

Ursula Quatember und Robert Kalasek

Architekturdokumentation mittels 3D-Surface Scanning: Der sog. Hadrianstempel an der Kuretenstraße in Ephesos

Am Österreichischen Archäologischen Institut (ÖAI) wurde in den Jahren von 2009 bis 2012 ein Projekt zum sog. Hadrianstempel an der Kuretenstraße in Ephesos (Abb. 15-1) durchgeführt, das vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung finanziert wurde.¹ Der kleine Tempel aus der römischen Kaiserzeit mit seinem charakteristischen syrischen Giebel ist eines der bekanntesten Monumente von Ephesos. Zur Architekturdokumentation wurden verschiedene Methoden des 3D-Surface Scannings angewandt. Diese sollen im Folgenden exemplarisch vorgestellt werden, um die Anwendungsmöglichkeiten dieser Methoden im Bereich der Dokumentation von Denkmälern sowie einer auf diesen Daten basierenden Präsentation auszuloten.

Ziel der Architekturdokumentation

Insbesondere Funktion und Interpretation des Gebäudes stehen im Zentrum des Forschungsvorhabens: Seit der

Ausgrabung des „Hadrianstempels“ sind mehr als 50 Jahre vergangen, dennoch liegen weder eine systematische Untersuchung noch eine Publikation der Baubefunde vor.² Auch die ursprüngliche Deutung als Kaiserkult-Tempel für Kaiser Hadrian (Regierungszeit: 117–138 n. Chr.) – d. h. als offizielle Stätte seiner Verehrung in der gesamten Provinz Asia – wird heute weitgehend abgelehnt.³ Fragen zu Chronologie, Rekonstruktionsdetails und der Reliefdekoration sind von der Forschung zwar vielfach und kontrovers diskutiert, aber nicht endgültig gelöst worden.⁴ Im Rahmen des am ÖAI durchgeführten Projekts erfuhr das Bauwerk erstmals eine umfassende bauhistorische und archäologische Untersuchung,⁵ deren Basis eine neue Architekturdokumentation bildete.

Der Hadrianstempel wurde in den Jahren 1957/1958 unmittelbar nach der Ausgrabung wieder aufgebaut. Der damalige Grabungsleiter Franz Miltner wollte den modernen Besuchern einen möglichst guten Eindruck der antiken Stadtlandschaft vermitteln und engagierte deshalb den Ar-

