Erkenntnisprozess: Es geht um das Verständnis räumlicher Gefüge und Zusammenhänge, das Nachvollziehen der Bau- und Tragwerksstruktur, das Erkennen von Fugen und Unstimmigkeiten, die Unterscheidung von Steinmetzzeichen und Steinbeschädigungen etc. Bauforschung ist zwingend Feldforschung am Objekt. Da jede Bauaufnahme eine Interpretation des Bestands darstellt, muss der Bearbeiter über entsprechende bauhistorische Kenntnisse verfügen. Ein weiteres Problem: Ansprüche an Genauigkeit und Detaillierung werden je nach Befunden erst im Laufe der Bearbeitung deutlich. Vor diesem Hintergrund werden die Möglichkeiten und Grenzen digitaler, berührungsfreier Aufnahmemethoden deutlich, die nicht zuletzt auch eine Frage der Angemessenheit ist. In einem kleinteiligen, möblierten Bauernhaus macht ein herkömmlicher 3d-Scan nur wenig Sinn. Die Nachbearbeitung übersteigt bei Weitem den Zeitgewinn vor Ort, zumal der Scan zwar ein detailgenaues Abbild des Gebäudes bietet, aber nicht „hinter“ die Oberfläche, in die Konstruktion schaut.

Bei großen Objekten können die „neuen“ Aufnahmemöglichkeiten hingegen eine verlässliche Grundlage liefern, mit der die unterschiedlichen Fachdisziplinen (Architekt, Tragwerksplaner, Bauforscher, Restaurator, didaktische/museale Aufarbeitung) weiter arbeiten. Der Vergleich in Wörschweiler zwischen der „traditionellen“ Bestandsaufnahme 2006-09 und der „neuen“ Aufnahme 2016 zeigt eindrücklich, mit welchem geringem Aufwand eine erste Gesamterfassung der Ruine möglich ist. Die dreidimensionale Betrachtung eines Bauwerks und seiner Entstehung kann neue räumliche Zusammenhänge geben. Die Möglichkeiten der Veranschaulichung nicht nur für den Laien sind unbestritten, wenngleich die Unterscheidung zwischen Bestand und Rekonstruktion erkennbar bleiben muss, gerade für den Laien. Grundlegend ist, dass Ziele und Anforderungen einer Bestandsaufnahme zuvor geklärt werden. Nicht alles was möglich ist, macht Sinn. Ebenso wichtig sind die Fragen des Datenaustauschs, der technischen Möglichkeiten der Datenbearbeitung und nicht zuletzt der langfristigen Speicherung.

Die ersten Beispiele der Hyperspektralaufnahmen zeigen, dass sich die Möglichkeiten der berührungsfreien Untersuchungen erweitern könnten. Bei Schadenskartierungen ist an die Differenzierung biogenen Bewuchses und das Erkennen von nachträglichen Reparaturmaßnahmen, etwa eine Unterscheidung von Zement- zu historischen Kalkmörteln zu denken. Wie weit die Ausdifferenzierung möglich ist, etwa die Unterscheidung unterschiedlicher Sandsteinvarietäten innerhalb eines Mauerabschnitts, müssen weitere Versuche zeigen. Die Ergebnisse wären ein weiteres Puzzleteil in der Gesamtbetrachtung des Bauwerks.

5 Fazit & Ausblick

Während seit dem 19. Jahrhundert Bauaufnahme und Bauforschung im wahrsten Wortsinn in einer Hand lagen, hat die zunehmende Verlagerung auf digitale Aufnahmesysteme seit spätestens den 1990er Jahren zwangsläufig zu einer personellen Trennung der Disziplinen geführt. Die Bestandsaufnahme, die unweigerlich eine Interpretation des Bestands darstellt, ist immer häufiger nicht mehr Teil des Erkenntnisprozesses. Berührungsfreie Aufnahmemethoden eröffnen zweifellos neue Möglichkeiten, die jedoch objektbezogen sinnvoll eingesetzt werden müssen. Sie können die Arbeit des Bauhistorikers nicht ersetzen, sondern seine Arbeit unterstützen. Voraussetzung ist ein gegenseitiges Verstehen der technischen Machbarkeiten und Anforderungen. Auf längere Sicht wird sich wohl auch die Praxis der Bauforschung verändern, so wie sich bereits seit längerem die Planungspraxis in der Architektur vom jahrhundertlang praktizierten 2D zum 3D ändert. Mit keiner Technik ersetzbar ist jedoch die Untersuchung des Bauwerks mit allen Sinnen vor Ort.

