

"Der digitale Behaim-Globus - Visualisierung und Vermessung des historisch wertvollen Originals"

Lionel Dorffner ([Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien](#))

Veröffentlicht in: **Cartographica Helvetica** 14/96

Contents

- [Zusammenfassung](#)
 - [Martin Behaim und sein Globus](#)
 - [Photographische Aufnahme und Digitalisierung der Bilder](#)
 - [Bestimmung der gegenwärtigen Gestalt des Behaim-Globus](#)
 - [Erzeugung des digitalen Behaim-Globus](#)
 - [Visualisierung, Vermessung und Überlagerung](#)
 - [Schlußbemerkung](#)
 - [Literatur](#)
-

Zusammenfassung

In den Jahren 1491-1492 wurde unter der Aufsicht von Martin Behaim (1459-1507) ein Erdglobus angefertigt. Dieser Globus gilt als die älteste erhaltene Darstellung der Erde in Kugelgestalt. Mit seiner Fertigstellung im Jahr 1492 ist der Behaim-Globus ein Zeugnis des geographischen Weltbildes zur Zeit von Christopher Kolumbus unmittelbar vor dessen großer Entdeckungsreise. Er wird im Germanischen Nationalmuseum in Nürnberg aufbewahrt, ist allerdings dort nicht ausgestellt, weil er für das normale Tageslicht zu empfindlich ist.

Anlässlich des 500-Jahr-Jubiläums wurde der Behaim-Globus mit unterschiedlichen wissenschaftlichen Methoden analysiert. Unter anderem wurden vom Globus photographische Aufnahmen hergestellt, um Duplikat-Globen anzufertigen und die gegenwärtige Gestalt des Globus zu ermitteln. Neben der herkömmlichen Methode, Globen-Duplikate durch Aufkleben von Globussegmenten herzustellen, bietet die moderne Computertechnik die Möglichkeit, ein solches wertvolles Original in digitaler Form zu reproduzieren.

Mit Hilfe moderner Visualisierungsprogramme kann dieses digitale Modell in Echtzeit auf einem Bildschirm dargestellt und über die weltweite Vernetzung sowohl Wissenschaftlern, als auch interessierten Laien zur Verfügung gestellt werden. Neben dieser rein visuellen Darstellung ist es auch möglich, den Behaim-Globus am Bildschirm digital zu vermessen, oder durch Überlagerung mit anderen Karten oder Globen zu vergleichen.

Der digitale Behaim-Globus trägt also nicht nur dazu bei, das historisch wertvolle Original dauerhaft zu dokumentieren, sondern bietet außerdem die Möglichkeit, geometrische Analysen auf der Globusoberfläche durchzuführen, ohne auf das Original zurückgreifen zu müssen.

Martin Behaim und sein Globus

Martin Behaim wurde 1459 in Nürnberg geboren und war nach Beendigung seiner Lehrzeit im elterlichen Betrieb von 1479 bis 1484 im Tuchhandel in Antwerpen für deutsche Handelshäuser tätig. Nach seiner Übersiedlung nach Portugal im Jahr 1484 soll er 1485 von König João II zum Ritter geschlagen worden sein. 1486 oder 87 heiratete er die Tochter von Josse van Huerter, dem Gouverneur der zwei Azoreninseln Fayal und Pico, 800 Meilen westlich von Portugal. Neben seiner Haupttätigkeit als Kaufmann beschäftigte sich Behaim mit Kosmographie und Navigation. Im Sommer 1490 kehrte er zur Regelung von Erbschaftsangelegenheiten nach Nürnberg zurück. Während der drei Jahre, die er in Nürnberg verbrachte, veranlaßte er die Anfertigung eines Erdglobus. Es dürfte sich dabei um den ersten Versuch handeln, eine vollständige, sorgfältig zusammengetragene, geographische Karte der damals bekannten Erde zu erzeugen. Mit seiner Fertigstellung im Jahr 1492 ist der Behaim-Globus damit ein Zeugnis des geographischen Weltbildes zur Zeit von Christopher Kolumbus unmittelbar vor dessen großer Entdeckungsreise.