Abb. 15-1: Der Hadrianstempel an der Kuretenstraße in Ephesos



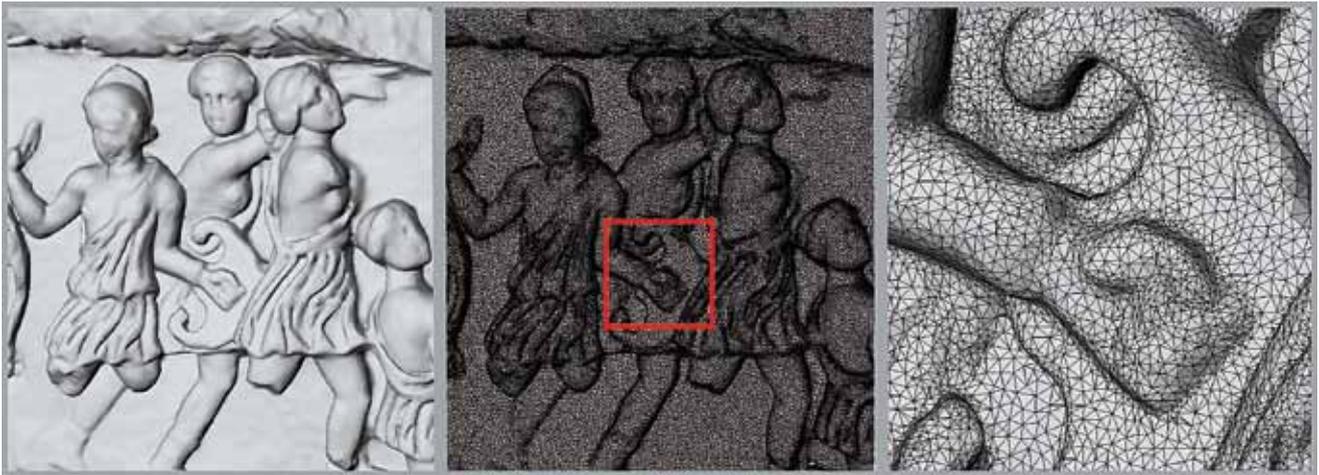


Abb. 15-2: Aufnahme eines Streifenlicht-Scanners: (a) Ausschnitt aus einem Reliefblock der Vorhalle, (b) Darstellung der Dreiecksvermaschung, (c) Detailausschnitt

chitekten Karl Heinz Göschl für diese aufwändige Unternehmung.⁶ Der Wiederaufbau erfolgte bevor im Jahr 1964 mit der Charta von Venedig⁷ verbindliche Richtlinien für die Denkmalpflege formuliert wurden, was – ebenso wie die Zeitumstände – bei einer Bewertung dieser Maßnahme berücksichtigt werden sollte.⁸ Eine ausführliche Dokumentation dieser Arbeiten fehlt leider ebenso wie eine detaillierte Architekturaufnahme aus der Zeit der Ausgrabung.

Als erster wesentlicher Schritt musste deshalb im Rahmen des Projekts die Architektur des Hadrianstempels neu aufgenommen werden; dies bildete die Grundlage für jede weitere wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Bauwerk. Die Anforderungen an das Ergebnis umfassten mehrere Ebenen: Zum einen sollte im Rahmen der gedruckten Publikation eine Dokumentation entstehen, die den zeitgenössischen Standards der archäologischen Bauforschung entspricht. Sämtliche Werksteine – d. h. die aus Marmor gefertigten Architekturteile, die speziell für den ihnen zgedachten Anbringungsort hergestellt wurden – sollten von allen Seiten im Maßstab 1 : 20 wiedergegeben werden. Pläne vom und Schnitte durch das Bauwerk sollten im Maßstab 1 : 50 vorliegen, wofür Bruchsteinmauern, Ziegel sowie die modernen Ergänzungen in entsprechend hoher Qualität aufgenommen werden mussten. Die erzielte Genauigkeit erlaubte, Rekonstruktionsdetails wie beispielsweise die Position einzelner Werksteine zu überprüfen.

Zum anderen sollte die Architekturdokumentation Grundlage für die weitere Beschäftigung mit dem Gebäude sein. Eine restauratorische und konservatorische Bestands- und Zustandserfassung stellt einen wichtigen Bestandteil des Forschungsprojekts dar. Sie dient dazu, Empfehlungen für künftige Konservierungsmaßnahmen am Gebäude selbst ableiten zu können. Der Hadrianstempel ist der älteste noch existierende Wiederaufbau mit originalen Bauteilen in Ephesos. Mit ähnlichen Methoden wurden in weiterer Folge sowohl in Ephesos als auch an anderen antiken Stätten der Türkei Monumente wieder errichtet. Erkenntnisse zu den am sog. Hadrianstempel auftretenden Schadensphänomenen sind deshalb potentiell auch auf diese Strukturen anzuwenden und können unsere Kenntnisse über die Instand-



Abb. 15-3: Aufnahme des Gebälks mit einem Streifenlicht-Scanner von der Hebebühne aus, 2009

haltung wieder aufgerichteter antiker Bauten und die damit verbundenen Probleme erweitern. Für eine Kartierung der unterschiedlichen Schadensphänomene war eine genaue Architekturdokumentation die Grundvoraussetzung.

