



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Alte Fragen – neue Antworten

**Neue naturwissenschaftliche Methoden und Technologien
in den Geisteswissenschaften**



FORSCHUNG

Deutschland. Das von morgen

Impressum

Herausgeber
Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Publikationen; Internetredaktion
11055 Berlin

Bestellungen
Schriftlich an den Herausgeber
Postfach 30 02 35
53182 Bonn

oder per
Tel.: 01805 - 262 302
Fax: 01805 - 262 303
(0,12 Euro/Min. aus dem deutschen Festnetz)

E-Mail: books@bmbf.bund.de
Internet: <http://www.bmbf.de>

Bonn, Berlin 2004 (unveränderter Nachdruck 2005)

Gedruckt auf Recyclingpapier

Bildnachweis
Projekträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH

Redaktion
Dr. Sabine Gerhardt
Dr. Hans-Joachim Krebs

Einzelberichte
Die jeweiligen Autoren der Einzelberichte
sind für die Inhalte und das Copyright der Abbildungen
selbst verantwortlich.



Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH



Alte Fragen - Neue Antworten.

Neue Technologien in den Geisteswissenschaften

Alte Fragen - Neue Antworten.
Neue Technologien in den Geisteswissenschaften

8. Juni 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung: Geisteswissenschaftliche Fragestellungen als Anwendungsfeld von Naturwissenschaft und Technik	1
2	Ziele und Förderbereiche 1996 - 2003	5
2.1	Ziele	6
2.2	Rahmen der Förderung	7
2.3	Förderbereiche	8
2.3.1	Materialanalyse	8
2.3.2	Formanalyse	10
2.3.3	Datierung	10
2.3.4	Ortung	12
2.4	Internationale Zusammenarbeit	13
2.5	Nachwuchsförderung	14
2.6	Publikation und Medienberichte	15
3	Ausblick	17
3.1	Erschließung neuer Themenfelder	18
3.2	Zukünftige Schwerpunkte und Entwicklungslinien	18
4	Einzelberichte zur Materialanalyse	21
4.1	Renaissance oder Historismus? Datierung von Maleremails aus Limoges	22
4.2	Glasperlen machen Geschichte - Technologieentwicklung zwischen Tradition und Innovation im frühen Mittelalter	27
4.3	Herkunft von antike Gold mit Laserablation und Sektorfeld-Massenspektrometrie	33
4.4	Der Erste Chinesische Kaiser und seine Grabesbeigaben - ein Projekt der Vergangenheit und der Zukunft	38

4.5	Von Rauchern, Nichtraucher, Schafen und Ziegen - Biomolekulare Analysen zur menschlichen Kulturgeschichte	46
4.6	Die ersten Bauern und Rinder in Europa - Paläogenetik des Neolithikums	51
4.7	Acht Jahrtausende Bodenerosion - Bodensedimente als Archiv der Kulturgeschichte	54
4.8	Projektverbund <i>Nasca</i> - Entwicklung und Adaption archäometrischer Techniken zur Erforschung der Kulturgeschichte	64
5	Einzelberichte zur Formanalyse	79
5.1	Hochauflösende Farbholographie für die Archäologie	80
5.2	Fundstücke in der virtuellen Realität - dreidimensionale archäologische und historische Befunddokumentation durch optische Digitalisierung . .	84
6	Einzelberichte zur Datierung	87
6.1	Radiolumineszenz von Feldspäten soll neues Licht auf die altsteinzeitliche Vergangenheit des Menschen in Mitteleuropa werfen	88
6.2	Eine physikochemische Uhr in Eiweißen zur Datierung von Skelettfunden? - Revision der Aminosäurendatierung	93
7	Einzelberichte zur Ortung	97
7.1	<i>SQUIDS</i> - Mit Supraleitertechnik auf den Spuren urgeschichtlicher Siedlungen	98
7.2	Trecker und Sensoren - Geophysik erforscht antike Siedlungsräume . . .	102
A	Antragsverfahren und Mitteleinsatz	109
B	Abgeschlossene und laufende Vorhaben 1996 bis 2003	111
B.1	Vorhaben mit Schwerpunkt <i>Materialanalyse</i>	111
B.2	Vorhaben mit Schwerpunkt <i>Formanalyse</i>	113
B.3	Vorhaben mit Schwerpunkt <i>Datierung</i>	113
B.4	Vorhaben mit Schwerpunkt <i>Ortung</i>	114

Abbildungsverzeichnis

1.1	Teilchenbeschleuniger	2
2.1	Röntgenfluoreszenzanalyse (<i>RFA</i>) induziert durch Synchrotronstrahlung	6
2.2	<i>ArtTAX®</i> -Spektrometer	9
2.3	Rekonstruktion einer Halbkuppel aus Natanz	10
2.4	Infrarot-Radiolumineszenz-Datierung	11
2.5	Geomagnetische Prospektion	12
2.6	<i>Nasca</i> -Geoglyphe in Peru	13
3.1	Georadar-Messung auf Tell Djinderis, Syrien	19
4.1	<i>Gefangennahme Christi</i>	22
4.2	Monatsteller <i>en grisaille</i>	24
4.3	Frühmittelalterliche Perlen aus Südwestdeutschland	27
4.4	Perlen aus dem Rheinland	28
4.5	Absatzgebiete grüner Perlen	30
4.6	Lydische Münzen, Alyattes- und Kroisos-Typ	33
4.7	Sarkophagwanne Echnatons	35
4.8	Laserablation-Massenspektrometrie (<i>LA-ICP</i>)-Messungen	36
4.9	Keltisches Regenbogenschüsselchen, Hortfund Wallersdorf	37
4.10	Tonkrieger mit grünem Inkarnat	38
4.11	Rüstung <i>in situ</i>	39
4.12	Gruppe von Tonkriegern	40
4.13	Gaschromatographie-Massenspektrometrie (<i>GC-MS</i>)	46
4.14	Pfeifenraucherlücke	47
4.15	<i>GC-MS</i> an Skeletten der Serie <i>Hinter den Brüdern</i>	48
4.16	Pergament als Schriftträger	49

4.17	Restriktionsanalyse (<i>RFLP</i>)	50
4.18	Schutzkleidung im <i>Mainzer Spurenlabor für alte DNA</i>	51
4.19	Rinderknochen	52
4.20	Becken von Phlious	56
4.21	Sedimentabfolge im Becken von Phlious	58
4.22	<i>OSL</i> -Datierung an kolluvialen Sedimenten	59
4.23	Geoglyphe	64
4.24	Nasca-Grab	65
4.25	Paracas Gräber	66
4.26	Spätzeit Abfallhaufen	67
4.27	Landsat-Satellitenbildmontage des Arbeitsgebiets in Südperu	69
4.28	Satellitenbild der Flussoase bei Ingenio (Südperu)	70
4.29	Landschaftseinheiten (Südperu)	71
4.30	Wüstenrandlöss	72
4.31	Geoelektrische Tomographie (Südperu)	73
4.32	Geoelektrische 3D-Messung (Südperu)	74
4.33	Geoglyphe auf der Hochfläche von Cerro Llipata bei Palpa/Peru	75
4.34	Lumineszenz-Messung	76
4.35	Hochauflösende Lumineszenzmessungen an einer Gesteinsoberfläche	77
5.1	Holographische Kamera	80
5.2	Rekonstruiertes Hologramm einer sumerischen Tontafel	81
5.3	Computerrekonstruktion	82
5.4	Holographische Kamera im Einsatz	83
5.5	Burg von Tiryns, Griechenland	84
5.6	Burg von Tiryns, Topometrische Messung	85
5.7	Terracotta-Kopf	86
6.1	Radiolumineszenz	88
6.2	Infrarot-Radiolumineszenz	89
6.3	Automatisiertes <i>IR-RL</i> -Messsystem	90
6.4	Paläolithfundstelle Rösa-Sauselitz	92
6.5	Präparation von Kollagenfragmenten aus degradiertem Knochenmaterial	94
6.6	Elektrophorese	95
6.7	Knochenproben im Hitzeversuch	96

7.1	Falschfarben-Luftbild	98
7.2	Prototyp eines Hochtemperatur- <i>SQUID</i> -Gradiometers	99
7.3	Magnetisches Abbild	100
7.4	Multi-Sensor-System	102
7.5	Messdaten im Süden der antiken Ruinenstadt Milet	103
7.6	Vermessung einer früh-neuzeitlichen Schanzenanlage in Oberhessen . . .	104
7.7	GPS-positionierte Multi-Sensor-Messdaten	105
7.8	Geomagnetische Kartierung der Hethitischen Stadtanlage Sarissa	107



Kapitel 1

Einleitung: Geisteswissenschaftliche Fragestellungen als Anwendungsfeld von Naturwissenschaft und Technik

Für die jeder Generation neu gestellte Aufgabe, das kulturelle Erbe zu bewahren, weiter zu erschließen und seine Deutung im Lichte neuer Erkenntnisse und Erfahrungen zu überprüfen, können heute in wachsendem Maße neue Ergebnisse und Methoden aus Naturwissenschaft und Technik nutzbar gemacht werden.

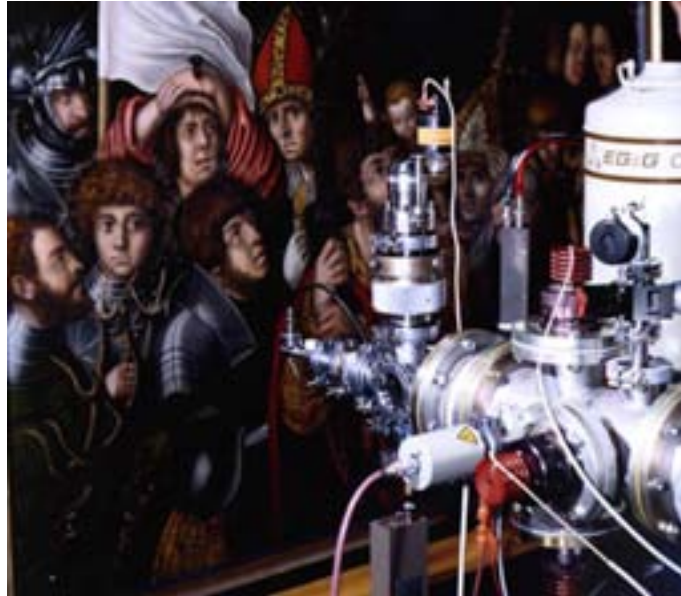


Abbildung 1.1: Identifizierung von Malschichten an der Torgauer Tafel von Lucas Cranach d. Ä. am Teilchenbeschleuniger. Foto: NTG-Vorhaben 03NE9ROS.

Das *Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)* unterstützt im Förderschwerpunkt *Neue naturwissenschaftliche Methoden und Technologien in den Geisteswissenschaften (NTG)* Projekte, in denen durch neuartige Formen der gemeinsamen Forschungsarbeit von Wissenschaftlern unterschiedlicher Disziplinen Ergebnisse der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung im Bereich der Geisteswissenschaften¹ genutzt werden. Ziel der hier geförderten Pilotprojekte ist die Nutzung neuer technologischer Möglichkeiten für

- die Detektion, Analyse und Konservierung kultureller Objekte.
- kulturhistorische Regional-Forschungen im Disziplinenverbund.

Die zentralen Fragestellungen der Projekte stammen zum überwiegenden Teil aus der Archäometrie. Archäometrie ist nicht Archäologie. Die Archäometrie umfasst das gesamte Gebiet des Einsatzes naturwissenschaftlicher Methoden in der kulturhistorischen Forschung. Zunehmend können - weit über das Gebiet der klassischen Archäologie hinaus - übergreifende Fragen zur Geschichte einer Gesellschaft, ihrer sozialen Struktur, ihres politischen und wirtschaftlichen Lebens und ihrer Wissenschaft, Kunst und

¹Der Begriff *Geisteswissenschaften* wird hier als Summe der Sprach-, Kultur- und Gesellschaftswissenschaften verstanden.

Religion durch Beiträge aus z.B. Physik, Chemie, Klimaforschung, Biologie und Geowissenschaften beantwortet werden. Aus dem täglichen Fortschritt auf diesen Gebieten resultieren zwangsläufig laufend auch neue Anwendungsmöglichkeiten für die Geisteswissenschaften. Die rasant wachsenden informationstechnischen Möglichkeiten revolutionieren dabei auch hier die Datenerfassung, -analyse und -synthese.

Mit der Planung, Abwicklung und Evaluierung dieser Vorhaben ist der *Projektträger Jülich (PTJ)*² beauftragt.

²Projektträger sind Dienstleister im Forschungsmanagement mit Kompetenz für Fach-, Haushalts-, Verwaltungs- und Wirtschaftsfragen der auftraggebenden Institutionen, z.B. Ministerien.



Kapitel 2

**Ziele und Förderbereiche 1996 -
2003**

2.1 Ziele

Die Geisteswissenschaften – als anspruchsvolles Langzeitgedächtnis der Gesellschaft – sind unverzichtbares Gegengewicht zu drohendem Kulturverlust durch Überbetonung von Naturwissenschaft und Technik. Mit dem seit 1989 bestehenden Förderschwerpunkt *Neue naturwissenschaftliche Methoden und Technologien in den Geisteswissenschaften (NTG)* stärkt das *BMBF* die geisteswissenschaftliche Arbeit in besonderer Weise. Die fächerübergreifenden Pilotprojekte dieses Schwerpunktes untersuchen, wie innovative Ansätze aus Naturwissenschaft und Technik für geisteswissenschaftliche Problemfelder nutzbar gemacht werden können.



Abbildung 2.1: *Ein Beispiel für die Entwicklung neuer naturwissenschaftlicher Methoden für die Geisteswissenschaften ist die zerstörungsfreie Punktanalyse kulturhistorischer Objekte mit Synchrotronstrahlung an der Universität Bonn. Foto: NTG-Vorhaben 03MO9BO3.*

Ziel ist es, Geisteswissenschaftlern verschiedener Fachdisziplinen Verfahren zur Bearbeitung von Fragestellungen verfügbar zu machen, die zusammen mit dem traditionellen geisteswissenschaftlichen Rüstzeug zu neuen Antworten führen können. Mit diesem Ziel verbunden ist häufig die Entwicklung und praxisnahe Erprobung von Techniken zur Sicherung des kulturellen Erbes. Naturwissenschaftler erhalten auf diese Weise Gelegenheit, die Nützlichkeit ihrer Methoden in Anwendungsfeldern außerhalb ihrer eigenen Disziplinen zu testen und zu demonstrieren.

Die Forschungsvorhaben entwickeln neue naturwissenschaftliche Methoden oder technische Geräte oder setzen bekannte Methoden oder Technologien über die Grenzen ihres bisherigen Einsatzfeldes - ggf. nach entsprechender Adaption - für neue Einsatzgebiete und Märkte ein. Der für solche Vorhaben charakteristische Dialog zwischen Naturwissenschaftlern und Geisteswissenschaftlern soll gezielt auch in grenzüberschreitenden Kooperationen stattfinden. Die Beteiligung von Wissenschaftlern und ggf. auch staatlichen Stellen auf internationaler Ebene ist nach aller Erfahrung sowohl für die Qualität der Projektarbeiten als auch für die Sichtbarkeit der Ergebnisse förderlich.

2.2 Rahmen der Förderung

Die Projekte des *BMBF-Förderschwerpunktes NTG* nehmen im Vergleich zu Vorhaben der *Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)*, der *VW-Stiftung* oder der *EU*, vor allem dadurch einen besonderen Platz ein, dass in ihnen der Brückenschlag zwischen naturwissenschaftlicher Grundlagenforschung und geisteswissenschaftlicher Fragestellung in internationaler Kooperation im Vordergrund steht.

In fächerübergreifender Zusammenarbeit wenden die Geförderten innovative naturwissenschaftliche Methoden und Technologien auf konkrete geisteswissenschaftliche Fragestellungen an. Durch die intensive Zusammenarbeit mit internationalen Kooperationspartnern demonstrieren sie darüber hinaus das landesübergreifende Interesse an dem Untersuchungsgegenstand.

Diese Merkmale grenzen den Förderschwerpunkt *NTG* von denjenigen anderer Fördereinrichtungen deutlich ab, ohne auf die ggf. vorhandenen Vorteile einer förderinstitutionsübergreifenden Koordinierung von Forschungsprojekten zu verzichten: Der Projektträger informiert sich vor der *BMBF*-Förderung in Gesprächen mit der *DFG* über die Chancen für den Einsatz der zu entwickelnden neuen Verfahren in späteren *DFG*-Projekten und zieht diese Informationen in die Bewertung von Anträgen ein.

Bei der Auswahl von Projekten wird darauf geachtet, dass zu demselben Thema keine Förderung von anderer Seite besteht. Entscheidend für die Auswahl und den Umfang von Forschungsvorhaben ist die *Summe der Gewichte* folgender Kriterien:

- Die primäre Fragestellung stammt aus einer geisteswissenschaftlichen Disziplin; ihre Lösung erfolgt durch Technikeinsatz und in Kooperation zwischen Geistes-, Naturwissenschaftlern und Technikern.
- Die sekundäre Fragestellung kommt aus der Naturwissenschaft oder Technik. Das eingesetzte Verfahren oder Gerät ist selbst Gegenstand der Forschung oder der technischen Entwicklung.
- Internationale Kooperationspartner aus dem wissenschaftlich-technischen oder geisteswissenschaftlichen Bereich bestätigen die Bedeutung des Vorhabens über den nationalen Bereich hinaus.
- Natur- oder ingenieurwissenschaftliche Kooperationspartner sind Wissenschaftler oder Techniker von Forschungszentren, Universitäten oder Industrieunternehmen, insbesondere wenn sie für das Vorhaben über Wissen und Ausrüstung aus bereits vom *BMBF* geförderten Projekten verfügen.
- Der Einsatz der Technologie erfolgt erstmalig oder ihre Adaptation an die geisteswissenschaftliche Fragestellung erfordert wesentliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.
- Im Falle einer Geräteentwicklung gibt es eine Zusammenarbeit mit der Industrie.
- Von besonderem Interesse sind Verbünde mehrerer Vorhaben mit dem Ziel, die Bearbeitung komplexer geisteswissenschaftlicher Themenstellungen mit neuen Technologien zu unterstützen.

- Der Einsatz von Computern, der Aufbau von Datenbanken, Expertensystemen und Bildbearbeitungssystemen sowie Softwareentwicklung können als solche nicht gefördert werden.
- Vorhaben, die *ausschließlich* Untersuchungen zum Thema *Erhaltung des Kulturerbes* (Konservierung, Restaurierung) zum Gegenstand haben, können ebenfalls nicht gefördert werden.
- Der Methoden- oder Technikeinsatz hat über das konkrete Vorhaben hinausgehende Bedeutung für andere Einsatzgebiete.
- Die zu erwartenden Ergebnisse oder zu entwickelnden Methoden/Geräte eines Einzelvorhabens können in späteren Verbundprojekten weiterverwertet werden.

2.3 Förderbereiche

Die Vorhaben des Förderschwerpunktes *NTG* umfassen - gemäß den Aufgaben, die den Naturwissenschaftlern und Technikern seitens der Geisteswissenschaftler bisher gestellt werden - vier Förderbereiche: *Materialanalyse*, *Formanalyse*, *Datierung* und *Ortung*.

Die Förderung von Gebieten wie Geschichte (auch der Kunst und Literatur), Philosophie oder Soziologie hängt wesentlich davon ab, inwieweit Informations- und Kommunikationstechnologien mit einbezogen werden. Zu den einzelnen Förderbereichen identifiziert der Projektträger Fragestellungen und die zu deren Bearbeitung erforderlichen Technologien in Workshops.

Exemplarische Einzelvorhaben aus den vier Förderbereichen werden in Kapitel 4-7 entsprechend ihrem Charakter als Pilotvorhaben detaillierter dargestellt.

2.3.1 Materialanalyse

Der Förderbereich *Materialanalyse* nimmt mit etwa der Hälfte der bewilligten Vorhaben den größten Raum ein. In diesem Bereich werden Vorhaben gefördert, die Kenntnisse über die materielle Zusammensetzung von Objekten liefern. Aus solchen Untersuchungen leiten die Wissenschaftler Aussagen über Herkunft und Handel, Verwandtschaft, Authentizität, Rezepturen, Herstellungstechnologien etc. ab. Die Untersuchungsgegenstände werden in Artefakte, Biomaterialien und Geomaterialien unterteilt.

Die Wissenschaftler messen an Artefakten (z.B. Keramik, Glas, Metallgegenstände) mit naturwissenschaftlichen Methoden wie der Neutronenaktivierungsanalyse, der Röntgenfluoreszenzspektrometrie oder der Massenspektrometrie Spurenelemente oder Isotope. Daraus erhalten sie Informationen über die Zuordnung von Artefakten zu bestimmten Töpfereibezirken oder Lagerstätten.

Untersuchungen an Biomaterialien bilden einen besonders erfolgreichen Schwerpunkt im Bereich der *Materialanalyse*. Mittels *DNA*-Analyse fossiler resp. alter (sog. *aDNA*)

Skelettmaterialien von Menschen oder Tieren erfolgt durch Molekularbiologen eine Geschlechterbestimmung oder eine Erweiterung des Spektrums individueller biologischer Daten.

Nach dem Ende der letzten Eiszeit setzten in Europa dramatische kulturelle Veränderungen ein, die mit dem Übergang von einer jagenden und sammelnden Lebensweise des Menschen zu Ackerbau und Viehzucht einher gingen (*Neolithische Revolution*). Wissenschaftler der *Johannes Gutenberg-Universität Mainz* ergründen in einem aktuellen Vorhaben den Ursprung der Rinder- und Milchwirtschaft in Europa, indem sie die *aDNA*-Analyse auf Rinderknochen adaptieren. Sie prüfen, ob die *Neolithische Revolution* auf einwandernde Bevölkerungsgruppen aus dem Südosten zurückgeht und ob diese Gruppen ihre Haustiere mit eingeführt haben. Die biomolekulare Archäologie des Neolithikums und vor allem die molekulargenetischen Untersuchungen prähistorischer Populationen stellen einen wesentlichen Schritt in der naturwissenschaftlichen Erforschung der Vorgeschichte des Menschen dar.

Die siedlungs- und landschaftsarchäologische Untersuchung einer Kernregion Griechenlands (Nordost-Peloponnes) hat gezeigt, dass der Archäologie ohne den Einsatz geowissenschaftlicher Methoden vielfach ein wichtiger Teil an Informationen fehlt. Deshalb konzentriert sich eine dritte Gruppe von Materialuntersuchungen auf die so genannten *Geomaterialien*. Geowissenschaftliche Methoden und Techniken bieten einen Schlüssel, um das bislang bis zur Neuzeit eher punktuelle Wissen über Art und Umfang landwirtschaftlicher Nutzung, deren Nachhaltigkeit sowie die Tragfähigkeit einer Landschaft zu erschließen.

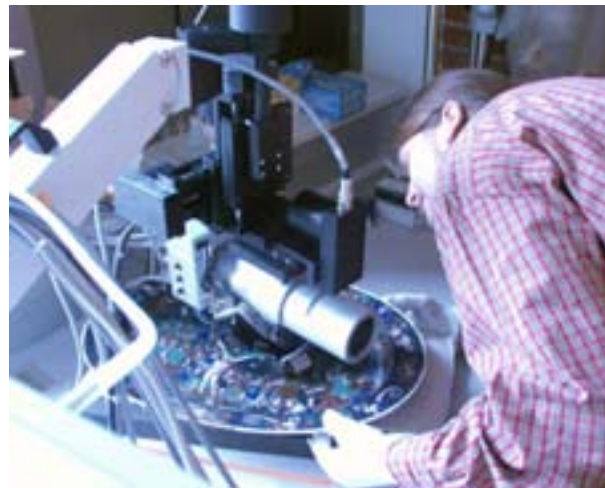


Abbildung 2.2: Mit der zerstörungsfreien, energiedispersiven Röntgenfluoreszenzspektrometrie (ED-XRF resp. ED-RFA) können sämtliche Elemente des Periodensystems der Ordnungszahlen 11-92 (Natrium bis Uran) nachgewiesen werden. Die Messparameter werden individuell den Untersuchungsobjekten und der damit verbundenen Fragestellung angepasst. Die Abbildung zeigt Vorbereitungen zur Echtheitsanalyse emailierter Objekte aus Limoges mit dem ArtTAX[®]-Spektrometer. Foto: NTG-Vorhaben 03MU9TUB.

2.3.2 Formanalyse

Im zweiten Förderbereich, der *Form- oder Zeichenanalyse*, ist die räumliche Gestalt von Objekten, Zeichen oder Zeichnungen Gegenstand der naturwissenschaftlichen Untersuchungen. Die genaue Vermessung von Objekten oder Zeichen, die Sichtbarmachung von Unterzeichnungen oder Schriften und die Tomographie musealer Objekte können dem Kunsthistoriker wichtige Informationen liefern.

Wissenschaftlern der Universität Münster gelang die Entwicklung eines tragbaren, also vor Ort - insbesondere in Museen - einsetzbaren Gerätes zur Aufnahme hochauflösender Farbholographien. Dieses Gerät fand ein großes Interesse in der Fachwelt und in den Medien. Es könnte für die dauerhafte Dokumentation resp. Konservierung von Informationsgehalt empfindlicher, unersetzlicher Kulturschätze (z.B. Tontafeln mit Keilinschriften) von großer Bedeutung sein. Selbst beschädigte, abgeriebene Oberflächen oder nicht mehr lesbare Zeichen können rekonstruiert werden und die Zusammengehörigkeit von Bruchstücken kann ermittelt werden. Diese Technik ergänzt die herkömmlichen Dokumentationsverfahren (meist Fotos oder Umzeichnungen) gerade in schwierigen oder besonders gelagerten Fällen (z.B. Verteilung auf mehrere Museen).