Die Kosten für die Herstellung des Globus wurden vom Nürnberger Rat getragen und die Abrechnung gibt Aufschlüsse über die damals verwendete Herstellungstechnik. Mit modernen Methoden der chemischen Analyse, der Endoskopie und der Computertomographie konnten in jüngster Zeit fast alle noch offenen Fragen über die Herstellungstechnik geklärt werden. Demnach wurden auf eine Kugelform aus Lehm vier Lagen Leinwand als Laminat aufgebracht. Nach dem Erhärten wurde die Kugel am späteren Äquator aufgeschnitten, der Lehm entfernt und jede Halbkugel innen mit einem Holzskelett verstärkt. Nach Bohrung der Löcher für die Achsen wurden die beiden Schalen wieder zusammengeklebt und mit einem Mantel aus Pergamentsegmenten umhüllt. Auf diese Kugel wurde als Malgrund Papier aufgeklebt. Anschließend erfolgte durch Georg Glockendon den Älteren die Umzeichnung der von Behaim angefertigten Weltkarte auf die Globusoberfläche. Für diese Bemalung benötigte er 15 Wochen.

Nach seiner Fertigstellung wurde der Globus mit ungefähr 50 cm Durchmesser auf einem eisernen Dreibein im Nürnberger Rathaus aufgestellt; 1510 wurde das Gestell um einen Horizonttring ergänzt. Nach einer Restaurierung im Jahr 1823 durch die Familie Behaim ging 1937 der Globus in den Besitz des Germanischen Nationalmuseums über, wo er einer weiteren Restaurierung unterzogen wurde.

Im Jahr 1493 kehrte Martin Behaim nach Portugal zurück. 1495 trafen ihn zwei harte Schicksalsschläge, von denen er sich nicht mehr erholen sollte. Sein einflußreicher Schwiegervater und der ihm gut gesonnene König João II starben. Über sein restliches Leben ist wenig bekannt. Er wurde in den letzten Jahren seines Lebens von seiner Frau verlassen; er starb 1507 in Armut, es ist nicht bekannt, wo er begraben wurde.

Der Behaim-Globus gilt als die älteste bis heute erhaltene Darstellung der Erde in Kugelform. Er wird im Germanischen Nationalmuseum in Nürnberg aufbewahrt, ist allerdings dort nicht ausgestellt, weil er für das normale Tageslicht zu empfindlich ist (Abb. 1).



Abb. 1: Behaim-Globus

Anlässlich des 500-Jahr-Jubiläums des Globus im Jahr 1992 entschloß sich das Germanische Nationalmuseum, die Ausstellung "Focus Behaim" zu gestalten. In diesem Zusammenhang wurde damals der Behaim-Globus mit unterschiedlichen wissenschaftlichen Methoden analysiert. Unter anderem wurde das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung an der Technischen Universität Wien beauftragt, Photographien anzufertigen, um Atlanten und Duplikat-Globen des Originals herzustellen, sowie die gegenwärtige Gestalt des Globus zu ermitteln.

Neben der herkömmlichen Methode, Globen-Duplikate durch Aufkleben von Globussegmenten herzustellen, bietet die moderne Computertechnik die Möglichkeit, ein solches wertvolles Original in digitaler Form zu reproduzieren. Die Vorteile einer solchen digitalen Vorgehensweise sind zum einen eine dauerhafte Archivierungsmethode von historischen Objekten, die nicht, wie das Original, einem Alterungsprozeß ausgesetzt sind. Einen weiteren Vorteil bieten moderne Visualisierungsprogramme, mit denen es möglich ist, solche digitalen Duplikate in Echtzeit auf einem Bildschirm darzustellen und auf diese Art über die weltweite Vernetzung einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu

Photographische Aufnahme und Digitalisierung der Bilder

Für die photographischen Aufnahmen wurde eine Linhof-Technica (Format 84x114 mm, Brennweite 150 mm) verwendet. Die Aufnahmeentfernung betrug etwa 0.75 m, die Blendenzahl 22. Daraus kann die Schärfentiefe für eine noch tolerierbare Unschärfe von 40 μm abgeschätzt werden. Sie beträgt nur 35.2 mm; das entspricht einem Zentriwinkel von 62° für die scharf abgebildete Kugelkalotte.

Für die Beleuchtung des Behaim-Globus wurden zwei symmetrisch zur Kamera aufgestellte Scheinwerfer verwendet, die mit Polarisationsfilter versehen waren. Durch ein fast orthogonal dazu eingestelltes Polarisationsfilter vor dem Objektiv der Kamera konnte der Kontrast der von der Globusoberfläche zurückgestreuten Strahlung positiv beeinflusst werden. Auf diese Weise entstanden Aufnahmen ohne Spiegelungen mit großen Farbkontrasten, die im Vergleich zum Original eine beeindruckende Farbenpracht aufweisen.

