

Die Entwicklung der Computergraphik und ihr Einsatz bei der digitalen Architekturrekonstruktion

Horst Stenzel

TH Köln, Institut für Informatik

20.6.2017

Kurzfassung. Die digitale 3D-Rekonstruktion von Architektur- und Archäologieobjekten ist eng mit der Anwendung der Methoden und Systeme der Computer Graphik verknüpft. Dieser Artikel stellt solche Verbindungen seit den Anfängen der Computergraphik in den 1950er Jahren bis etwa zur Jahrtausendwende dar. Die Entwicklungen von Methoden zur Gewinnung von 3D-Daten, i.e. 3D-Scannverfahren und Photogrammetrie, werden ergänzend kurz betrachtet.

Abstract. *The digital 3D reconstruction of architectural and archeological objects is closely related to the application of computer graphics methods and systems. In this article we trace these relations since the beginnings of computer graphics after 1950 up to about the turn of the millennium. In addition, the development of methods for the production of 3D data from real objects, i.e. 3D scanning and photogrammetry, is briefly touched upon.*

Key words: *3D reconstruction, 3D models, architecture, archaeology, computer graphics, historical development*

Computergraphik - Verbindung zwischen der Konzeption einer 3D-Rekonstruktion und ihrer Repräsentation

Im Kern einer digitalen 3D-Rekonstruktion historischer Architektur steht die Erstellung einer Datenstruktur im Computer, die das abstrakte Modell einer Bearbeitung und Darstellung zugänglich macht. Die visuellen Aspekte dieser Daten - Geometrie und Aussehen, d.h. Oberflächen- und Materialeigenschaften - sind Gegenstand der Computergraphik. Die digitale 3D-Rekonstruktion wandte vor allem die Methoden und Systeme an, die im Rahmen des umfassenderen und allgemeineren Feldes der Computergraphik entwickelt wurden. Deshalb beginnt diese Betrachtung mit einem Blick auf die Anfänge der Computergraphik seit den 1950er Jahren. Sie geht im Wesentlichen nicht über die Jahrtausendwende hinaus, denn viele

der danach begonnenen Entwicklungen sind noch nicht abgeschlossen.¹ Ergänzend werden die Entwicklungen von 3D-Scannverfahren und Photogrammetrie sowie *structure from motion* als Methoden zur Gewinnung von 3D-Daten kurz betrachtet. Wie Sander Münster schreibt, stellt ein Modell eine „*zweckmäßig und subjektiv vereinfachte, virtuelle Rekonstruktion eines Originals dar. Zu unterscheiden ist dabei zwischen diesem digitalen 3D-Modell und dessen Darstellung bzw. Visualisierung im Sinne eines Modellabbildes*“². Auch aus diesem Grund werden Visualisierung und *rendering*-Verfahren hier nicht angesprochen (wie *shading, texture mapping, ray tracing, radiosity, non-photorealistic rendering*).

Diese Betrachtung bleibt trotzdem aufgrund der Fülle an Techniken und Anwendungen in vielen Punkten skizzenhaft und ist zudem von den persönlichen Erfahrungen des Autors geprägt. Auf viele, vielleicht nötige technische Details und Begriffserläuterungen wird verzichtet. Der Leser wird hiermit pauschal auf die umfangreiche Computergraphik-Literatur und die einschlägigen Lehrbücher verwiesen. Im Kontext dieser Betrachtung sind die seinerzeit richtungsweisenden Bücher von Foley, van Dam e.a.³ zu nennen. Eine aktuelle zusammenfassende Darstellung der Elemente der Computergraphik aus Sicht der 3D-Rekonstruktion findet sich in in der Dissertation von Joice Wittur⁴.

Entwicklung der Computergraphik

Von ihren Anfängen um 1950 bis zum Beginn der 1970er Jahre war die aktive forschende und entwickelnde Auseinandersetzung mit Computergraphik-Anwendungen wenigen privilegierten Institutionen vorbehalten, z.B. der Luftfahrtindustrie und für militärische Anwendungen. Erst dann beschleunigte sich die Entwicklung der Computergraphik mit der Abkehr von Vektor- zu Raster-graphischen Geräten. Kalligraphische Displays, auf Kathodenstrahlröhren basierend, wurden durch Pixel-basierte Video-Geräte mit digitalem Bildspeicher abgelöst, und später langsame Stift-Plotter durch Raster-Drucker. In den achtziger Jahren kam Computergraphik durch PCs und Apple-Rechner auf jeden Arbeitsplatz,

¹ U.a. der Einfluss der GPUs, prozedurale Modellierung, *point cloud*-Verarbeitung, der Einfluss von *open source*-Software.

² Sander Münster, *Interdisziplinäre Kooperation bei der Erstellung geschichtswissenschaftlicher 3D-Modelle*. Dissertation, Dresden 2014.

³ James D. Foley und Andries van Dam, *Fundamentals of interactive computer graphics: Repr. with corrections*, Reading Ma. 1984.

James D. Foley, Andries van Dam und Steven K. Feiner, *Computer Graphics: Principles and Practice*, 2nd ed., New York, Don Mills, Wokingham, Amsterdam, Bonn, Sydney, Singapore, Tokyo, Madrid, San Juan, Milan, Paris 1995.

⁴ Joice Wittur, *Computer-generated 3D-visualisations in archaeology: Between added value and deception*, BAR international series 2463, Oxford 2013.

was einen neuen Impuls für die Entwicklung von Verfahren und Anwendungen auslöste. In der gleichen Zeit wurde die Unterhaltungsindustrie zu einem weiteren Motor der Entwicklung, mit Animationen für Werbe-Spots, *special effects* für Kinofilme und Video-Spiele. Schließlich wurde Ende der neunziger Jahre die aufwendigen Graphik-Controller durch preiswertere und leistungsstarke 3D-Graphik-Karten abgelöst. Die darin vorhandenen spezialisierten hochparallelen Recheneinheiten (GPUs) gestatteten nun auch die Beschleunigung einer Vielzahl von Anwendungen. Ein Ende der Auswirkungen der GPUs auf die Anwendungen der Computergraphik und nicht nur auf Pixel-basierte Graphik ist noch nicht abzusehen.

Entwicklung der 3D-Modell-Erstellung, CAD und CSG

Der Fortschritt der 3D-Rekonstruktion ist eng verbunden mit der Entwicklung der Computergraphik. Deren mathematische Grundlagen sind lange vor der Computer-Ära gelegt worden. In den sechziger Jahren begann eine intensivere Auseinandersetzung mit Fragen der Computer-gestützten Darstellung und der Interaktion mit geometrischen Objekten.

1950 und folgende: Die Anfänge im Dunkeln. Die frühen Computergraphik-Entwicklungen, z.B. am MIT, bis in die frühen 1960er Jahre hinein, sind bislang nur wenig publiziert worden. Sie waren wenig zielgerichtet und in aller Regel an militärischen Projekten orientiert. Die Geräte zur Ausgabe von Graphiken waren Kathodenstrahlröhren, die eigentlich zur Überwachung der Hardware direkt an die CPU angeschlossen waren, sowie Textdrucker. Der Elektronenstrahl zeichnete eine Linie auf den Schirm, indem die Strahlablenkung durch Digital-Analog-Wandler vom Rechner gesteuert wurde. Der Phosphor der Kathodenstrahlröhre besitzt nur eine begrenzte Nachleuchtzeit, deshalb musste das Bild auf dem Bildschirm regelmäßig aufgefrischt werden. Dafür wurde das Bild in eine *display list* umgesetzt, eine Folge von x-y-Werte-Paaren, den Endpunkten der Linien, die regelmäßig abgearbeitet wurde. Die Alternative, das Bild im Rechner in ein Pixel-Raster aufzulösen, das zeilenweise einem Video-Bildschirm zugeführt wurde, war bis in die 1970 Jahre nicht praktikabel, weil Video-Bildschirme zu langsam und zu niedrig aufgelöst waren.

1960 und folgende: Computergraphik entsteht. Der Begriff „Computergraphik“ wurde ab 1960 durch William Fetter, einem Mitarbeiter von Boeing, aufgebracht. Zu dieser Zeit waren übliche Graphik-Ausgabegeräte an Mainframes über Lochstreifen oder Magnetband *offline* gesteuerte Stiftplotter, sowie Mikrofilm-Aufzeichnungsgeräte mit Kathodenstrahlröhren mit aufwendigen darin integrierten Zeichengeneratoren. Jack Bresenham publiziert 1965 den DDA-Algorithmus, mit dem Linien effizient für Plotter generiert werden konnten. Terminals mit Graphik-Funktionalitäten, insbesondere an Prozessrechnern, kamen im Laufe der 60er Jahre auf. Einen Durchbruch brachten 1969 die Speicherröhren von Tektronix, die keine ständige Bildwiederholung durch den Rechner und keinen aufwendigen Controller brauchten. Sie konnten beliebig komplexe Liniengraphiken

ohne zu flackern darstellen und waren erheblich preiswerter als Graphik-Terminals mit *display list*-Prozessoren.

1963: Sketchpad. Ivan Sutherland legte 1963 in seinem Sketchpad-System die Basis für alle graphisch-interaktiven Computer-Anwendungen.⁵ Sketchpad zeigte, wie über die Bildschirm-Oberfläche unmittelbar mit der Software interagiert werden kann, um Daten einzugeben, Aktionen auszulösen und Ergebnisse zu visualisieren. Sutherland bemühte sich dabei darum, die Interaktion so „natürlich“ wie möglich zu gestalten, um die Benutzbarkeit zu erhöhen.