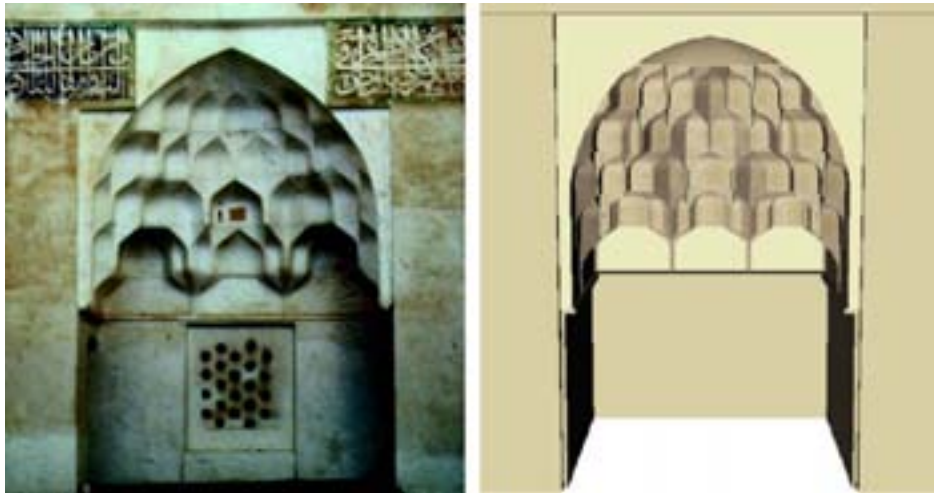


Abbildung 2.3: *Mathematische Grundlagen und computergraphische Rekonstruktion von Stalaktitengewölben (Muqarnas) in der islamischen Architektur (NTG -Vorhaben 03WNX2HD). Dargestellt ist die Rekonstruktion einer existierenden Halbkuppel aus Natanz. Foto: Y. Dold und IWR Heidelberg.*

2.3.3 Datierung

Im dritten Förderbereich, der *Datierung*, stehen Vorhaben im Mittelpunkt, in denen Wissenschaftler das Alter von archäologischen Fundobjekten oder musealen Kunstgegenständen bestimmen oder die Grundlagen für neue Datierungsmethoden erarbeiten. Diese nutzen Historiker zum Aufbau von Zeitskalen für historische Epochen.

Archäologische Forschung erfordert häufig die direkte und absolute Altersbestimmung von Artefakten. Eine Vielzahl solcher Objekte wie z.B. Steinwerkzeug, Dolmen, Statuen oder Gebäude ist jedoch bislang, wenn überhaupt, nur indirekt über Funde aus dem Zusammenhang datierbar. Im Förderbereich *Datierung* kommt es oft zu Überschneidungen mit der Untersuchung von Geomaterialien und Artefakten. Zu Überschneidungen kommt es auch in den Bereichen *Datierung* und *Ortung*, da die zu datierenden Objekte häufig mit geophysikalischen Methoden geortet worden sind.



Abbildung 2.4: Feldspäte, ionisierender Bestrahlung ausgesetzt, senden Strahlung im nahen Infrarot aus (Radiolumineszenz). Dieser Effekt kann unter bestimmten Voraussetzungen zur Bestimmung des Zeitpunktes der letzten Belichtung genutzt werden. Insbesondere feldspathaltige Sedimente im Altersbereich von einigen 100.000 Jahren kommen als geeignete Materialien in Frage (Radiolumineszenz-Datierung). Die Abbildung zeigt Datierungsergebnisse an Sedimenten aus der Grabungsstätte Gröbern. Foto: NTG-Vorhaben 03KR9FR2.

Besonders erwähnenswerte Verfahrensentwicklungen sind die *Optisch Stimulierte Lumineszenz (OSL)*, die *Infrarot Stimulierte Lumineszenz (IR)* und das neu entdeckte Phänomen der *Radiolumineszenz (RL)* von Mineralien. Diese Verfahren wurden aus der herkömmlichen *Thermolumineszenzdatierung (TL)* in Vorhaben der NTG weiterentwickelt. Die *Photolumineszenz* besitzt ein großes Potenzial zur Datierung archäologischer Objekte und Horizonte, die bei Ihrer Ablagerung dem Licht (wobei eine kurze Belichtungsdauer genügt) ausgesetzt waren. Mit ihr lässt sich der Zeitpunkt der letzten Belichtung datieren und damit an bisher nicht datierbaren Materialien neue, archäologisch relevante Erkenntnisse gewinnen. Die Radiolumineszenz-Datierung zeichnet sich gegenüber konventioneller Lumineszenz-Datierung durch geringsten Materialbedarf, höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Daten und einen höheren, gesicherten Altersbereich aus. Mit ihrem Einsatz soll ein Beitrag zur bisher noch sehr unbefriedigend geklärten Chronologie der kulturgeschichtlichen Entwicklung des paläolithischen Menschen in Mitteleuropa geleistet werden.

2.3.4 Ortung

Im vierten Förderbereich, der *Ortung*, werden Vorhaben gefördert, in denen die räumliche Anordnung oder die Existenz einzelner Gegenstände oder archäologisch auswertbarer Strukturen mit Prospektionsmethoden nachgewiesen werden. Dieser Bereich hat sich seit 1996 zu einem deutlichen Schwerpunkt neben der *Materialanalyse* entwickelt und kann sicherlich als der Bereich mit den meisten neuen Ideen und dem größten *FuE*-Potenzial bezeichnet werden.

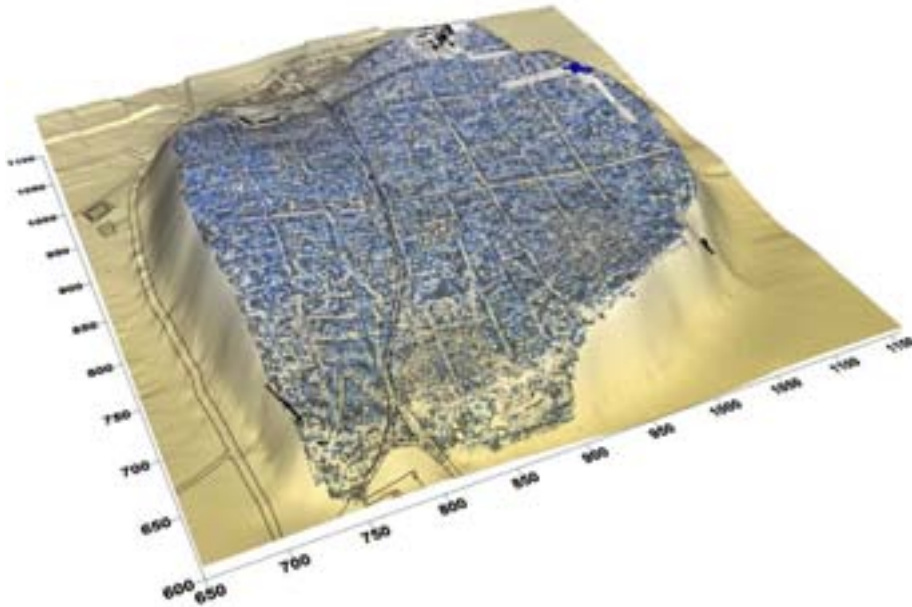


Abbildung 2.5: Geomagnetik und Topografie eines 20 ha großen Siedlungshügels in Syrien (Tell Gjindaris). Foto: Fa. eastern atlas, Berlin, NTG-Vorhaben 03SUX4KN.

In der Regel werden bei der archäologischen Prospektion die Untersuchungsobjekte (Böden, Hügel, Bauten) mit elektrischen, magnetischen, elektromagnetischen oder mechanischen Signalen (Felder, Ströme, Wellen) *durchleuchtet* und aus dem gemessenen *Durchdringungssignal* auf Strukturen des *durchleuchteten* Objekts geschlossen. Dadurch kann Unsichtbares sichtbar gemacht und dem Archäologen Hinweise gegeben werden, wo er graben soll.

Die Ortung von archäologischen Strukturen oder Objekten geschah bisher traditionell durch die Luftbildarchäologie, durch gezielte Feldbegehungen aufgrund von Literaturhinweisen oder durch Zufallsfunde bei Baumaßnahmen. Durch den Einsatz technischer Geräte zur Oberflächen- und Tiefen-Ortung archäologischer Objekte wird die Arbeit der Archäologen stark unterstützt, da dadurch z.B. Bohrungen gezielter und damit auch kostengünstiger und zeitsparender angesetzt werden können.

Ein ganz besonderes Feld der Prospektion archäologischer Objekte ist die Unterwassarchäologie. Bislang geschieht dies meist durch den Einsatz von Forschungstau-

chern. Die Prospektion flacher Gewässer mit akustischen Verfahren stellt eine Herausforderung dar, da Verfahren und Technologien entwickelt werden müssen, die dem erforderlichen geringen Tiefgang des Geräteträgers sowie der vor allem im Uferrandbereich problematischen Seegangsbewegung gerecht werden.

Insofern gehört die Entwicklung eines vielstrahligen Sedimentecholotes mit 3D-Scanfähigkeit zu den herausragenden Ergebnissen des Förderschwerpunktes *NTG*. Mit Hilfe dieses Gerätes haben Archäologen die Relikte des wikingerzeitlichen Hafens von Haithabu untersucht und ihn als erstrangige archäologische Quelle zur europäischen Handelsgeschichte und zur Entstehung der mittelalterlichen Städtewelt identifiziert. In diesem Vorhaben haben Physiker einen Geräteprototyp entwickelt, der für die Prospektion der verschiedensten Objekte unter Wasser einsetzbar ist. Aus archäologischer Sicht war die Entdeckung eines neuen Wikingerschiffswracks ein großer Erfolg, das auch als dezentrales Projekt auf der *EXPO 2000* gezeigt worden ist.

2.4 Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen, kulturellen und staatlichen Stellen ist eine Grundvoraussetzung der *NTG*-Vorhaben und wichtiges Förderkriterium für die Bewilligung. Die Zusammenarbeit ist dort besonders wichtig, wo naturwissenschaftliche Methoden oder Technologien vor Ort angewandt werden, z.B. bei der



Abbildung 2.6: Aktuellstes Beispiel für einen Projektverbund ist der im Sommer 2002 eingerichtete Verbund zur Entwicklung und Adaption archäometrischer Techniken zur Erforschung der Kulturgeschichte der Nasca in Peru. In der Abbildung dargestellt ist eine der weltberühmten Bodenzeichnungen (Geoglyphe). Foto: Heidelberger Akademie der Wissenschaften - Forschungsstelle Archäometrie am Max-Planck-Institut für Kernphysik, *NTG*-Vorhaben 03WAX3VP.

Prospektion archäologischer Objekte oder der Materialanalyse an kunsthistorischen Objekte, die nicht ohne weiteres bewegt werden können.

Die Prospektion führte mehrere Vorhaben nach Griechenland, wo in einem Projektverbund von 1998 bis 2003 anthropogene Landschaftveränderungen auf der Nordost-Peloponnes untersucht wurden. Hieran waren mehrere deutsche und griechische Forschungseinrichtungen sowie die griechische Antikenverwaltung kooperativ beteiligt.

Die Herkunftsbestimmung von keltischem und skythischem Gold wurde durch die Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern in der Ukraine und Ungarn möglich. Auch andere archäologisch interessante Länder wie Zypern, Türkei, Syrien und Jordanien standen schon mehrfach im Blickpunkt von *NTG*-Vorhaben. Beispielhaft ist die Zusammenarbeit auch mit chinesischen Wissenschaftlern und Museumsfachleuten bei Untersuchungen zur Erhaltung von Polychromien an der bekannten *Terrakottaarmee* des Ersten Chinesischen Kaisers demonstriert.

Während in der Vergangenheit oftmals die osteuropäischen Länder und Länder des *Nahen Ostens* im Vordergrund standen, wird Südamerika als neues Untersuchungsfeld immer interessanter. Seit 2002 untersucht dort ein Projektverbund die Kultur im Umfeld der berühmten Bodenzeichnungen der Bewohner der *Nasca*-Ebene in Peru.

2.5 Nachwuchsförderung

Durch den Schwerpunkt *NTG* wird zugleich die Beteiligung des akademischen Nachwuchses an der archäometrischen Forschung in Deutschland gefördert. Die Projekte sind in besonderem Maße dafür geeignet, dass Teilaufgaben auch Gegenstand von Diplom- und Masterarbeiten oder von Dissertationen sind. Die im Rahmen der *NTG*-Vorhaben gebotene Möglichkeit der intensiven dialogischen Einbindung in wettbewerbsorientierte, evaluierte Forschungsvorhaben und die frühzeitige Einbindung in die internationale *scientific community* bieten günstige Entwicklungsvorteile für die jungen Forscherpersönlichkeiten.

Auf diese Weise ist es z.B. an der Universität Göttingen gelungen, alle an *NTG*-Projekten beteiligten biowissenschaftlichen Examenskandidaten in die aufnehmenden Berufsfelder (z.B. auch Kriminalämter, ausländische Oberbehörden) oder anschließend an in- und ausländische Graduiertenprogramme zu vermitteln. Ferner ist durch gezielte Bereitstellung von Stipendiatenstellen eine Koppelung von Forschungs- und Nachwuchsförderung betrieben worden, um so gezielt mittelfristige Expertise aufzubauen.

Angesichts eines strukturellen Defizits archäometrischer Einrichtungen vermittelt die Existenz des Förderschwerpunktes den risikobereiten Studierenden eine erforderliche psychologische Bestärkung. Wo Förderbereitschaft besteht, besteht auch Nachfrage. Der Förderschwerpunkt integriert diese Momente der Nachwuchspflege in die Forschungsförderung und ist damit erfolgreich.

2.6 Publikation und Medienberichte

Der *BMBF*-Förderschwerpunkt *NTG* hat sich durch die bisher erzielten Ergebnisse ausgewiesen. Die initiierte Forschung hat wesentlich zum Aufbau heute international anerkannter Forschungsgruppen beigetragen. In der zwischenzeitlich vergriffenen *NTG*-Broschüre ¹ aus dem Jahr 1997 sind einige Vorhaben der ersten Jahre (1989 bis 1997) dargestellt.

Die in den Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse haben zu einer Reihe von Publikationen in internationalen Fachzeitschriften und in Wissenschaftsmagazinen, zu Konferenz- und Tagungsbeiträgen, zu Diplom- und Doktorarbeiten, zu Habilitationsschriften und nicht zuletzt zu einer großen Anzahl von Publikationen in den Medien Zeitung, Hörfunk, Fernsehen und Film geführt. Im April 2002 wurde in der *ZDF*-Wissenschaftsserie *Goldfieber* ein 45-minütiger Beitrag mit dem Titel *Das Gold aus dem Himmelsgebirge* gesendet, in dem Ergebnisse eines *NTG*-Vorhabens der *TU Bergakademie Freiberg* vorgestellt wurden. In diesem Vorhaben aus dem Förderbereich Materialanalyse wurde mit einem hochauflösenden Massenspektrometer Isotopenmessung von Osmium zur Herkunftsbestimmung von keltischem und skythischem Gold durchgeführt.

Die besonderen Merkmale des Förderschwerpunktes *NTG*, d.h. die fächerübergreifende Zusammenarbeit zwischen Natur- und Geisteswissenschaftlern in internationalen Kooperationen, lassen immer wieder einzigartige Projekte entstehen. Es steht zu erwarten, dass auch weiterhin innovative naturwissenschaftliche Methoden und Technologien für die Geisteswissenschaften entwickelt werden. Die Nachfrage aus der *Community* ist seit Jahren ungebrochen.

¹Einsatz neuer Technologien in den Geisteswissenschaften, Jülich 1997.

An aerial photograph of a mountainous region. The terrain is rugged with numerous ridges and valleys. A prominent river network is visible, with several large, winding channels and many smaller tributaries. The central part of the image shows a valley with a river flowing through it. The overall color palette is in shades of brown and tan, suggesting a dry or semi-arid environment. The text 'Kapitel 3' is overlaid on the upper left portion of the image.

Kapitel 3

Ausblick

3.1 Erschließung neuer Themenfelder

Ergebnisdarstellungen auf Konferenzen und Ausstellungen und in den Medien zeigen, dass der *BMBF*-Förderschwerpunkt *NTG* eine große Resonanz in der Forschung und in der Öffentlichkeit gefunden hat. Die Wissenschaftler betrachten die Nutzbarmachung der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung für die Lösung geisteswissenschaftlicher Fragestellungen als Herausforderung und Chance. Die geisteswissenschaftlichen Fächer haben ihre Beziehung zu den Naturwissenschaften verbessert. Die Art der Förderung ist daher Modell für interdisziplinäre und internationale Forschung. Die Fähigkeit, über den Tellerrand der eigenen Wissenschaft zu blicken, muss von den betreffenden Wissenschaftlern im Diskurs erarbeitet werden. Nicht selten wird der so geschärfte Blick mit Erfolg belohnt, wo die Chancen, Neues zu entdecken ohnehin groß sind, nämlich an den Grenzen mehrerer Disziplinen, im Neuland.

Über Medien wie das Internet, Fachzeitschriften und Magazine hinaus werden neue Themenschwerpunkte überwiegend im Gespräch mit der *Scientific Community* erschlossen, auf Fachtagungen, Kongressen und eigenen *NTG*-Workshops (z.B. 2001 zum Thema Archäologische Prospektionsmethoden). Gesprächspartner sind die Mitglieder der *Gesellschaft für Naturwissenschaftliche Archäologie-Archäometrie (GNAA)* und des *Arbeitskreises Archäometrie und Denkmalpflege der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft*.

3.2 Zukünftige Schwerpunkte und Entwicklungslinien

Vorhaben mit überregionaler Bedeutung (z.B. zur Siedlungsarchäologie, zur Wechselwirkung zwischen Mensch und Umwelt, zu Einflüssen von Umwelt, Klima, natürlichen Ressourcen, Topographie, etc. auf gesellschaftliche, kulturelle und wirtschaftlichen Entwicklungen) bilden einen zukünftigen Schwerpunkt in der *NTG*. Dies bedingt, dass verstärkt integrierte Forschungsvorhaben (*Projektverbünde*)¹ zu gemeinsamen Fragen von Geistes- und Naturwissenschaften hinsichtlich der Beziehung von Mensch, Umwelt und Klima gefördert werden.

Weitreichende Fragen betreffen die Herkunft und biologische Entwicklung des modernen Menschen und die Möglichkeit der Rekonstruktion der ungeschriebenen Geschichte der modernen Zivilisation (Neolithisierung, gesellschaftliche Differenzierung und handwerkliche Spezialisierung, religiöse Vorstellungen, Sprache, Identifizierung ethnischer Einheiten, etc.). Bei der *DNA*-Analyse an historischem Skelettmaterial hat es in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung gegeben, die es möglich macht die Beantwortung dieser übergeordneten Fragestellungen anzugehen. Dabei werden zwei Ziele als besonders vielversprechend bewertet: Die Weiterentwicklung der Polymerasekettenreaktion (engl. *PCR*) und die Optimierung der Probennahme hin zu möglichst zerstörungsfreien Entnahmemethoden.

Ein großes *FuE*-Potenzial wird bei der Entwicklung von neuen Methoden zur archäolo-

¹In Projektverbänden sind mehrere, grundsätzlich auch getrennt durchführbare Vorhaben zusammengeschlossen, die *als Summe* zur Lösung einer übergeordneten Fragestellung beitragen.

gischen Prospektion gesehen. Bei der Geräte- bzw. Verfahrensentwicklung rückt die Verbesserung der Messgenauigkeit, vor allem in Bezug auf die Auflösung und das Kosten zu Nutzen-Verhältnis in den Vordergrund. Durch den kombinierten Einsatz verschiedener Methoden auf geeigneten Geräteträgern - oft in modular aufgebauten Systemen - können Messungen individuell auf die Fragestellungen der Archäologen oder die Gegebenheiten vor Ort zugeschnitten werden. Dies kann zum Beispiel die Vermessung großer Flächen in kurzer Zeit mit eher geringer Auflösung für Notgrabungen bei Strassenbauarbeiten oder die Vermessung kleinerer Flächen und dreidimensionaler Auflösung komplexer und mehrphasiger Siedlungsstrukturen sein. Der kombinierte Einsatz verschiedener Methoden steigert die Qualität der Ergebnisse, da Messergebnisse gegeneinander überprüft und auch bei schwierigen Bodenverhältnissen gute Ergebnisse erreicht werden können. Durch die Erhöhung der Genauigkeit und Vielfalt der Rohdaten muss aber auch die Bearbeitung der Daten mit rechnergestützten Systemen und die Interpretation der Daten verbessert werden.



Abbildung 3.1: Georadarmessung auf dem 20 ha großen Siedlungshügel Tell Gjindaris in Syrien. Foto: Fa. eastern atlas, Berlin, NTG-Vorhaben 03SUX4KN.

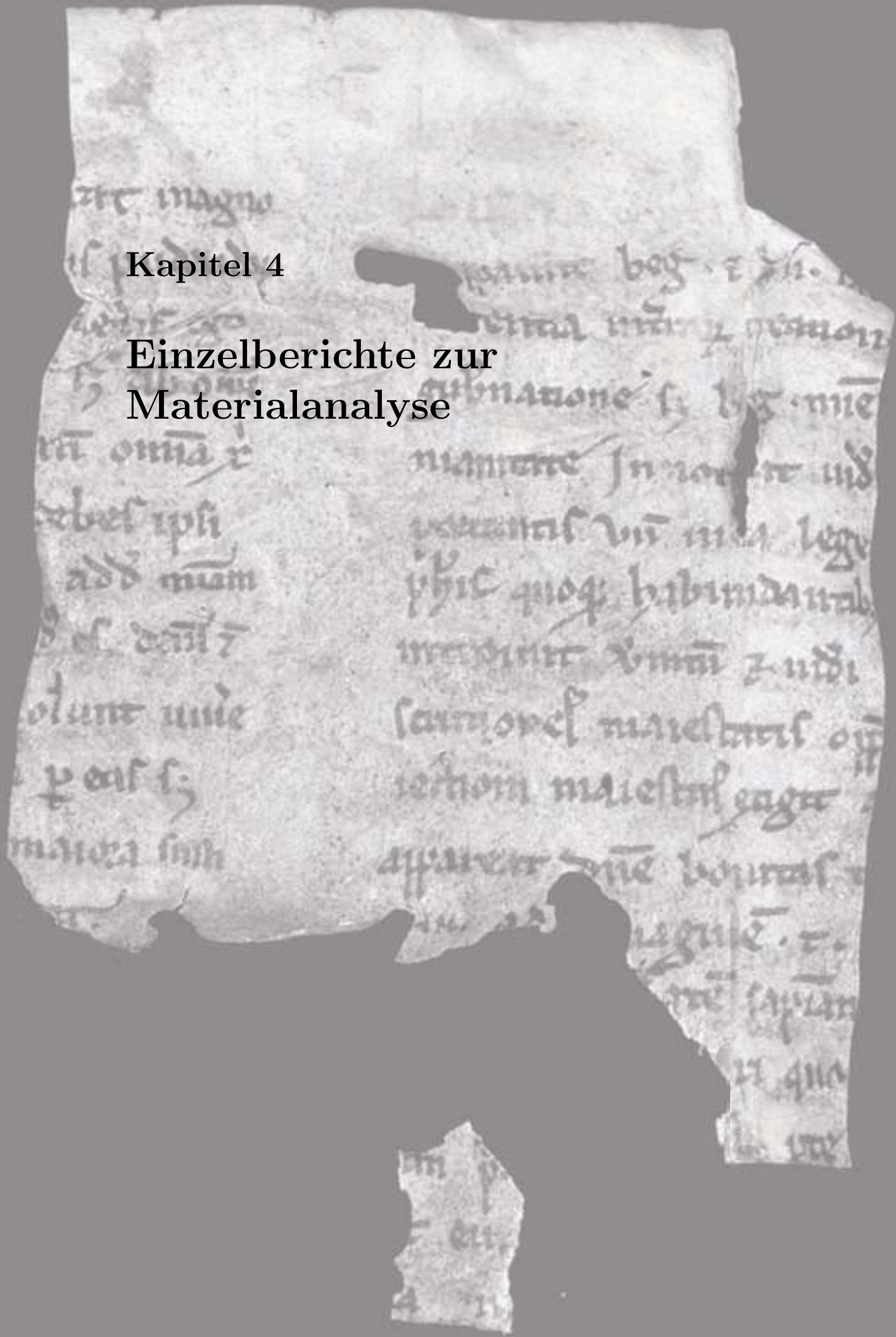
Neue Entwicklungsmöglichkeiten für Prospektionsmethoden werden vor allem auch bei schwierig zu vermessenden Übergangsregionen wie der Uferrandzone und stark bewaldeten oder bebauten Gebieten gesehen, wo z.B. Grabungen nicht möglich oder bislang mit hohen Kosten verbunden sind.

Generell besteht Bedarf in der *Community* nach optimierten Methoden zur Erfassung bisher nicht messbarer Parameter, in der Entwicklung mobiler, vor Ort einsetzbarer Geräte (z.B. Spektrometer) und möglichst zerstörungsfreier Methoden.

Entscheidend wird bei allem auch künftig naturgemäß die kooperative Fantasie der Beteiligten sein. Die Geschichte des Einsatzes der verschiedenen Lumineszenzmessverfahren zur Altersbestimmung zeigt besonders gut die Bedeutung jener fachübergreifenden Kreativität, die sich immer aufs Neue vorzustellen versucht, welche vorhandenen oder neuen naturwissenschaftlichen Erkenntnisse oder Verfahren zur Lösung alter oder neuer geisteswissenschaftlicher Fragen eingesetzt werden könnten.

Kapitel 4

Einzelberichte zur
Materialanalyse



4.1 Renaissance oder Historismus? Datierung von Maleremails aus Limoges

Heike Stege und Stefan Röhrs

Förderkennzeichen: 03MU9TUB (01.04.99-30.04.02)

Einleitung

Maleremails gehören zu den bedeutendsten Schöpfungen des französischen Kunstgewerbes der Renaissance. Die Bildwelt dieser mit farbigen Glasflüssen bemalten Kupfertafeln oder kupfernen Gefäße umfasst sakrale und profane Themen, biblische Szenen ebenso wie solche der antiken Mythologie und Ornamentik unterschiedlichster Art.



Abbildung 4.1: *Polychrome Tafel der Gefangennahme Christi, 1. Drittel des 16. Jhs., Herzog Anton Ulrich-Museum Braunschweig.*

Geschaffen wurden diese Emails vor allem in der südwestfranzösischen Stadt Limoges, die schon im Mittelalter ein Zentrum der Emailkunst war. Die sogenannten Maleremails waren eine technische Neuentwicklung des ausgehenden 15. Jhs. Ihr komplizierter Herstellungsprozess setzte einen hochqualifizierten Werkstattbetrieb voraus. Als Paste angerührtes Glaspulver wurde dabei in mehreren Brennschritten so auf den Kupferträger aufgetragen, dass das Ergebnis einem Gemälde ähnelte. Um die in Limoges konzentrierte virtuose Technik des Maleremails vor Imitationen zu schützen, erhielten die Werkstätten großzügige Privilegien des französischen Königs. Limousiner Maleremails wurden in der 2. Hälfte des 16. Jh. Bestandteil der höfischen Kultur, so dienten my-

thologische Darstellungen zum Beispiel der Unterhaltung bei Tisch. Viele der Emails wurden nun *en grisaille* ausgeführt, also durch fein nuancierte Abstufungen von Weiß auf schwarzem oder blauem Hintergrund. Um die Mitte des 17. Jhs. ging die Blütezeit der Maleremails zu Ende, wohl wegen eines Geschmackswandels, der chinesisches Porzellan, Miniaturmalerei auf Email und die Goldschmiedekunst populärer werden ließ.