Die Linhof-Technica ist keine photogrammetrische Kamera. Sie liefert zwar Bilder von ausgezeichneter photographischer Qualität, doch eignet sie sich nicht für präzise geometrische Rekonstruktionen. Um trotzdem die gegenwärtige Gestalt des Globus aus diesen Aufnahmen ermitteln zu können, mußte die Linhof-Technica zuerst kalibriert, also geometrisch geeicht, werden. Dazu wurden zusätzliche Aufnahmen von einem orthogonalen Dreibein hergestellt, an dessen Kanten Maßstabsleisten angebracht waren.

Die Anordnung der insgesamt 34 Aufnahmen ist für die Nordhalbkugel aus Abb. 2 ersichtlich. Während einer Aufnahmeserie aus gleicher geographischer Breite blieb die Kamera fest, und der Globus wurde um seine Polachse gedreht. Eine Serie von 12 Aufnahmen wurde mit einer Neigung von 30° gemacht, 4 Aufnahmen mit einer Neigung von 55° und eine weitere in Richtung der Polachse. In der gleichen Weise wurden die 17 Aufnahmen für die Südhalbkugel hergestellt.

Zur digitalen Weiterverarbeitung wurden die Farbaufnahmen mit einer Auflösung von $30\mu\text{m}$ am PhotoScan PS1 von der Firma Zeiss gescannt. Dies entspricht einer Auflösung auf der Globusoberfläche von 0.1 mm. Beim Scannen wird ein farbiges Dia mit einem Lichtstrahl abgetastet und in 3 Durchläufen mit unterschiedlichen Farbfiltern die einzelnen Anteile von Rot, Grün und Blau ermittelt. Dabei entstehen drei Dateien für jeweils einen Farbauszug, die anschließend im Computer wieder zu einem farbigen Bild zusammengesetzt werden. Durch die verwendete hohe Auflösung von 30 μm hatte jedes Bild eine Größe von 33 Megabyte, sodaß insgesamt eine Datenmenge von 1.1 Gigabyte verarbeitet werden mußte.