Auswahl der Dokumentationstechnik und Aufnahme vor Ort

Nicht zuletzt wegen der Rahmenbedingungen erfolgte bereits im Zuge der Projektvorbereitung eine Entscheidung zugunsten von 3D-Surface-Scanning.⁹ Der Hadrianstempel ist eine der touristischen Hauptattraktionen von Ephesos. Alle der fast zwei Millionen Besucher der Ruinenstätte werden entlang der Kuretenstraße am Hadrianstempel vorbeigeführt. An eine länger andauernde Einrüstung, wie sie für eine Dokumentation mit traditionellem Handaufmaß notwendig gewesen wäre, konnte deshalb nicht gedacht werden. Berührungsfreie 3D-Scanning Methoden waren auf Grund ihrer Erfassungsgeschwindigkeit und der damit verbundenen kurzen Aufnahmedauer vor Ort sowie der erreichbaren Er-

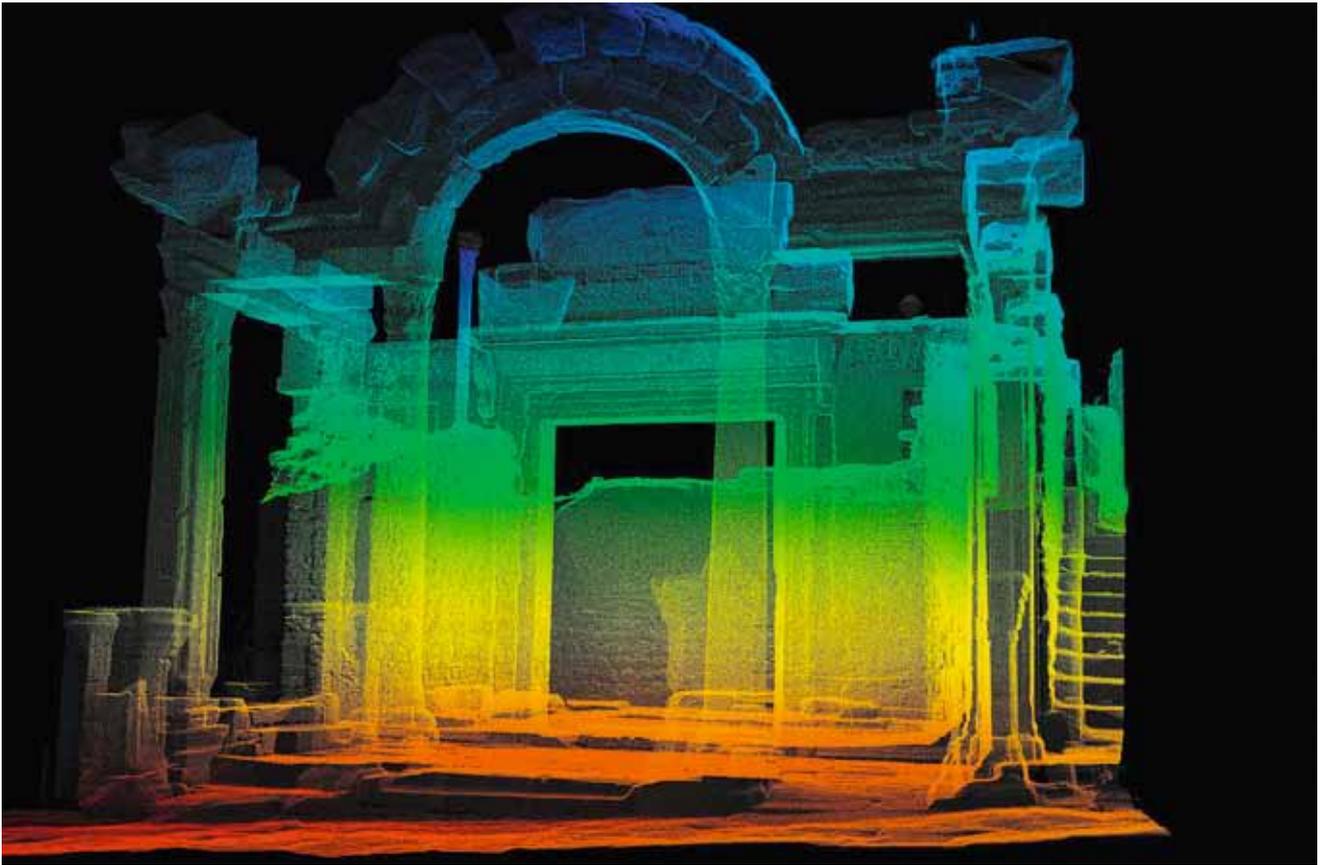


Abb. 15-4: Mit dem Laserscanner gemessene Punktwolke



Abb. 15-5: Aufnahme eines Statuenpostaments mit einem Streifenlicht-Scanner: (a) Einzelscan, (b) fertiges 3D-Modell, (c) Foto

fassungsqualität optimal geeignet, eine umfassende Architekturdokumentation des Hadrianstempels zu erstellen und die oben dargestellten Anforderungen zu erfüllen.