Eine weitere Innovation von Sutherland war 1966 das *head mounted display*, das die Basis für *virtual reality* darstellte. Zunächst konnte der Betrachter damit eine im Raum schwebende Drahtgitter-Darstellung eines Würfels durch Kopfbewegung von verschiedenen Seiten betrachten.

1963: Lawrence Roberts. Aufbauend auf den Arbeiten Sutherlands erzeugte Lawrence Roberts in den frühen 1960ern mit den Rechnern am MIT aus Fotografien 3D-Modelle.⁶ Anhand von vier oder mehr Punkten, die auf den 2D-Bildern identifiziert wurden, berechnete er die 3D-Koordinaten dieser Punkte und anschließend Kanten und Polygone. Er war darüber hinaus Pionier der Algorithmen für das Entfernen verdeckter, vom Betrachter nicht sichtbarer Bildteile ebenso wie der Berechnung perspektivischer Projektionen mittels Transformationsmatrizen. Roberts berechnete von 3D-Modellen perspektivische 2D-Ansichten von verschiedenen Blickpunkten. Er benutzte die 2D-Datenstrukturen für Punkte und Linien, die Sutherland für Sketchpad entwickelt hatte, und erweiterte sie für 3D-Operationen. Die interne Repräsentation der 3D-Objekte hatte schon wesentliche Elemente der später erfolgreichen *winged edge*-Datenstruktur⁷. Eine Szene aus 3D-Objekten wurde von Roberts in einer Baumstruktur abgespeichert, die an den Blättern geometrische Objekte als Instanzen von Objekten-Definitionen enthielt. Die Kanten waren Transformationen, die als 4x4-Matrizen samt ihren Inversen gespeichert waren, und die Knoten waren, als *picture* bezeichnet, Listen von weiteren *pictures* oder Objekt-Instanzen. Damit antizipiert Roberts auch die hierarchische Struktur des Szenengraphen.

Wie in einem *round table*-Gespräch 1989 von Roberts berichtet wurde, testete er die Leistungsfähigkeit seiner Implementierung an 3D-Modellen von Bauwerken.⁸ Eine (vermutlich hypothetische) „Burgruine“ kann vielleicht als die erste 3D-(Re-)Konstruktion

⁵ Ivan E. Sutherland, „Sketchpad a man-machine graphical communication system,“ *Transactions of the Society for Computer Simulation* 2 (5) 1964.

⁶ Lawrence Gilman Roberts, *Machine perception of three-dimensional soups*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1963.

⁷ Bruce G. Baumgart, *Winged edge polyhedron representation*, Reports / STANFORD UNIV Memo AIM-179, 1972-

⁸ Robert L. Judd, *ACM SIGGRAPH 89 Panel Proceedings*, New York 1989.

angesehen werden. Die *refresh*-Rate kollidierte mit der Belichtungszeit, so dass das Bild der Burg auf der Oszillographenröhre nicht in Gänze abphotographiert werden konnte.⁹

1963 und folgende: 2D-Computer-Anwendungen in der Archäologie. Ab Mitte der 1960er Jahre wurden zunehmend Computer in der Archäologie eingesetzt, wenn auch zunächst vorwiegend für Datensammlungen und statistische Berechnungen. Auch erste graphische Anwendungen, die über die 2D-Visualisierung von Ergebnissen und Illustrationen hinausgingen, wurden berichtet. Wilcock beschrieb eine Anzahl von Computer-Anwendungen in der Archäologie aus dieser Zeit.¹⁰ Er hob das Potential der Computergraphik hervor, insbesondere das des Stift-Plotters als automatisiertes Zeichenwerkzeug. Cowgill erwähnte 1967 die Möglichkeit, die Formen von Artefakten digital im Computer zu speichern.¹¹

1960 und folgende: CAD kommt auf. *Computer aided design* (CAD) wurde in den Ingenieurs- und Architekturdisciplinen mit dem Ziel entwickelt, neue Objekte zu konstruieren. Etwas zeitversetzt und zunächst unabhängig davon entstanden im Vermessungswesen andere Computer-gestützte Methoden, Befunde zu dokumentieren, vor allem 2D- und 2,5D-Ansätze in Verbindung mit Geo-Informationssystemen (GIS) zur Erfassung von Gebäuden und Ensembles. Die Dokumentation und Rekonstruktion von historischen Artefakten konnte sich in Folge erfolgreich solcher vorgefundenen Methoden und ihrer Experten bedienen.

Die Treiber der CAD-Entwicklung waren um 1965 große Konzerne im Automobilbau und der Flugzeugindustrie. Vermutlich die erste kommerzielle CAD-Anwendung wurde in der Mitte der 1960er Jahre entwickelt.¹² Kristine Fallon stellte die Entwicklung der Computergraphik-Anwendungen im Ingenieurs- und Konstruktions-Bereich sehr ausführlich dar.¹³ Sie vermutete, dass 1966 mit PD&S in Boston die erste Consulting-Firma gegründet wurde, die Computergraphik für Architekten anbot.

Mitte der 70er wurden CAD-Systeme auf Minicomputern (vorwiegend VAX von Digital Equipment) von großen Konstruktions- und Architektur-Firmen genutzt. Fallon wies auf eine bemerkenswerte Architektur-Visualisierung von D.P.Greenburg von der Cornell University Anfang der 1970er Jahre hin. Greenburg habe, im Gegensatz zu den sonst üblichen Drahtnetz-

⁹ Leider macht Roberts in seinem Diskussionsbeitrag keine zahlenmäßigen Angaben zur Komplexität des Bildes oder des Modells.

¹⁰ John D. Wilcock, *A general survey of computer applications in archaeology*, in: *Science and Archaeology* 9, 1973.

¹¹ George L. Cowgill, *Computer applications in archaeology*, in: the November 14-16, 1967, fall joint computer conference, 1967, S. 331.

¹² Don Bissell, *Was the IDIOM the first stand-alone CAD platform?*, in: *IEEE Annals of the History of Computing* 20 (2) 1998, doi:10.1109/85.667292.

¹³ Kristine K. Fallon, *Early computer graphics developments in the architecture, engineering and construction industry*, in: *IEEE Annals of the History of Computing* 20, (2)1998, doi:10.1109/85.667293.

Darstellungen, ein geplantes Museum mit schattierten Oberflächen visualisiert. Fallon bemerkte, dass Entwerfen und Konstruieren bis in die 90er Jahre hinein der Schwerpunkt des Einsatzes von CAD-Systemen blieben.

Weisberg schilderte 2008 den Aufstieg und Fall der frühen CAD-Firmen und ihrer Produkte und Entwickler in großer Sorgfalt; allerdings spielten Architektur- und erst recht Archäologie-Anwendungen dabei eine eher untergeordnete Rolle.¹⁴ Er erwähnte, dass 1967 Harper und Sides ein Bau-Planungs-Programm auf einem Prozessrechner von IBM entwickelten. Die Chicagoer Firma SOM entwickelte 1970 ein umfassendes Programm für Architektur-Design-Anwendungen, das später unter dem Name AES von IBM vermarktet wurde.

Solid modelling-Systeme, basierend auf *Constructive Solid Geometry* (CSG), und zeichnungsorientierte CAD-Systeme entwickelten sich bis in die 70er Jahre weitgehend parallel zueinander - CAD mehr im industriellen Umfeld und CSG eher im akademischen Bereich.

Das Programm Autocad erschien 1984 auf dem Markt. Es wurde hauptsächlich als ein System zum 2D-Zeichnen genutzt, obwohl es seit 1986 über 3D-Elemente verfügte. Das Programmpaket Autodesk 3D Studio, später Autodesk 3DS, erschien 1990. Es bot weit mehr und höher entwickelte Oberflächenmodellierung als Autocad und war speziell dazu gedacht, 3D-Modelle zu konstruieren und diese Modelle zu visualisieren und zu animieren. Autocad und Autodesk 3D Studio nur zwei Vertreter der zahlreichen CAD-Systeme, die für alle Arten von Computern im Laufe der 80er Jahre vermarktet wurden, zunächst für Prozessrechner und Workstations, dann zunehmend auch für die leichter verfügbaren PCs.

1970er bis heute: Unterhaltungsindustrie. In einem Artikel von 1998 zeigt Morie die Entwicklung der Computergraphik-Nutzung von einer anderen Seite, der Filmindustrie:¹⁵ In den 1970er Jahren entwickelten Computergraphiker alle benötigten Werkzeuge und Techniken jeweils neu, die für Filmproduktionen benötigt wurden, denn es gab kaum schlüsselfertige Systeme für die Aufgaben der Filmindustrie. 3D-Computergraphik war eine recht esoterische Technologie; es hieß, sie gäbe Antwort auf Fragen, die noch nicht gestellt wurden. 1974 wurde im Hollywood-Film *Futureworld* erstmalig 3D-Computergraphik eingesetzt. Die Unterhaltungsindustrie vergab gelegentlich Aufträge an Hochschulen, um ihre Probleme lösen zu lassen. Die Werbeindustrie war in den späten 1970er und frühen 80er Jahren unter den Ersten, die intensiver 3D-Graphik nutzten, insbesondere für kurze TV-Werbe-Filme, die aufgrund ihrer Neuheit Aufmerksamkeit erweckten. Ab der Mitte der

¹⁴ Dave Weisberg, *The engineering design revolution CAD history: The people, companies and computer systems that changed forever the practice of engineering*, Internet, URL<www.cadhistory.net> (abgerufen am 13.09.2017)

¹⁵ Jacquelyn F. Morie, *CGI training for the entertainment film industry*, in: IEEE Computer Graphics and Applications 98, Januar/Februar 1998.