Im 19. Jh. erfreuten sich Limousiner Maleremails erneut außerordentlicher Beliebtheit und waren gefragte Sammlerstücke mit zum Teil exorbitanten Preisen auf dem Kunstmarkt. Wichtiges Medium zum Entfachen der Begeisterung am Kunsthandwerk des Mittelalters und der Renaissance stellten öffentliche Ausstellungen wie die Londoner Weltausstellung von 1851 dar - Initialzündung für die daraufhin einsetzende Epoche des Historismus. In den darauf folgenden Jahrzehnten wurden vielfach beschädigte Stücke ergänzt, neue Werke im Stile der Originale geschaffen oder auch in betrügerischer Absicht gefälscht. Diese historistischen Restaurierungen und Nacharbeiten von Maleremails erfolgten in spezialisierten Werkstätten so geschickt, dass sie bislang in Literatur und Forschung bedenkenlos als genuine Stücke der französischen Renaissance gelten und sich heute in zahlreichen Museen und Sammlungen befinden. Mit dem bloßen Auge sind manche dieser Fälschungen nicht zweifelsfrei als solche zu erkennen: Zum einen haben die Emailleure sich eng an graphische Vorlagen (z.B. Holzschnitte oder Kupferstiche) gehalten, also keine eigene *Handschrift* entwickelt, die eine kunsthistorische Zuordnung ermöglichen würde. Zudem sind viele Werke nicht signiert, andere tragen zwar Monogramme, doch ist deren Zuordnung problematisch, da Meister über Generationen die gleichen Namen getragen haben. Daher war es das Ziel des Vorhabens, der kunsthistorischen Stilanalyse die naturwissenschaftliche Materialanalyse zur Seite zu stellen, um dabei zu helfen, die anstehenden Fragen der historischen Einordnung und Werkstatt-Zuordnung zu klären.

Auch die sorgfältige Aufarbeitung der historischen Rezeptliteratur sollte wichtige Informationen über die zeittypische Verwendung von Materialien liefern. In unserem Vorhaben arbeiten daher Naturwissenschaftler der *TU* und der *BAM Berlin*, Kunsthistoriker des *Kunstgewerbemuseums Berlin* und des *Herzog Anton Ulrich-Museums Braunschweig*, Röntgengeräteentwickler des *IfG Berlin* sowie eine Expertin für historische Emailliertechniken eng zusammen.

Materialanalysen - aber wie?

Untersuchungen an emaillierten Kunstobjekten stellen aus verschiedenen Gründen höchste Anforderungen an den archäometrisch arbeitenden Analytiker: Wegen der Fragilität von Emails und ihrer Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung ist ein Transport der oft einzigartigen Stücke möglichst zu vermeiden. Die Entnahme einer Probe ist nur in sehr wenigen Einzelfällen an Beschädigungen vertretbar. Um systematische Analysen zu ermöglichen, wurde deshalb *ArtTAX*[®] (siehe Abb. 2.2 auf Seite 9), ein neuartiges mobiles Spektrometer für die energiedispersive Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse entwickelt, das in mehreren Punkten für den Einsatz im Kunstbereich optimiert ist. Die Ausführung erfolgte von den Firmen *IfG*, Institut für Gerätebau und *intax Berlin*.



Abbildung 4.2: Sogenannter Monatsteller en grisaille mit der Darstellung des Monats Dezember, Nacharbeit des 19. Jhs., vermutlich Pariser Werkstatt. Kunstgewerbemuseum Berlin.

Die Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse (μRFA) liefert qualitative und quantitative Informationen über die Elementzusammensetzung eines Materials (nicht aber über Bindungszustände oder Kristallstrukturen). Simultan und mit großer Empfindlichkeit können Elemente zwischen Natrium und Uran erfasst werden. Die Methode eignet sich also auch für die Analyse von z.B. Legierungen, Pigmenten oder Edelsteinen.

Der miniaturisierte Messkopf enthält eine luftgekühlte Mikrofokusröntgenröhre mit einer maximalen Leistung von 30 W für die Anregung der Fluoreszenz. Die Besonderheit der μRFA ist es, den anregenden Strahl sehr fein, d.h. im Mikrometer-Bereich, fokussieren zu können, so dass auch die Untersuchung feinsten Maledetails oder Inhomogenitäten möglich ist. Die verwendete Polykapillaro-optik aus Glas nutzt den Effekt der Totalreflexion aus, um die Röntgenstrahlung zu fokussieren. Die Größe des anregenden Röntgenspots liegt bei 80 bis 100 μm . Für optimale Anregungsbedingungen konnten in Gläsern Nachweisgrenzen von besser 0,002 Gew.% eines Elementes erreicht werden.

Zur Detektion der Fluoreszenzstrahlung wird ein ebenfalls neuartiger Silizium Driftkammer Detektor (XFlash[®] von *Röntec*) benutzt, der nicht wie bisher mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden muss. Um eine Absorption der Fluoreszenz der Elemente Natrium bis Kalium an Luft zu verhindern und um die primäre Anregung zu verbessern, wurde eine Helium-Gasspülung integriert, die alle Anregungs- und Detektionswege luftfrei hält, ohne aber wie sonst üblich im Vakuum arbeiten zu müssen.

All diese Baugruppen sind zu einem Messkopf zusammengefasst, der auf einem Stativ gelagert ist und dadurch optimal zum Objekt positioniert werden kann. Für die exakte Positionierung der Spots und zur Justierung des Abstandes kann der Messkopf mittels eines schrittmotorgesteuerten Y, X, Z-Triebs vom Rechner aus bewegt werden. Um die Position des Messkopfes relativ zum Objekt zu bestimmen, erhielt der Mess-

kopf eine *CCD*-Kamera, deren Bild auf dem Monitor verfolgt werden kann, sowie drei *Laser-LEDs*, die so justiert sind, dass im Schnittpunkt ihrer Strahlen der Fokus der Röntgenoptik liegt. Das betreffende Objekt - es kann von fast beliebiger Größe und Form sein - wird lediglich dicht vor einen schwenkbaren Messkopf gestellt. Die Analyse selbst erfolgt berührungslos und innerhalb weniger Minuten. Im Vor-Ort-Einsatz hat sich das Spektrometer schon mehrfach bewährt. Der Aufbau des gesamten Gerätes nimmt etwa 30 min. in Anspruch.

Die zerstörungsfreien Messungen werden ergänzt durch Analysen an einigen entnommenen Proben mittels Elektronenstrahlmikrosonde (für die genaue Charakterisierung von Schichtaufbauten) und der Laser-Mikroanalyse (für die semi-quantitative Bor-Bestimmung).

Wie entlarvt man eine Fälschung?

Bisher ist es noch nicht gelungen, für Metalle und Glas, den beiden Grundmaterialien von Emails, eine Methode zur direkten Datierung, etwa vergleichbar zur Radiokarbon-Datierung, zu finden. Daher ist man auf eine vergleichende Datierung angewiesen, die allerdings die möglichst präzise Kenntnis von Referenzobjekten der fraglichen Zeiträume und des gleichen Herstellungsortes voraussetzt. Insgesamt sollen bis zum Projektende etwa 140 Maleremails aus den wichtigsten deutschen Sammlungen erfasst und in einer Datenbank zusammengefasst werden. Besonders die Glasflüsse enthalten eine Vielfalt von Informationen für die chronologische Einordnung, da sie sich aus jeweils 15 oder mehr unterschiedlichen Elementoxiden zusammensetzen. Vor dem eigentlichen Emaillieren wurden die Roh-Emails dazu aus einem Gemenge von Sand oder Quarz und alkalihaltigen Flussmitteln, also Sodaasche, Pottasche oder Kalisalpeter (Kaliumnitrat), zum Teil auch Bleioxid, erschmolzen. Diesen klaren *Fluss* wurden verschiedene färbende Metalloxide (Kupfer, Eisen, Cobalt, Mangan) beigemischt. Das in den originalen Emails verwendete Trübungsmittel für die Herstellung des so wichtigen *Grisaille*-Weiß bestand aus einer Mischung von Blei- und Zinnoxid - seine Herstellung erforderte besonders viel Sorgfalt und Erfahrung.

In manchen Fällen kann die Frage *Renaissance oder Historismus?* sehr einfach beantwortet werden: So wurden erst im 19. Jh. bestimmte färbende Elemente verwendet, die vorher unbekannt waren. Prominenteste Vertreter solcher *termini post quem* sind Verbindungen von Chrom und Uran, die nicht vor 1802 bzw. 1830 in Gebrauch waren. Aber bereits vorher brachte die Geburt der experimentellen Naturwissenschaften im 17. Jh. eine tiefgreifende Verbreiterung der Materialkenntnis und damit auch eine erweiterte Palette von Farben und Farbkombinationen mit sich (zum Beispiel Goldrubin oder zinkhaltiges opakes Gelb).

Auch die Trübungsmittel für opake Emails wechselten: seit dem 18. Jh. fand Bleiarzenat Verbreitung und löste Zinnoxid in vielen Fällen ab. Andere Datierungsmerkmale sind auf eine verbesserte Herstellungstechnologie zurückzuführen. So sind die Farbflüsse des 19. Jahrhunderts im allgemeinen sehr viel bleihaltiger als in den originalen Emails. Als Datierungsmarker finden wir oft auch Bor, ein Element, was in Form des Flussmittels Borax (Natriumtetraborat) zwar im 16. Jahrhundert durchaus bekannt, aber erst

durch die Entdeckung größerer Vorkommen im 19. Jh. in größerem Maßstab erschwinglich wurde. Aber auch aus den nur geringen Gehalten von Neben- und Spurenelementen wie Phosphor, Chlor, Barium oder Rubidium, um nur einige zu nennen, lassen sich Hinweise auf die Herstellungszeit ziehen. Diese Bestandteile gelangten nicht intentionell, sondern nur als Verunreinigungen der Rohstoffe in die Schmelze und ermöglichen damit Rückschlüsse z.B. auf die Art und Reinheit der verwendeten Flussmittel oder sind typische Begleitelemente mineralischer Ausgangsverbindungen, vor allem des Cobalts und Mangans.

Mit dem wachsenden Kenntnisstand der Chemie wurden auch die in der Glas- und Emailherstellung eingesetzten Materialien, z.B. synthetische Soda, im Laufe der Zeit nach und nach reiner, in erster Linie um eine reproduzierbare und von unvorhersehbaren Materialschwankungen unabhängige Produktion zu ermöglichen. Aber auch die Emailiertechnik war dem Wandel der Zeiten unterworfen. Der schwarze Hintergrund des abgebildeten Monatstellers mit Schlittschuhläufern ist mit einem hoch bleihaltigen farblosen *Fluss* überzogen, eine Technik, die als *Crowning* erst im 19. Jh. verbreitet ist.

Ein Problem sollte nicht unerwähnt bleiben: Während es häufig eindeutig möglich ist, eine Fälschung zu *entlarven*, ist es ungleich schwerer, den sicheren Beweis für die Originalität eines Objektes zu führen. Trotz einer Zeitspanne von 200 bis 300 Jahren, die zwischen der Blüte der Maleremails in Limoges und ihrer Wiederentdeckung liegt, wissen wir nicht genau, wie lange noch mit alten Materialien gearbeitet wurde. Noch heute ist es übliche Praxis von Emailleuren, ihre Materialien und Werkzeuge an Nachfolger zu vererben. Letztendlich kann deshalb nur die interdisziplinäre Bewertung von stilkritischer, technischer und materialanalytischer Seite größtmögliche Klarheit bringen.

4.2 Glasperlen machen Geschichte - Technologieentwicklung zwischen Tradition und Innovation im frühen Mittelalter

Martin Heck, Christian Matthes, Claudia Theune, Peter Hoffmann und Johan Callmer
Förderkennzeichen 03CA9HUB (01.04.96-31.07.00) und 03HO9DAR (01.04.96-31.03.00)

Oftmals sind es die unbedeutend erscheinenden Dinge, die bei der wissenschaftlichen Arbeit zu neuen Erkenntnissen führen. Zu ihnen gehören mit Sicherheit auch die zahllosen Glasperlen von Halsketten, mit denen die Frauen im Frühmittelalter neben anderen Trachtbestandteilen auf den Gräberfeldern des des 5.-7. Jhs. in West- und Süddeutschland bestattet wurden. Neben dem Trachtschmuck aus Edelmetall bei Frauengräbern oder Waffenfunden und aufwendigen Gürteln in Männergräbern erschienen die Perlen lange Zeit für die archäologische Forschung eher unbedeutend und nicht zuletzt wegen ihrer hohen Anzahl wurde ihnen wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Ihre weite Verbreitung, ohne zeitliche oder regionale Beschränkungen, quer durch alle gesellschaftliche Schichten machen sie jedoch zu einem hervorragenden Forschungsobjekt, das keinerlei sozialem Filter in der archäologischen Überlieferung unterliegt.



Abbildung 4.3: *Frühmittelalterliche Perlen aus Südwestdeutschland.*

An ihrem Beispiel wurde in unserem von Archäologen und Materialwissenschaftlern durchgeführten Forschungsprojekt die Technologieentwicklung von der Spätantike (4./5. Jh.) bis zum Anfang des 8. Jhs., der Merowingerzeit, verfolgt. Die ältere Forschung glaubte lange, durch die Unruhen der Völkerwanderungszeit sei nicht nur das politische Machtgefüge des Römerreiches auseinandergebrochen, sondern auch zahllose andere Strukturen - unter anderem der hohe Stand der Technik - sei verloren gegangen.

Archäologische Fundobjekte besitzen ein hohes Maß an Informationen zur Technologie der Zeit und können daher den Grad der überlieferten Traditionen und Innovationen

deutlich machen. Besonders hochspezialisierte Handwerkszweige wie die Metall- und auch die Glasverarbeitung bieten wichtige Hinweise für die Produktionsmechanismen, für Herstellung und Verteilung. Schriftquellen helfen hier nicht weiter, da Aussagen zu Kultur und Gesellschaft und deren Veränderungen kaum vorhanden sind.

Die Verbindung zwischen Archäologie und Materialwissenschaften ermöglichte ein Herangehen an das Forschungsobjekt auf zwei Ebenen. Die Archäologie beschäftigte sich mit dem *Makrokosmos* der Glasperlen. Es wurden die äußerlichen Merkmale wie Farbe, Form, Größe, Dekor und Herstellungsspuren im Detail aufgenommen. Grundlage dabei waren einige ausgesuchte Gräberfelder entlang des Rheins. Vergleicht man nun die Perlentypenzusammensetzung der Ketten aus den verschiedenen Gräbern erkennt man Gemeinsamkeiten und Unterschiede. Eine kombinationsstatistische Auswertung der Perlentypen und ihrer Fundplätze, die so genannte Seriation, ergab einen chronologisch zu deutenden kontinuierlichen Wandel in der Zusammensetzung der Ketten.

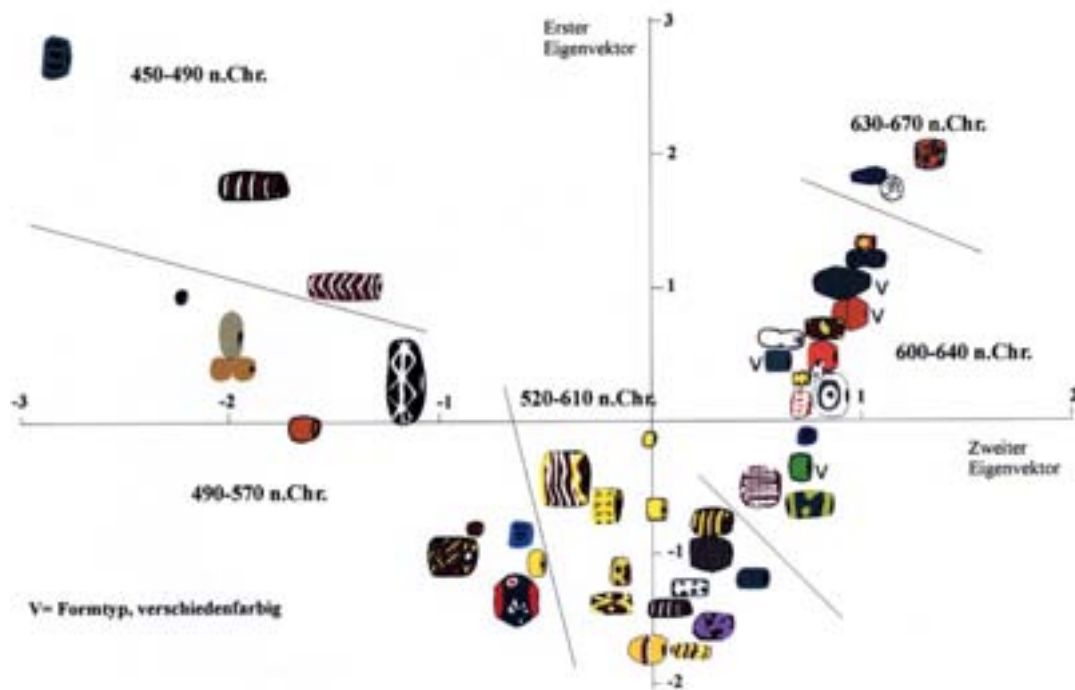


Abbildung 4.4: Zweidimensionale Darstellung der Eigenvektoren der Seriation der Perlen aus dem Rheinland.

Abbildung 4.4 zeigt in einer parabelförmigen Eigenvektordarstellung den zeitlichen Einsatzpunkt verschiedener Perlentypen. Zwar können diese Typen Laufzeiten von bis zu drei Generationen haben, doch die spezifische Kombination der zahlreichen Einzeltypen zu einer Kette ist nur für eine kurze Zeitspanne von etwa einer Generation charakteristisch und bietet daher ein optimales Datierungsmittel.

Der *Mikrokosmos* der Glasperlen wurde naturwissenschaftlich erforscht. Von besonderem Interesse waren die chemische Zusammensetzung der Perlen sowie Aussagen zu

den enthaltenen kristallinen Phasen der Farbpigmente in der amorphen Glasmatrix. Um den Erhalt der Altertümer zu garantieren, mussten die Analyseverfahren überwiegend zerstörungsfrei arbeiten. Mit der Anwendung der energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse (*EDRFA*) wurde diese Prämisse umgesetzt. Daneben kamen die Röntgendiffraktometrie (*XRD*), Rasterelektronenmikroskopie (*REM*), die Elektronenstrahlmikroanalyse (*ESMA*) und die Thermionenmassenspektrometrie (*TIMS*) zum Einsatz, die an wenigen Bruchstücken auch mal nicht-zerstörungsfrei arbeiten durften.

Insgesamt wurden 1493 Perlen mit der *EDRFA* untersucht. Das Problem der zunächst durch ihre runde Form erzeugten weiten Streuung der Messstrahlung konnte durch den Einsatz besonderer Blenden und Filter zur größten Zufriedenheit gelöst werden. Desweiteren bereitete die oberflächliche Korrosionsschicht, die auch bei scheinbar gut erhaltenen Perlen vorhanden war, Schwierigkeiten. Es wurden zur Unterscheidung verschiedener Perlentypen daher nur Substanzen eingesetzt, die sich in verschiedenen Messungen an korrodierten und korrosionsfreien, angeschliffenen Proben erwiesen. Ferner wurden drei Messungen pro Perle vorgenommen, um Inhomogenitäten im Glas gemittelt zu relativieren.

Farbe	Färbung	Anzahl der Cluster in ihrer Verbreitung		
		überregional	regional	lokal
gelb	Bleistannat ($PbSnO_3$)	4	7	
weiß	Zinnoxid (SnO_2)	2		1
dunkelgrün	CuO, PbO, MnO, Fe_2O_3	2		2
hellgrün	$PbSnO_3$ (gelb) Cu^{2+} – Ionen (blau) = grün	1		2
orange	Cuprit (Cu_2O)	3	1	4
braun	elementares Kupfer (Cu)	2	5	2

Tabelle 4.1: *Färbende Komponenten bei merowingerzeitlichen Glasperlen und ihre räumliche Verteilung*

Glasperlen bestehen aus dem Grundglas, der sogenannten Glasmatrix, und den in ihr enthaltenen farbgebenden Komponenten. Das Grundglas unterscheidet sich in seiner Zusammensetzung mit SiO_2 : 68 %, Na_2O : 18 % und CaO : 8 % in keiner Weise von Gläsern der römischen Antike. Die über die gesamte Untersuchungszeit des 5.-7. Jhs. im gesamten Untersuchungsgebiet vom Nieder- bis zum Hochrhein gleichbleibende Glasmatrix zeigt, daß Rohglas zentral in antiker Tradition hergestellt worden ist und zwar nach Rezepturen, die schon in der römischen Kaiserzeit verwendet wurden. Hier ist also eine eindeutige Technologiekontinuität zu sehen.

Offen ist nach wie vor, woher dieses Grundglas stammt, da es für die Merowingerzeit keinerlei archäologischen Beleg in Form eines Glasofens gibt, in dem aus den Rohstoffen Sand, Soda und Kalk das Glas erschmolzen wurde. Bei kritischer Betrachtung fehlt dieser sogar für die römische Kaiserzeit in den germanischen Provinzen, da die dort gefundenen Glasöfen eher auf eine Glasverarbeitung, denn auf eine Glasherstellung schließen lassen. Als farbgebende Komponenten wurden Minerale, Syntheseprodukte,

Metalle und deren Oxydationprodukte und Metallverarbeitungsschlacken eingesetzt.

Unterschiede sind jedoch in der Zusammensetzung der farbgebenden Komponenten bei allen Farben festzustellen. Zwar wurden die Perlen einer Farbgruppe mit den gleichen Pigmenten gefärbt, doch gibt es starke Abweichungen bei der Quantität der einzelnen Komponenten. Signifikant voneinander zu unterscheidende Perlentypen wurden dabei in Gruppen (Cluster) eingeteilt.

An diesem Punkt kam es zur Synthese der archäologischen und chemisch-analytischen Vorgehensweisen. Die ermittelten Cluster wurden über den Fundplatz der Perlen mit archäologischen Methoden, wie der Kartierung, in einen zeitlich-räumlichen Zusammenhang gestellt. Bei den merowingerzeitlichen Perlen ließen sich chronologisch-chorologische Strukturen feststellen. Damit erhielt man zunächst Aussagen über Absatzgebiete bestimmter Produktionseinheiten, da offensichtlich ein identisches Rohglas verwendet wurde, die Methode, es einzufärben, aber räumlich unterschiedlich war. Man muss also davon ausgehen, dass der Einfärbeprozess des Glases von der Rohglasherstellung getrennt war. Das eingefärbte Glas wurde dann zu Glasperlen weiterverarbeitet.

Die unterschiedlichen Absatzgebiete sind am deutlichsten bei grünen Perlen zu erkennen. Bleioxidreiche Varianten traten nur vom Nieder- bis zum Mittelrhein (s. Abb. 4.5: Offene Kreise), bleioxidarme hingegen vom Ober- bis zum Mittelrhein auf (s. Abb. 4.5: Gefüllte Kreise).

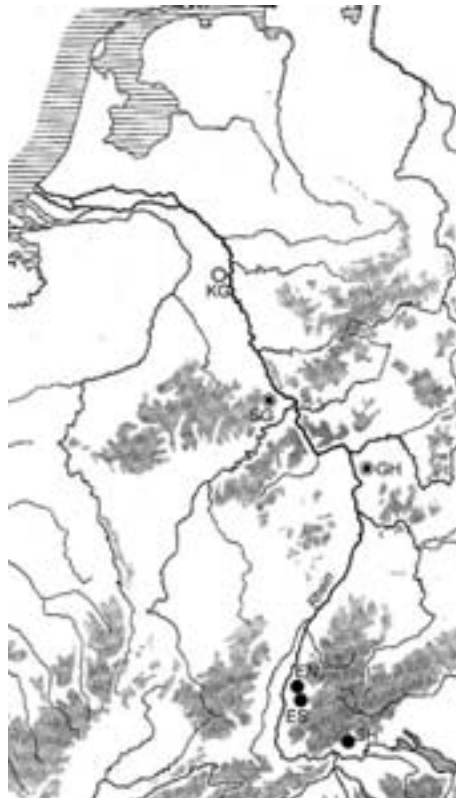


Abbildung 4.5: *Unterschiedliche Absatzgebiete der grünen Perlen.*

Aber auch zeitliche Variationen ließen sich feststellen. Cluster mit überregionaler Verteilung waren grundsätzlich unabhängig von der Farbe älter als solche mit regionaler Verbreitung. Diese setzten in der Regel erst mit Beginn des 7. Jhs. ein. Langlebige Perlenzusammensetzungsmischungen, wie die eines Clusters bei den gelben Perlen, der sich bis in die frühe Völkerwanderungszeit zurückverfolgen ließ, nahmen quantitativ so stark ab, dass man davon ausgehen kann, dass sie nicht mehr produziert wurden. Die in den jüngeren Gräbern noch auffindbaren Exemplare werden durch persönliche Weitergabe *verspätet* ins Grab gelangt sein. Bei gelben Perlen konnte weiterhin eine tendenzielle Zunahme des Bleioxidgehaltes festgestellt werden. Möglicherweise sind dies Ansätze zu Vereinfachungen im Schmelzverfahren, da das Bleioxid die Verarbeitungstemperatur sinken lässt.

Es wurden also in mehrfacher Hinsicht Veränderungen bei Produktionsprozessen deutlich. Neben der überlieferten Produktion in antiker Tradition, die im 5. und 6. Jh. fortlebte, traten seit der Zeit um 600 kleinere Werkstätten mit eigenen Rezepturen auf. Im Verlauf des 7. Jhs. fand also eine Regionalisierung in der Perlenproduktion statt. Dieser Prozess ist auch in für andere Schmuck- und Trachtgegenstände der Zeit beobachtet worden.