Abhängig vom gewünschten Detaillierungsgrad des angestrebten Endergebnisses wurden zwei unterschiedliche Aufnahmeverfahren gewählt.

Mit Streifenlicht-Scannern der Breuckmann GmbH (Breuckmann smartSCAN-3D und Breuckmann triTOS) wurden alle marmornen Bauglieder des Tempels mit hoher Auflösung erfasst, wobei insgesamt ca. 1 750 Einzelscans aufgenommen wurden. Der Aufnahmebereich beträgt dabei – abhängig vom verwendeten Scanner – 0,2 m² bzw.

1 m², die laterale Auflösung 0,3 mm bzw. 1 mm (Abb. 15-2a-c). Ein einzelner Scanvorgang dauert weniger als zwei Sekunden. Um Interferenzen mit dem Umgebungslicht zu vermeiden, muss die Datenerfassung mit den Streifenlicht-Scannern bei (relativer) Dunkelheit erfolgen. Aus diesem Grund wurde die Aufnahme in insgesamt 10 Nächten mit zwei Teams durchgeführt, wobei jeweils zwei Personen einen Scanner bedienten. Der Arbeitsabstand beträgt beim Breuckmann triTOS 1,30 m; dadurch war dieses Gerät gut geeignet, das Gebälk des Tempels von einer mobilen Hebebühne aus aufzunehmen (Abb. 15-3).

Gerade im Hinblick auf die oben diskutierten Rahmenbedingungen und die zahlreichen Touristen, die tagsüber Ephesos besuchen, war die nächtliche Aufnahmetätigkeit von großem Vorteil.

Mit einem 3D-Laserscanner basierend auf Phasenvergleichs-Messtechnik (Z+F IMAGER® 5006i) wurden bei Tageslicht ca. 90 Panorama-Scans über das gesamte Bauwerk, die Bruchsteinmauern des Innenraums sowie der angrenzenden Strukturen aufgenommen. Bei einer Dauer von drei bis zehn Minuten pro Scan mit einer Aufnahme von mehr als einer Million Pixel pro Minute konnten jeweils etwa 50 bis 100 m² erfasst werden, wobei die laterale Auflösung etwa 5–10 mm beträgt (Abb. 15-4).