1980er Jahre gab es zunehmend spezialisierte Agenturen, die die Filmindustrie belieferten. Noch war die Produktion annähernd realistischer 3D-Computergraphik-Szenen zu teuer, um sich auf breiter Basis durchzusetzen. Das änderte sich in den 90er Jahren. *Special effects* und Computer-Animationen waren seitdem unverzichtbar, was durch den Erfolg von Pixars *Toy Story* deutlich wurde. Im Laufe dieser Jahre verschob sich die Expertise der mit der Erstellung von 3D-Computergraphik-Animationen befassten Experten von Computer-Spezialisten hin zu Künstlern, die sich die Fachkenntnisse aneigneten und auch die Entwicklung der Werkzeuge in ihrem Sinne vorantrieben.

Eine ähnliche Entwicklung vollzog sich bei den Computer-Spielen, die zwar etwas später einsetzte, aber inzwischen einen größeren Marktanteil besitzt und mehr Entwickler beschäftigt als die Filmindustrie.

1975: Zeichen-Programme, Video frame buffer. 2D-Zeichen-Programme, die das Arbeiten mit Pinsel und Stift am Computer nachbilden, werden hier nicht ausführlicher betrachtet. Sie besitzen eine Bedeutung für die Erstellung von 3D-Modellen, da mit ihrer Hilfe oft Texturen und anderes manuell nachbearbeitet werden müssen. 2D-Zeichen-Programme erschienen zuerst am Anfang der 70er Jahre. Ab 1975 wurden von Evans und Sutherland die digitalen *frame buffer (pixel refresh memories)* entwickelt und als Bildwiederholpeicher für den zeilenweise arbeitenden Videobildschirm genutzt. Sie besaßen zunächst 512 x 480 Pixel mit je 8 Bit und arbeiteten mit *color lookup tables*. Ab 1980 wiesen sie 3x8 Bit Farbtiefe für RGB auf, bald auch 4x8 Bit mit dem zusätzlichen Alpha-Kanal für Transparenz, und 1024 x 1024 Pixel. Der Bildwiederholpeicher konnte über *double buffering* vom Anwendungsprogramm gelesen und geschrieben werden, ohne dass inkonsistente Zwischenzustände sichtbar wurden.¹⁶

1980 und folgende: Graphische Workstations und Personal computer. In den 80er Jahren waren Video-Bildwiederhol-Speicher genügend hoch aufgelöst und schnell, um die Speicherröhren zu verdrängen. Ebenso wurden die Prozessrechner von Minicomputern und graphischen Workstations abgelöst, typischer Weise mit Motorola 68000-Prozessoren, und von den sehr erfolgreichen Unix-Workstations von Sun und Silicon Graphics.

Der IBM-PC mit der CGA-Graphik kam 1981 auf den Markt, aber er war erst Ende der 80er Jahre leistungsfähig genug, um CAD-Software zu betreiben, die den Vergleich mit professioneller, Workstation basierter CAD-Software standhalten konnte. Die in Forschung und Lehre sehr beliebte Hercules-Graphikkarte für den IBM-PC erschien 1982. Sie konnte auf dem bis dahin nur alphanumerischen PC-Bildschirm 720 x 384 Pixel mit 4 Helligkeitsstufen ausgeben. Die Bilder wurden pixelweise im Hauptspeicher erzeugt. 1993 brachte Microsoft Windows NT für den PC auf den Markt, ein Betriebssystem, das im wesentlichen die Funktionalität eines Unix-Systems bot, so dass die Grenzen zwischen PC und Workstations

¹⁶ Alvy R. Smith, *Digital paint systems: an anecdotal and historical overview*, in: IEEE Annals of the History of Computing, 2001.

zunehmend verschwanden und viele Anwendungen, die ursprünglich für Workstations entwickelt wurden, nun auch im PC umgesetzt wurden..

Das Erscheinen des Apple Macintosh setzte 1984 einen weiteren Meilenstein, indem die graphische Benutzeroberfläche mittels des Raster-graphischen Bildschirms in ein geschlossenes, vollständiges System integriert war. Viele Anwendungen für den Designbereich konzentrierten sich in Folge auf den Mac.

1982 und folgende: 3D-Anwendungen der Archäologie.In den 1980er und 1990er Jahren wurde die Graphik-Peripherie der Computer in der Archäologie vorwiegend wie Zeichenmaschinen zur Erzeugung zweidimensionaler Datenvisualisierungen gebraucht. Laut Pfarr-Harfst wurde 3D-Computer-Grafik seit den 1980er Jahren systematisch als Kommunikationsmedium im Bereich *cultural heritage reseearch* und Wissens-Transfer verwendet.¹⁷

Frischer berichtete, dass ab 1982 3D-Modelle manuell, unter Einsatz von CAD-Software, konstruiert wurden.¹⁸ Nach Miller wurden in Großbritannien die ersten 3D-Visualisierungsprojekte in den 1980er Jahren begonnen. Die Software und die Computer wurden von großen Firmen gesponsert, die sich eine Werbewirkung versprachen.¹⁹ Reilly schrieb ebenso, dass die Verwendung der Computergraphik in der Archäologie von dem Bedürfnis geprägt war, schöne Bilder für die Öffentlichkeit zu produzieren, und dass zu der Zeit die Forschung nicht im Vordergrund stand.²⁰ Cornforth und Davidson beschrieben, dass Fishbourne Palace mit Hilfe eines Apple Macintosh II modelliert wurde.²¹ Huggett wies 1990 auf die Möglichkeiten hin, die Autocad für Archäologen böte. CAD wurde zur Aufnahme von Befunden benutzt, aber auch zur Rekonstruktion von Vergangenen, wobei

¹⁷ Mieke Pfarr-Harfst, *Typical workflows, documentation approaches and principles of 3D digital reconstruction of cultural heritage*, in: Sander Münster et al. (Hg.), *3D research challenges in cultural heritage II: How to manage data and knowledge related to interpretative digital 3D reconstructions of cultural heritage*, Cham 2016.

¹⁸ Bernard Frischer, *Introduction*, in: Bernard Frischer und Anastasia Dakouri-Hild (Hg.), *Beyond illustration: 2D and 3D digital technologies as tools for discovery in archaeology*, Oxford 2008, S. v–xxii.

¹⁹ Paul Miller und Julian Richards, *The good, the bad, and the downright misleading: archaeological adoption of computer visualization*, in: *BAR INTERNATIONAL SERIES* 600, 1995.

²⁰ Paul Reilly (Hg.), *Archaeology and the information age: A global perspective; [derived from the Second World Archaeological Congress, held in Barquisimeto, Venezuela, Sept. 1990]*, *One world archaeology* 21, London 1992.

²¹ Janice Cornforth und Craig Davidson, *Picturing the past*, in: *Archaeological computing newsletter* 19, 1989.

Huggett eine visuelle Unterscheidung für erforderlich hielt. Er publizierte Makros und Menüs, die die Benutzung von Autocad für Archäologen erleichterten.²²

Wood und Chapman stellen 1990 Festkörpermodellierung und Oberflächenmodellierung für die Archäologie gegenüber, mit einigen Praxisbeispielen und den dabei aufgetretenen Problemen (u.a. Inkompatibilität der verwendeten Softwaresysteme).²³ Sie kamen zu dem Schluss, dass keines der eingesetzten Programme ideal war, und hatten die Hoffnung, dass die kommende Version 11 von Autocad oder Software von Intergraph einige Probleme löse.

Von dieser eher experimentierenden Nutzung ausgehend fanden in den 1990er Jahren 2D-GIS-Anwendungen zunehmend Eingang in die Archäologie, und CAD-Anwendungen wie Autocad und 3D Studio wurden für Architektur-Rekonstruktionen eingesetzt.²⁴ Eine Darstellung der frühen 3D-Rekonstruktionen für die Archäologie aus den 1980er bis 1990er Jahren findet sich bei Wittur.²⁵ Die Auswahl der Modellierungssysteme war oft nicht Teil der Projektplanung, sondern wird durch Präferenzen der Beteiligten oder das zur Verfügung stehende Equipment vorgegeben.²⁶

1985 und folgende: 3D-Software-Normen, Core, GKS und Nachfolger. Van Dam bezeichnete Normen als ein Übel, das aber sehr notwendig sei.²⁷ Ab Mitte der 1970er Jahre stellte man fest, dass die Portierbarkeit von Computergraphik-Anwendungen aufgrund der inkompatiblen kommerziellen Softwareentwicklungen zunehmend schwieriger wurde. Aus der ACM heraus wurde der erste graphische Standard Core (*3D Core Graphics System*) 1977 entwickelt.²⁸ Parallel und im Wettstreit wurde GKS (Graphisches Kern-System) mit dem Ziel

²² J. Huggett, *Programming AutoCAD for the archaeologist*, in: Archaeological computing newsletter 25, 1991.

²³ Jason Wood und Gill Chapman, *Three-dimensional computer visualization of historic buildings with particular reference to reconstruction modelling*, in: Paul Reilly und Sebastian Rahtz (Hg.), *Archaeology and the information age: a global perspective*, London 1992, S. 123–46.