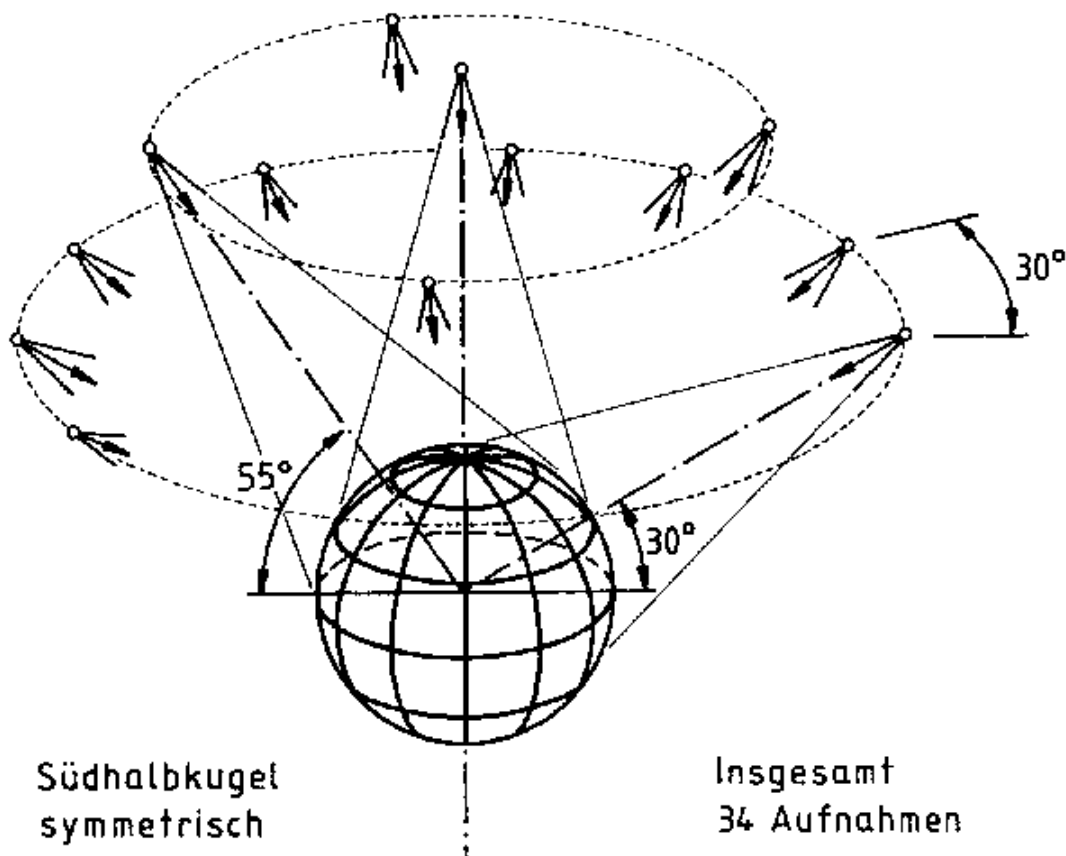


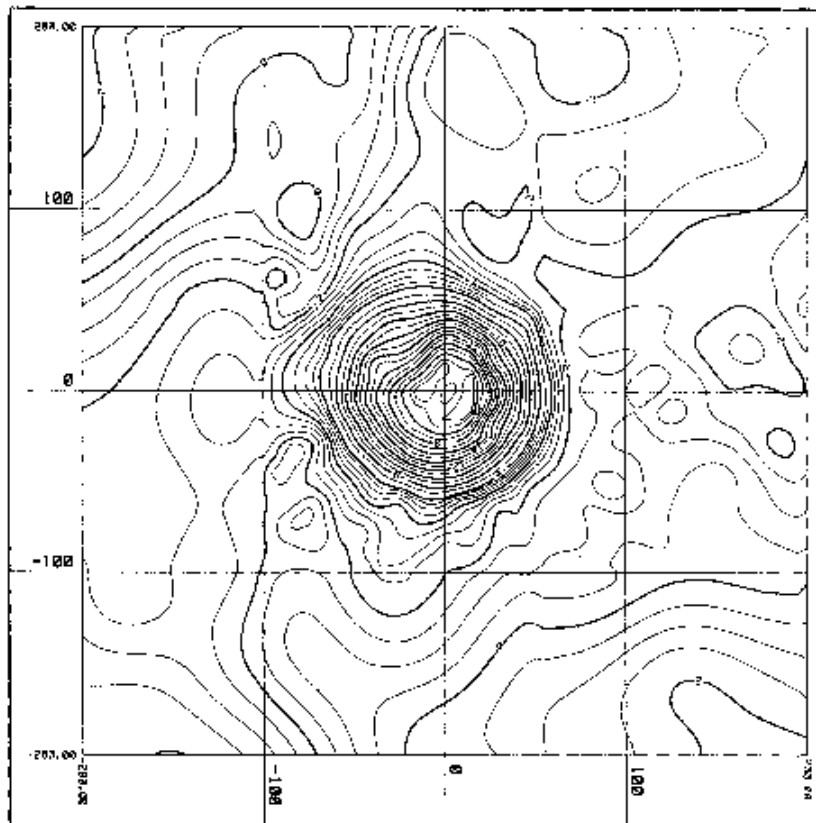
Abb. 2: Aufnahmeanordnung

Bestimmung der gegenwärtigen Gestalt des Behaim-Globus

Jede photogrammetrische Aufnahme, in diesem Fall in digitaler Form, legt ein Strahlenbündel zwischen dem Projektionszentrum des Linsensystems der verwendeten Kamera und den photographierten Objektpunkten fest. Im Rahmen einer photogrammetrischen Bündelblockausgleichung wurde der Verband aller 34 Strahlenbündel verwendet, um in einer geschlossenen Auswertung die Aufnahmestandpunkte und Orientierungswerte dieser Strahlenbündel exakt zu bestimmen. In diese Berechnung gingen auch 23 räumliche Strecken von jeweils etwa 20 cm Länge ein, die mit einer Schublehre am Behaim-Globus mit einer Genauigkeit von ± 0.2 mm gemessen wurden. Neben den Aufnahmestandpunkten und Orientierungen lieferte das Verfahren auch die dreidimensionalen Koordinaten von 2181 Punkten auf der Oberfläche des Globus mit einer Standardabweichung von ± 0.2 mm.

Um den Ursprung des Koordinatensystems in den Mittelpunkt des Globus zu legen, wurde durch alle Punkte eine ausgleichende Kugel gelegt. Der Radius dieser Kugel wurde so gewählt, daß die Quadratsumme der positiven und negativen Abweichungen an den 2181 Punkten minimal sind. Für den auf diese Art ermittelten idealisierten Behaim-Globus ergab sich ein Radius von 247.6 mm. Die Koordinatenachsen wurden dann so festgelegt, daß zwei Achsen in der Äquatorebene liegen und die dritte Achse durch die Pole geht.