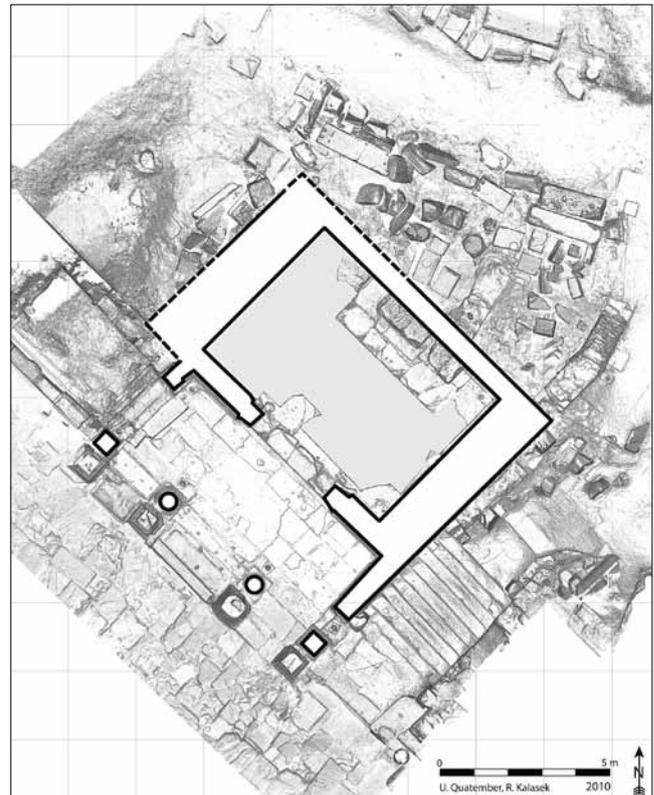


Abb. 15-6: Aus den Laserscans erstellter Plan des Hadrianstempels

Post-Processing und Datenbearbeitung

Ergebnis der Scans sind jeweils einzelne Messpunkte im Raum, eine sogenannte „Punktwolke“, die von diskreten – d. h. voneinander getrennten – Punkten gebildet wird. Der Umgang mit dieser Punktwolke weicht bei den beiden verwendeten Systemen etwas voneinander ab. Die Rohdaten des Streifenlicht-Scanners werden unmittelbar in flächige, polygonale Objekte überführt (Abb. 15-5a). Im Anschluss an die Datenerfassung werden die Einzelaufnahmen der Streifenlichtscanner objektweise anhand ihrer 3D-Geometrie in einem gemeinsamen Koordinatensystem registriert und anschließend zu einem gemeinsamen 3D-Modell zusammengefügt (Abb. 15-5b; s. auch Tabelle 1). Die polygonalen Strukturen (d. h. Dreiecksvermaschungen, Abb. 15-2b-c) bilden die Oberfläche der erfassten Objekte im Idealfall flächendeckend ab. Sie spannen also mittels einer Vielzahl winziger Dreiecksflächen die Hülle der Objekte auf. Damit sind die für die Darstellung der Objekte notwendigen Voraussetzungen gegeben: Die Bauteile sind undurchsichtig.

In weiterer Folge ist es möglich, anhand von Fotos, die gleichzeitig mit den Scans und aus derselben Position aufgenommen werden, die Darstellung mit Farbinformationen zu versehen. Dieser Schritt wurde für die Dokumentation des Hadrianstempels aber nicht durchgeführt: Während beispielsweise bei Wandmalereien die Farbe die wesentlichste Information in der Dokumentation darstellt, kann bei marmornen Baugliedern das Hinzufügen von oberflächlichen Farbinformationen die geometrische Darstellung so verunklären, dass eine Abbildung ohne überlagernde Fotos wesentlich aussagekräftiger ist.¹⁰ Als Beispiel sei auf die vor dem Hadrianstempel aufgestellten Statuenpostamente verwiesen: Die Inschrift ist im untexturierten Scan wesentlich besser lesbar als auf einem Foto (Abb. 15-5b-c). Eine Entscheidung bezüglich einer Texturierung hängt wesentlich vom intendierten Zweck der Dokumentation ab. Beim

Tabelle 1: Überblick über die Größe der dreiecksvermaschten Polygonmodelle

Objekt	Anzahl der Dreiecke [Millionen]	Größe der entsprechenden PLY-Datei	Bemerkung
Hadrianstempel	ca. 50	ca. 1.2 GB	
Postamente	je ca. 10–20	ca. 200–400 MB	
Einzelne Steine	je ca. 5–10	ca. 100–200 MB	
Originale Relieffriese	je ca. 20	ca. 400 MB	aufgenommen im Museum in Selcuk
Panorama-Scans	ca. 15	ca. 300 MB	

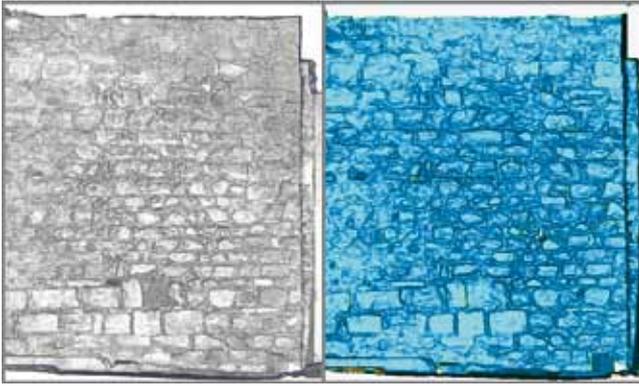


Abb. 15-7: Bruchsteinmauer, aufgenommen mit einem Laserscanner: (a) Punktwolke mit in Grauwerten dargestellter Reflexionsintensität, (b) Dreiecksvermaschung der Punktwolke mit blauer Farbgebung