²⁴ Julian D. Richards, *Recent trends in computer applications in archaeology*, in: *Journal of Archaeological Research* 6 (4) 1998.

²⁵ Wittur 2013

²⁶ Oft sind Informatik- und Technologie-Aspekte der erstellten Rekonstruktionen schwer zugänglich tief in Projektdokumentationen verborgen. Ein interessantes Projekt könnte sein, die Dokumentationen der 3D-Rekonstruktionen aus dieser Zeit auf die verwendeten System hin zu analysieren.

²⁷ Steve Carson et al., *The history of computer graphics standards development*, in: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 32 (1) 1998, doi:10.1145/279389.279434.

²⁸ R. H. Ewald und R. Fryer, *Final report of the GSPC state-of-the-art subcommittee*, in: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 12, (1-2)1978, doi:10.1145/1216491.1216493.

einer internationalen Norm entwickelt.²⁹ GKS wurde 1985 zur ISO-Norm - zunächst auf 2D beschränkt und 1987 zu GKS-3D ergänzt.³⁰ Core und stärker noch GKS haben durch Abstraktion und Systematik für eine gemeinsame Begriffsbildung im Bereich der Graphik-Programmierung gesorgt. Sinclair e.a. erwähnten 1992, dass im Gegensatz zur Situation bei den Datenbanken fehlende Computergraphik-Standards die Computernutzung in der Archäologie erschweren, und hofften, dass GKS die Situation verbessere.³¹

Ein erfolgreiche Programmierschnittstelle im 3D-Bereich wurde ab 1988 PHIGS (*Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System*).³² PHIGS lag auch der von Foley und van Dam verwendeten didaktischen 3D-Software SRGP (Simple Raster Graphics Package) zugrunde, die in Computergraphik-Vorlesungen verwendet wurde.³³ PHIGS war im Wesentlichen noch auf Vektor-Graphik ausgerichtet - die damaligen Normungsbemühungen wurden von der Technologieentwicklung überholt, die inzwischen zu Raster-graphischen Systemen übergegangen war. Dieses Defizit wurde 1991 durch PHIGS PLUS behoben.³⁴ PHIGS PLUS enthielt auch Schnittstellen für modernere B-Spline-Linien und -Flächen (NURBS, *non uniform rational b-splines*) und Schattierungsalgorithmen. Auch diese Norm wurde bald durch de-facto-Industriestandards überholt, in diesem Fall durch OpenGL, die aber von den Grundlagen profitierten, die die ISO-Normen gelegt hatten. Ein Ansatz, Normen für die graphische Programmierung in die Objekt-orientierte Software-Welt hineinzubringen, war PREMO (*Presentation Environment for Multimedia Objects*), das 1998 verabschiedet wurde, aber wenig Marktbedeutung erlangte.³⁵

1992 bis heute: OpenGL. OpenGL ist eine Programmierschnittstelle zwischen dem Anwenderprogramm und der Graphikhardware zum Modellieren und Projizieren von dreidimensionalen Objekten. OpenGL wurde in den 90er Jahren für die SGI-Workstations entwickelt und in die *public domain* gestellt.³⁶ Seitdem wurde OpenGL kontinuierlich weiterentwickelt und an neue Anforderungen angepasst. Die Schnittstelle umfasste mehrere Hundert Befehle zum Verwalten von elementaren geometrischen Primitiven wie Punkten,

²⁹ Peter R. Bono et al., *GKS - The first graphics standard*, in: IEEE Computer Graphics and Applications 2 (5) 1982, doi:10.1109/MCG.1982.1674306.

³⁰ ISO/IEC 7942, *ISO/IEC 7942 1985* (1985).

³¹ Paul Sinclair, et al., *The impact of the information technology on the archaeology of southern and eastern Africa: the first decades*, in: Paul Reilly, Sebastian Rahtz (Hg.), *Archaeology and the information age: a global perspective*, London 1992.

³² ISO/IEC 9592, *ISO/IEC 9592 1989* (1989).

³³ Foley et al. 1995.

³⁴ ISO/IEC 9592-4, *ISO/IEC 9592-4 1991 : Plus Lumière und Surfaces (PLUS)* (1991)

³⁵ Ivan Herman et al., *PREMO: an ISO standard for presentation environment for multimedia objects*, ACM 1994.

³⁶ Mark Segal und Kurt Akeley, *Segal, Akeley* 1999.

Linien, Polygonen und Bezierkurven und von Attributen wie Farben und Normalenvektoren sowie von Transformationen und Projektionen. Auch höhere geometrische Objekte wie Kugel, Kegel und Torus bis zu komplexeren Objekten wie NURBS und Quadrics stehen zur Verfügung. Objekte können von der Anwendung selbst definiert und unter einem Namen in der Display-Liste gespeichert und damit mehrfach instanziiert werden. Einmal gesetzte Attribute, wie z.B. Farben, bleiben als Zustand erhalten, bis sie explizit geändert werden.³⁷

OpenGL bietet den Durchgriff auf die Optimierungs-Features der jeweiligen Hardware (*frame buffer*, Transformationen, hierarchische Modellierung, *z-buffer*, *texture handling*, *shader*). OpenGL hat sich als de-facto-Standard und als eine stabile Basis für die Erstellung von graphischer Anwendungssoftware herausgestellt, der die Portierbarkeit von Anwendungen ermöglicht, ohne auf Leistungszuwächse neuer Hardware zu verzichten.

Interne Repräsentationen

Geometrische Formen werden im Computer durch Datenstrukturen beschrieben. Elementare Objekte sind Punkte im dreidimensionalen Raum. Werden benachbarte Punkte durch Kanten verbunden, erhält man ein sogenanntes Drahtgittermodell (*wire frame*). Das reicht für eindeutige Repräsentation nicht aus. Deshalb werden alternativ 3D-Modelle durch ihre Oberflächen oder die Volumina der beteiligten Objekte beschrieben.

Punktwolken. Von Scannern oder mit der Photogrammetrie werden umfangreiche Punktwolken erzeugt, die jedoch keine eindeutige Oberflächen besitzen. Wenn die Punkte dicht genug liegen (im Bereich der Bildschirmauflösung), ergibt das überzeugende, detailreiche Bilder. Ein weiteres Hineinzoomen ist jedoch nicht mehr ohne weiteres möglich. Ein Ausweg ist die Visualisierung mittels Oberflächen, die von den Scanner-Punkten aufgespannt werden. Gebhardt e.al. beschreiben ausführlich und mit Hintergrundinformationen, wie sie aus Punktwolken automatisiert Oberflächenmodelle erzeugt haben.³⁸ Die Beschreibung von Software zur Verarbeitung von Punktwolken (Reduktion, Oberflächen-Rekonstruktion, Registrierung) ist leider außerhalb der Möglichkeiten dieses Aufsatzes.³⁹

³⁷ Durch diese modalen Attribute der graphischen Elemente erscheint OpenGL noch der generativen Graphik der 1980er Jahre verhaftet, wie z.B. Core.

³⁸ Scott Gebhardt, Eliezer Payzer und Leo Salemann, *Polygons, point-clouds, and voxels, a comparison of high-fidelity terrain representations*, in: Simulation Interoperability Workshop and Special Workshop on Reuse of Environmental Data for Simulation—Processes, Standards, and Lessons Learned.

³⁹ Fabio Remondino, *From point cloud to surface: The modeling and visualization problem*, in: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D

Oberflächenmodelle. Um ein dreidimensionales Objekt eindeutig durch seine Oberfläche zu beschreiben (*boundary representation*, B-rep), begrenzen die Kanten Oberflächenelemente (Polygon, Facette, *patch*). Die Polygone müssen zu einem vollständig geschlossenen, überschneidungsfreien Netz verbunden werden (*mesh*, Mannigfaltigkeit). Zusätzlich werden in der Regel zu jeder Ecke und/oder zu jedem Polygon die Normalen angegeben; das sind Einheitsvektoren, die senkrecht auf der Oberfläche stehen und konsistent in Richtung der Außenseite des Objekts zeigen sollen. Eine 3D-Datenstruktur soll außerdem gestatten, Nachbarschaften einfach abzufragen, z.B. welche Kanten an einem Punkt enden oder welche Polygone sich in einer Kante schneiden. Eine optimale Datenstruktur gibt es jedoch nicht, da ihre Eigenschaften von den Anwendungen abhängen. Gute Datenstrukturen sind mehrfach entwickelt und beschrieben worden. Eine frühe, viel zitierte Quelle ist die Arbeit von Baumgart aus 1975.⁴⁰

Schon Roberts nutzte 1963 polygonale Facetten zur Modellierung. Im Laufe der 1970er Jahre wurden sie von u.a. Blinn sowie Evans und Sutherland vervollkommen, insbesondere ihr *rendering*. Seit den 1980er Jahren dominierte ihre Benutzung in der 3D-Modellierung. Vierendeckige Polygone erschienen intuitiv ansprechend, insbesondere, wenn man von 2,5 D *height maps* über einem regelmäßigen Raster ausging, aber sie können sich an Krümmungen nicht „anschießen“. Man ging entweder zu polynomial definierten Oberflächen (Coons *patches*, Spline-Flächen, NURBS) über, oder die Flächen wurden in Dreiecke aufgeteilt (trianguliert). Beide Methoden wurden in den 1970er Jahren entwickelt. Im Kontext der 3D-Rekonstruktion haben sich polynomiale Flächendefinitionen nicht eingebürgert.