Die nur wenigen bisher bekannten direkten archäologischen Nachweise einer Perlenproduktion geben wichtige Hinweise zu deren Herstellung. Vornehmlich handelt es sich dabei um Tiegelbruchstücke aus Abfallgruben oder Siedlungsfunden. Ein Fragment mit gelber Schmelze aus Schleithem (Schweiz) wurde im Rahmen des Projektes untersucht. Es enthielt das Pigment Bleistannat, ein Blei-Zinnoxid. Die Zusammensetzung dieses entsprach dem von Perlen aus dem Gräberfeld des gleichen Fundortes, so dass man davon ausgehen muss, dass das gelbe Farbpigment für die Perlen auch in oder bei Schleithem hergestellt worden sind. Die Perlen setzten sich dabei aus ca. 1/4 Soda-Kalk-Glas und 3/4 Pigmentschmelze zusammen.

Es fiel auf, dass mit Beginn des 7. Jhs. der durchschnittliche Arsen- und Antimonoxidanteil bei den gelben Perlen erheblich anstieg. Dies betraf besonders Perlen aus dem Verbreitungsgebiet des Oberrheins. Beide Elemente sind in Erzgängen Begleiter des Bleis, das in oxidiert Form, wie oben dargestellt, einen Großteil des gelben Pigmentes ausmacht. Deshalb wurden einige Bleiisotopenanalysen vorgenommen. Auch hier trennten sich die Arsen- und antimonoxidhaltigen Perlen von den übrigen Stücken. Ferner bestanden hohe Übereinstimmungen mit Bleiisotopenvergleichsdaten aus dem Schwarzwald. Es ist also anzunehmen, daß das Bleioxid der arsen- und antimonhaltigen gelben Perlen aus einem Bergbau des Schwarzwaldes bzw. den damit verbundenen Verhüttungswesen stammt. So bilden die aus den gelben Perlen gewonnenen Analyse- daten möglicherweise den frühesten Beleg für mittelalterlichen Silber-Blei-Bergbau im Schwarzwald, der schon Anfang des 7. und nicht erst im 8. oder gar 9. Jh. einsetzte.

Alle Einfärbeprozesse vom Perlenglas sind eng mit anderen Hochtemperaturtechnologien verbunden. Ein Tiegelfragment mit gelbem Glas aus Wijnaldum (Niederlande) war in einer Abfallgrube mit Produktionsresten eines Schmiedes/Bronzegießers vergesellschaftet. Bei weißen Perlen weist eine hohe Korrelation von Blei- und Zinnoxid auf eine gemeinsame Zugabe hin. Das Mengenverhältnis beider zueinander entspricht dem von Weichlot. Bei braunen Perlen konnte aufgrund von Gefügeuntersuchen gezeigt werden,

dass das zur Kupferreduktion eingesetzte Eisenoxid ursprünglich aus einer Rennofenschlacke stammt. Zinnoxideinschlüsse in Kupferverbindungen bei braunen, orangefarbenen und grünen Perlen lässt an eine Mitverwendung von Bronzen als Kupferrohstoff denken. Dies alles sind deutliche Hinweise auf ein Zusammenwirken von metall- und glasverarbeitenden Handwerksbetrieben.

Die Untersuchung hat einen wichtigen Beitrag zu Fragen der Kontinuität antiker Kulturen im frühen Mittelalter geliefert. Anhand der vorliegenden Analyse zu merowingerzeitlichen Glasperlen konnte nachgewiesen werden, dass es in technologischer Hinsicht keinen Bruch von der Spätantike zum frühen Mittelalter gegeben hat, sondern zumindest bis ins 6. Jh. hinein alte Techniken fortgesetzt wurden. Erst mit dem 7. Jh. setzte eine Periode der stärkeren Regionalisierung ein. Dieser Prozess spiegelt sich auch bei anderen handwerklich hergestellten Gegenstände der Zeit wider. Eine größere Bandbreite bei der Zusammensetzung der farbgebenden Komponenten der Perlen deutet auf eine Abkehr von antiken Traditionen, aber auch auf eine größere Experimentierfreudigkeit hin, die zu Innovationen führte. Ursache hierfür könnte eine rückläufige Verfügbarkeit des Kalk-Soda-Glases und anderer Rohmaterialien sein. Möglicherweise steht am Ende dieses Prozesses die Einführung des hochmittelalterlichen Waldglases. Der mit Hilfe der gelben Glasperlen indizierte merowingerzeitliche Bergbau im Schwarzwald und der sich in der Glasfärbung widerspiegelnde hohe materialtechnische Kenntnisstand deuten an, dass das frühe Mittelalter in seinem technologischen Stand unterschätzt wurde.

4.3 Herkunft von antikem Gold mit Laserablation und Sektorfeld-Massenspektrometrie

Rupert Gebhard, Stephan Junk, Ernst Pernicka und Bernward Ziegeaus

Förderkennzeichen 03PE9FRE (01.04.99-30.04.02)

Einleitung

Archäologische Goldfunde waren immer schon etwas Besonderes. Man denke nur etwa an die von Heinrich Schliemann geborgenen Schatzfunde von Troia und Mykene. Gold wies schon früh einen erheblichen ökonomischen Wert auf und gilt bis heute als Inbegriff für ein wertvolles Metall. Darüber hinaus übt es auf viele Menschen eine fast magische Anziehungskraft aus. Nicht umsonst ist es das bei weitem beliebteste Schmuckmetall.

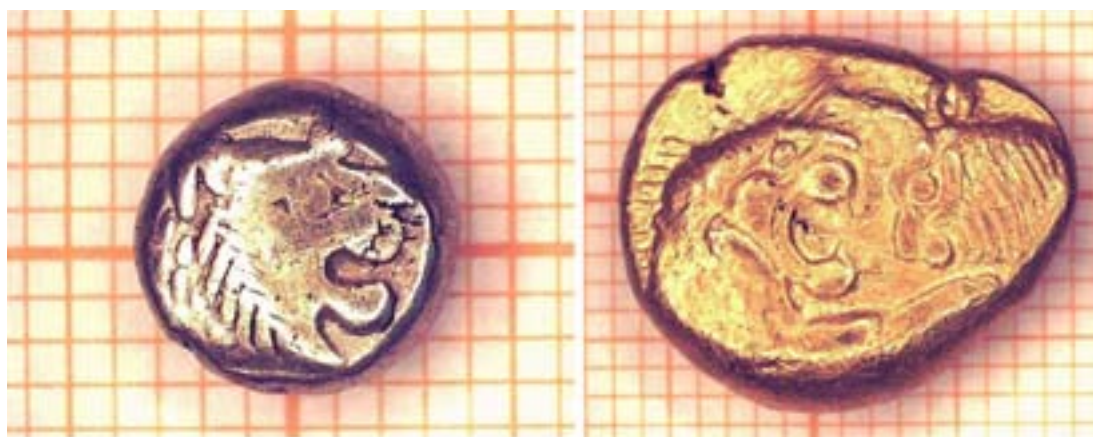


Abbildung 4.6: *Lydische Münzen mit Prägung des Alyattes- und Kroisos-Typs, Münzsammlung Zwicker Nr. Z1544 und Z1548.*

Für Archäologen stellt sich bei solchen Funden natürlich auch die Frage nach der Herkunft des Goldes und der Verarbeitungsmethoden. Traditionell versucht man, diese über die Materialzusammensetzung zu ermitteln. Chemische Analysen wurden schon im 19. Jh. auf archäologische Objekte angewandt in der Annahme, dass die Zusammensetzung Informationen sowohl über die Herkunft des Metalls als auch über dessen Alter enthalten würde. Bezüglich des Alters wurden die Hoffnungen sehr bald enttäuscht aber die Herkunft blieb immer ein zentrales Forschungsanliegen der Archäologie.

Am *Institut für Archäometrie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg* sucht man mit naturwissenschaftlichen Methoden nach Antwort. Genutzt werden dafür Verfahren, die eigentlich für die Weltraumforschung entwickelt wurden: Dabei werden aus kleinsten Materialproben die Spurenelemente und Isotope bestimmt. So entsteht eine Art *chemischer Fingerabdruck* von der jeweiligen Lagerstätte bzw. dem Bronzegegenstand, die dann auf ihre Übereinstimmung überprüft werden können. Am besten für solche Vergleiche geeignet ist dabei das Blei, von dem sich Spuren in jedem Erz finden

und das je nach dem geologischen Alter und der Entstehungsgeschichte der Lagerstätte in unterschiedlichen Isotopenverhältnissen auftritt. Für Kupfer, Kupferlegierungen, Silber und Blei hat sich diese Methode bereits bewährt. Wie sieht es aber mit Gold aus?

Im Prinzip sollte die Herkunftsbestimmung von Gold einfacher sein als die von Kupfer. Denn im Gegensatz zu anderen Metallen unterliegt nämlich das Gold auf dem Weg von der Lagerstätte zum Fertigprodukt keinen chemischen Veränderungen durch die Verhüttung. Es sollte deshalb seinen *geochemischen Fingerabdruck* bewahren. Dennoch waren die bisher veröffentlichten Ergebnisse bezüglich der Herkunft von Gold wenig überzeugend, denn alle die dafür meist eingesetzte Methode der Emissionsspektalanalyse ist nicht sehr nachweisstark. Da Gold aber in der Natur fast immer mit Silber vermischt, aber sonst sehr rein auftritt, konnten die meisten Elemente nicht erfasst werden. Es ist bekannt, dass der Silbergehalt des natürlichen Goldes in weiten Bereichen schwankt und deshalb keine Rückschlüsse über die Herkunft zulässt.

Zusätzliche Schwierigkeiten bestehen in der häufig beobachteten Zugabe von Kupfer zu natürlichem Gold, um dessen Farbe zu verbessern, denn Gold-Silber Legierungen sind nur blassgelb. Weil Kupfer in der Regel stärker verunreinigt ist, verändert es das Spurenelementmuster der Legierung erheblich. Die bei Buntmetallen so erfolgreich angewandte Bleiisotopenmethode ist für Gold ebenfalls kaum geeignet, weil Gold meist nur sehr geringe Mengen (meist weniger als $1 \mu\text{g/g}$) von Blei enthält. Bei solch geringen Gehalten ist die Kontaminationsgefahr, sei es in der Natur durch die Bodenlagerung, sei es bei der Probenahme oder im Labor, besonders groß und die Interpretation der Messergebnisse schwierig. Auch hier stört gegebenenfalls die Zugabe von Kupfer, das meist mehr Blei als Gold enthält. In diesem Fall zeigen die Isotopenverhältnisse des Bleis die Herkunft des Kupfers und nicht des Goldes an.

Schon lange ist bekannt, dass antikes und prähistorisches Gold häufig Einschlüsse von Platinmetallen enthält, die im wesentlichen die Elemente Ir, Os und Ru in wechselnden Anteilen enthalten. Diese Einschlüsse sind recht widerstandsfähig und lösen sich auch in geschmolzenem Gold nicht auf. Leider ist ihre chemische Zusammensetzung kein Herkunftsindikator, weil sie selbst in einem einzigen Objekt über weite Bereiche streut. Dagegen sollte aber die Isotopenzusammensetzung des Osmiums in diesen Osmium-Iridium- und Osmium-Iridium-Ruthenium-Legierungen für die Herkunft bedeutsam sein, da ^{187}Os durch den radioaktiven Zerfall von ^{187}Re gebildet wird und es ähnlich wie bei Blei - vom Re/Os-Verhältnis und dem geologischen Alter eines Gesteins abhängt, welches $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ sich einstellt.

Die Isotopenanalyse von Osmium ist allerdings kein leichtes Unterfangen. Erst seit etwa 1980 wird die Isotopensystematik von Osmium als geologischer Tracer verwendet. Die Messung erfolgt dabei durch Massenspektrometrie negativer Ionen mittels thermischer Anregung. Diese Methode ist allerdings sehr komplex und zeitaufwändig. Vor allem wird dafür eine Probe benötigt, die zur Analyse aufgelöst werden muss. Solche Beschädigungen können an ästhetisch ansprechenden Funden aber kaum toleriert werden.

Weitaus besser ist die Laserablation kombiniert mit einer sehr nachweisstarken Analysenmethode. Bei der Laserablation wird durch Beschuss einer Probe mit einem Laserstrahl auf einer Fläche von wenigen tausendstel Millimeter Durchmesser eine kaum

wahrnehmbare Menge der Probe abgetragen und mit einem Gasstrom zur eigentlichen Messung abtransportiert. Dieses so erzeugte Aerosol genügt für äußerst empfindliche Analysemethoden wie die Sektorfeld-Massenspektrometrie mit einem induktiv gekoppelten Argonplasma als Ionenquelle. Dieses Analyseverfahren ist auf praktisch alle feste Proben anwendbar.

Chemische Zusammensetzung

Wenn es darum geht, ob das gesamte für ein Objekt verwendete Gold aus der selben Quelle stammt, oder ob die selbe Goldqualität für den gesamten Gegenstand verwendet wurde, dann hilft oft die Materialzusammensetzung weiter. Solche Fragen entstanden bei z. B. bei der Sarkophagwanne des ägyptischen Pharaos Echnaton aus dem Grab KV 55 im Tal der Könige (s. Abb. 4.7). Er wurde Mitte des 13. Jhs. v. Chr. begraben.



Abbildung 4.7: Darstellung der Sarkophagwanne Echnatons aus dem Grab KV 55 im Tal der Könige.

Es wurden unterschiedliche, mit Goldblech verzierte Stellen dieser Sarkophagwanne untersucht. Wichtig war, sowohl den Hauptbestandteil Gold, die Nebenbestandteile Kupfer und Silber, als auch ausgewählte, für bestimmte Lagerstätten charakteristische Spurenbestandteile nachzuweisen, was mit der Massenspektrometrie möglich ist. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der Zusammensetzung der Goldbleche, so dass von einer einheitlichen Goldqualität bei dieser Sarkophagwanne ausgegangen werden kann. Dieselbe Goldquelle wäre eine ebenso naheliegende Schlussfolgerung.

Auffällig war der mit etwa 2 % recht niedrige Silbergehalt bei gleichzeitig geringem

Kupfergehalt. Dies legt eine gezielte Auswahl der Goldqualität nah, etwa um eine gute Aushämmerbarkeit zu dünnen Blechen sicherzustellen, zum anderen um einen schönen Goldfarbton zu erhalten und die starken Farbaufhellungen von höher silberhaltigem, kupferarmen Gold zu vermeiden. Hohe Silbergehalte von zum Beispiel 20 % verbunden mit niedrigem Kupfergehalt sind typisch für bergmännisch gewonnenes Gold. Entweder waren den Ägyptern daher schon früh silberarme Goldquellen zugänglich oder es muß damit gerechnet werden, dass die Technik des Scheidens von Gold und Silber bereits sehr früh bekannt war.

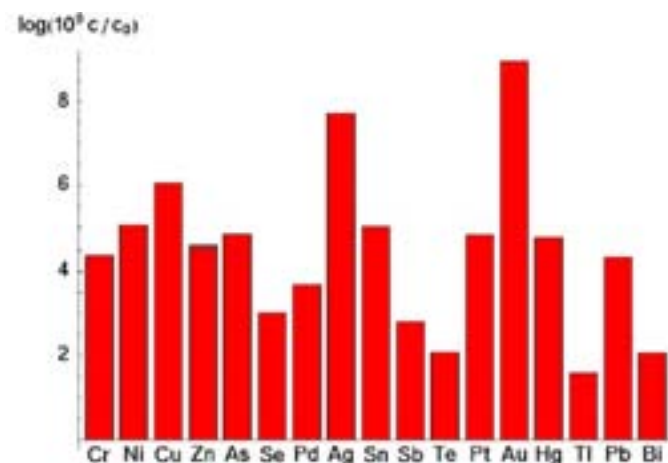


Abbildung 4.8: *Ergebnisse der Laserablations-Massenspektrometrie (LA-ICP-MS)-Messungen der Goldblechprobe Nr. 1 der Sarkophagwanne Echnatons aus dem Grab KV 55 im Tal der Könige.*

Osmium-Isotopenverhältnisse

Gold taucht in Mitteleuropa ab der frühen Bronzezeit, also etwa ab 2000 v. Chr. auf, allerdings zunächst in geringen Mengen. Große Hortfunde von Gold stammen erst aus der Keltenzeit im dritten und zweiten Jh. v. Chr. Die Goldmenge scheint in dieser Zeit sprunghaft zuzunehmen, v.a. in der Form keltischen Goldmünzen. Durch eine vorangegangene Untersuchung war bekannt, dass diese häufig Einschlüsse von Mineralien der Platingruppenelemente enthalten. Noch vor wenigen Jahren waren für die Antike nur die Goldseifen des Pactolus in der Westtürkei bekannt, die solche Mineralien enthielten. So entstand die Vermutung, dieses keltische Gold stamme von dort und wurde von keltischen Söldnern, die im Heer Alexanders des Großen gekämpft hatten, nach Mitteleuropa gebracht. Allerdings zeigte sich in den letzten Jahren, dass diese Mineralien der Platingruppenelemente in Goldseifen recht weit verbreitet sind und zudem in der chemische Zusammensetzung so variabel sind, dass damit allein keine Zuordnung zu bestimmten Goldseifen möglich war.

Eine andere Hypothese geht von einer gesteigerten Goldproduktion in Bayern und Böhmen aus. In diesem Projekt wurden nun erstmals überhaupt die Isotopenverhältnisse des Osmiums in Platinmetalleinschlüssen in archäologischen Goldobjekten gemes-

sen. Es zeigte sich, dass diese in einem relativ weiten Bereich streuen. Dieser Befund ließ zunächst darauf schließen, dass Gold aus verschiedenen Quellen gemischt wurde, denn die Streuung ist weit größer als etwa bei den Bleisotopenverhältnissen. Analysen an Platinmetallnuggets aus Lagerstätten ergaben aber ähnliche Streubereiche, so dass eine Mischung nicht mehr zwingend angenommen werden muss. Allerdings ist damit die Grundvoraussetzung der Herkunftsbestimmung nicht mehr erfüllt, die lautet, dass sich die Lagerstätten anhand ihres Isotopenmusters unterscheiden lassen, wenn man nur den Streubereich betrachtet. Bezieht man aber die Verteilungsfunktionen der Analysenwerte in die Betrachtung ein, lassen sich durchaus noch Unterschiede erkennen, allerdings um den Preis, dass nun die Analyse eines einzelnen Einschlusses nicht mehr ausreicht. Auch für einfache Aussagen sind daher mindestens vier verschiedene, osmiumhaltige Einschlüsse oder Körner notwendig. Um die geologische Geschichte der jeweiligen Lagerstätte zu ermitteln, müssen sogar wenigstens zehn, besser mehr Einschlüsse untersucht werden.

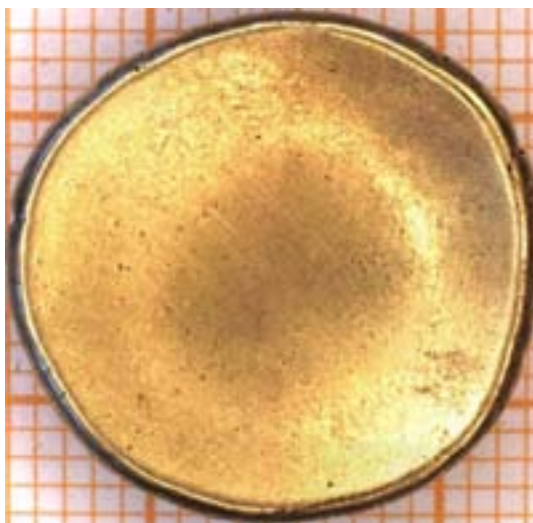


Abbildung 4.9: *Keltisches Regenbogenschüsselchen, Hortfund Wallersdorf. Prähistorische Staatssammlung München, Münze Nr. 4*

Zum Glück enthielten die keltischen Goldmünzen, die wegen ihrer Form Regenbogenschüsselchen genannt werden (s. Abb. 4.9), oft mehrere solcher Einschlüsse. Hier waren nun Osmiumisotopenverhältnisse erfolgreich anwendbar. Für die Münzen des Hortfunds von Wallersdorf erlaubten sie den Ausschluss zahlreicher Lagerstätten aus Afrika und Europa bis hin zum Ural und Teilen Sibiriens. Eine gute Übereinstimmung gab es hingegen mit lydischen Münzen, sowohl mit Prägungen von Alyattes als auch mit denen des berühmten Königs Kroisos geprägt. Somit gibt es nun für die Annahme einer vorderasiatischen Herkunft des Goldes deutliche naturwissenschaftliche Indizien. Denn für die unter Alyattes und später unter Kroisos geprägten Münzen sind die Goldlagerstätten überliefert. Es sollte nun möglich sein, diese wieder zu finden, zu beproben und schließlich mit den keltischen Goldfunden zu vergleichen.

4.4 Der Erste Chinesische Kaiser und seine Grabesbeigaben - ein Projekt der Vergangenheit und der Zukunft

Daniela Bathelt, Sandra Bucher, Rupert Utz, Catharina Blänsdorf, Rong Bo und Zhou Tie

Förderkennzeichen 03SN9MU2 (01.01.98-31.12.00)

Einleitung

Die *Terrakottaarmee* aus der Grabanlage des Ersten Chinesischen Kaisers in Lintong gehört zu den sensationellsten archäologischen Funden des 20. Jhs. Abbildungen der langen Reihen lebensgroßer braungrauer Soldaten und Pferde sind mittlerweile weltweit bekannt, in Ausstellungen werden seit über 25 Jahren einzelne Figuren gezeigt. Die *Terrakottaarmee* gehört - neben der Großen Mauer und dem Kaiserpalast in Beijing - zu den wichtigsten und bekanntesten chinesischen Kulturdenkmälern.

Die Armee ist jedoch nur ein kleiner Teil der riesigen Grabanlage des Qin Shihuang mit ihren zahlreichen wertvollen Funden - und was man heute sieht, ist nur ein blasser Abglanz dessen, was die Armee einmal war. Nach der Ausgrabung beginnt die mindestens ebenso mühselige und langwierige Arbeit der Konservierung der Funde, ein Versuch, wenigstens den größeren Teil von dem zu retten, was bei der Ausgrabung noch zu erkennen ist. Seit 11 Jahren arbeiten chinesische und deutsche Wissenschaftler gemeinsam an den komplizierten Fragestellungen, welche die Ausgrabungen in Lintong aufwerfen.



Abbildung 4.10: *Lintong, Terrakottaarmee: Krieger aus Grube 2 mit grünem Inkarnat.*

Das chinesisch-deutsche Projekt zur Zusammenarbeit im Kulturgüterschutz

Seit 1988 besteht die Zusammenarbeit im Bereich des Kulturgüterschutzes zwischen Deutschland und der Provinz Shaanxi. Basierend auf dem *Wissenschaftlich-Technischen Abkommen (WTZ)* zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Volksrepublik China, entstand die Zusammenarbeit auf Vermittlung des *BMBF* und des *Ministeriums für Kulturgüterschutz der Provinz Shaanxi*. Als Zentrum des antiken China, dessen Hauptstadt von 221 v. Chr. bis in 10. Jh. in Xi'an lag, und als Ausgangspunkt der Seidenstraße ist die Provinz Shaanxi bedeutend für ihre antiken Funde, die frühen Kaisergräber und die buddhistischen Heiligtümer. Auf deutscher Seite sind das *Römisch-Germanische Zentralmuseum* in Mainz und das *Bayerische Landesamt für Denkmalpflege* an der Kooperation beteiligt. Auf chinesischer Seite nehmen das *Technische Zentrum zur Konservierung und Restaurierung von Kulturgütern der Provinz Shaanxi* und das Archäologische Institut, beide in Xi'an, sowie das *Museum der Terrakottaarmee* in Lintong teil. Das Projekt wird vom *BMBF* finanziert und mit Mitteln des Bayerischen Staates unterstützt.

Im Rahmen des Projektes werden seit 1991 Methoden zur Konservierung der ausgewählten Kulturgüter entwickelt. Seit 2001 sind erstmals Terrakottakrieger mit konservierter Farbfassung im Museum der *Terrakottaarmee* ausgestellt, ein Anblick, der ein völlig neues Licht auf die schon so gut bekannten Figuren wirft - ein Erfolg der langjährigen chinesisch-deutschen Zusammenarbeit. Seit dem Jahr 2000 weitete sich die Kooperation auch auf andere neu entdeckte Funde aus der Grabanlage aus, so z.B. die Rüstungen aus Kalksteinplättchen.



Abbildung 4.11: *Rüstung aus Kalksteinplättchen in situ.*

Die kultur- und kunsthistorische Forschung der chinesischen Wissenschaftler wird durch die natur- und geisteswissenschaftliche Forschung im Rahmen des Projektes unterstützt. Dazu gehören Quellenstudium, naturwissenschaftliche Untersuchungen zu Materialien und Techniken sowie Rekonstruktionsversuche. Diesen Arbeiten kommt eine besondere Bedeutung zu, da über die antiken Kunsttechniken, über Ressourcen,

Handelswege und Produktionsmöglichkeiten besonders für die *Qin-Zeit* wenig bekannt ist.

Der Fundkomplex

Der Erste Chinesische Kaiser wurde als Sohn des Königs des Teilstaates Qin im Jahre 259 v. Chr. geboren, annektierte in langen Kriegen die Königreiche und schuf so die Grundlage des Staates China. Sein Herrschertitel *Qin Shihuangdi* (Erster Gottkaiser von Qin), den er sich 221 v. Chr. nach der Reichseinigung gab, wird deshalb oft als *Erster Kaiser von China* übersetzt. Als er 210 v. Chr. starb, wurde er in einer Grabanlage bestattet, deren Größe und Reichtum der Ausstattung ohne Vorbild ist. Die Gesamtfläche der Anlage beträgt ca. 6 km², neben Gruben mit Beigaben sind bisher 400 Nebengräber bekannt, die zum Teil im direkten Zusammenhang mit dem Kaisergrab stehen. Das Kaisergrab selbst soll unter einer 76 m hohen Erdpyramide liegen, die in der Ebene weithin sichtbar ist.

Drei der Gruben werden durch die *Terrakottaarmee* belegt, welche, 1,5 km vom Grabhügel entfernt, die Prozessionsstraße zum Grab bewacht. In den Gruben sind verschiedene Einheiten der Armee aufgestellt, insgesamt schätzungsweise 7000 bis 8000 Soldaten und Pferde. Eine vierte Grube ist unfertig geblieben und enthält keine Artefakte. Durch Zufall wurde am 29. März 1974 die *Terrakottaarmee* entdeckt. Mittlerweile ist um die Gruben der *Terrakottaarmee* ein Museum entstanden, das seit seiner Eröffnung 1979 pro Tag 3000 bis 5000 Besucher anzieht, ca. 1,5 Mio. pro Jahr. Seit die Grabanlage des Ersten Chinesischen Kaisers in die Liste des Weltkulturerbes aufgenommen wurde, ist auch der Grabhügel als Freilichtmuseum zu besichtigen.