Die Abweichungen der 2181 Punkte vom idealisierten Globus wurden dann für die Bestimmung eines Deformationsmodells verwendet. Die graphische Darstellung desselben erfolgte in Form von Isolinien. Für die Darstellung des Bereiches zwischen nördlicher und südlicher geographischer Breite von 70° wurde die quadratische Plattkarte gewählt. Die beiden Polbereiche wurden in einer mittabstandstreuen Azimutalprojektion dargestellt (Abb. 3). Im Mittel liegen die Abweichungen bei 3.5 mm, im Bereich des Äquators treten Deformationen bis zu +8 mm auf, am Südpol sogar bis -20 mm. Diese großen Abweichungen sind vermutlich auf den langjährigen Auflagedruck auf das am Südpol befindliche Lager zurückzuführen.



Mischstanzdrahtmodell, Zylinderprojektion
 Institut fuer Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien

Abb. 3: Deformationsmodell des Behaim-Globus in der Südpolregion. Das Isolinienintervall beträgt 0.5 mm.

Erzeugung des digitalen Behaim-Globus

Damit man von einem Objekt ein dreidimensionales Modell in Form eines digitalen Drahtmodells generieren kann, müssen genügend Punkte auf der Objektoberfläche bestimmt werden. Auf das Drahtmodell wird dann die Bildinformation von Photographischen Aufnahmen lagerichtig als Textur aufgebracht. Auf diese Art entsteht ein photorealistisches dreidimensionales Modell (= 3D-Photomodell).

Für den digitalen Behaim-Globus wurde die Kugel des oben beschriebenen idealisierten Globus verwendet. Man hätte auch direkt die dreidimensionalen Koordinaten der 2181 Oberflächenpunkte zur Erzeugung eines digitalen Drahtmodells verwenden können, doch wurde aus folgendem Grund darauf verzichtet. Bei der Herstellung des Globus 1492 wurde versucht, möglichst genau eine Kugel zu erzeugen. Die Form des digitalen Globus sollte daher gut dem ursprünglichen Original entsprechen und nicht die altersbedingten Deformationen beinhalten.

Um nun die Textur lagerichtig auf die Kugel zu bringen, mußten die digitalen Bilder unter Berücksichtigung des Deformationsmodells umgebildet werden. Bei der photographischen Aufnahme einer Kugel wird das Gradnetz im Bild zentralperspektiv abgebildet. Treten Abweichungen von der exakten Kugelgestalt auf, so kommt es in Abhängigkeit von Größe und Ort dieser Abweichungen zu Versetzungen im perspektiven Abbild dieses Gradnetzes (Abb. 4).