Konstruktive Modellierung mit Festkörpern. Bei der konstruktiven Festkörper-Modellierung (*constructive solid modelling*, CSG) werden Objekte man im Rechner beschreibt, indem man von einfachen Festkörpern (Würfel, Kugel, Zylinder) ausgeht, die auf verschiedene Weise zu ausgedehnten Objekten mit komplizierteren Oberflächen kombiniert werden.

Mit CSG wird in der Regel die Instanziierung von elementaren Körpern bezeichnet, die positioniert, in der Größe angepasst und durch boolesche Operationen (Durchschnitt, Vereinigung, Differenz) kombiniert werden. Reilly wies darauf hin, dass die ersten 3D-Rekonstruktionen in Großbritannien und Irland 1985 mit Hilfe von CSG erstellt wurden. Er stellte 1990 fest, dass Festkörpermodellierung in der Archäologie eine längere Tradition hatte

Models, 24-28 February 2003, Tarasp-Vulpera, Switzerland, XXXIV-5/W10 2003.

Radu B. Rusu und Steve Cousins, *3D is here: Point Cloud Library (PCL)*, in: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, S. 1–4.

⁴⁰ Baumgart 1972.

als B-rep-Modelle und hob das von IBM entwickelte *solid modelling*-System WINSOM hervor.⁴¹

Eine extreme Form des CSG benutzte nur Halbräume, bzw. unendlich ausgedehnte Ebenen, die den Raum in ein Inneres und ein Äußeres teilen (wie mit einer Säge). Die Teile wurden durch boolesche Operationen miteinander verknüpft. Woodwark beschrieb, dass mit dieser Methode 1983 der Tempel von Sulis Minerva des römischen Bath mit seiner Umgebung mit 2.300 Halbräumen modelliert wurde, sowie ein Jahr später das römische Bad in Caerleon, Wales, mit 7.000 Halbräumen.⁴²

Wenn der 3D-Raum regelmäßig in gleichgroße würfelförmige Zellen aufgeteilt wird (*volumetric pixels*, Voxel), kann damit ein Objekt beschrieben werden, indem pro Voxel festgehalten wird, ob es sich im Innern des Objekts oder außerhalb befindet. Die Koordinaten der Oberfläche ergeben sich aus der Position im Voxel-Array. Voxel fanden durch die 1973 von Hounsfield entwickelte Computertomographie intensiv in der 3D-Modellierung Eingang. Die Verwendung von Voxeln ist in der 3D-Rekonstruktion nicht verbreitet. Wittur weist darauf hin, dass diese Methode von Nigro 2001 in der Archäologie genutzt wurde.⁴³

Formate für Austausch und Archivierung

Bei der Publikation von 3D-Rekonstruktionsprojekten wurde den verwendeten Formaten wenig Aufmerksamkeit gewidmet, da Wiederverwendbarkeit und Austausch keine vordergründige Rolle spielten. Im folgenden wird auf einige 3D-Datenformate hingewiesen, die zum Austausch und zur Archivierung von 3D-Modellen benutzt wurden. Die Betonung liegt auf solchen Formaten, die nicht an eine Anwendungssoftware oder einen Hersteller gebunden sind. Die Auswahl ist bei weitem nicht vollständig. Erwähnt werden könnten auch COLLADA, PLY, 3DS, FBX und andere mehr. Eine frühere Übersicht über zahlreiche 3D-Formate und die Programme, die damit umgehen konnten, bieten McHenry und Bajcsy.⁴⁴

1980, 1986, 1987: IGES. Erst 1979 wurde mit CAM-1 eine erste Version eines Standard-Formats für den Datenaustausch zwischen CAD- und CSG-Systemen vereinbart. Parallel dazu

⁴¹ Paul Reilly, *Three-dimensional modelling and primary archaeological data*, in: Paul Reilly, Sebastian Rahtz (Hg.), *Archaeology and the information age: a global perspective*, London 1992.

⁴² John Woodwark, *Reconstructing history with computer graphics*, in: *IEEE Computer Graphics and Applications* 11, (1) 1991, doi:10.1109/38.67693.

⁴³ Joseph D. Nigro et al., *The creation and potential applications of a 3-dimensional GIS for the early hominin site of Swartkrans, South Africa*, in: Göran Burenhult (Hg.), *Archaeological informatics - pushing the envelope*, Oxford 2002.

⁴⁴ Kenton McHenry und Peter Bajcsy, *An overview of 3d data content, file formats and viewers*, in: National Center for Supercomputing Applications 1205, 2008.

wurde die US-Norm IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) entwickelt und 1980 veröffentlicht, die den Datenaustausch zwischen technischen Zeichensystemen zum Gegenstand hatte.⁴⁵ IGES beschränkte sich zunächst auf 2D-Zeichnungs-Daten und -Annotationen. In der Folge definierte IGES eine Produkt-neutrale Repräsentation von Geometrie aus 2D- und 3D-Kurven, Flächen und Körpern, sowie deren Annotation und Bemaßung. Mit Version 3 von IGES wurde 1986 auch der Austausch von Architektur-Daten spezifiziert worden. Ab 1987 gingen die zwischenzeitlichen Weiterentwicklungen im CAM-1-Bereich in die Version 4 von IGES ein, das dann auch den Austausch von CSG-Modellen zwischen prominenten CAD-Systemen ermöglichte.⁴⁶

1988: STL. 1988 wurde mit dem stl-Format (Stereo-Lithographie, auch *Standard Triangulation Language* oder *Surface Tessellation Language*) von 3D-Systems ein einfaches, offenes Format für 3D-Oberflächen geschaffen, das als Geometrie-Elemente Ecken, Dreiecke und Polygon-Normale enthält. Es wendete sich in erster Linie an *rapid prototyping* und den 3D-Druck. Oberflächeneigenschaften wie Farben oder Texturen können in der Standard-Version nicht definiert werden.⁴⁷

1989: OBJ. Das oft benutzte obj-Format wurde ursprünglich um 1989 von Wavefront Technologies geschaffen und ging an AutoDesk über. Dadurch, dass es gut dokumentiert und leicht implementierbar war, gewann es schnell Beliebtheit als Austausch- und Archivierungsformat.⁴⁸ Es gestattete, Oberflächen von 3D-Objekten mittels Polygonen und parametrischen Patches zu definieren. Materialeigenschaften wie Farben und Texturen konnten über eine externe mtl-Datei beschrieben werden.⁴⁹

1994: STEP. IGES war mindestens bis zum Ende der 1980er Jahre das de-facto-Standard-Datenaustauschformat. Einige Defizite von IGES, wie fehlende CAD-Datenelemente, u.a. für B-rep, und die träge Verarbeitung großer Dateien, führten zur Definition von alternativen Datenaustauschformaten (u.a. PDDI, VDA/FS, PDES, CAD 1). Schließlich begann die ISO 1984 Aktivitäten unter der Überschrift STEP mit dem Ziel, eine internationale Norm zu entwickeln, die ermöglicht, alle Informationen, die ein computerisiertes Produktmodell enthält, in Hersteller- und System-neutraler Form über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg zu erfassen, ohne an Vollständigkeit zu verlieren. Dies führte zur ISO-Norm 10303

⁴⁵ Ansi 1980.

⁴⁶ Peter Wilson, *A short history of CAD data transfer standards*, in: IEEE Computer Graphics and Applications 7 (6) 1987, doi:10.1109/MCG.1987.276899.

⁴⁷ Inc. 3D Systems, *3D Systems 1989*, Valencia 1989.

⁴⁸ Die Interoperabilität mittels obj wird dadurch eingeschränkt, dass Anwendungen inkompatible Teilmengen verwenden.

⁴⁹ Wavefront, *OBJ file format summary*, in: FileFormat.info, 2011.

STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*), deren erste Version 1994 verabschiedet wurde.⁵⁰

Mit STEP können Eigenschaften wie Geometrie, Topologie, Struktur, Größe, Toleranzen, Finite Elemente, Materialeigenschaften, elektrische Eigenschaften, Zeichnungselemente und Präsentation beschrieben werden. Die geometrischen Eigenschaften beinhalten Punkte, Kanten, Kurven, Oberflächen für CSG und polygonale Repräsentation.

Charakteristisch für STEP ist, dass es definierte Teilmengen gibt, für die die Norm-Konformität nachgewiesen werden kann. Die Anwendungen von STEP erstrecken sich über viele Bereiche von Computer-gestütztem Entwurf, Konstruieren und Simulation.⁵¹ Architektur- oder Bauwerks-Daten sind nicht im gleichen Umfang vertreten wie z.B. Maschinenbau und Elektrotechnik. Obwohl STEP allgemein als bedeutend dargestellt wird, schritt seine Akzeptanz nicht so schnell wie erwartet voran. Ein Grund könnte die große Komplexität und der Widerwille gegen Abkehr von Bekanntem sein.