Abb. 15-8: Auf der Grundlage des 3D-Gesamtmodells von R. Kalasek gestaltetes Präsentationsvideo

Hadrianstempel stand die Architekturdokumentation im Vordergrund. Im Rahmen eines Kartierungsprojekts könnte es aber beispielsweise sinnvoll sein, biogene Besiedlung, Krustenbildung u. ä. bereits mit einem Foto auf dem Objekt zu verorten, um die anschließende Schadbildaufnahme zu erleichtern.

Im Gegensatz zu den unmittelbar „vermaschten“ Punkten des Streifenlicht-Scanners bleiben im Post-Processing der Laserscanning-Daten die Informationen zunächst als 3D-Punktwolke erhalten. Sie können erst in einem zweiten Arbeitsschritt mittels Dreiecksvermaschung in flächige, polygonale Strukturen überführt werden.

Vor allem aus optischen Gründen erfolgte für die Dokumentation des Hadrianstempels in Form von Plänen (Abb. 15-6) und Schnitten die Entscheidung, auf die Dreiecksvermaschung der Laserscanning Daten zu verzichten und stattdessen die – nachbearbeitete – Punktwolke als Grundlage zu nutzen. Als „Farbinformation“ wurde die Reflexionsintensität als Grauwert dargestellt (Abb. 15-7). Auf eine Zuordnung von realen Farbwerten wurde hingegen ebenso wie bei den Streifenlicht-Scans verzichtet. Ein flächenhafter Eindruck der Oberfläche in den aus der Punktwolke generierten Darstellungen entsteht dort, wo der vir-

tuelle Betrachter so weit vom Objekt entfernt ist, dass der Raum zwischen den Punkten nicht mehr zu erkennen ist. Entscheidend für die Qualität der Dokumentationsergebnisse ist daher die maßstabsabhängige Mindestpunktdichte im Messdatensatz.

Während für die Dokumentation der einzelnen Werksteine im Maßstab 1 : 20 im Wesentlichen die Streifenlicht-Scans verwendet wurden, erfolgte die Erstellung von Plänen und Schnitten im Maßstab 1 : 50 auf Basis der Laser-Scans. Das dreidimensionale Gesamtmodell, das zu Präsentationszwecken verwendet werden kann, stellt hingegen eine Kombination von Aufnahmen aus beiden Messverfahren dar (Abb. 15-8). Dieses Modell dient weniger zur Dokumentation im Rahmen der gedruckten Endpublikation als vielmehr zur Darstellung der Forschungsergebnisse im Rahmen von Präsentationen.¹¹ Für diese Gesamtdarstellung wurden auch die Punktwolken des Laserscannings zu einem Polygonmodell „vermascht“ (Tabelle 1).¹²

Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass 3D-Surface-Scanning ein sehr flexibles Instrument zur wissenschaftlichen Dokumentation räumlicher Strukturen und ihrer Oberflächen darstellt. Vor der Auswahl der Aufnahmemethode und der Festlegung der einzelnen Schritte im Rahmen des Post-Processings ist es jedoch unbedingt notwendig, sich über Verwendungszweck und Ziele der Aufnahme im Klaren zu sein. Nur dadurch kann gewährleistet werden, dass der Detaillierungsgrad der Datenaufnahme den Anforderungen entspricht, dabei aber gleichzeitig keine übergroße Datenmenge angehäuft wird, die die Schritte des Post-Processings unnötig belastet und verlangsamt. Eine Texturierung kann fallweise eine sinnvolle Ergänzung der ansonsten rein geometrischen Informationen darstellen.