Natürlich wird die Wahl des Aufnahmesystems, neben der verfügbaren apparativen Ausstattung, in Hinblick auf die erforderliche Genauigkeit erfolgen müssen. Grundsätzlich zeigen die hier getesteten photogrammetrischen Aufnahmesysteme mitunter Schwächen, die allerdings durch die Datenintegration aus unterschiedlichen Quellen beseitigt werden können. Kombiniert man beispielsweise die Punktwolken eines hochgenauen aber eher stationären Scanners mit den Ergebnissen eines mobilen photogrammetrischen Aufnahmesystems, erhält man in kurzer Zeit ein flächendeckendes 3d-Modell, dessen Detailgrad man selbst bestimmen kann. Ein großer Vorteil der so erzeugten digitalen Daten ist die Möglichkeit, auf diese Modelle ebenfalls digitale Rekonstruktionen anzupassen. Als Endprodukt aus diesen Arbeitsschritten soll ein per 3d-Druck erstelltes Modell entstehen, welches die aktuelle und die rekonstruierte historische Situation des Klosters differenziert darstellen soll.

Die erste Auswertung der Hyperspektralaufnahmen zeigt das Potential dieses Verfahrens. Da bei Aufnahmen im Nahbereich der Anteil der Mischpixel deutlich reduziert werden kann, sollte somit unter günstigen Umständen die Unterscheidung von Materialien im VIS-NIR-Bereich möglich sein. Dazu werden aktuell an der TU Kaiserslautern Laboruntersuchungen an unterschiedlichen Werkstoffen durchgeführt. Eine Erweiterung des Spektrums, beispielsweise über ein weiteres hyperspektrales Aufnahmesystem im SWIR (Kurzwelleninfrarot) bzw. IR-B (Nahinfrarot 1450 bis 3000 nm), dürfte die Wahrscheinlichkeit zur eindeutigen Bestimmung der Materialien verbessern. Chancen dieser Methode im Themenfeld Bauingenieurwesen und Architektur werden insbesondere im Monitoring von Bauwerken, in der Aufnahme von Bestandsdaten und deren Verknüpfung mit Datenbanken gesehen (z.B. BIM). Langfristig soll das Potential hyperspektraler Aufnahmen für die Schadensdokumentation und Veränderungsanalyse genauer überprüft werden. Ein großer Vorteil dieser Methodenkombination liegt in der objektiven Datenerfassung und Dokumentation sowohl der Objektgeometrien als auch der Oberflächeninformation.

6 Literaturverzeichnis

- ARITA, J., SASAKI, K. I., ENDO, T. & YASUOKA, Y., 2001: Assessment of concrete degradation with hyper-spectral remote sensing. 22nd Asian Conference on Remote Sensing **5**, 5 p.
- LANDESDENKMALAMT SAARLAND, 2015: Baudenkmalpflege 2005-2014 (Denkmalpflege im Saarland, Bd. **5**), Saarbrücken.
- NEX, F. & REMONDINO, F., 2014: UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics* **6**(1), 1-15.
- SCHULLER, M., 2001: Mehr Denken statt nur Messen. Von Handaufmaß bis High Tech – Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung (Kolloquium TU Cottbus 2000), Weferling, U., Heine, K. & Wulf, U. (Hrsg.), Verlag Philipp von Zabern, 213-226.
- SHABAN, A., 2013: Determination of Concrete Properties Using Hyperspectral Imaging Technology: A Review. *Science Journal of Civil Engineering and Architecture*, Volume **2013**, Article ID sjcea-102, 11 p.
- ZARCO-TEJADA, P.J., BERNI, J.A. J., SUÁREZ, L., SEPULCRE-CANTÓ, G., MORALES, F. & MILLER, J.R., 2009: Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment* **113**(6), 1262-1275.