Konformität eines Anwendungsprogramms mit IGES oder STEP bedeutet, dass das Programm die Definitionen lesen und „verstehen“ kann. Ob es sie aber genau so interpretiert wie das erzeugende Programm, war nicht sichergestellt. Dies kann ein Grund für die lückenhafte Akzeptanz dieser Standards gewesen sein.⁵²

1994: VRML. In den 1990er Jahren wurde für Anwendungen im *world wide web* der Bedarf an einem unabhängig einsetzbaren und von Browsern ohne spezielle *plug-ins* darstellbaren Datenformat deutlicher. Als erster 3D-Standard im Internet wurde die populäre Web3D-Technik *Virtual Reality Modeling Language* (VRML) 1994 in der ersten Version und 1997 in der ergänzten zweiten Version veröffentlicht.⁵³ VRML umfasst die Geometrie-Elemente Ecken, Linien, Polygone, Kurven, Bögen, parametrische Patches, Normale sowie CSG-Objekte. Objekt-Eigenschaften wie Farben und Texturen können definiert werden. Auch ist dynamisches Verhalten und Interaktivität definierbar. Durch Hyperlinks können beliebige Objekte im Web referenziert werden.

VRML folgt in seinem Aufbau dem Szenen-Graphen von Open-Inventor. Seine Baumstruktur enthält als Blätter Instanzen primitiver (d.h. elementarer) Objekte mit *default*-Werten. Die Zwischenknoten enthalten Transformationen, Attribute, Aktionen sowie Gruppierungen von Unterknoten. An der Spitze steht ein Wurzelknoten, der die Welt repräsentiert. Anderson e.al. führten 2010 einige Anwendungen zur *cultural heritage*, wie

⁵⁰ ISO 10303, *ISO 10303 1994*.

⁵¹J. Wapakabulo et al., *A step towards the adoption of data-exchange standards: a UK defence community case study*, in: The 4th Conference on Standardization and Innovation in Information Technology, 2005, S. 242–53.

⁵²Kent A. Reed, *Product modeling of buildings for data exchange standards: from IGES to PDES/STEP and beyond*, in: Conceptual modelling of buildings, *CIB W 74*, 1988.

⁵³ISO/IEC 14772 1994

virtuelle Museen, auf , die auf VRML basierten.⁵⁴ Über die Web-Anwendung hinaus eignet sich VRML als Austauschformat für 3D-Geometrie.

Raytracing, Schattenwurf oder NURBS findet man nicht in VRML, sondern erst im Web3D-Nachfolger *Extensible 3D Format (X3D)*, der 2005 von der ISO/IEC veröffentlicht wurde.⁵⁵

Gewinnung der 3D-Daten

In der *Computer Vision* und der Photogrammetrie bezeichnet „Rekonstruktion“ von Objekten die Gewinnung der Koordinaten dieser 3D-Objekte aus Messungen und aus Bildern.⁵⁶ Wenn 3D-Rekonstruktionen auf realen Objekten basieren bzw. deren Darstellung integrieren, stammen ihre Daten oft von 3D-Scannern, die eine schnelle und genaue Datenaufnahme ermöglichen. Im Anfang stand allerdings die punktweise traditionelle Vermessung, auf die hier nicht eingegangen wird (siehe dafür Heiliger⁵⁷). Zunächst wurden Fotografien hinzugezogen und die Methoden der Photogrammetrie benutzt.

1858-1950: Wurzeln der Photogrammetrie. Albrecht Meydenbauer begründet 1858 die photogrammetrische Gebäudevermessung mit dem Ziel der Erfassung unzugänglicher Objekte und detailreicher Dokumentation. Wiedemann et al. konnten die historischen Aufnahmen Meydenbauers für eine 3D-Rekonstruktion nutzen.⁵⁸

Ab 1900 begann mit dem Bau des Stereokomparators unter Carl Pulfrichs Leitung die Einführung des stereoskopischen Messprinzips, das die photogrammetrische Auswertung revolutionierte. 1908 erfand Eduard von Orel in Wien den Stereoautographen, der die stereoskopische Messung unmittelbar mit der Kartierung verband. Daraus entstehen mehrere Generationen von stereophotogrammetrischen Auswertegeräten, die nach unserem heutigen

⁵⁴Eike F. Anderson et al., *Developing serious games for cultural heritage: A state-of-the-art review*, in: *Virtual Reality* 14, (4)2010, doi:10.1007/s10055-010-0177-3.

⁵⁵ISO/IEC 19775 -77 2005

⁵⁶ Wolfgang Förstner und Bernhard P. Wrobel, *Photogrammetric computer vision: Statistics, geometry, orientation, and reconstruction*, *Geometry and computing* 11 (Cham: Springer, 2016)

⁵⁷ Ralph Heiliger, *Die Vermessung von Architektur: Von Pareto, Parmenides und dem schönsten Weihnachtsbaum* (Lohmar: ratio-books, 2016)

⁵⁸ Albert Wiedemann, Matthias Hemmleb und Jörg Albertz, „Reconstruction of historical buildings based on images from the Meydenbauer archives,“ in *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII* (Amsterdam: Woodhead Pub, 2000), Introduction i-ii

Sprachgebrauch Analog-Computer darstellten, und die der Photogrammetrie zum Durchbruch verholfen haben.⁵⁹

1963 und folgende: Photogrammetrie in der 3D-Rekonstruktion. Die Arbeiten Roberts am Anfang der 1960er Jahre sind schon erwähnt worden. Roberts benötigte wie Meydenbauer für photogrammetrische Rekonstruktionen die exakte manuelle Einmessung von Kontrollpunkten.

Am Anfang der 1980er Jahre fanden Digitalrechner Eingang in die photogrammetrische Praxis, die im Wesentlichen durch die Auswertung von Luftbildern geprägt war.⁶⁰ In dieser Zeit wurde Photogrammetrie aber schon regelmäßig für Dokumentationen von Gebäuden und für Formkontrollen eingesetzt. Die Bilder wurden jedoch in der Regel manuell (in Komparatoren) punktweise ausgemessen. Seit dem Ende der 1990er Jahre gab es Digitalkameras, die eine genügend hohe Auflösung für brauchbare digitale photogrammetrische Auswertungen besaßen.⁶¹ Teure analytische Auswertegeräte wurden durch PCs ersetzt.

Im Zuge der Bemühungen, die Fähigkeiten von Menschen und Tieren zum räumlichen Sehen zu verstehen und analytisch nachzubilden, wurde der Begriff *optical flow* geprägt. Aus Bildpaaren von einer Kamera von bewegten Objekten in kurzen Zeitabständen, ebenso wie im Fall von Stereo-Aufnahmen von einer Szene mit nahe benachbarten Kameras sollte die aufgenommene Geometrie berechnet werden. Diese Konzepte wurden in den Kognitionswissenschaften schon in den 1960er Jahren entwickelt. Der Physiker und Kognitions-Psychologe Longuet-Higgins arbeitete in der ersten Hälfte der 1980er Jahre die Mathematik dazu.⁶² In der *computer vision* und der Steuerung von autonomen Fahrzeugen wurden diese Entwicklungen parallel mit der Namen *structure from motion* verbunden.⁶³ Lange Zeit wurde das Problem unter einschränkenden Bedingungen gelöst, wie z.B. das

⁵⁹ Jörg Albertz, *Information aus Bildern – 100 Jahre Entwicklung in Photogrammetrie und Fernerkundung*, in: VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 85 (4) 1997.

⁶⁰ H. Belzner, *Photogrammetrie und Fernerkundung in der Bundesrepublik Deutschland 1976 - 1980*, in: 14. Kongress der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie, Hamburg 1980, S. 274–305.

⁶¹ Ralf Reulke und Thomas Döring, *Computer Vision im Kontext von Fotografie und Photogrammetrie*, in: Wolfgang Reisig und Johann-Christoph Freytag (Hg.), *Informatik: Aktuelle Themen im historischen Kontext*, Berlin, Heidelberg 2006, S. 315–28, doi:10.1007/3-540-32743-6_13.

⁶² H. C. Longuet-Higgins, *A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections*, in: *Nature* 293 (5828) 1981, doi:10.1038/293133a0.

⁶³ Shimon Ullman, *The interpretation of structure from motion*, in: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 203 (1153) 1979.

eindeutig identifizierbare Markierungen in allen Bildern existieren, oder dass die Bilder in einer festen zeitlichen Reihenfolge aufgenommen wurden. Mit Zunahme der verfügbaren Rechnerleistungen entstanden Programme, die diese Einschränkungen nicht mehr haben.

Wiedemann konnte Ende der 1990er Jahre mit Hilfe der modernen Methoden des *bundle adjustments* auch Bilder mit unbekanntem Aufnahmeparametern und unkalibrierten Kameras als Informationsquellen nutzen.⁶⁴ Auf diese Weise konnte er ein weitgehend vollständiges 3D-Modell des zerstörten Berliner Stadtschlösses unter Zuhilfenahme der oben erwähnten Aufnahmen Meydenbauers rekonstruieren. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die Technik der „Pseudo-Stereo-Restitution“, bei der repetitive Strukturen oder der Schattenwurf auf ebenen Objektteilen aus nur einem Bild für die Gewinnung von 3D-Daten genutzt werden.