Ein wesentlicher Vorteil von 3D-Surface-Scanning ist jedoch nicht nur die flexible Anwendung zur wissenschaftlichen Dokumentation. Die Dreidimensionalität der daraus resultierenden Modelle erlaubt auch die Präsentation der erzielten Ergebnisse mit besonderer Anschaulichkeit und bildet damit eine gute Grundlage zur virtuellen Rekonstruktion und Vermittlung von fragmentarisch erhaltenen Kunst- und Kulturgütern.

Abbildungsnachweis

alle Abbildungen: ÖAI, Wien (Abb. 15-1, 15-3: U. Quatember; Abb. 15-2: R. Kalasek – B. Breuckmann – Ch. Bathow; Abb. 15-4, 15-7, 15-8: R. Kalasek; Abb. 15-5: B. Breuckmann – Ch. Bathow – R. Kalasek – B. Thuswaldner – U. Quatember; Abb. 15-6: R. Kalasek – U. Quatember)

Literatur

Ewen L. BOWIE, The “Temple of Hadrian” at Ephesus, in: *Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik*, 8, 1971, S. 137–141

- Ewen L. BOWIE, The Vedii Antonini and the Temple of Hadrian at Ephesus, in: Ekrem AKURGAL, (Hrsg.), The Proceedings of the Xth International Congress of Classical Archaeology, Ankara – Izmir 1973, 1978, S. 869–874
- Beat BRENK, Die Datierung der Reliefs am Hadrianstempel in Ephesos und das Problem der tetrarchischen Skulptur des Ostens, in: *Istanbuler Mitteilungen*, 18, 1968, S. 238–258
- Robert FLEISCHER, Der Fries des Hadrianstempels in Ephesos, in: *Festschrift Fritz Eichler*, Österreichisches Archäologisches Institut in Wien, Beiheft 1, Wien 1967, S. 23–71
- Friedmund HUEBER, Antike Baudenkmäler als Aufgabengebiet des Architekten, in: Manfred KANDLER (Hrsg.), *Lebendige Altertumswissenschaft*. Festschrift Hermann Vetters, Wien 1985, S. 391–398
- Friedmund HUEBER, Ephesos. Gebaute Geschichte, Mainz 1997
- Franz MILTNER, XXII. Vorläufiger Bericht über die Ausgrabungen in Ephesos, in: *Jahreshefte des Österreichischen Archäologischen Institutes in Wien*, 44, 1959, Beiblatt Sp. 243–314
- Franz MILTNER, Denkmalpflege in Ephesos, in: *Österreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege* 13, 1959, S. 1–10
- Ulrike OUTSCHAR, Zur Deutung des Hadrianstempels an der Kuretenstraße, in: Herwig FRIESINGER – Friedrich KRINZINGER (Hrsg.), *100 Jahre österreichische Forschungen in Ephesos. Akten des Symposiums Wien 1995*, (Archäologische Forschungen 1=Denkschriften der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, phil.-hist. Klasse 260), Wien 1999, S. 443–448
- Ursula QUATEMBER, The “Temple of Hadrian” on Curetes Street in Ephesus: new research into its building history, in: *Journal of Roman Archaeology*, 23, 2010, S. 376–394
- Ursula QUATEMBER, Der Wiederaufbau des Hadrianstempels an der Kuretenstraße in Ephesos, in: Caroline Jäger-Klein – Andreas Kolbitsch (Hrsg.), *Fabrica et ratiocinatio in Architektur, Bauforschung und Denkmalpflege*. Festschrift Friedmund Hueber zum 70. Geburtstag, Wien 2011, S. 243–254
- Ursula QUATEMBER – Robert KALASEK – Bernd BREUCKMANN – Christiane BATHOW, Das 3D-Modell des sog. Hadrianstempels an der Kuretenstraße in Ephesos, in: *Forum Archaeologiae*, 59/VI/2011 (<http://farch.net>)
- Ursula QUATEMBER – Barbara THUSWALDNER – Robert KALASEK – Bernd BREUCKMANN – Christiane BATHOW, The Virtual and Physical Reconstruction of the Octagon and Hadrian’s Temple in Ephesus, in: H. G. Bock – W. Jäger – M. J. Winckler (Hrsg.), *Scientific Computing and Cultural Heritage. Contributions in Computational Humanities, Contributions in Mathematical and Computational Sciences 3*, Heidelberg 2012, S. 217–228
- Peter SCHERRER, Die Stadt als Festplatz: Das Beispiel der ephesischen Bauprogramme rund um die Kaiserneokorien Domitians und Hadrians, in: Jörg RÜPKE (Hrsg.), *Festrituale in der römischen Kaiserzeit*, Tübingen 2008, S. 35–65
- Hartwig SCHMIDT, *Wiederaufbau. Denkmalpflege an archäologischen Stätten 2*, Stuttgart 1993
- Gilbert WIPLINGER, Restaurierungsprojekte in Ephesos, in: Brinna OTTO – Friedrich EHRL (Hrsg.), *Echo. Beiträge zur Archäologie des mediterranen und alpinen Raumes*. Festschrift Johannes B. Trentini, (Innsbrucker Beiträge zur Kulturwissenschaft 27), Innsbruck 1990, S. 329–335
- Barbara THUSWALDNER, Zur computergestützten steingerechten Rekonstruktion des Oktogons in Ephesos, in: Sabine LADSTÄTTER (Hrsg.), *Neue Forschungen zur Kuretenstraße von Ephesos*, Akten des Symposiums für Hilke Thür 2006, (Archäologische Forschungen 15, Denkschriften der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, phil.-hist. Klasse 260), Wien 2009, S. 261–281
- Michael WÖRRLE, Zur Datierung des Hadrianstempels an der Kuretenstraße in Ephesos, in: *Archäologischer Anzeiger*, 1973, S. 470–477