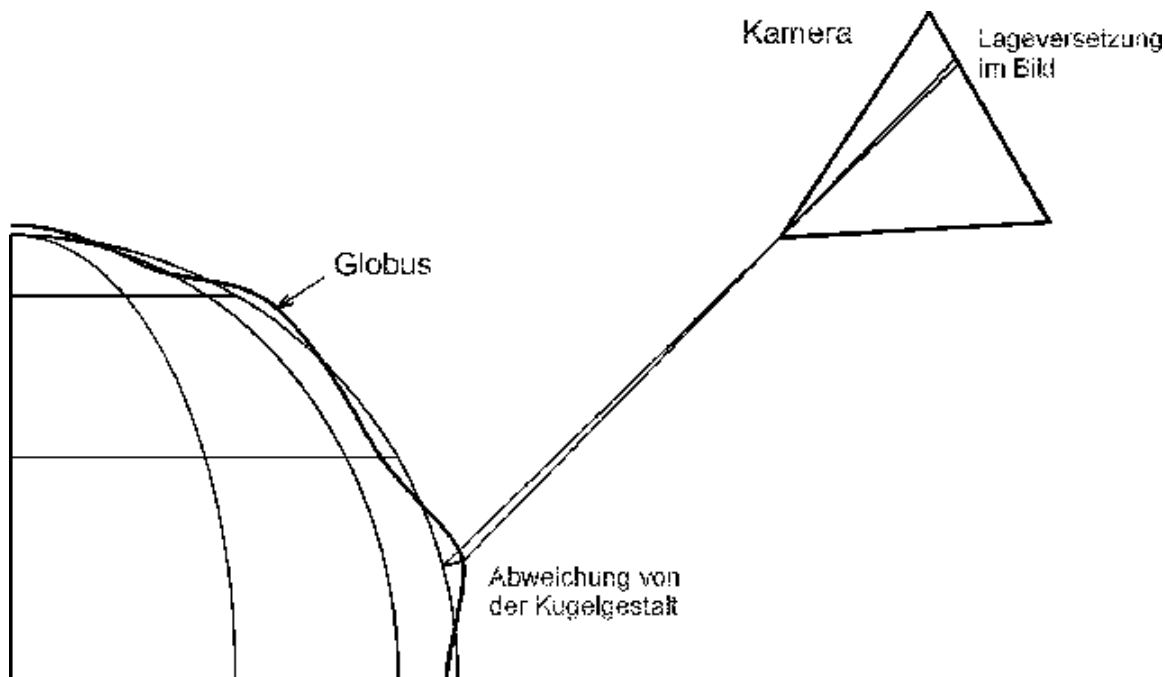


Abb. 4: Lageversetzung im Bild aufgrund einer Abweichung von der Kugelgestalt.

Wie sich für die oben beschriebene Aufnahmeanordnung abschätzen läßt, führt bei einem Zentriwinkel von 15° eine Abweichung von einer Kugel von nur 1 mm bereits zu einer Lageversetzung von über 0.1 mm im Bild. Bei einer Bildauflösung von $30 \mu\text{m}$ würde das also eine Versetzung von mehr als 3 Pixel bedeuten. Da nun am Behaim-Globus Deformationen von bis zu 20 mm auftreten, war es unbedingt notwendig, das Deformationsmodell beim Umbildungsvorgang zu berücksichtigen.

Bei dieser Prozedur wurde zunächst rein rechnerisch ein Gradnetz in geographischen Koordinaten, auf einer Kugel mit dem idealisierten Globusradius von 247.6 mm ausgebreitet. Für jeden Gradnetz-Punkt konnte dann aus dem Deformationsmodell der Zu- oder Abschlag zum Radius entnommen werden. Aus den für jeden Punkt individuellen sphärischen Polarkoordinaten, und R wurden anschließend die dreidimensionalen geozentrischen kartesischen Koordinaten X, Y, Z berechnet. Damit lagen die Voraussetzungen vor, um diese X, Y, Z Koordinaten in das jeweilige Vorlagenbild zu transformieren. Das Ergebnis einer solchen zentralperspektivischen Abbildung waren die Bildkoordinaten x, y des deformierten Gradnetzes. Das Vorlagenbild und das deformierte x, y -Netz wurden nun verwendet, um ein neues Bild zu erzeugen, das dem -Gradnetz entspricht.

Die Bildinformation der photographischen Aufnahmen konnte aufgrund der großen Datenmenge und der Anzahl der Vorlagenbilder nicht als eine einzige Einheit als Textur auf den digitalen Globus aufgebracht werden. Daher mußten mit Hilfe des Gradnetzes kleinere Einheiten geschaffen werden. Der Teil zwischen der nördlichen und südlichen geographischen Breite von 60° wurde in vier Streifen zu jeweils 12 Bilder unterteilt, sodaß jedes Bild eine Ausdehnung von 30° in Breite und Länge erhielt. Die Bereiche um den Nord- und Südpol ab einer geographischen Breite von 60° wurden in fünf Bilder unterteilt. Vier Bilder deckten den Bereich von 60° bis 80° geographischer Breite mit einer Längenausdehnung von jeweils 90° ab; das fünfte Bild umfaßte dann die unmittelbare Umgebung des Pols. Auf diese Art erhielt man 58 Bilder, bei denen die Datenmenge nur mehr jeweils 5 Megabyte betrug.