1980 und folgende: Scanner. Über die Entwicklung von sogenannten Laser-Scannern und verwandten Geräten (*time of flight scanner*, LiDAR) in der Zeit von ca. 1980 bis 2000 gibt Blais einen Überblick.⁶⁵ Die der optischen Entfernungsmessung zugrunde liegende Mathematik ist, wie in der Photogrammetrie, seit langem bekannt. Laser-Scanner entstanden und entwickelten sich seitdem mit dem Aufkommen und der Verfügbarkeit von neuen Technologien und Geräten weiter. In den 1980er Jahren begann die Entwicklung von automatischen optischen Scannern in Forschungs- und Entwicklungs-Laboren. Seit 1990 machte die Entwicklung der kontaktlosen optischen Abtastung von Oberflächen große Fortschritte. Parallel mussten für die Bewältigung der Datenmengen leistungsfähige Algorithmen entwickelt werden. Mit der Einführung von CCD-Arrays konnten Genauigkeiten von 0,1% und bald 0,01% erreicht werden. Während Scanner mit einem Punkt-Laser einige technische Vorteile boten, stellten Linien-Laser einen Kompromiss dar, da sie die Erfassung einer Profillinie in einem einzelnen Video-Frame gestatten und preisgünstiger waren. Im Gegenzug erforderten sie Bildverarbeitungsmethoden, um die 3D-Information aus den Bildern zu gewinnen. Strukturiertes Licht, das ist die Projektion von Streifen oder Mustern, kam auch seit der Mitte der 1980er Jahre in Gebrauch. Hier stieg der Bildverarbeitungs-Aufwand noch mehr, und für ausgedehnte Objekte war die Technik leicht überfordert.

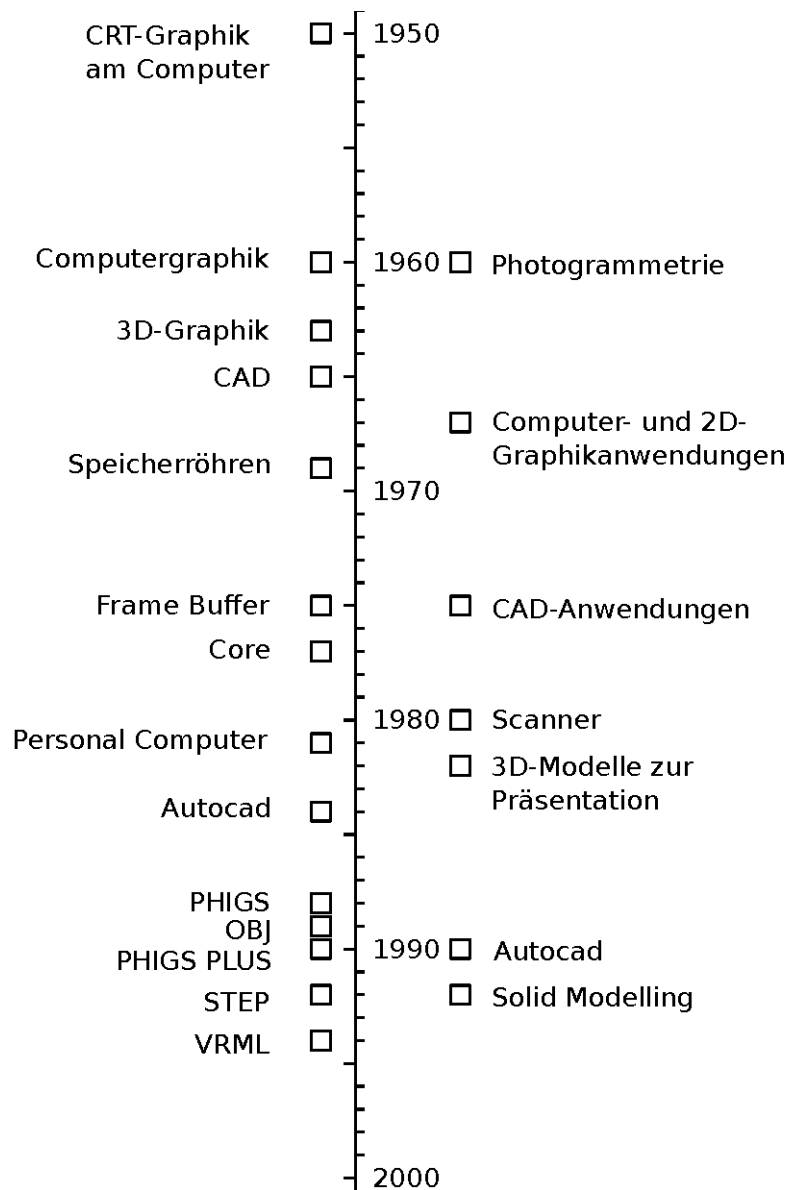
Auf der Reflektion von ausgesandtem sichtbarem Licht basierende Methoden haben mehr oder weniger große Probleme mit stark reflektierenden oder absorbierenden Oberflächen. Alternativ und besonders für größere Strukturen geeignet sind *time of flight*-Scanner (LiDAR), die nach dem Radar-Prinzip arbeiten. Sie waren jedoch im betrachteten Zeitraum noch zu komplex für einen praktischen Einsatz.

Um die Jahrtausendwende stand eine Vielzahl von industriell gefertigten Scannermodellen zur Verfügung, die für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche ausgewählt werden konnten. Die Kombination von Scan-Daten und RGB-Bildern der Objekte befand sich noch in

⁶⁴ Wiedemann et al. 2000.

⁶⁵ Francois Blais, *Review of 20 years of range sensor development*, in: Sabry F. El-Hakim, Armin Gruen und James S. Walton (Hg.), *Electronic Imaging*, SPIE 2003, S. 62.

den Anfängen. Mit Anfang dieses Jahrtausends wurden 3D-Scanner erschwinglich, und ihre Verwendung wurde zunehmend alltägliche Praxis.



Einige Entwicklungsschritte der Computergraphik (links) und ihrer Anwendung in der 3D-Rekonstruktion (rechts)

Abschließende Bemerkungen

Der Einzug der Computergraphik in die 3D-Rekonstruktion von Architektur und archäologischen Objekten wurde anfangs von Experimenten und der vielleicht zufälligen Kooperation von Enthusiasten getragen. Mit dem Heranreifen der Technologie bereiteten frühzeitige Anwender den Weg für die zunehmend systematischen Anwendungen ab den 1980er Jahren. Mit der Jahrtausendwende stand eine Fülle von etablierten Techniken und

Produkten und in ihrer Anwendung geschulte Experten zur Verfügung, die eine Vielzahl von Objekten rekonstruiert haben.

Die digitale Rekonstruktion von Bauwerken bediente sich des jeweiligen Entwicklungsstands der Computergraphik. Sie trat kaum als Treiber der Technologie-Entwicklung hervor; wenn über Computergraphik-Anwendungsfelder berichtet wird, dominieren normaler Weise Ingenieurs- und Unterhaltung-Anwendungen (Spiele, Animationen). Die digitale Architekturrekonstruktion ist dadurch auf die Nutzung vorhandener Applikationen angewiesen, die für andere, wenn auch ähnliche Zwecke entwickelt wurden. Dabei stellt sie durchaus hohe, spezifische Anforderungen, z.B. durch die Ausdehnung der Objekte und den gleichzeitigen Detaillierungsgrad, den Bedarf, eine Entwicklung über die Zeit aufzuzeigen, und die Notwendigkeit der Verknüpfung mit vielfältigen anderen Datenquellen und semantischen Informationen.

Die Technologieentwicklung und ihre Integration in die archäologische und die architekturgeschichtliche Forschung schreitet bis heute ungebrochen voran. Immer leistungsfähigere, erschwinglichere Hardware macht immer komplexere Anwendungsprogramme möglich, die einen Gewinn an Qualität, Komfort und Geschwindigkeit der Modellerstellung mit sich bringen. Dies ist jedoch verbunden mit einem gleichzeitig steigenden Ausbildungsbedarf. Erschwerend tritt ein nach wie vor bestehender Mangel an Standardisierung der Begriffe, Technologien und Formate hinzu. Die beobachtete Abhängigkeit der Weiterentwicklung der digitalen Rekonstruktion von der Entwicklung der Computer-Technologie (siehe Abbildung) relativiert sich nach der Jahrtausendwende durch die eingesetzte Integration von Informatik-Inhalten in die Curricula.

Literaturverzeichnis

- 3D Systems, Inc. *StereoLithography Interface Specification*. Valencia, CA, 1989.
- Jörg Albertz, *Information aus Bildern – 100 Jahre Entwicklung in Photogrammetrie und Fernerkundung*, in: VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 85, (4) 1997, S. 251–259.
- Eike F. Anderson, Leigh McLoughlin, Fotis Liarokapis, Christopher Peters, Panagiotis Petridis und Sara de Freitas, *Developing serious games for cultural heritage: A state-of-the-art review.*, in: Virtual Reality 14 (4) 2010, S. 255–275. doi:10.1007/s10055-010-0177-3.
- Ansi, *ASME Y14.26M - Initial Graphics Exchange Specification (IGES)* 1980.
- Bruce G. Baumgart, *Winged edge polyhedron representation*, Standford 1972.
- H. Belzner, *Photogrammetrie und Fernerkundung in der Bundesrepublik Deutschland 1976 – 1980*, in: 14. Kongress der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie, Hamburg 1980, S. 274–305.
- Don Bissell, *Was the IDIOM the first stand-alone CAD platform?*, in: IEEE Annals of the History of Computing 20 (2) 1998, S. 14–19. doi:10.1109/85.667292.
- Francois Blais, *Review of 20 years of range sensor development*, in: Sabry F. El-Hakim, Armin Gruen und James S. Walton (Hg.), *Electronic Imaging 2003*, SPIE 2003, doi:10.1117/12.473116.
- Peter R. Bono, Jose L. Encarnacao, F. R. A. Hopgood und Paul J. W. Hagen, *GKS - The first graphics standard*, in: IEEE Computer Graphics and Applications 2 (5) 1982, S. 9–23 doi:10.1109/MCG.1982.1674306.
- Steve Carson, Andries van Dam, Dick Puk und Lofton R. Henderson, *The history of computer graphics standards development.*, in: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 32 (1) 1998, 34–38. doi:10.1145/279389.279434.
- Janice Cornforth und Craig Davidson, *Picturing the past.*, in: Archaeological computing newsletter 19, 1989, S. 6–10.
- George L. Cowgill, *Computer applications in archaeology*, in: the November 14-16, 1967, fall joint computer conference, 331. 1967. doi:10.1145/1465611.1465654.
- R. H. Ewald und R. Fryer, *Final report of the GSPC state-of-the-art subcommittee.*, in: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 12 (1-2) 1978, S. 14–169, doi:10.1145/1216491.1216493.
- Kristine K. Fallon, *Early computer graphics developments in the architecture, engineering and construction industry*, in: IEEE Annals of the History of Computing 20 (2) 1998, S. 20–29, doi:10.1109/85.667293.
- James D. Foley und Andries van Dam, *Fundamentals of interactive computer graphics: Repr. with corrections*. Reading, Ma 1984.