¹ Projekt Nr. P20947-G02. Unser Dank gilt der Institutsdirektorin und Grabungsleiterin, Sabine Ladstätter, ebenso wie Bernd Breuckmann, Christiane Düffort und Barbara Thuswaldner, Christian Kurtze und Filiz Öztürk sowie dem Efes Müzesi Selçuk mit dem Direktor Cengiz Topal. Die Dokumentation wurde in Zusammenarbeit des ÖAI mit der TU Wien und der Breuckmann GmbH (Meersburg, Deutschland) durchgeführt.

² Zu einem Vorbericht s. MILTNER 1959, S. 264–273.

³ WÖRRLE 1973, S. 470–477; s. bereits früher dazu BOWIE 1971, S. 137–141; BOWIE 1978.

⁴ Vgl. beispielsweise BRENK 1968, S. 238–258; FLEISCHER 1967, S. 23–71; OUTSCHAR 1999, S. 443–448; HUEBER 1997, S. 86–88; SCHERRER 2008, S. 51–53.

⁵ Zu ersten Ergebnissen bezüglich der Baugeschichte s. QUATEMBER 2010, mit weiteren Literaturangaben.

⁶ S. dazu MILTNER 1959, S. 1–8; QUATEMBER 2011.

⁷ Zum englischen Text der „Venice Charter“ s. http://www.international.icomos.org/charters/venice_e.pdf (21. 11. 2012).

⁸ Zum Wiederaufbau des Hadrianstempels s. HUEBER 1985, S. 394; WIPLINGER 1990, S. 330; SCHMIDT 1993, passim, bes. S. 125 f., 165–171.

⁹ S. dazu bereits QUATEMBER – THUSWALDNER – KALASEK – BREUCKMANN – BATHOW 2011; QUATEMBER – KALASEK 2012.

¹⁰ Zu einem Vergleich zwischen texturierten und untexturierten Darstellungen s. auch THUSWALDNER 2009, S. 269, Abb. 6–7.

¹¹ Beispielsweise wird das dreidimensionale Gesamtmodell derzeit im „Deep Space“ des Ars Electronica Centers in Linz von acht Spezialprojektoren auf einer 16 x 9 m großen Leinwand im Rahmen von Führungen präsentiert.

¹² Ausführlicher zur Erstellung des Gesamtmodells s. QUATEMBER – KALASEK – BREUCKMANN – BATHOW 2011.