Abbildung 4.12: *Tonkrieger aus der Terrakottaarmee mit vorzüglich konservierter Farbgebung, Grube 2, August 1999.*

Nachdem 25 Jahre lang vor allem im Bereich der *Terrakottaarmee* gegraben wurde, konzentrieren sich die Ausgrabungen jetzt verstärkt auf die direkte Umgebung des Grabhügels. Schon 1981 waren dort zwei Prachtkutschen aus bemalter Bronze gefunden worden, sowie Pferdebestattungen und beige setzte *Seltene Tiere und Vögel*, eine Art Privatzoo des Kaisers. Seit 1999 wurde das Gelände innerhalb der Umfassungsmauern systematisch sondiert und mit Testgrabungen begonnen. Dabei wurde eine Grube entdeckt, die lebensgroße Terrakottafiguren von Zirkusartisten und einen großen Bronzekessel enthielten. In der Nachbargrube kamen Helme und Panzer zum Vorschein, hergestellt aus kleinen Kalksteinplättchen, die mit Bronzedrähten verbunden wurden. Im Jahr 2000 wurde eine Grube mit 12 tönernen Ministern und zahlreichen Pferdeskeletten freigelegt. Seit 2001 wird an einer weiteren Grube gegraben, die einen unterirdischen Teich enthält, um welchen Kraniche, Enten und Schwäne aus Bronze gruppiert sind.

Akrobaten, Minister, Kutschen, wertvolle Bronzeobjekte, eine Rüstkammer und diverse Tiere aus dem Besitz des Kaisers oder nachgeahmt in Bronze - allmählich beginnt man zu ahnen, welche Dimensionen der unterirdische Hofstaat haben mag, der Qin Shihuang mit ins Grab gegeben wurde. Unterhaltung, Beratung, Verteidigung, Reiseausrüstung, all dies sollte dem Kaiser auch nach dem Tod zur Verfügung stehen. Was alles in der Erde noch der Entdeckung harret, weiß man noch nicht. An die Öffnung des Kaisergrabes selbst wird derzeit nicht gedacht.

Der Historiker Sima Qian berichtet von märchenhaften Schätzen, 700.000 Zwangsarbeitern und der Zerstörung im Jahre 206 v. Chr. durch eine Rebellenarmee - dem Ende der Qin- und der Beginn der Han-Dynastie. Es ist nicht sicher, wie zuverlässig Sima Qian's um 90 v. Chr. (d.h. 120 Jahre nach dem Tod Qin Shihuang's) verfasste Annalen in den Details sind. Er beschreibt den Tod des Kaisers und die Ausstattung der Grabkammer. Die *Terrakottaarmee* und die anderen bisher gefundenen Schätze erwähnt er jedoch nicht. Die Ausgrabungen haben gezeigt, dass die Grabanlage in der Tat niemals fertiggestellt wurde. Es fanden sich auch ca. 100 Gräber von Zwangsarbeitern und eiserne Fußfesseln. Ebenfalls nachzuweisen ist die Zerstörung in der Antike: Rot gebrannte Erde, verkohlte Holzbalken, eingebrochene Decken und zu weißem Brandkalk verbrannte Steinplättchen zeugen von einem heftigen Feuer. Zerschlagene Figuren mit zertrümmerten Gesichtern und geraubte Waffen verweisen auf vorsätzliche Zerstörung, aber auch auf eine Rebellenarmee, welche die *Terrakottaarmee* als Waffenlager entdeckte: Die Terrakottasoldaten hatten Tausende echter Armeewaffen als Ausrüstung, an denen sich die Aufständischen bedienen konnten.

Später füllte Sand von Überschwemmungen die Gruben, die Deckenbalken bogen sich durch, brachen ein und Erdreich rutschte nach. Spätere Grablegen scheinen darauf hinzudeuten, dass der Platz im Bewusstsein der Landbewohner noch eine besondere Bedeutung hatte. Auch wurde das Gelände nie in größerem Maßstab bebaut - vielleicht ebenfalls aus Respekt oder Angst vor den Geistern der Toten. Es gibt aber auch Tunnel von Grabräubern, die ihr Glück versuchten - allerdings ohne Erfolg.

Aufgabenstellungen und Schwerpunkte der deutsch-chinesischen Zusammenarbeit an der Grabanlage des Qin Shihuang

Nach der Ausgrabung beginnen sofort die Probleme der Erhaltung: Die Farbfassungen der Terrakottaskulpturen fallen ab, die Erde trocknet aus, Metall korrodiert, brandgeschädigte Kalksteine spalten sich auf. Als 13 Jahre nach Beginn der Ausgrabung das chinesisch-deutsche Projekt ins Leben gerufen wurde, waren die unterirdischen Gänge, in denen die Terrakottakrieger stehen, vom Einsturz bedroht. Damit die berühmte Armee und die neuen Funde aus der Grabanlage nicht nur für die archäologische Dokumentation zur Verfügung stehen, sondern auch der Öffentlichkeit zugänglich gemacht und auf Dauer erhalten werden können, wurden umfangreiche Konservierungsarbeiten erforderlich.

Bei der Grabanlage des Qin Shihuang sollen nicht, wie oft bei Ausgrabungen, die Objekte geborgen und museal als Einzelstücke präsentiert werden, die aus dem Zusammenhang gerissen sind. Die unterirdischen Bauwerke sind Teil der Gesamtanlage und deswegen unbedingt erhaltenswert: Sie zeigen die Intention der antiken Auftraggeber und die Technik der Baumeister. In der Erde finden sich außerdem Abdrücke von vielen Dingen, die heute vollständig vergangen sind: Die Balkendecken über den unterirdischen Korridoren und die hölzernen Streitwagen, die Flechtmatten zum Abdichten der Decken, die Holzschäfte der Waffen und Pfeile. Auch Teile der Bemalung haben sich nur in der Erde erhalten. Weiterhin dokumentiert die Erdarchitektur auch die Geschichte der Grabanlage mit der Zerstörung in der Antike und dem Druck der Erde über einen Zeitraum von 2200 Jahren. Um diese Zeugnisse zu erhalten, werden Teile der Gruben nicht vollständig ausgegraben, sondern Zwischenzustände belassen.

Die Aufgabenstellungen innerhalb der chinesisch-deutschen Zusammenarbeit berücksichtigen dieses Konzept der Erhaltung und Präsentation in situ. Dies bedeutet aber auch eine zusätzliche Schwierigkeit bei den schon an sich komplizierten konservatorischen Fragestellungen. Für das chinesisch-deutsche Projekt wurden folgende Schwerpunkte definiert:

- Erhaltung der Erdstege und Erdstrukturen
- Überwachung und Kontrolle des Klimas, des mikrobiellen Befalls und der Austrocknung
- Erhaltung der Farbfassung der Terrakottafiguren
- Zusammensetzen der zerbrochenen Terrakottafiguren
- Konservierung der Kalksteinpanzer

Zu Beginn des Projektes waren die vordringlichen Fragen die Sicherung der Erdstege und somit der gesamten unterirdischen Anlage sowie die Erhaltung der Farbfassung der Terrakottafiguren. In beiden Bereichen wurden bereits gute Erfolge erzielt, jedoch sollen die Methoden noch verbessert und weitere Fragestellungen, die sich während der Arbeiten immer wieder ergeben, geklärt werden. Seit den neuen Ausgrabungen um den

Grabhügel hat sich das Projekt auf die Fragestellungen erweitert, welche die neuen Funde mit sich bringen: Die Bergung und Konservierung der Kalksteinpanzer wurde 2000 neu in die Kooperation aufgenommen. Die Problematik der stark korrodierten Bronzevögel wird seit November 2001 im Rahmen des Projektes diskutiert.

Erhaltung der Polychromie

Die Farbfassung der *Terrakottaarmee* und anderer Figuren aus dem Areal der Grabanlage des Qin Shihuang ist direkt nach der Ausgrabung auf vielen Figuren noch nahezu vollständig erhalten, auch wenn die Brandschätzung in der Antike und die lange Lagerung in der feuchten Erde bereits zu Verlusten geführt haben. Schon während der ersten Ausgrabungskampagne wurde die Farbigkeit beobachtet und in Form von schwarz-weißen Zeichnungen und tabellarischen Aufstellungen dokumentiert. Da der Verlust der Farbfassung offensichtlich mit der Austrocknung zusammen hängt, wurden einzelne Fragmente in Plastiktüten aufbewahrt, um die Feuchtigkeit in der Terrakotta zu halten und so die Farbe zu retten. Oft blieb die Farbe auch an der Erde haften: Blöcke mit Farbbrechen, nun im *Negativ*, d.h. von der einstigen Unterseite aus, sichtbar, wurden in Gips eingebettet und archiviert.

Untersuchungen ergaben, dass die bräunliche bis schwarze Schicht unter der bunten Farbschicht aus ostasiatischem Lack (japanisch: *urushi*, chin. *qi*) besteht. Die Figuren wurden komplett mit Qi-Lack grundiert. Danach erfolgte eine farbenprächtige Bemalung mit mineralischen Pigmenten in einem wässrigen Bindemittel (Leim oder Pflanzgummi).

In der feuchten Erde haben im Laufe eines über 2200 Jahre andauernden Alterungsprozesses Veränderungen in der Lackschicht stattgefunden. Vermutlich wurden leichter lösliche Bestandteile aus dem Lack ausgeschwemmt und Wasser eingelagert. Sobald die Luftfeuchtigkeit, die in der feuchten Erde und bei der Ausgrabung bei 100 % rel. Feuchte (rF) liegt, unter 84 % rF sinkt, reißt der Lack, rollt sich ein und löst sich irreversibel vom Untergrund ab. Das Grundproblem besteht darin, dass das in der Lackschicht eingelagerte Wasser durch ein anderes nicht verdunstendes Material ersetzt werden muss, um das Schrumpfen und damit das Reißen, Verformen und Ablösen des Lackes zu verhindern. Zudem ist die Lackgrundierung meist zweischichtig, wodurch Spannungen innerhalb der Schichten entstehen. Wegen der Gefahr der Ablösung der Schichten voneinander und von der Terrakotta muss außerdem ein Mittel eingebracht werden, welches die Haftung zum Untergrund wiederherstellt. Die Konservierung der Lackschichten umfasst somit zwei Schritte:

- Ersatz des Wassers und dadurch Stabilisierung der Lackschichten (mit einem Konsolidierungsmittel)
- Fixierung der stabilisierten Lackschichten auf dem Untergrund (mit einem Klebemittel)

An den Forschungsarbeiten hierzu war das *NTG*-Vorhaben 03SN9MU2 maßgeblich beteiligt.

Nach zahlreichen Versuchen mit allen in der Restaurierung gängigen Materialien und verschiedenen Verfahren, u.a. Gefriertrocknung, wurde zunächst als Konsolidierungsmittel *Polyethylenglykol (PEG) 200* vorgeschlagen. Nach Vorversuchen erwies sich als beste Methode, *PEG 200* in drei Schritten mit ansteigender Konzentration (30 %, 60 % in Wasser und 100 %) mittels Kompressen aufzubringen. Das Klebemittel wird in 5-%iger Konzentration während des ersten Schrittes zugegeben. Jeder Schritt dauert 1 bis 2 Tage.

Im Sommer 1999 brachten neue Ausgrabungen in der Grube 2 kniende Bogenschützen mit sehr gut erhaltener Polychromie zu Tage. Dieser Bereich der Grube war in der Antike fast vollständig von den Brandschätzungen verschont geblieben. Zum ersten Mal konnten die Wissenschaftler und Restauratoren des Labors bei der Ausgrabung mitwirken. Die Figuren wurden in kleinen Abschnitten freigelegt und die Fassung noch innerhalb desselben Tages gefestigt. Nach der so durchgeführten Vorbehandlung konnte eine weitergehende Festigung und Reinigung im Labor durchgeführt werden. Es gelang so zum ersten Mal, sechs komplette Figuren mit ihrer prächtigen Farbfassung zu erhalten. Seit Sommer 2002 sind einige der Figuren im Museum ausgestellt. Die gegenwärtige Forschung beschäftigt sich damit, die Auswahl des Klebemittels zu verbessern, um eine möglichst gute Langzeitstabilität der gefestigten Lackschichten zu gewährleisten.

In einem alternativen Verfahren werden Monomere (d.h. Einzelmoleküle) von Kunststoffen verwendet. Monomere durchdringen als niedrigviskose Flüssigkeit die Farbschicht, die Qi-Lackschicht und die Terrakotta. Durch ein anschließendes Festigungsverfahren werden die Monomere polymerisiert, d.h. die Einzelmoleküle reagieren miteinander werden zu langkettigen Molekülen. Aus der Lösung wird dadurch ein Feststoff. Wählt man eine geeignete Kunststoffgruppe, erfüllt das Mittel außer der Funktion als wasserersetzendes Konsolidierungsmittel auch diejenige als Klebemittel.

Nach verschiedenen Vorversuchen wurde als Festigungsmittel eine Lösung auf Basis von Hydroxyethylmethacrylat (*HEMA*) eingesetzt. Methacrylate werden vielfach eingesetzt. Sie werden in der Restaurierung als Klebemittel verwendet (z.B. Paraloid). Eine auch aus dem Alltag bekannte Form von Methacrylaten ist Plexiglas.

Das Einbringen des Festigungsmittels erfolgt wie bei *PEG*. Monomere können durch unterschiedliche Prozesse vernetzt werden. Lichthärtende Verfahren scheiden aus, da Licht den schwarzen Lack nicht durchdringen kann. Auch Polymerisation durch Temperaturerhöhung ist nicht möglich, da dies den Lack schädigt. Als geeignetes Härungsverfahren stellte sich die Elektronenbestrahlung heraus. Dafür wird ein Elektronenbeschleuniger benötigt, der in vielen Städten, z. B. in Dresden und in Lintong in der Nähe des Museums zur Verfügung steht. Durch Änderung der Beschleunigungsenergie kann die Eindringtiefe der Elektronenstrahlen eingestellt werden. Experimente zur diese Methode zeigen, dass weder Lack, noch Terrakotta oder Pigmente hierbei geschädigt werden.

Versuche seit 1998 an Fragmenten zeigten vielversprechende Ergebnisse. Gegenwärtig wird an einer Optimierung des Polymers gearbeitet, um mögliche Folgeschäden wie Fleckenbildung und Versprödung zu verhindern. Bisher können mit der Methode nur kleinere Bruchstücke behandelt werden, da herkömmliche Elektronenstrahlanlagen so konstruiert sind, dass nur 15 oder 20 cm hohe Objekte bestrahlt werden können. Die

Methode könnte aber bei den kleinteilig zerbrochenen Figuren, wie sie in Grube 1 gefunden wurden, gut eingesetzt werden.

Die Möglichkeit, die Farbfassung größerer Fragmente oder ganzer Figuren zu konservieren, lässt die *Terrakottaarmee* in neuem Licht erscheinen. Eine Betrachtung der sechs Bogenschützen aus Grube 2 zeigt, dass alle Figuren in farbenfrohe Gewänder gekleidet sind. Gewand, Ärmelumschlag und Kragen, Hosen und Wickegamaschen zeigen kontrastreiche Kombinationen aus rot, orange, rosa, hell- und dunkelgrün, blau, verschiedenen Violetttönen und weiß. Sogar die Bänder, mit denen die Panzerplatten der Rüstungen verbunden sind, können verschiedene Farben haben: Es gibt grüne, rote, orangefarbene, rosafarbene und weiße. Die Gesichter weisen helle, blasse Töne bis kräftig-rotbraune Farben auf. Nicht zwei Figuren sind identisch gestaltet. Der schwarzbraune Lack wurde als Grundierung aufgetragen, aber auch schwarze Farbe verwendet, z.B. bei Haaren, Schuhsohlen und Panzerplatten. Die Lederpanzer der Qin-Soldaten waren mit Lack überzogen. Zudem glänzt der Lack und ist hauchdünn, während die Farbfassungen dicker und matt sind. So standen schwarz glänzende Haare gegen leuchtendrote, aber seidig matte Haarbänder, dunkel glänzende Pupillen gegen eine matte rosa Haut.

Die Beobachtungen an den Farbfassungen bestätigen, was die Untersuchungen an der Terrakotta vermuten ließen: Die Figuren sind extrem naturgetreu gearbeitet und realistisch bis in das letzte Detail. Die Haarfrisuren lassen sich nachstellen, die Rekonstruktion der Panzer ergab, dass sie funktionsfähig wären. Die Farben lassen die Krieger noch realistischer erscheinen. Die bunte Mischung der Kleiderfarben entspricht wohl dem Aussehen der damaligen Qin-Armee. Damals gab es keine einheitliche Uniform für die Soldaten. Die Krieger schniderten sich ihre Kleidung aus billigen Stoffen in leuchtenden Farben, die ihnen gefielen. Einzelne Waffengattungen und Rangordnungen lassen sich an den Typen der Panzer und den verschiedenen Kappen erkennen.

Die Analysen zeigen, dass überwiegend wertvolle Materialien verwendet wurden: Qi-Lack war immer schon wertvoll, da seine Gewinnung aufwändig ist und die Bäume nur bedingt ausgebeutet werden können. Als Pigmente wurden Mennige, Zinnober, Malachit, Azurit, Bleiweiß, Knochenweiß und wenig gelbes und rotes Eisenoxid nachgewiesen. Dies sind in der Antike verbreitete, überwiegend teure Pigmente. Zusätzlich wurde 1993 ein violettes Pigment, ein Bariumkupfersilikat, nachgewiesen, welches bisher nur in China gefunden wurde. Das in der Antike verbreitete Pigment ähnelt in seiner Zusammensetzung dem Ägyptisch Blau, einem Calciumkupfersilikat, und wurde erst 1983 durch Analysen an hanzeitlichen Objekten wiederentdeckt. Der Befund an der *Terrakottaarmee* ist der früheste bislang bekannte.

Die Farbschichten sind überwiegend einschichtig, die Inkarnate sind jedoch zweischichtig aufgebaut, wobei hellere über kräftiger roten Schichten liegen oder auch umgekehrt. Die verschiedenen Kombinationen können zur Erzielung spezieller Effekte gedient haben. Sie sind jedoch eventuell auch ein Hinweis darauf, dass die vielen beteiligten Künstler unterschiedliche Methoden anwendeten, die auf verschiedenen Schulen oder persönlichen Vorlieben basierten.

4.5 Von Rauchern, Nichtraucher, Schafen und Ziegen - Biomolekulare Analysen zur menschlichen Kulturschichte

Susanne Hummel, Joachim Burger, Odile Loreille, Hartmut Wischmann, Holger Zierdt und Bernd Herrmann

Förderkennzeichen 03HU9GO1 (01.11.96-31.01.98) und 03HU9GO2 (01.11.97-28.02.01)

Die menschliche Kulturgeschichte ist eine Geschichte der Erfindungen, Entdeckungen und Entscheidungen. Grundlegend waren Erfindungen wie der Gebrauch von Steinabschlägen als Werkzeug und die kollektive Entscheidung für einen Wechsel der Nahrungserwerbsstrategie vom Jäger zum Bauern. Während die Nutzung von Steinklingen den Anfang von Technik repräsentiert, hat die Sesshaftigkeit, die mit der agrarischen Lebensweise verbunden ist, letztlich zur urbanen Lebensweise des modernen Menschen geführt.



Abbildung 4.13: *Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) für die DNA-Analyse an archäologischem Skelettmaterial.*

Für den europäischen Kulturraum stellt zweifellos die Entdeckung, dass sich getrocknete Tierhäute für schriftliche Aufzeichnungen eignen, einen wegweisenden Fortschritt in der Überlieferung von Wissenszusammenhängen dar. Von mindestens ebenso großer Bedeutung für Europa war die Einführung der aus Südamerika stammenden Kartoffel als Grundnahrungsmittel. Sie führte aus verschiedenen möglichen Gründen zu einem nahezu explosionsartigen Anstieg des Bevölkerungswachstums. Alle diese Handlungsweisen, die den Charakter von Entdeckungen, Erfindungen und individuellen oder kollektiven Entscheidungen besitzen, haben Spuren hinterlassen, die sich sowohl in den kulturellen Hinterlassenschaften als auch den menschlichen Überresten selbst finden.

Menschliche Knochen, genauso wie Knochen der verschiedenen Tierarten, bilden als stoffwechselaktives Gewebe die Lebensweise eines Individuums ab. In den Skelettele-

menten, die über Jahrhunderte und Jahrtausende im Boden erhalten bleiben können, sind grundsätzlich verschiedene Biomoleküle nachweisbar: körpereigene (endogene) wie *DNA* und Hormone, und körperfremde (exogene), die durch Aufnahme von Nahrung, Drogen und Arzneimitteln in den Körper gelangen. Während beispielsweise in archäologischem Knochen überdauernde *DNA* schon seit mehreren Jahren erfolgreich analysiert wird, liegen nur sehr vereinzelt wissenschaftliche Studien zum Knochen als Speicher exogener Substanzen vor. Auf diesem Hintergrund wurden in einem Teilprojekt des Vorhabens *Biowissenschaftliche Archäometrie* u.a. Methoden zur Extraktion von Alkaloiden und Flavonoiden pflanzlicher Herkunft aus archäologischem Skelettmaterial entwickelt.

In der Stoffgruppe der Alkaloide finden sich mehrere im Alltag der Menschen stoffwechselwirksame Substanzen, so Ergotamine aus dem Mutterkornpilz, Nicotin, Coffein und Solanine aus den Nachtschattengewächsen Kartoffel, Tomate und Stechapfel. In der Regel hinterlässt die Aufnahme dieser Substanzen über Nahrung, Genussmittel oder Arzneien keine morphologisch erkennbaren Spuren am Skelett. In einzelnen Fällen sind jedoch Spuren des Gebrauchs erkennbar, so beispielsweise bei den als *Pfeifenlücken* bezeichneten Abnutzungsmustern an Zähnen, aufgrund derer einzelne Individuen gesichert als Pfeifenraucher angesprochen werden können. Solche Individuen liegen in der frühneuzeitlichen Skelettserie *Hinter den Brüdern* aus dem niedersächsischen Goslar vor (s. Abb. 4.14), wodurch eine erste systematische Anwendung und Prüfung der neu entwickelten Methoden ermöglicht wurde.



Abbildung 4.14: Sog. Pfeifenraucherlücke an einem Schädel aus der frühneuzeitlichen Skelettserie *Hinter den Brüdern* aus dem niedersächsischen Goslar.

Die Skelettserie *Hinter den Brüdern* umfasst etwa 100 Individuen, die ihr Recht, auf einem bestimmten Areal des Kirchhofs bestattet zu werden ihrer Berufsgruppenzugehörigkeit verdanken. Bei dieser Berufsgruppe handelte es sich um die im Harzbergbau arbeitenden Hüttenleute. Durch paläogenetische Untersuchungen konnte für diese Gruppe bereits die Frage, ob das Hüttenhandwerk in der Frühneuzeit in familiärer Tradition oder - wie noch im Hochmittelalter - durch zugewanderte Fachleute ausgeübt wurde, zugunsten der Familientradition geklärt werden.

Aus der Skelettserie wurde eine Stichprobe von 34 Individuen gewählt, darunter auch die acht Individuen, die eine *Pfeifenlücke* aufweisen. Proben aus den Oberschenkelbeinen wurden nach Reinigung und Oberflächenentfernung mit polaren Lösungsmitteln extrahiert und gaschromatographisch-massenspektrometrisch analysiert. Danach konnten in 22 der 34 untersuchten Proben Spuren des Alkaloids Nicotin nachgewiesen werden (s. Abb. 4.15), darunter in den Proben der acht gesicherten Pfeifenraucher.

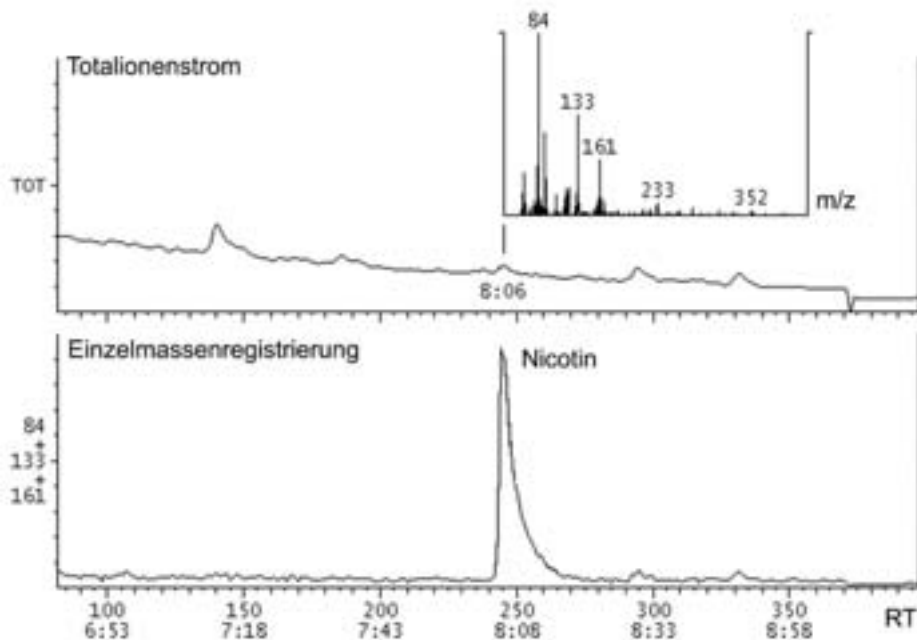


Abbildung 4.15: Ergebnisse der Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS)-Messungen an Skeletten der Serie *Hinter den Brüdern*: Nachweis von Nicotin.

Die Frage nach der Authentizität der gefundenen Daten kann jedoch noch nicht abschließend beantwortet werden. Zwar wurden Kontrolluntersuchungen durchgeführt, die eine Kontamination mit Nicotin aus heutiger Zeit unwahrscheinlich erscheinen lassen. Der Nachweis des Stoffwechselproduktes Cotinin, das eine *in vivo*-Aufnahme des Nicotins sicher belegen könnte, war bislang jedoch noch nicht möglich.