Visualisierung, Vermessung und Überlagerung

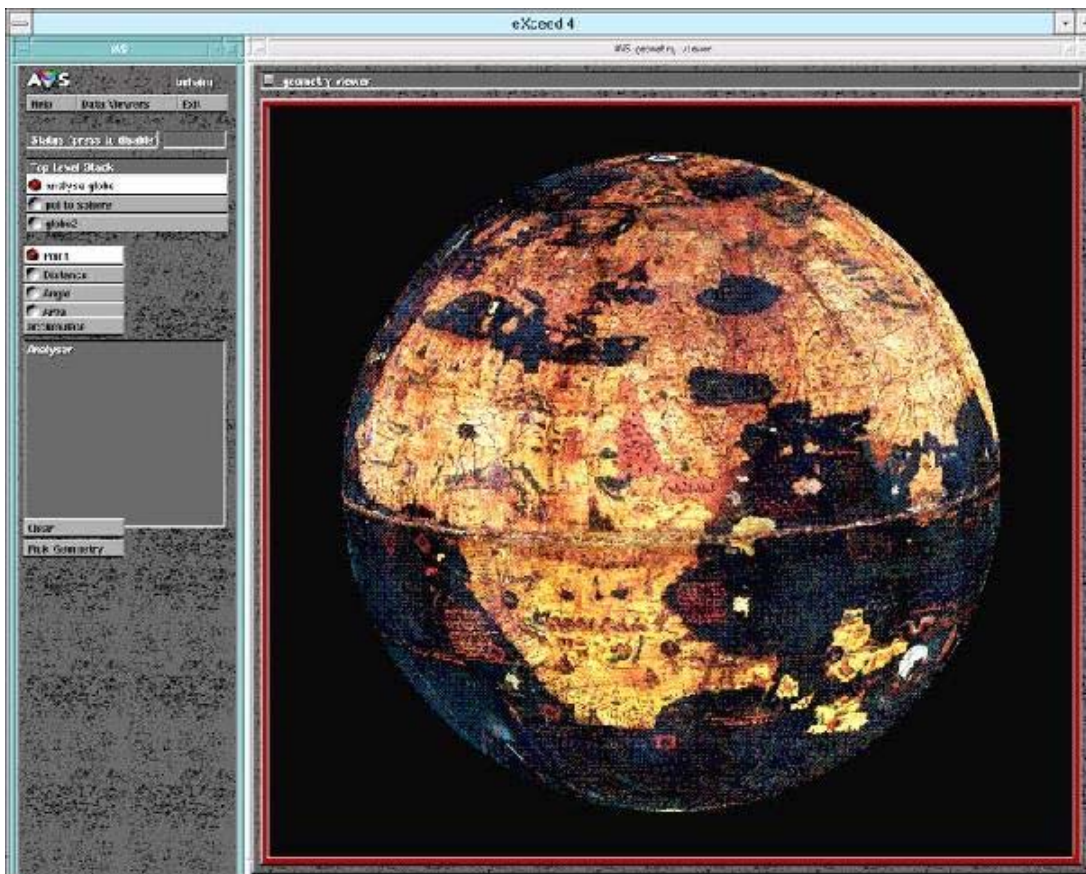


Abb. 5: Visualisierung des digitalen Behaim-Globus

Das damit vorliegende 3D-Photomodell des Behaim-Globus kann interaktiv in Echtzeit am Bildschirm gedreht, verschoben, vergrößert und verkleinert werden (Abb. 5). Dabei werden, abhängig von der jeweiligen Vergrößerung, unterschiedliche Auflösungsstufen verwendet. Betrachtet man den Globus aus größerer Entfernung, so werden die Details nicht angezeigt. Erst wenn sich der Benutzer einen Ausschnitt vergrößert ansieht, wird die volle Auflösung mit allen Details dargestellt (Abb. 6). Dadurch läßt sich der, bei einer Gesamtdatenmenge von 290 Megabyte, nicht unbeträchtliche Berechnungsaufwand reduzieren und damit die Rechenzeit verkürzen.

Neben dieser rein visuellen Darstellung ist es auch möglich, den Behaim-Globus am Bildschirm digital zu vermessen. Dazu können einzelne Punkte auf der Globusoberfläche abgegriffen werden. Die Positionen werden dann entweder in kartesischen oder in geographischen Koordinaten angezeigt und abgespeichert. Bei Messung mehrerer Punkte können auch Abstände, Entfernungen auf Großkreisen, Winkel und Richtungen bestimmt werden. Auf diese Art ist es möglich, Lage und Umfang ganzer Kontinente zu erfassen.

Eine weitere Möglichkeit, die am digitalen Globus durchgeführt werden kann, ist der Vergleich mit anderen Karten oder Globen. So zeigt die Überlagerung mit den heute bekannten Küstenlinien, daß die relative Position von Europa, Asien und Japan am Behaim-Globus große Fehler bezüglich ihrer geographischen Länge aufweist. Legt man einen Globus mit diesen Küstenlinien derart über den Behaim-Globus, daß sie an der spanischen Westküste zusammenpassen, so treten bereits in Italien relativ große Abweichungen zwischen den beiden Globen auf (Abb. 7). Der Grund für diese falschen Dispositionen liegt höchstwahrscheinlich in einem von Behaim verwendeten zu kleinen Erdradius.