- James D. Foley, Andries van Dam und Steven K. Feiner, *Computer Graphics: Principles and Practice*. 2nd ed. Reading, Menlo Park, New York, Don Mills, Wokingham, Amsterdam, Bonn, Sydney, Singapore, Tokyo, Madrid, San Juan, Milan, Paris 1995.
- Wolfgang Förstner und Bernhard P. Wrobel, *Photogrammetric computer vision: Statistics, geometry, orientation, and reconstruction*. Geometry and computing 11, Cham 2016.
- Bernard Frischer, *Introduction*, in: Bernard Frischer und Anastasia Dakouri-Hild (Hg.), *Beyond illustration: 2D and 3D digital technologies as tools for discovery in archaeology*, Oxford 2008, S. v–xxii.
- Scott Gebhardt, Eliezer Payzer und Leo Salemann, *Polygons, point-clouds, and voxels, a comparison of high-fidelity terrain representations*, in: Simulation Interoperability Workshop and Special Workshop on Reuse of Environmental Data for Simulation—Processes, Standards, and Lessons Learned.
- Ralph Heiliger, *Die Vermessung von Architektur: Von Pareto, Parmenides und dem schönsten Weihnachtsbaum*. Lohmar 2016.
- Ivan Herman, Paul t. Hagen, G. Reynolds, George S. Carson, J. Davy, D. Duce, W. Hewitt, Klaus Kansy, B. Lurvey und Horst Stenzel, *PREMO: an ISO standard for presentation environment for multimedia objects*, ACM 1994.
- J. Huggett, *Programming AutoCAD for the archaeologist*, in: Archaeological computing newsletter 25, 1991, S. 18–24.
- ISO 10303. *Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange*. 1994.
- ISO/IEC 14772. *Virtual Reality Modelling Language (VRML)*. 1994.
- ISO/IEC 19775 -77. *X3D*. 2005.
- ISO/IEC 7942. *Graphical Kernel System (GKS)*. 1985.
- ISO/IEC 9592. *Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System (PHIGS)*. 1989.
- ISO/IEC 9592-4. *Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System (PHIGS): Plus Lumière und Surfaces (PLUS)*. 1991.
- Robert L. Judd, *ACM SIGGRAPH 89 Panel Proceedings*. New York 1989.
- H. C. Longuet-Higgins, *A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections*, in: Nature 293 (5828) 1981, S. 133–135, doi:10.1038/293133a0.
- Kenton McHenry und Peter Bajcsy, *An overview of 3d data content, file formats and viewers*, in: National Center for Supercomputing Applications 1205, 2008.
- Paul Miller und Julian Richards, *The good, the bad, and the downright misleading: archaeological adoption of computer visualization*, in: *BAR INTERNATIONAL SERIES* 600, 1995, S. 19.
- Jacquelyn F. Morie, *CGI training for the entertainment film industry*, in: IEEE Computer Graphics and Applications 98, Januar/Februar 1998, S. 30–37.
- Sander, Münster, *Interdisziplinäre Kooperation bei der Erstellung geschichtswissenschaftlicher 3D-Modelle*, Dissertation. Dresden 2014.

- Joseph D. Nigro, W. F. Limp, Kenneth K. Kvamme, Darryl J. d. Ruiter und Lee R. Berger, *The creation and potential applications of a 3-dimensional GIS for the early hominin site of Swartkrans, South Africa*, in: Göran Burenhult (Hg.), *Archaeological informatics - pushing the envelope*, Oxford 2002.
- Mieke Pfarr-Harfst, *Typical workflows, documentation approaches and principles of 3D digital reconstruction of cultural heritage*, in: Sander Münster et al., *3D research challenges in cultural heritage II: How to manage data and knowledge related to interpretative digital 3D reconstructions of cultural heritage*. Cham 2016.
- Kent A. Reed, *Product modeling of buildings for data exchange standards: from IGES to PDES/STEP and beyond*, in: *Conceptual modelling of buildings*, CIB W 74, 1988.
- Paul Reilly (Hg.), *Archaeology and the information age: A global perspective; [derived from the Second World Archaeological Congress, held in Barquisimeto, Venezuela, Sept. 1990]*. *One world archaeology* 21, London 1992.
- Paul Reilly, *Three-dimensional modelling and primary archaeological data*, in: Paul Reilly and Sebastian Rahtz (Hg.), *Archaeology and the information age: a global perspective*, London 1992.
- Paul Reilly and Sebastian Rahtz (Hg.), *Archaeology and the information age: a global perspective*, London 1992.
- Fabio Remondino, *From point cloud to surface: The modeling and visualization problem*, in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models*, 24-28 February 2003, Tarasp-Vulpera, Switzerland XXXIV-5/W10 2003. doi:10.3929/ethz-a-004655782.
- Ralf Reulke und Thomas Döring, *Computer Vision im Kontext von Fotografie und Photogrammetrie*, in: Wolfgang Reisig und Johann-Christoph Freytag (Hg.), *Informatik: Aktuelle Themen im historischen Kontext*, Berlin, Heidelberg 2006, S. 315–28, doi:10.1007/3-540-32743-6_13.
- Julian D. Richards, *Recent trends in computer applications in archaeology*, in: *Journal of Archaeological Research* 6 (4) 1998.
- Lawrence G. Roberts, *Machine perception of three-dimensional soups*, Dissertation Massachusetts 1963.
- Radu B. Rusu und Steve Cousins, *3D is here: Point Cloud Library (PCL)*, in: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2011, S. 1-4, doi:10.1109/ICRA.2011.5980567.
- Mark Segal und Kurt Akeley, *The OpenGL graphics system: A specification (version 1.1)*, 1999.
- Paul Sinclair, M. Kokonya, J-A Rakatoarisoa und M. Meneses, *The impact of the information technology on the archaeology of southern and eastern Africa: the first decades*, in: Paul

- Reilly and Sebastian Rahtz (Hg.), *Archaeology and the information age: a global perspective*, London 1992, S. 29–40.
- Alvy R. Smith, *Digital paint systems: an anecdotal and historical overview* in: *IEEE Annals of the History of Computing*, 2001.
- Ivan E. Sutherland, *Sketchpad a man-machine graphical communication system*, in: *Transactions of the Society for Computer Simulation* 2, (5) 1964, S. R3–R20.
- Shimon Ullman, *The interpretation of structure from motion*, in: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 203 (1153) 1979, S. 405–426.
- J., R. Dawson Wapakabulo, S. Proberts und T. King, *A step towards the adoption of data-exchange standards: a UK defence community case study*, in: *The 4th Conference on Standardization and Innovation in Information Technology*, 2005, S. 242–53, doi:10.1109/SIIT.2005.1563812.
- Wavefront. „OBJ file format summary.“ *FileFormat.info*, 2011.
- Dave Weisberg, *The engineering design revolution CAD history: The people, companies and computer systems that changed forever the practice of engineering*, Internet, URL<www.cadhistory.net> (abgerufen am 13.09.2017).
- Albert Wiedemann, Matthias Hemmleb und Jörg Albertz, *Reconstruction of historical buildings based on images from the Meydenbauer archives*, in: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, S. i-ii XXXIII, Amsterdam 2000, doi:10.1016/B978-1-85573-345-9.50005-4.
- John D. Wilcock, *A general survey of computer applications in archaeology*, in: *Science and Archaeology* 9, 1973, S. 17–21.
- Peter Wilson, *A short history of CAD data transfer standards*, in: *IEEE Computer Graphics and Applications* 7 (6) 1987, S. 64–67, doi:10.1109/MCG.1987.276899.
- Joyce Wittur, *Computer-generated 3D-visualisations in archaeology: Between added value and deception*. BAR international series 2463, Oxford 2013.
- Jason Wood und Gill Chapman, *Three-dimensional computer visualization of historic buildings with particular reference to reconstruction modelling*, in: Paul Reilly and Sebastian Rahtz (Hg.), *Archaeology and the information age: a global perspective*, London 1992. S. 123–46.
- John Woodwark, *Reconstructing history with computer graphics*, in: *IEEE Computer Graphics and Applications* 11 (1) 1991, S. 18–20, doi:10.1109/38.67693.