Paläogenetische Untersuchungen an kulturhistorischen Objekten standen im Zentrum eines zweiten Teilvorhabens. Hier galt es zu klären, ob Materialien wie Farbaufträge von Felsbildern, Leime und Bindemittel, Leder und Pergamente, Inhalte archäologischer Keramikgefäße, Öle und Anhaftungen an Steinartefakten grundsätzlich geeignet

sind, genetische Informationen so zu bewahren, dass sie mit den modernen molekulargenetischen Techniken erfassbar sind. Hierzu wurden verschiedene Extraktionsverfahren angewendet, denen jeweils eine Polymerasekettenreaktion (engl. *PCR*) nachgeschaltet wurde. Die *PCR*-Technologie, die auch aus degradierten Spuren noch analysierfähige Mengen von *DNA* amplifizieren kann, diente hierbei zum einen als Prüfinstrument für den Extraktionserfolg. Zum anderen wurden gerade solche Gen-Sequenzen für die Amplifikation ausgewählt, die nach weiteren Analysen Aufschluss über die verarbeiteten Tierarten und deren Herkunft geben würden. Daraus lassen sich beispielsweise Erkenntnisse zu Ressourcennutzung und Handelsbeziehungen gewinnen.

Die *PCR*-Analysen ergaben, dass insbesondere in Pergamenten alte *DNA* in weit überdurchschnittlicher Qualität erhalten bleibt. Bei Pergamenten, die bis in die Neuzeit hinein nicht nur als Schreibmaterial dienten (s. Abb 4.16), sondern auch zum Einbinden von Büchern genutzt wurden, handelt es sich genau wie bei Leder um verarbeitete Tierhäute.



Abbildung 4.16: *Pergament als Schriftträger.*

Anders als bei der Herstellung von Ledern, die eine Wässerung und Säurebehandlung erfahren, werden die Häute zur Pergamentherstellung auf Rahmen gespannt möglichst schnell getrocknet. Das Verfahren gleicht also im weitesten Sinne einem Mumifikationsprozess. Damit sind alle entscheidenden Voraussetzungen für eine überdurchschnittlich gute Erhaltung der *DNA* gegeben.

Erfolgreich wurden in den folgenden Analyseschritten Methoden erarbeitet und eingesetzt, die beispielsweise der Artbestimmung dienen. Als besonders effektiv hat sich dabei die Untersuchung sogenannter Restriktionsfragmentlängenpolymorphismen (*RFLP*) erwiesen. Dafür müssen bestimmte Abschnitte der in den Mitochondrien lokalisierten

DNA amplifiziert und anschließend mit Restriktionsenzymen versetzt werden. Jede Tierart weist spezifische Basenabfolgen in diesen Sequenzabschnitten auf, woraus sich wiederum spezifische Muster nach der Restriktionsanalyse ergeben (s. Abb. 4.17). Mit diesem Verfahren ließen sich schnell und sicher die häufigen Nutzungen von Schaf und Ziege zur Pergamentherstellung nachweisen, aber auch seltener verwendete Arten wie Schwein, Rind und Hase.

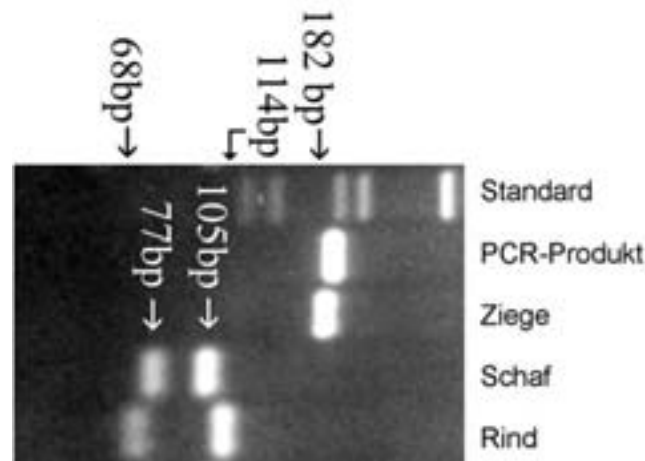


Abbildung 4.17: *Ergebnis der Restriktionsanalyse (RFLP): Jede Tierart zeigt spezifische Basenabfolgen.*

Erfolgreich waren auch die Versuche, verschiedene individuelle genetische Marker zu typisieren. Diese Marker, die gemeinsam den genetischen Fingerabdruck des betreffenden Tieres repräsentieren, ermöglichen zweifelsfreie Zuordnungen von Fragmenten, was zum Beispiel im Zuge von Restaurierungsarbeiten wertvoll ist.

Ein besonders wichtiger Schritt im Sinne möglichst geringfügiger Zerstörungen am Objekt ist mit der Einführung sogenannter Multiplexanalysen zu den verschiedenen Fragestellungen gelungen. Simultan können jetzt aus *DNA*-Extrakten kulturhistorischer Objekte die verwendete Tierart, das Geschlecht des Tieres und sein *genetischer Fingerabdruck* bestimmt werden, nachdem für paläogenetische Untersuchungen an menschlichen Skeletten solche Strategien bereits erfolgreich genutzt werden.

4.6 Die ersten Bauern und Rinder in Europa - Paläogenetik des Neolithikums

Joachim Burger, Barbara Bramanti, Wolfgang Haak, Ruth Bollongino und Kurt W. Alt
Förderkennzeichen: 03BUX1MZ (01.08.01-31.07.04)

In das *Mainzer Spurenlabor für alte DNA (aDNA)* darf nur, wer am Morgen geduscht und die Haare gewaschen hat. Zudem muss die Kleidung frisch gewaschen sein. Schuhe, Mantel, Tasche und danach auch noch die frisch gewaschene Kleidung werden vor dem Labor in zwei Schleussen abgelegt. Erst dann wird die Schutzkleidung über den ganzen Körper gestreift und das Gesicht mit Mundschutz und Schild verdeckt.



Abbildung 4.18: *Schutzkleidung im Mainzer Spurenlabor für alte DNA*

Nun beginnt der mühsame Prozess der Probenbearbeitung, der immer wieder durch langwierige Putzetappen und stundenlanges Bestrahlen von Proben, Reagenzien und Werkzeug unterbrochen wird. Selbst das Putzwasser wird mithilfe einer wasserdichten UV-Röhre dekontaminiert.

Es handelt sich bei der beschriebenen Prozedur um einen speziellen Fall archäometrischer Forschung: Die Untersuchung alter, prähistorischer *DNA* zur Feststellung des Ursprungs unserer menschlichen Zivilisation. Das hochgesteckte Ziel lohnt die Mühe, der sich im Rahmen eines Forschungsvorhabens am *Mainzer aDNA-Spurenlabor* drei

Forscher unterwerfen. Die genaue Frage lautet: Wie kam es dazu, dass vor ca. 8000 Jahren Menschen in Europa von Jägern und Sammlern zu Ackerbauern und Viehzüchtern wurden. Desweiteren: Wurden damals zu Beginn des Neolithikums (Jungsteinzeit) europäische Jäger durch einwandernde Bauern aus Südosteuropa bzw. Anatolien verdrängt? Brachten diese Fortgeschrittenen dabei ihre bereits domestizierten Rinder mit und legten sie damit Grundlage für eine Jahrtausende währende bäuerliche Wirtschaftsform, die in Europa erst im Verlauf des 20. Jhs. allmählich in den Hintergrund trat?

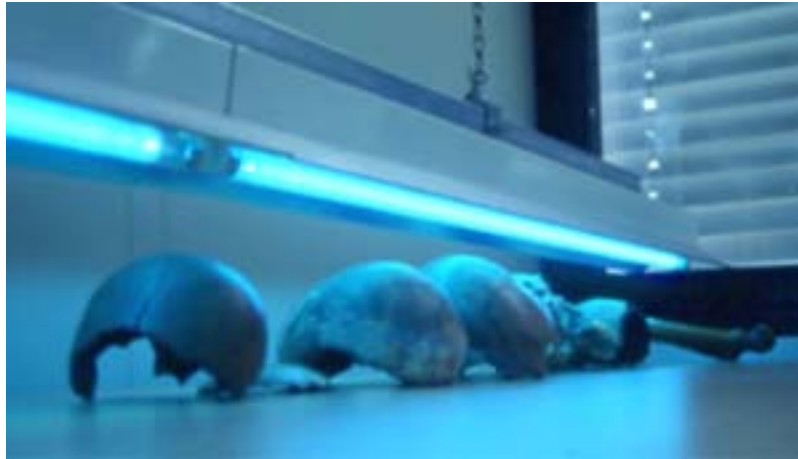


Abbildung 4.19: *Rinderknochen unter UV-Licht.*

Es sind dies seit langem und nun immer häufiger gestellte Fragen, die in der archäologischen, anthropologischen und kulturwissenschaftlichen Forschung ihre wissenschaftshistorische Tradition haben. Und dennoch sind die Wissenschaftler bislang weit von einer Lösung entfernt. Noch immer existieren bezüglich der sog. Neolithisierung geradezu polar entgegengesetzte Auffassungen. Die Meinungen schwanken seit Jahrzehnten zwischen den Vertretern einer Kolonisation Europas durch avancierte Bauern einerseits und Vertretern einer autochthonen europäischen Entwicklung mit Technik- und Ideentransfer und ohne Austausch von Bevölkerungen andererseits. Der Grund für die schiere Unlösbarkeit dieses Meinungskonflikts liegt darin, dass dem sozialhistorisch fassbaren Phänomen Neolithisierung eigentlich genetisch-biologische Vorgänge zugrunde liegen, nämlich der Austausch von Individuen einer Bevölkerung bzw. die Domestikation des Auerochsen (*Ur*) zum Hausrind. Diese Prozesse können demnach lediglich mit den Werkzeugen der genetischen Forschung nachvollzogen werden. Es liegt also ein klassischer Fall von geistes- bzw. kulturwissenschaftlicher Fragestellung vor, die durch naturwissenschaftliche Mittel einer Lösung zugeführt werden kann.

Welche Mittel sind dies genau? In unserem Fall bestehen sie aus der Isolierung *alter DNA* aus archäologischen Knochen der entscheidenden Zeitstellung (meso- und neolithischer Mensch und Auerochse, bzw. neolithisches Hausrind) und deren Vervielfältigung (*PCR*, Klonierung) und Sequenzierung mithilfe eines ganzen Arsenal moderner spurenanalytischer und molekulargenetischer Methoden. Jedoch erfordert die hohe Kontaminationsanfälligkeit dieser Methoden die rigorosen Rein-Raum-Routinen, wie sie zu

Anfang beschrieben wurden. Gleichzeitig müssen Resultate ständig wiederholt und an unabhängigen Proben des selben Individuums bestätigt werden. Hieraus entsteht ein langwieriger Prozess, der durch den steten Wechsel von Erfolg und durch die Dekomposition des Knochens bedingten Misserfolg geprägt ist. Doch hierbei sollte man sicher immer wieder vergegenwärtigen, welches außerordentliche Potenzial die angewandten Methoden besitzen um die zentralen Fragestellungen zu beantworten - zugegebenerweise in der gegebenen Zeit nur in Ansätzen.

Das Projekt, das noch andauert, hat bereits eine der anstehenden Fragen beantworten können, und zwar zum Ursprung der europäischen Hausrinder: Die *aDNA*-Sequenzierung von 200-300 Basenpaaren der mitochondrialen *DNA* von neolithischen Rindern und Auerochsen aus Zentraleuropa ergab insgesamt drei genetische Linien. Hiervon sind zwei dem Auerochsen und eine dem domestizierten Hausrind zuzuordnen. Letztere, die nicht unter den Auerochsen gefunden werden konnte, verdrängte im Laufe der Neolithisierung die Linien der Auerochsen. Dies führt zu dem Schluss, dass die europäischen Auerochsen durch eine nicht autochthone domestizierte Form ersetzt wurden. Anders gesagt: Das europäische Rind wurde nicht in Europa domestiziert.

Woher kamen dann die eingeführten Rinder? Dieser Frage wird sich das Projekt in der verbleibenden Zeit widmen und hoffentlich durch die Untersuchung südosteuropäischer und anatolischer Knochenfunde zu einer Lösung gelangen. Analog wird mit menschlichen Skelettfunden des Mesolithikums und der Linearbandkeramik (früheste neolithische Kulturstufe in Zentraleuropa) verfahren. Doch im Fall von alter menschlicher *DNA* mahlen die analytischen Mühlen noch langsamer. Trotz aller Vorsichtsmaßnahmen lassen sich Kontaminationen durch die Bearbeiter oder durch anderweitig eingetragene *DNA* nicht völlig ausschließen. Deswegen sind eine zusätzliche Anzahl von Reproduktionen der Ergebnisse und die Klonierung der amplifizierten *DNA* unerlässlich. Und dennoch rechnen die Mainzer Jungforscher damit, das langersehnte große Ziel zu erreichen: neben den ersten Rindern sollen nun auch die ersten Bauern Europas genetisch identifiziert werden.

4.7 Acht Jahrtausende Bodenerosion - Bodensedimente als Archiv der Kulturgeschichte

Andreas Lang, Markus Fuchs und Günther A. Wagner

Förderkennzeichen: 03LA9HE2 (01.01.98-31.12.00), 03LA9HE3 (01.12.00-31.12.02), 03MA9HE2 (01.01.98-31.12.00), 03MA9HE3 (01.01.01-31.03.03), 03WA9HE2 (01.10.97-31.12.00)

In der frühen Geschichte Griechenlands nimmt der aus den Landschaften Korinthia und Argolis bestehende Nordosten der Halbinsel Peloponnes eine besondere Stellung ein. Hier ließen sich im 7. Jt. v. Chr. Europas früheste Bauernkulturen nieder, hier können wir bereits im 3. Jt. v. Chr. Ansätze hochkultureller Entwicklung beobachten und hier lag im 2. Jt. v. Chr. einer der Kernbereiche der durch Paläste, monumentale Grabanlagen und früheste Schriftverwendung gekennzeichneten mykenischen Hochkultur. Auch im 1. Jt. v. Chr. hörte die Gegend nicht auf, im Mittelpunkt des politischen und wirtschaftlichen Geschehens zu stehen, was sich in Städten wie Korinth und Argos manifestiert, die zu mächtigen Rivalen von Athen und Sparta aufstiegen.

So klar sich die Grundzüge dieser historischen Entwicklung abzeichnen, so ungewiss ist, in welchen Etappen die Erschließung der Teilregionen der Peloponnes seit der ersten Landnahme durch jungsteinzeitliche Bauern vonstatten ging und welche Folgen menschliches Handeln über die Jahrtausende hinweg für die Umwelt hatte. Tatsache ist: Sämtliches Kulturschaffen fußt auf den Ressourcen der Landschaft und kann dementsprechend nicht losgelöst von dem ökologisch bestimmenden Lebensraum betrachtet werden. Umgekehrt drückte der Mensch schon früh der Landschaft seinen Stempel auf. Als die ersten Menschengruppen mit einer agrarischen Wirtschaftsweise in Südgriechenland begannen, das Land urbar zu machen, fanden sie überall Naturlandschaften vor. Diese wandelten sich unter dem Einfluss des Menschen allmählich in Kulturlandschaften um.

Wir wissen heute, dass bereits die erste landwirtschaftliche Nutzung in der Jungsteinzeit in vielen Regionen Europas Bodenerosion - einen Abtrag des Bodens, der über das natürliche Maß hinausgeht, - nach sich zog. Sobald eine Fläche gerodet und der Boden seiner schützenden Vegetationsdecke beraubt ist, können Wind und Regen Bodenpartikel aufgreifen und verfrachten. Ausschlaggebend für die Erosion durch Wasser ist neben den Bodeneigenschaften vor allem die Intensität der Niederschläge und die Neigung der Ackerflächen. Zusätzlich wird bei der Bewirtschaftung der Flächen, vor allem durch das Pflügen, Bodenmaterial verlagert. Die abgelösten Bodenpartikel werden zum Teil nur über kurze Distanzen bewegt - hangabwärts etwa bis zum Hangfuß -, zum Teil aber auch über längere Strecken durch Bäche und Flüsse bis zu Seen oder ins Meer.

Genau diese enge Verzahnung von Bodenerosion, Klima und Landwirtschaft ermöglicht es, aus der Untersuchung der Entstehung von Bodensedimenten über die Jahrtausende hinweg Rückschlüsse auf Landschaftsveränderung zu ziehen. Oder, anders ausgedrückt, Bodensedimente sind Archive längst vergangener Zustände einer Landschaft. Gelingt es, sie zu entschlüsseln, können wichtige Informationen für die Kulturgeschichte gewonnen werden. Für das Verständnis der Beziehungen zwischen Mensch und Umwelt ergeben sich aus all dem drei unmittelbare Konsequenzen:

- Die heutige Kulturlandschaft ist das Ergebnis einer langfristigen menschlichen Beeinflussung und kann folglich nur vor diesem Hintergrund verstanden werden.
- Das jetzige Erscheinungsbild einer Landschaft entspricht nicht dem, das vergangene Menschengenerationen vorfanden.
- Die Nutzbarmachung der Ressourcen löst ökologische Veränderungen aus, die ihrerseits ökonomisch auf den Menschen rückwirken können.

Seit 1998 erforschte ein Projekt der *Arbeitsstelle Archäometrie* der *Heidelberger Akademie der Wissenschaften am Max-Planck-Institut für Kernphysik*, des *Geographischen Institutes der Universität Bonn* und des *Institutes für Ur- und Frühgeschichte der Universität Heidelberg* die Landschaftsentwicklung und Besiedlungsgeschichte einer Mikroregion der Nordostpeloponnes, nämlich des Beckens von Phlious. Das Projekt wurde initiiert, um durch Zusammenarbeit zwischen Geistes- und Naturwissenschaftlern und unter Einsatz innovativer Technologien die langfristigen Veränderungen in der nach-eiszeitlichen Besiedlungsgeschichte und der Geomorphologie einer mediterranen Landschaft zu erforschen. Am Beispiel einer Region Süd griechenlands sollten die für die historisch-kulturwissenschaftliche Forschung zentralen Fragen nach dem Werden einer Landschaft und den für die Landschaftsveränderung essentiellen Triebkräften unter besonderer Berücksichtigung etwaiger anthropogener Faktoren von Landschaftswandel einer Beantwortung nähergebracht sowie der Wandel von Strukturen menschlicher Besiedlung durch die Zeiten hindurch verfolgt werden.

Das Becken von Phlious liegt in der Südhälfte der Korinthia an der Grenze zur Argolis und bildet die größte Ebene des Korinthischen Binnenlandes. Ihren Namen verdankt die Region der antiken Stadt Phlious, die sich am Ostrand der Ebene befand und ihren Höhepunkt in der klassischen Zeit, d.h. im 5. und 4. Jh. v. Chr. hatte. In der Ebene vereinigen sich die aus unterschiedlichen Richtungen kommenden Quellbäche des Asopos, der nach Norden weiter fließt und unweit Sikyon in den Korinthischen Golf mündet. Das Zentrum des Beckens befindet sich in ca. 300 m Höhe, wogegen die umgebenden Gebirge im Norden auf über 1200 m ansteigen.

Vor Beginn unserer Untersuchungen war das Becken ein nahezu weißer Fleck auf der archäologischen Karte Griechenlands, doch ließen verschiedene Indizien vermuten, dass dies lediglich eine Folge einer unzureichenden Erforschung war. In der Antike muss nämlich die Region eine Schlüsselposition für Landverbindungen zwischen verschiedenen Teilbereichen der Peloponnes besessen haben, und die Fruchtbarkeit der Böden des Beckens wurde bereits von antiken Autoren gerühmt. Hinzu kam, dass sich unter den wenigen in den letzten Jahrzehnten bekannt gewordenen archäologischen Fundpunkten herausragende Plätze befanden. Hierzu zählt zum einen die mykenische Kammergräbernekropole von Aidonia im Nordwesten des Beckens, die zu den goldreichsten Bestattungsplätzen des Zeitraums zwischen 1500 und 1300 v. Chr. in Griechenland gehört, zum anderen die erst 1995 durch den griechischen Antikendienst entdeckte frühbronzezeitliche Großsiedlung von Petri, die in der Zeit zwischen 2500 und 2200 v. Chr. eine die Region beherrschende Rolle eingenommen haben muss.

Von vornherein war klar, dass zur Beantwortung der das Projekt leitenden Fragen eine besonders enge Verzahnung natur- und geisteswissenschaftlicher Methoden not-

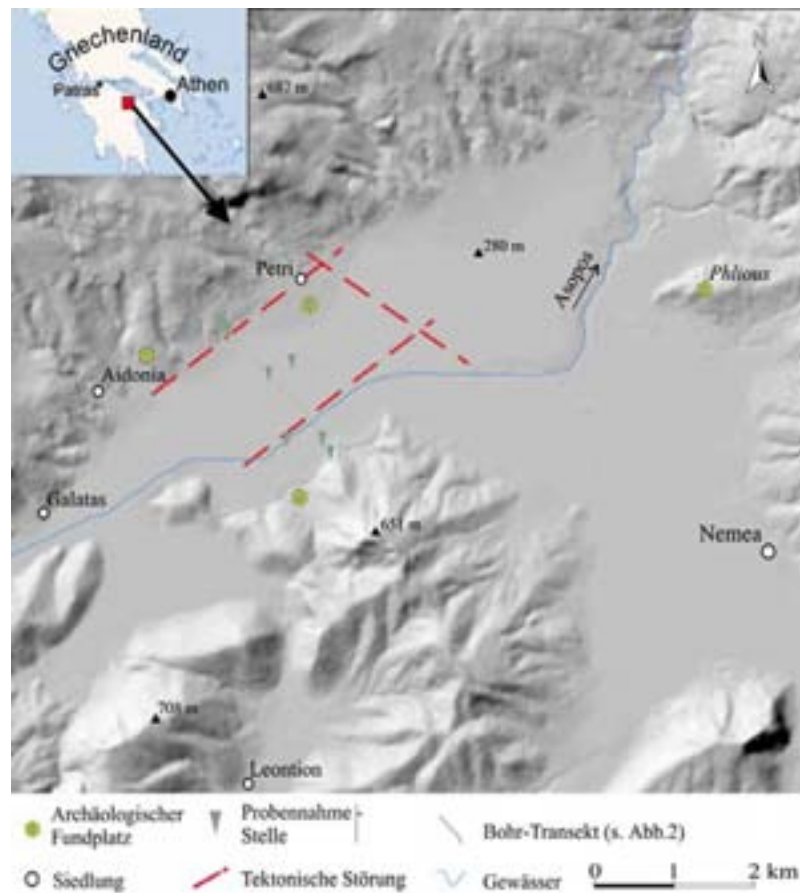


Abbildung 4.20: Untersuchungsgebiet Becken von Phlious auf der NE-Peloponnes mit Verlauf des Bohr-Transekts und den vermuteten tektonischen Störungen sowie den Lokalitäten der Probbennahmen. Die Karte basiert auf einem digitalen Höhenmodell, das aus topographischen Karten des Maßstabs 1:5000 generiert wurde.

wendig sein würde. Von archäologischer Seite sollten unter Anwendung von Methoden intensiver Oberflächenprospektion sämtliche Indizien vor-moderner Siedlungstätigkeit und Landnutzung in den zu untersuchenden Zonen erkannt und dokumentiert werden, um so zu Aussagen über Siedlungsstrukturen und ihren diachronen Wandel zu gelangen. Eine siedlungsgeschichtliche Auswertung der sich für die einzelnen Zeitabschnitte ergebenden Verbreitungsbilder sollte jedoch erst im Lichte der Ergebnisse der geoarchäologischen Untersuchungen erfolgen, da geklärt werden musste, wie die an der heutigen Erdoberfläche nachzuweisenden Fundstreuungen entstanden sind und ob diese einen repräsentativen Eindruck der menschlichen Besiedlung im Holozän vermitteln.

Die archäologische Feldforschung, die von der *Vierten Ephorie des Griechischen Antikendienstes* tatkräftig unterstützt wurde, konzentrierte sich 1998-2001 auf den westlichen und zentralen Teil des Beckens, und hierbei vor allem auf die Zonen um die Dörfer Petri und Aidonia. In die Untersuchung wurden sowohl die Ebene, als auch die umgebenen Berghänge einbezogen. Aufbauend auf den Erfahrungswerten der von ame-

rikanischer, englischer und schwedischer Seite in anderen Landschaften Griechenlands durchgeführten vergleichbaren Projekte wurden für die archäologischen Untersuchungen im Becken von Phlious neue, verfeinerte Methoden der Oberflächenprospektion entwickelt. Auf der Basis von Luftbildern und eigenen Vermessungen wurde ein Kartenmaterial erarbeitet, das die Grundlage für die Prospektion bildet.

Die zu begehenden Bereiche der Ebene wurden in GroÙeinheiten unterteilt, die durch Wege oder Bachläufe bzw. Trockentäler voneinander abgegrenzt sind. Diese als Blöcke bezeichneten Einheiten wiederum setzen sich aus einzelnen Feldern jeweils gleicher Bewirtschaftung zusammen. Große Felder wurden mit Maßbändern in Untereinheiten von durchschnittlich 2500 m^2 unterteilt und die Felder Reihe für Reihe abgesucht, wobei der Abstand zwischen den Mitgliedern des Teams 3-4 m betrug. Diese Form der Prospektion wurde gewählt, um auch kleinere Fundstreuungen auffinden zu können. Auch die Berghänge wurden in Blöcke unterteilt, die durch Täler, Flussläufe oder Felsrücken abgegrenzt sind. Innerhalb dieser GroÙeinheiten wurde nach topographischen Einheiten, wie z.B. Oberhang, Mittelhang und Unterhang, differenziert und diese Abschnitte wiederum in kleinere Unterabschnitte unterteilt. Die Oberflächenfunde umfassen in erster Linie Haushaltskeramik und Baukeramik, seltener Steingeräte sowie sehr selten Metallartefakte (Münzen o.ä.) und Architekturteile.