Abb. 6: Detail an der Westküste Afrikas; Ekliptik mit dem Sternzeichen des Skorpions.

Geographische Längendifferenzen lassen sich nicht ausschließlich aufgrund von Sonnen- oder Sternenbeobachtungen ableiten, wie dies etwa bei Breitenbestimmungen möglich ist.

Infolgedessen mußten Kartographen zur damaligen Zeit geographische Längen von Orten aufgrund ihnen zur Verfügung stehender Aufzeichnungen bestimmen. Dazu wurden die in verschiedenen Reiseaufzeichnungen vermerkten Entfernungen durch die Länge eines Längengrades auf der jeweiligen Breite dividiert. Der große Unsicherheitsfaktor war also die Größe des Längengrades, der natürlich unmittelbar mit dem Radius der Erde zusammenhängt.

Im 500. Jahrhundert ermittelten die Araber die Größe eines Grades zu $56 \frac{2}{3}$ arabischer Meilen. Nachdem die arabische Meile etwa 2000 m entspricht, ergibt sich ein Wert, der nur um 2 % vom tatsächlichen abweicht. Der Wert von $56 \frac{2}{3}$ Meilen wurde in verschiedenen Büchern vermerkt, die dann im Mittelalter ins Lateinische und Hebräische übersetzt wurden. Im 15. Jahrhundert war dieser Wert in Europa sicherlich bekannt, doch wurde er möglicherweise der italienischen nautischen Meile zugewiesen, die jedoch um 25 % kürzer ist, als die arabische Meile. Demzufolge ist es durchaus wahrscheinlich, daß damals ein zu kleiner Erdradius für die Erzeugung des Behaim-Globus verwendet wurde. Dividiert man nun eine in Ost-West Richtung zurückgelegte Entfernung durch einen zu kurzen Längengrad, so ergibt sich eine zu große Längendifferenz und damit am Globus falsche, weil zu weit auseinander liegende, Dispositionen.



Abb. 7: Behaim-Globus mit überlagerten Küstenlinien.

Schlußbemerkung

Der digitale Behaim-Globus zeigt, wie historisch wertvolle Gegenstände mit Hilfe moderner Technologien sicher und trotzdem anschaulich einer breiten Öffentlichkeit fast "greifbar" zugänglich gemacht werden können. Speziell der Aspekt einer "Bildschirm-Vermessung" ist im Fall des Behaim-Globus von besonderer Bedeutung, da der Original-Globus für eine große Zahl von Wissenschaftlern und interessierten Personen nicht mehr zugänglich ist. Der digitale Behaim-Globus trägt also nicht nur dazu bei, das historisch wertvolle Original dauerhaft zu dokumentieren, sondern bietet außerdem die Möglichkeit, geometrische Analysen auf der Globusoberfläche durchzuführen, ohne auf das Original zurückgreifen zu müssen.

Eine stark reduzierte Version des Behaim-Globus steht im OBJ-Format [zum Download](#) zur Verfügung.

Literatur

Focus Behaim Globus, Teil1: Aufsätze, Teil2: Katalog. Ausstellungskataloge des Germanischen Nationalmuseums. Nürnberg 1993.

Görz, Günther et al. Report: *Machbarkeitsstudie für ein Multimedia-Informationssystem über den Behaim-Globus.* Bayrisches Forschungszentrum für wissensbasierte Systeme, Erlangen 1994.

Halmer, Andreas; Kraus, Karl; Rottensteiner, Franz; Tschannerl, Josef. *Die Bearbeitung des Behaim-Globus mit photogrammetrischen Methoden.* Sonderdruck aus: Der Globusfreund, wissenschaftliche Zeitschrift für Globen und Instrumentenkunde 40/41. Wien 1992. S. 9 -19.

Kager, Helmut; Kraus, Karl; Steinnocher, Klaus: *Photogrammetrie und digitale Bildverarbeitung angewand auf den Behaim-Globus.* In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung 5/92. Karlsruhe, 1992. S. 142-148.

Robinson, Arthur H.: *A Cartographic Quincentenary.* In: Cartographic Perspectives 15. 1993. S. 3 - 12.