Von seiten der Geoarchäologie galt es, die im Becken nachweisbaren, aus der Erosion von Böden hervorgehenden Ablagerungen für die Rekonstruktion ehemaliger Zustände der Landschaft nutzbar zu machen. Hierzu wurden sowohl bewährte als auch in der Entwicklung befindliche geowissenschaftliche Methoden eingesetzt. Vor Ort wurden die Arbeiten dabei vom griechischen geologischen Dienst (*IGME* Tripolis) und vom *DEMOKRITOS*-Institut in Athen unterstützt. Zur Erforschung seiner Geomorphodynamik wurde das Untersuchungsgebiet geomorphologisch kartiert, wobei zur Erkundung des Aufbaus und zur Erprobung der Sedimente Baggerschürfe, Sondagen und geophysikalische Verfahren verwendet wurden. Techniken der Bodenkunde, der Sedimentologie und der Chronometrie (^{14}C , Optisch Stimulierte Lumineszenz) dienten zur zeitlichen Einstufung von Sedimenten, Böden und alten Oberflächen. Aufbauend auf diesen Daten wird die Entwicklung der Ablagerungen quantitativ bestimmt.

In der Region sind Böden, die noch zu Beginn der landwirtschaftlichen Nutzung die Hänge bedeckt hatten, heute bis auf geringe Reste in erosionsgeschützten Positionen komplett abgetragen. Das erodierte Bodenmaterial wurde am unteren Teil der Hänge als sogenanntes Kolluvium, bzw. als Schwemmfächersediment und als Schwemmsedimente (Alluvium) im zentralen Teil des Beckens abgelagert. Diese Sedimente sind komplexen Aufbaus, was einerseits die geologisch-tektonischen Verhältnisse des Untersuchungsgebietes und andererseits die bewegte Besiedlungsgeschichte des Beckens widerspiegelt. Die räumliche und zeitliche Erfassung der Sedimente erfolgte mittels Kartierungen. Die horizontalen Sedimentabfolgen wurden im westlichen Beckenbereich entlang eines ca. 1,8 km langen Transsekts mit Hilfe von Sondagen und Baggerschürfen aufgeschlossen sowie durch geophysikalische Untersuchungen erkundet. Nach einer detaillierten Beschreibung der Sedimente und Böden im Gelände wurden Proben für die Laboruntersuchungen entnommen.

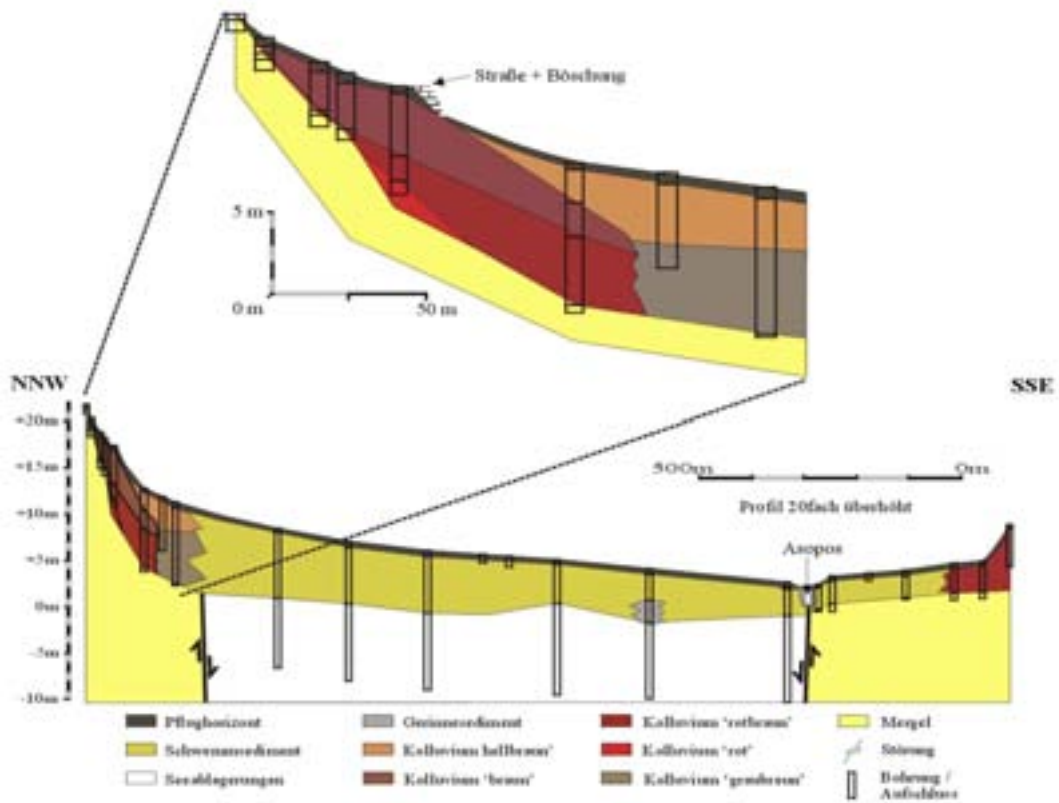


Abbildung 4.21: Schema der Sedimentabfolge im Becken von Phlious entlang des 1,8 km NNW-SSE Transektes (s. Abb. 4.20). Die Lage der Bohrungen und Baggerschürfe ist gekennzeichnet, ebenso der Verlauf der vermuteten tektonischen Störungen. In der oberen Abbildung ist ein vergrößerter Ausschnitt des nördlichen Hangfußes dargestellt.

Es zeigt sich, dass im zentralen Teil des Beckens Seeablagerungen und Schwemmsedimente die jüngsten Teile der Beckenfüllung bilden. Die Seeablagerungen liegen im Beckenzentrum in einer Tiefe von ca. 4-6 m und konnten bis zur maximalen Tiefe von 15 m verfolgt werden. Überlagert werden sie von Schwemmsedimenten. Diese Ablagerungen werden im Süden durch eine tektonische Störung begrenzt, deren Verlauf durch den Fluss Asopos markiert wird. Im Bereich des rezenten Gerinnes finden sich Sande und Kiese. Dieser grobkörnige Sedimenttyp konnte außerdem ca. 300 m nördlich des Asopos in 3-5 m Tiefe erbohrt werden, womit ein ehemaliger Lauf des Flusses dokumentiert ist. Südlich des Asopos schließt sich bis zum Hangfuß eine Schwemmebene an. Die ca. 3 m mächtigen Sedimente überlagern direkt sehr viel ältere Mergel und Konglomerate, womit sich die südliche Schwemmebene deutlich von der nördlich des Asopos gelegenen unterscheidet. An den Hangfußbereichen, die nördlich und südlich an die Schwemmebenen anschließen, wurden Kolluvien abgelagert. Das Kolluvium des südlichen Hangfußbereiches ist undifferenziert und vermutlich bis zu 4 m mächtig, wogegen das Kolluvium des nördlichen Hangfußbereiches eine Differenzierung zulässt und eine Mächtigkeit von bis zu 5,5 m erreicht. Keramikbruchstücke, die in die Sedimen-

te eingelagert sind und einen eindeutigen Hinweis auf deren anthropogenen Ursprung geben, treten bis in Tiefen von 5,5 m auf.

Die Sedimentationsgeschichte wurde beispielhaft anhand des Sedimentarchivs des nördlichen Hangfußbereichs rekonstruiert. In Abbildung 4.22 ist eine Häufigkeitsanalyse der Datierungsergebnisse abgebildet. Bereits in der Jungsteinzeit (ca. 6800-4400 v. Chr.) kam es aufgrund von Bodenerosion zur Ablagerung eines etwa 1 m bis 1,5 m mächtigen Kolluviums. Deutlich zeigt sich für das Ende der Jungsteinzeit und für die darauf folgende Periode der Kupferzeit eine erhöhte Häufigkeit der Kolluvienbildung, wogegen in der frühen Bronzezeit (ca. 3000-2000 v. Chr.) in geringerem Maße derartige Sedimente abgelagert wurden.

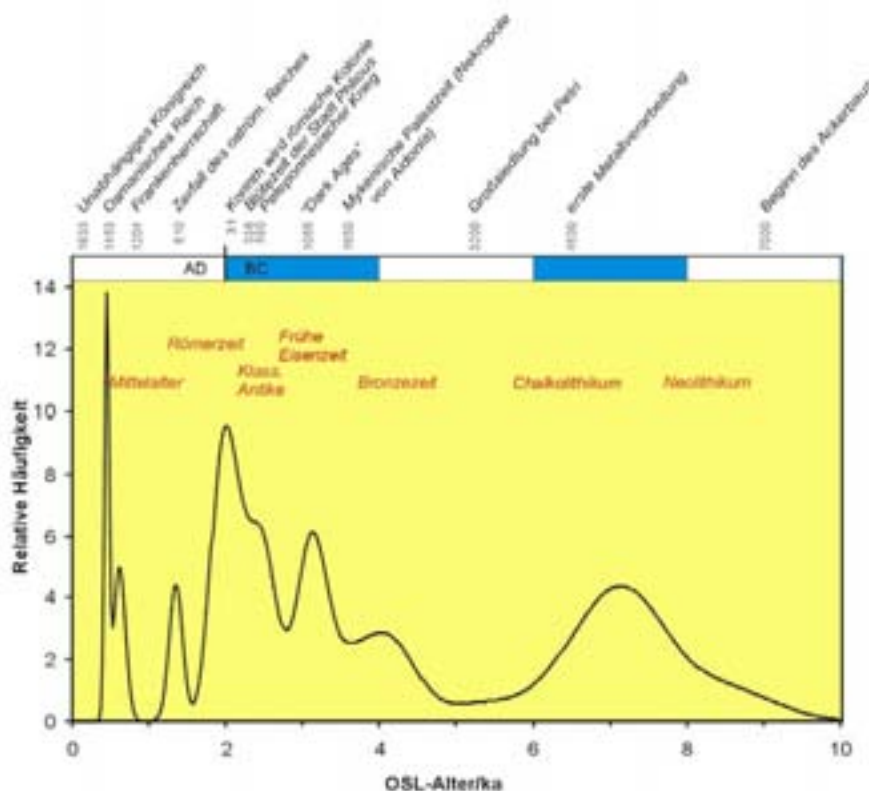


Abbildung 4.22: Häufigkeitsverteilung der OSL-Alter kolluvialer Sedimente. Aufgetragen sind die aufsummierten Häufigkeiten der OSL-Alter in tausend Jahren (ka), die an den Kolluvien des N-Hanges ermittelt wurden, gegen die Zeit. Zusätzlich sind Kulturepochen und Ereignisse eingetragen.

Das in der mittleren (ca. 2000-1600 v. Chr.) und späten Bronzezeit (ca. 1600-1050 v. Chr.) abgelagerte Kolluvium weist eine Mächtigkeit von etwa 1 m auf. Aus der frühen Eisenzeit sowie der Zeit der klassischen Antike haben sich rund 0,5 m solcher Sedimente erhalten. Insgesamt wurden seit der Römerzeit etwa 2 m Kolluvium abgelagert, wobei zunächst geringere Bildungsraten und ab dem 16. Jh. wieder höhere Werte erreicht wurden.

Insgesamt gesehen, erweisen sich die Abschnitte der mittleren und späten Bronzezeit, der Römerzeit und der Zeit seit dem ausgehenden Mittelalter als Phasen gesteigerter Kolluvienbildung und somit erhöhter Bodenerosion. Auffallend niedrige Ablagerungsraten sind für den Zeitraum des Chalkolithikums und der frühen Bronzezeit zu verzeichnen, und Gleiches trifft wahrscheinlich auch auf die frühe Eisenzeit zu. Betrachtet man die absoluten Mächtigkeiten der Kolluvien, die in den entsprechenden Kulturepochen sedimentierten, so wurden von den insgesamt 5-5,5 m umfassenden Kolluvien des nördlichen Hangfußbereiches ca. 20 % seit der Römerzeit und 20 % in der Römerzeit gebildet. Auf die mittlere und späte Bronzezeit entfallen ebenfalls ca. 20 %. Auffällig ist, dass es bereits in der Jungsteinzeit zur Bildung mächtiger Kolluvien kam, die wiederum etwa 20 % der gesamten Unterhangsedimente ausmachen. Die Landschaftsumgestaltung ist somit durchaus kein ausschließlich modernes Phänomen.

Für die archäologische Prospektion hat die Zuordnung der Sedimente zu den jeweiligen Kulturepochen, wie sie mittels der *OSL*-Datierung erfolgt ist, weitreichende Konsequenzen. Noch vor der ersten Feldforschungskampagne der geoarchäologischen Projektpartner wurde aufgrund bestimmter archäologischer Beobachtungen die These geäußert, dass Fundstellen in der Ebene durch spätere Ablagerungen verschüttet worden sein dürften. Bezeichnend waren in dieser Hinsicht die zeitlichen Unterschiede zwischen den Oberflächenfunden aus dem ebenen Beckenzentrum und dem nördlichen Hangfußbereich einerseits und von den Hängen andererseits. In den ebenen Zonen erwiesen sich die nach-bronzeitlichen Perioden und besonders der Zeitraum zwischen der klassischen und der byzantinischen Zeit als gut im Fundbild vertreten. Dagegen ließen sich hier keine neuen Fundstellen der Jungsteinzeit, der Kupferzeit oder der Bronzezeit feststellen. Gleichzeitig wurde beobachtet, dass die meisten Felder in der Ebene von einer Art *Teppich* aus relativ kleinen und stark verwitterten Ziegel- und Keramikfragmenten bedeckt waren, wogegen es nur wenige Stellen gab, bei denen konzentriert eine große Menge großformatiger Funde aufgelesen werden konnte.

Vor dem Hintergrund der geoarchäologischen Untersuchungsergebnisse müssen wir heute davon ausgehen, dass das sich teppichartig ausbreitende kleinstückige Fundmaterial überwiegend herantransportiert wurde, sei es durch Hangerosion, sei es durch Flußüberschwemmungen. Durch Kartierung der Größe und der Dichte der Fundobjekte können wir mittlerweile aber diese verlagerten Fundmaterialien von den echten Fundstellen trennen. Die Tatsache, dass junge Sedimente alluvialen und kolluvialen Ursprungs Teile des Beckens bedecken, setzt dem archäologischen Bestreben, Strukturen menschlicher Besiedlung von den Anfängen bis ins Mittelalter nachzuzeichnen, enge Grenzen. Wenn nämlich urgeschichtliche Fundplätze in der Ebene unter Sedimenten begraben sind und sich dementsprechend eines Nachweises an der Erdoberfläche entziehen, so scheidet in diesen Zonen für die ältesten Abschnitte menschlicher Besiedlung die Definition von Siedlungsstrukturen aus. Bei den Berghängen stellt sich in gewisser Weise das umgekehrte Problem, da dort jünger-antike Siedlungsstellen in ungünstigen Lagen der Erosion anheimfielen und heute als Kolluvium in der Ebene liegen, wogegen urgeschichtliche Fundstellen überhaupt erst durch das Abgehen jüngerer, überlagernder Sedimente freigegeben worden sein können.

Die Beeinflussung und Verfälschung der Ergebnisse archäologischer Oberflächenprospektion durch geomorphologische Prozesse wurde in dieser Klarheit in keinem anderen

vergleichbaren Projekt herausgearbeitet und wird eine wichtige Rolle bei der Interpretation anderer in Griechenland vorgenommener Feldforschungen spielen. Auch wenn das archäologische Ziel, Strukturen menschlicher Besiedlung durch die Jahrtausende hindurch zu verfolgen, aus den genannten Gründen insbesondere für den Zeitraum vor dem 1. Jt. v. Chr. nicht erfüllt werden kann, so ergibt sich dennoch bei Zusammenschau der Ergebnisse von Archäologie und Geoarchäologie ein reiches siedlungsgeschichtliches Quellenmaterial.

Bisher wurde durch die Prospektion nur ein einziger Siedlungsplatz der Jungsteinzeit lokalisiert. Da aus den geomorphologischen Untersuchungen klare Indizien für eine durch Erosionsvorgänge ausgelöste Kolluvienbildung während des Neolithikums vorliegen, ist es wahrscheinlich, dass einige der ehemals eventuell an den Berghängen befindlichen Siedlungsstellen des Neolithikums der Hangerosion zum Opfer gefallen, andere in der Ebene jedoch unter meterdicken Sedimenten verborgen sind. In jedem Fall muss es eine intensive Landnutzung während dieser Periode in unserem Untersuchungsgebiet gegeben haben, ohne dass sich dies freilich bisher archäologisch entsprechend bemerkbar machen würde.

Ein erster Siedlungsschwerpunkt zeichnet sich archäologisch für die frühe Bronzezeit (ca. 3100/3000-2000 v. Chr.) ab, für die es zahlreiche Belege in verschiedenen Zonen gibt. Einige dieser frühhelladischen Plätze liegen erstaunlich hoch und z.T. in abgelegenen Zonen. Dies könnte entweder mit einem Schutzbedürfnis, oder mit speziellen wirtschaftlichen Faktoren (z.B. Weidewirtschaft, Abbau von Rohmaterialien) in Zusammenhang stehen. Eine Konzentration frühhelladischer Fundpunkte zeichnet sich in der Umgebung des Dorfes Petri ab, wo, abgesehen von der schon bekannten Großsiedlung, zwei weitere Plätze erkannt wurden. Eine Interpretation im Sinne einer hohen Siedlungsdichte während dieses Zeitabschnittes ist indes noch nicht möglich, da zumindest eine der beiden Fundstellen in den älteren Abschnitt des Frühhelladikums datiert (3100/3000-2500 v. Chr.) und zum Zeitpunkt der Gründung der anderen beiden Siedlungen eventuell bereits aufgegeben worden war. Anders als in der südlich benachbarten Argolis fehlen in unserem Untersuchungsgebiet Indizien einer verstärkten Erosionsrate während des 3. Jts. v. Chr., und dies verdeutlicht die Notwendigkeit zu einer mikroregionalen Betrachtungsweise geomorphologischer Prozesse.

Auffällig viele Fundplätze der Mittelbronzezeit (ca. 2000-1600 v. Chr.) und der Spätbronzezeit (ca. 1600-1050 v. Chr.) gibt es auf den Hügeln des westlichen Teils des Beckens, und dieser Befund korrespondiert mit der für das 2. Jt. v. Chr. zu verzeichnenden erhöhten Erosionstätigkeit. Der bedeutendste neu lokalisierte mykenische Ort ist eine durch ihre Topographie natürlich befestigte Akropolis, die der Kammergräbernekropole von Aidonia benachbart ist und mit ihr in unmittelbarem Zusammenhang stehen dürfte. Vom Typus her erinnert diese Akropolis von Aidonia an Orte, die wir aus anderen Landschaften als Sitz zeitgenössischer Eliten kennen. Die hervorragende Lage zwischen zwei Trockentälern, direkt an einer großen Quelle (und einer kleineren auf der östlichen Bergseite), mit natürlicher Befestigung und Blick über fast das gesamte Tal unterstreichen die Bedeutung dieser Siedlung.

Während Belege der archaischen Zeit (ca. 700-480 v. Chr.) selten sind, ergaben sich zahlreiche Hinweise auf Siedlungsaktivitäten der klassischen, hellenistischen und römi-

schen Zeit. Auch unter diesen Fundstellen der klassischen Antike befinden sich mehrere, die für die Kulturgeschichte der Nordostpeloponnes von einiger Bedeutung sind. Hierzu zählen ein Heiligtum einer weiblichen Gottheit, vermutlich Hera oder Demeter, aus dem 6. Jh. v. Chr., d.h. der archaischen Zeit und das mächtige Fundament eines öffentlichen Gebäudes mutmaßlich der klassischen Zeit (5. Jh. v. Chr), die an verschiedenen Stellen im Bereich des südlichen Beckenrandes aufgefunden wurden, sowie eine große Ansiedlung der klassischen Zeit auf dem als *Prophitis Ilias Leontiou* bezeichneten Hügel im Westen des Beckens.

Gut repräsentiert im Fundbild ist die byzantinische Zeit, d.h. das Mittelalter in Griechenland (ca. 5. Jh.-15. Jh. n. Chr.). Bislang steht noch eine feinchronologische Untersuchung des byzantinischen Fundstoffes aus, weshalb sich nicht sagen lässt, inwieweit sich dieser rund ein Jahrtausend einnehmende Zeitabschnitt gleichmäßig im Fundbestand niederschlägt. Unter den neu entdeckten Fundplätzen des Mittelalters gibt es mehrere, die zu wüst gefallenen Gehöften, Weilern und Siedlungen gehört haben müssen.

Will man ein Fazit ziehen, so lässt sich sicher sagen, dass der wissenschaftliche Ertrag des Projektes die vor Projektbeginn nur vermutete hervorragende Eignung der Region als Untersuchungsgegenstand voll bestätigt hat. Weder war von geowissenschaftlicher Seite erwartet worden, dass sich hinter dem heute so ruhig wirkenden Relief der Ebene ein äußerst komplexer geologischer Unterbau verbirgt, noch war von archäologischer Seite damit gerechnet worden, eine derart große Dichte antiker Hinterlassenschaften, unter Einschluss bisher unbekannter bedeutender Orte, vorzufinden. Einige der neu entdeckten Plätze, vor allem die mykenische Akropolis von Aidonia, das spätarchaische bis frühklassische Heiligtum am Fuß des Koukoujeras und die vermutlich klassische Befestigung auf dem Gipfel desselben Berges, sind bedeutende Zeugnisse der Kulturgeschichte einer zuvor nahezu unbekanntem Region, die künftig bei einer Auseinandersetzung mit der frühen Geschichte der Korinthia berücksichtigt werden müssen.

Bewahrheitet hat sich aber auch die zu Beginn des Projektes formulierte These, wonach siedlungs- und umweltgeschichtliche Untersuchungen nur durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Archäologie und Naturwissenschaften erfolgreich durchgeführt werden können. Die Bedeutung der naturwissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse für die Archäologie liegen dabei nicht allein in der Möglichkeit, Veränderungen im Landschaftsrelief nachzuvollziehen, sondern sie tragen gleich in mehrerer Hinsicht zur Vervollständigung unserer Kenntnis des Verlaufs menschlicher Besiedlung und vor allem zur Interpretation der Ergebnisse archäologischer Oberflächenprospektion bei.

Seit dem Aufkommen von Survey-Unternehmungen ging die Forschung zumindest implizit von der Grundannahme aus, dass auf der Basis der Kartierung archäologisch nachweisbarer Oberflächenfunde zuverlässige Aussagen über die Strukturen menschlicher Besiedlung durch die Jahrtausende gemacht werden können. Diese hohe Bewertung des wissenschaftlichen Potentials von Surveys gipfelte in der Aussage, dass derartige Feldforschungen Ausgrabungen als Erkenntnisquelle der Archäologie vorzuziehen seien, da sie im Unterschied zu diesen keine Zerstörungen hervorriefen und Aufschlüsse über ganze Regionen und nicht nur einzelne Plätze zuließen. Erst in den letzten Jahren wurde immer mehr die Notwendigkeit, das sich aus den Surveys ergebende archäologische Fundbild einer intensiven Quellenkritik zu unterziehen, erkannt. Fünf Jahre Untersuchungen

im Becken von Phlious haben gezeigt, wie eng die Verteilung von Oberflächenfunden mit der holozänen Landschaftsentwicklung verknüpft ist. Die Beziehung zwischen holozäner Landschaftsentwicklung und der heutigen Verteilung antiker Funde und Befunde eröffnet der Interpretation der Ergebnisse archäologischer Oberflächenprospektion im östlichen Mittelmeerraum neue Deutungsperspektiven und führt vor Augen, dass allein auf der Basis der Kartierung archäologisch nachweisbarer Fundstreuungen keine zuverlässigen Aussagen über den Gang der Besiedlungsgeschichte einer Region gemacht werden können.

Eben weil aber archäologische Oberflächenfunde und Landschaftsentwicklung in einem dynamischen Verhältnis zueinander stehen, erscheint es unerlässlich, geowissenschaftliche Untersuchungen zum integralen Bestand von archäologischen Surveys zu machen. Es sollte zu denken geben, dass das bisher einzige Forschungsvorhaben in Griechenland, in dem derart intensiv Sedimentdatierungen durch *OSL* zum Einsatz kamen, zu solchen im Hinblick auf die Beurteilung des wissenschaftlichen Wertes von Survey-Ergebnissen beunruhigenden Resultaten geführt hat. Wir werden erst dann Klarheit über den Stellenwert archäologischer Oberflächenprospektion erhalten, wenn die von fast allen bisherigen Survey-Projekten zugrunde gelegte Annahme, dass die an der heutigen Erdoberfläche anstehenden Sedimente Informationen über alle Zeitabschnitte der Besiedlungsgeschichte seit dem Neolithikum bereithalten, durch ähnliche Sedimentdatierungen, wie sie im Becken von Phlious durchgeführt wurden, erhärtet wird. Nur unter dieser Voraussetzung wird es möglich sein, die Chancen zur Aufklärung der vor-modernen Besiedlungsgeschichte einer Region realistisch einzuschätzen und damit eine fundierte Grundlage für ein besseres Verständnis der Beziehung zwischen vergangenen Kulturen und ihrer Umwelt zu schaffen.

4.8 Projektverbund *Nasca* - Entwicklung und Adaption archäometrischer Techniken zur Erforschung der Kulturgeschichte

Markus Reindel, Bernhard Eitel und Günther A. Wagner

Förderkennzeichen: 03REX1VP (01.08.02-31.07.06), 03EIX1VP (01.08.02-31.12.05), 03WAX3VP (01.08.02-31.12.05)

Einleitung und archäologischer Teil

Die *Nasca*-Kultur an der Südküste Perus wurde berühmt durch die Linien, Flächen und figürlichen Darstellungen, die sich zum Teil kilometerweit über die Hochebenen einer der trockensten Wüsten der Welt erstrecken. Über kaum ein archäologisches Phänomen wurde so viel geschrieben wie über diese *Geoglyphen*.



Abbildung 4.23: Diese Gruppe von Geoglyphen auf einer Fußfläche von Palpa wurde für die gezielte Kombination von archäologischen und naturwissenschaftlichen Datierungsverfahren ausgewählt.

Allerdings liegen über die Kulturen im *Nasca*-Gebiet bisher nur sehr wenige gesicherte archäologische Kenntnisse vor. Der Projektverbund *Nasca - Entwicklung und Adaption archäometrischer Techniken zur Erforschung der Kulturgeschichte* hat sich zum Ziel gesetzt, in einem interdisziplinären Vorhaben die Entwicklung und die Umwelt der

Kulturen im *Nasca*-Gebiet zu rekonstruieren. In diesen thematischen Rahmen ist die Entwicklung neuer naturwissenschaftlicher Methoden und Technologien eingebettet, die einen Beitrag nicht nur für die archäologische Forschung im *Nasca*-Gebiet, sondern für die Vorgeschichtsforschung im Allgemeinen leisten kann.

Das Untersuchungsgebiet liegt um den Ort Palpa, im Gebiet einer Taloase, die durch die Flüsse Río Grande, Río Palpa und Río Viscas gebildet wird. Die Flüsse entwässern die Westseite der peruanischen Anden hin zu dem 70 km entfernten pazifischen Ozean. Die Oase ist eingebettet in die zur Atacamawüste gehörende peruanische Küstenebene, wo so gut wie keine Niederschläge fallen. Ob dies immer so war, muss Gegenstand der Untersuchungen sein. Fest steht jedoch, dass die Region wegen ihrer günstigen naturräumlichen Gegebenheiten seit frühesten Zeiten Menschen angezogen hat. Wegen ihrer Isoliertheit und klaren Abgrenzung, aber auch wegen der guten Erhaltungsbedingungen und der hohen Funddichte, bietet sich die Taloase um Palpa in idealer Weise für archäologische Untersuchungen an.



Abbildung 4.24: *Neu entdeckte Großgräber zeugen von der ausgeprägten gesellschaftlichen Gliederung der Nasca-Kultur (200 v. Chr. - 600 n. Chr.). Anthropologische Untersuchungen liefern Informationen über die Bestatteten.*

Die der archäologischen Forschung eigenen Methoden im Sinne einer historischen Forschungsdisziplin lassen sich auf zwei Grundprinzipien zurückführen: zum Einen die Beobachtung von Stratigraphie, das heißt von Überlagerungen von Funden und Befun-

den als Hinweise auf zeitliche Abfolge, sowie deren Vergesellschaftung als Hinweis auf Gleichzeitigkeit. Zum Anderen die Beobachtung von Ähnlichkeit im Falle von Funden oder Befunden, die nicht in einem unmittelbaren räumlichen Zusammenhang stehen. Die Ähnlichkeit gilt als Indiz für Gleichzeitigkeit. Zur Interpretation aller anderen kulturhistorisch relevanten Zusammenhänge ist die Archäologie auf die Zusammenarbeit mit Nachbardisziplinen angewiesen, in den letzten Jahren immer stärker auf die Naturwissenschaften.

Im Verlaufe der Vorstudien des *Nasca*-Projektes haben sich zahlreiche Forschungsprobleme ergeben, zu denen Naturwissenschaften Lösungsansätze liefern können. Ein zentrales Anliegen war von Anfang an die Dokumentation der von der Zerstörung bedrohten *Geoglyphen* des *Nasca*-Gebietes mit Hilfe von modernen photogrammetrischen Methoden, ein Vorhaben, das von der *Schweizerisch-Liechtensteinischen Stiftung für Archäologische Forschungen im Ausland (SLSA)* unterstützt wurde. Bei der Durchführung zeigten sich bald die Grenzen automatisierter digitaler Bildauswertung bei der Kartierung kontrastarmer Objekte, ein Manko, das die Erfassung aller *Geoglyphen* im *Nasca*-Gebiet unwirtschaftlich oder sogar unmöglich erschienen ließ. Im Rahmen des vom *BMBF* geförderten Projektverbundes werden neue Methoden entwickelt, die die automatisierte Auswertung kontrastarmer Objekte ermöglichen.



Abbildung 4.25: *Siedlungsreste und Gräber aus verschiedenen Phasen der Paracas - Kultur (800 - 200 v. Chr.) bilden die Grundlage für eine numerische Chronologie der Kulturgeschichte in Palpa.*

In zahlreichen Aufschlüssen in Trockentälern, an Terrassenkanten, aber auch in Profilen archäologischer Ausgrabungen in Palpa sind Sedimentarchive zu beobachten, die auf Niederschläge zum Teil katastrophaler Ausmaße hindeuten. Sollte das Klima in der Vergangenheit instabil oder sogar deutlich anders gewesen sein? Spielt das vieldiskutierte *El Niño*-Phänomen, das in den Nordanden immer wieder zu Überschwemmungen führt, auch an der Südküste Perus eine viel größere Rolle als bisher angenommen? Diesen Fragen geht das geomorphologische Forschungsteam des Projektverbundes nach. Es geht darum, sowohl das Klima als auch die Landschaft in prähistorischer Zeit zu rekonstruieren. Dazu werden unter anderem neue Methoden der Geophysik entwickelt, um die für die Beurteilung der fluvialen Dynamik entscheidende Sedimentierung in den Talböden besser erfassen zu können.



Abbildung 4.26: Anhand von mächtigen stratifizierten Schichten in Abfallhaufen lässt sich die interne Gliederung der sog. Späten Zwischenperiode (1000 - 1400 n. Chr.) bestimmen und mit naturwissenschaftlichen Methoden numerisch datieren.

Die große Fundortdichte und die vielen obertägig sichtbaren Siedlungsreste bieten ideale Voraussetzungen für siedlungsarchäologische Studien in Palpa. Veränderungen von Klima und Landschaft, aber auch politische und wirtschaftliche Wechsel haben offenbar immer wieder zu kulturellen Brüchen geführt, die sich in veränderten Siedlungsmustern und Fundinventaren äußerten.

Die Lokalisierung ungestörter archäologischer Fundkontexte stellt eines der Hauptprobleme der Archäologie Perus dar. Gerade im *Nasca*-Gebiet werden prähistorische Siedlungen und Gräberfelder seit Jahrzehnten geplündert. Moderne geophysikalische Prospektionsmethoden können einen wichtigen Beitrag liefern, um verborgene, bisher ungestörte Bodenfunde aufzuspüren. Erstmals in Südamerika wird die Magnetometermessung im Projektverbund eingesetzt, die zwar in Mitteleuropa bereits etabliert ist, jedoch an die besonderen Bedingungen der Südhalbkugel adaptiert werden muss. Die für die geomorphologische Forschung zu entwickelnde geoelektrische Tomographie kann ebenfalls für die Archäologie eingesetzt werden und bietet eine willkommene Ergänzung der Magnetometermessung.

Kein Gebiet Südamerikas verfügt über eine ausreichend durch numerische Daten gesicherte Chronologie. Ohne Chronologie ist jedoch eine historische, insbesondere vergleichende historische Forschung sinnlos. Im Projektverbund werden neue Verfahren entwickelt, die die gut etablierte, aber in ihrer derzeitigen Anwendung sehr teure *AMS*-Datierung von Radiokohlenstoff so wirtschaftlich machen, dass auch größere Probenserien erstellt werden können. Dies wird es ermöglichen, für die Region Palpa eine numerische Chronologie für alle Phasen der Kulturentwicklung zu erstellen. Die *AMS*-Datierung dient auch der Kontrastierung von Ergebnissen einer vollkommen neuen Datierungsmethode, der ortsauflösenden Lumineszenzdatierung, die es erlauben wird, unter anderem Gesteinsoberflächen zu datieren. Auf diese Weise werden die *Geoglyphen* im *Nasca*-Gebiet erstmals direkt datiert werden können.

In der Anfangsphase der Jahre 2002/2003 konnten schon grundlegende Forschungsergebnisse erzielt und Tendenzen aufgezeigt werden. Gemeinsame Geländebegehungen der Teilnehmer lieferten ein Verständnis für die Grundzüge der Landschaftsgeschichte und machten die besonderen physiographischen Bedingungen für die Anlage der *Geoglyphen* in der Region *Nasca* deutlich. Die ausgeprägte fluviale Dynamik im Zuge mit klimatischen Veränderungen wurde als bestimmendes Element für die Formung der Landschaft erkannt. Feuchtere Perioden in der Vergangenheit waren auch die Voraussetzung für die Bildung von Lössdecken in großen Teilen der Landschaft, was vollkommen andere landwirtschaftliche Bedingungen schaffte.

Die sich ergänzenden und gegenseitig bestätigenden geophysikalischen Prospektionsmethoden haben gezeigt, dass der generell als siedlungsleer deklarierte Talboden zahlreiche ungestörte archäologische Befunde in sich birgt. Diese Befunde ließen sich zum Teil bereits durch archäologische Ausgrabungen bestätigen. Selbst im Bereich der *Geoglyphen* konnten zahlreiche Gebäudereste und andere Anomalien nachgewiesen werden. Damit haben sich die Magnetometermessung und die Geoelektrik als Prospektionsmethoden mit enormem Potenzial in Südamerika erwiesen.

Bei den archäologischen Ausgrabungen im Sommer 2003 konnten in idealer Weise stratifizierte Siedlungs- und Gräberfunde mehrerer Zeitstufen dokumentiert werden.

Die Anwesenheit der Chronometrie-Spezialisten erlaubte die gezielte Entnahme kontextualisierter Proben, die in den Aufbau der numerischen Chronologie eingehen werden. Außerdem wurde schwerpunktmäßig ein ausgewählter *Geoglyphenkomplex* systematisch für die ortsauflösende Lumineszenzdatierung beprobt. Dort war eine Überlagerung von *Geoglyphen* beobachtet worden, in Verbindung mit kleinen Plattformen, die ergraben wurden und zusätzliches Probenmaterial für die AMS-Datierung lieferten. Bei einem ergänzenden Survey wurde eine große Zahl neuer *Geoglyphen* aus der *Paracas*-Zeit entdeckt, die stilistisch früher einzuordnen sind als alle bisher bekannten *Geoglyphen*. Die Datierung dieser *Geoglyphen* mit der neuen, im Projektverbund entwickelten Methode hat allerhöchste Priorität.

Die bisherigen Arbeiten haben gezeigt, dass die konzentrierte Arbeit der beteiligten Wissenschaftler im Gelände ein umfassendes Verständnis und nicht zuletzt auch Begeisterung für die Forschungsproblematik schafft. Die Diskussionen vor Ort und im Laufe der Feldforschungen lassen die Prioritäten im Forschungsbedarf unmittelbar deutlich werden. Durch die Multiplikation der Methoden, insbesondere der Kombination von Geistes- und Naturwissenschaften, wird die Effektivität der Forschung erheblich gesteigert. Für die Archäologie in Palpa bedeutet dies einen enormen Erkenntnisgewinn. Aus den neuen naturwissenschaftlichen Methoden erwächst ein großes Potenzial für die archäologische Forschung in Südamerika und weltweit.



Abbildung 4.27: *Landsat-Satellitenbildmontage des Arbeitsgebiets in Südperu. Rottöne markieren Vegetation. Deutlich zu sehen sind die Atacama-Küstenwüste und die Flusssoasen im östlichen Wüstenabschnitt. Das Arbeitsgebiet ist umrandet.*

Geomorphologisch-bodenkundlicher Teil

Die Aufgabe besteht darin, durch Adaption und Weiterentwicklung geomorphologisch-bodenkundlicher Methoden einen Beitrag zur Erforschung des Umfelds der *Nasca*-Kultur zu leisten. Dies geschieht auf zwei Wegen:

Sedimente und Böden werden als *Geo-Archive* genutzt und analysiert, um die Umweltentwicklung des Arbeitsgebiets zu rekonstruieren. Ziel ist es, durch Adaption geomorphologisch-pedologischer Untersuchungsmethoden einen Beitrag zum Verständnis zu leisten, auf welchen geökologisch-paläoklimatischen Grundlagen die *Paracas*- bzw. die *Nasca*-Kultur nach 1200 v. Chr. aufbaute, und welche Umweltveränderungen zu ihrem Kollaps um etwa 800 n. Chr. führten. Andererseits werden moderne sedimenttomographische Verfahren (Geelektrische und refraktionsseismische Messungen) eingesetzt und weiterentwickelt, um auch fossilisierte Ablagerungen zu erkunden, dreidimensional zu modellieren und interpretieren zu können.



Abbildung 4.28: Satellitenbild der Flussoase bei Ingenio. Die sommerlichen Niederschläge in der Westkordillere der Anden speisen die zum Pazifik orientierten Flüsse, die meist nur jahreszeitlich Wasser führen. Am Gebirgsfuß sind im ariden Umfeld der östlichen Atacama-Küstenwüste daher Flussoasen entwickelt, in denen und entlang derer sich die wichtigsten Siedlungsgebiete der Nasca-Kultur finden. Auf den trockenen Fußflächensystemen (Pediments) sind Bodenzeichnungen (Geoglyphen) zu erkennen. Diese Zeichnungen entstehen durch Entfernen der dunklen Steine mit sog. Wüstenlack, wodurch die helleren, feinsedimentreichen Ablagerungen darunter sichtbar werden.

Die Fundplätze der *Nasca*-Kultur liegen etwa 40-60 km entfernt von der Küste am Fuß der Westkordillere der Anden. Das Gebiet bildet heute die hyperaride östliche Atacama-Küstenwüste, die nur von einzelnen Flussoasen durchzogen wird. Der Wüstenrand liegt heute etwa in 1500 m ü. M. bzw. 80-90 km östlich der Küste. Die Untersuchungen haben ergeben, dass das Klima einst wesentlich feuchter gewesen sein muss. Als Ursache kommen weniger pazifische Einflüsse (*El Niño*-Ereignisse) als vielmehr monsunale Effekte, also tropische Feuchtluftmassen in Frage, die während des Südsommers aus dem Amazonasbecken die Anden überqueren. Dies geschieht auch heute noch. Neben einer Reihe von bodengeographischen, sedimentologischen und geomorphologischen Hinweisen bilden die Wüstenrandlöss, die in der Gebirgsfußzone zwischen etwa 650 und 1250 m ü. M. fleckenhaft aber auch deckend auftretend, den zentralen Befund für ehemals feuchtere Klimaverhältnisse. Sie wurden im Rahmen des *NTG*-Projekts erstmals untersucht.

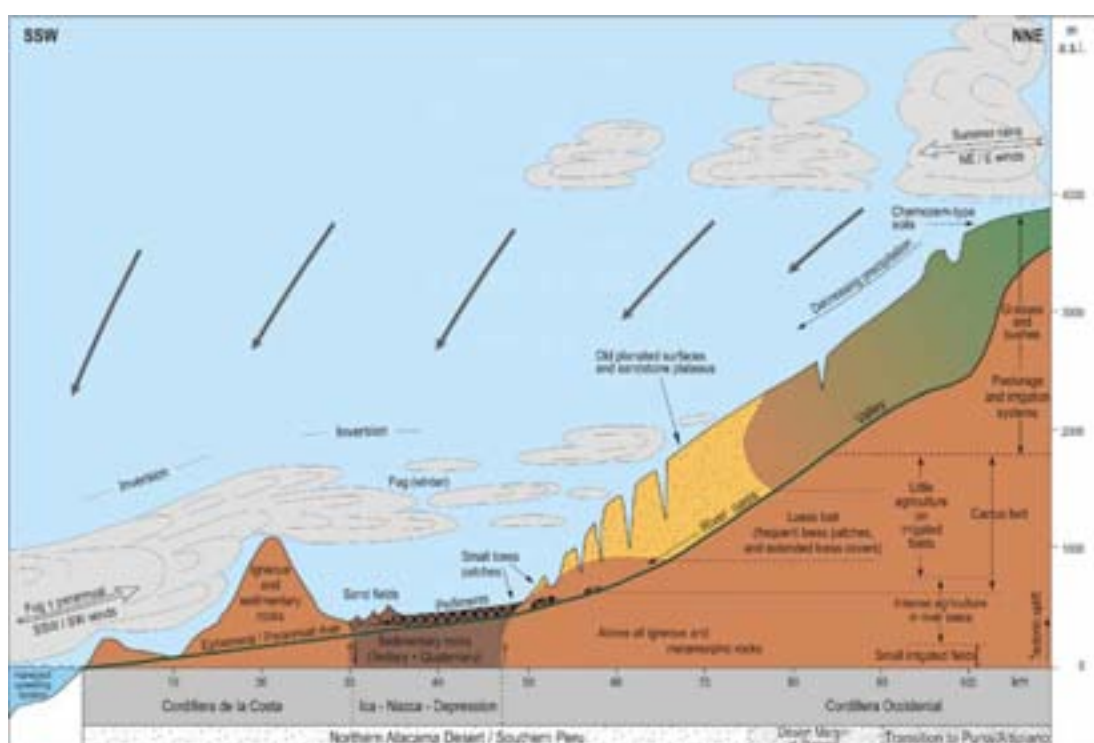


Abbildung 4.29: Schnitt durch die verschiedenen Landschaftseinheiten nördlich Palpa (S-Peru). Heute liegt der Wüstenrand etwa 90 km östlich der Küste, im mittleren Holozän etwa 40 km weiter westlich. Die Lössverbreitung dokumentiert eine ehemalige Gras-(Strauch-)decke, also eine offene Savannenlandschaft. Die Geoglyphen der *Nasca*-Kultur finden sich auf den Fußflächenresten (Pediments), während die heutigen Flussoasen sicher auch damals den Kern der Wirtschaftsflächen bildeten.

Die Bildung der Wüstenrandlöss ist nur mit Hilfe einer Grasvegetation möglich, die die dauerhafte Ablagerung des Staubs (Korngrößen im Feinstsand und Schluffbereich unter 0,1 mm Korngröße) ermöglichte. Die bis etwa 0,4 - 0,5 m mächtigen Lössen enthalten noch heute viele Rhizome, die die einst feuchteren Bedingungen dokumentieren.

ren. Mehrere Zentimeter große Schneckenschalen (*Pupillidae* und *Bulimullidae*) in den äolischen Sedimenten belegen auch faunistisch eine dichte, zumindest saisonal feuchte Savannenvegetation. Erste Lumineszenzdatierungen an den Lössen (Dr. A. Kadereit / Teilprojekt Prof. Dr. G. Wagner) belegen klar deren holozäne Entstehung, v. a. nach 6500 Jahren vor heute. Nimmt man eine lösstypische Sedimentationsrate von etwa 0,1 mm pro Jahr an, dann hätte die Lössbildung bis ins 1. Jt. n. Chr. gedauert, also bis einschließlich der *Nasca*-Epoche. Die Lößverbreitung zeichnet den Wüstenrand 30-40 km weiter westlich als heute nach, was auf verstärkte monsunale Feuchtluftinflüsse und eine Einengung des trockenen Küstenstreifens hinweist. Die Menschen in der Paracas- und *Nasca*-Kultur haben damit sehr gute Klimabedingungen angetroffen. Die wahrscheinlich offene Graslandschaft erlaubte die Weidewirtschaft (Alpacas) ausserhalb der wohl intensiv genutzten Bereiche um die Flüsse. Andererseits war das semiaride Klima am Wüstenrand sicher nicht so feucht, dass Tropenkrankheiten die Kulturen nennenswert beeinträchtigen konnten.



Abbildung 4.30: *Wüstenrandlöss (ca. 40-50 cm Mächtigkeit) im Sta. Cruz-Tal nördlich Palpa (Höhe: ca. 1000-1200 m ü.M.). Die Deckensedimente belegen eine Holozäne Grasdecke, die durch jungholozäne Aridisierungsprozesse verschwunden ist. Dies könnte die Ursache für den Zusammenbruch der Nasca -Kultur (um 800 n. Chr.) sein.*

Für den Zusammenbruch der *Nasca*-Kultur wurden zunächst katastrophale *El Niño*-Ereignisse vermutet. Hierfür gibt es aber keine überzeugenden Belege im Raum Palpa. Aus der Reihe der Gegenargumente sei hervorgehoben, dass nicht nur die berühmten *Nasca-Geoglyphen* nahezu durchweg erhalten sind, auch die Schlammströme der Region sind größtenteils viel älter als die *Nasca*-Kultur. Refraktionsseismische und geoelektrische Untersuchungen haben zudem den archäologischen Befund bestätigt, dass die etwa 2,5 m über dem heutigen Flussbett liegende (Nieder-)Terrasse besiedelt war und seit der *Paracas*- bzw. *Nasca*-Zeit nicht mehr - auch nicht durch katastrophale Fluten -

umgelagert wurde. Viel wahrscheinlicher ist daher, dass die Aridisierung der Region durch das Ausbleiben der monsonalen Sommerregen und die Ausdehnung der Atacama nach Osten, den Menschen die ökonomische Grundlage entzog und einen Kulturwandel herbeiführte. Wie gesagt, heute liegt der Wüstenrand ca. 40 km weiter östlich in den Anden oberhalb ca. 1500 m ü.M.

Die sedimenttomographischen Untersuchungen haben aber nicht nur wichtige Argumentationshilfe bei der Rekonstruktion der Umweltgeschichte erbracht. Vor allem die geoelektrischen Messungen und die Modellierung der Ergebnisse haben sich auch als hervorragend geeignete Technologie zur archäologischen Prospektion erwiesen. Die Messungen des elektrischen Widerstands im Untergrund wurden erstmals in einem ariden Umfeld mit geoarchäologischer Zielsetzung eingesetzt. Dabei wurden magnetometrische Untersuchungsergebnisse bestätigt und sowohl durch 2D- als auch durch erstmals ausgeführte 3D-Modellierungen wesentlich erweitert.

Die tomographische Visualisierung bietet den Archäologen vergleichsweise genaue Einblicke in den Untergrund und damit zur Lage potentieller archäologischer Befunde. Die Arbeiten bieten so die Möglichkeiten, die Grabungen genauer als bisher zu vorbereiten. Es wird damit auch unwahrscheinlicher, wichtige Befunde zu übersehen oder beiläufig zu zerstören. Die Aufnahmen erlauben zudem, die archäologischen Befunde räumlich mit Sedimenten zu verknüpfen, die Aufschluss über die geomorphologischen Prozesse im Umfeld der Kulturspuren geben können.

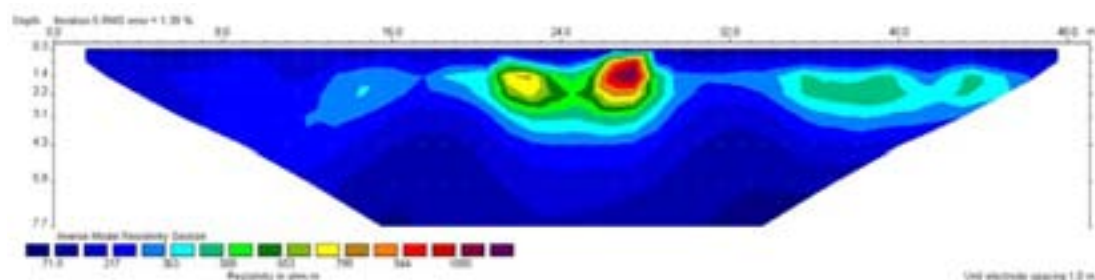


Abbildung 4.31: Das Beispiel einer geoelektrischen Tomographie im Umfeld des Fundo Jauranga bei Palpa zeigt die Verteilung des elektrischen Widerstandes im Boden auf einer Länge von ca. 50 m. Zur Messung wurden 50 Elektroden im Abstand von 1 m verwendet. Die Bereiche höherer Widerstandswerte (gelbe und rote Farben) decken sich gut mit den Ergebnissen magnetischer Messungen am selben Standort und zeigen damit potentielle archäologische Fundstellen an.

Noch sind die Arbeiten nicht abgeschlossen. Die Sedimentanalysen haben gerade erst begonnen und auch die Chronologie der Umweltereignisse muss noch weiter präzisiert werden. Eines ist aber bereits jetzt deutlich geworden: Die Adaption und Weiterentwicklung geomorphologischer und bodengeographischer Methoden und Technologien eignet sich hervorragend, archäologisches Arbeiten im Gelände und argumentativ die Interpretation der Befunde zu unterstützen.

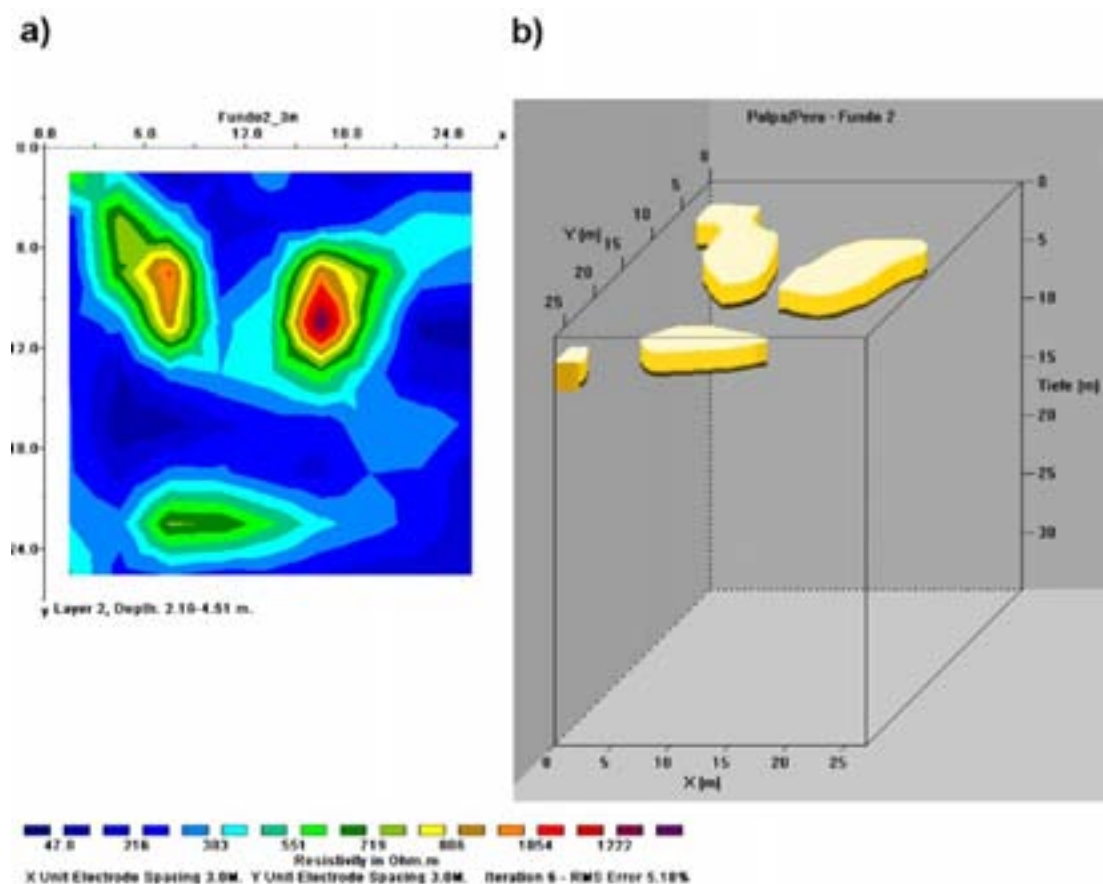


Abbildung 4.32: Das Ergebnis einer geoelektrischen 3D-Messung (im Gegensatz zu bisher üblichen 2D-Interpolationen) im Umfeld des Fundo Jauranga bei Palpa: a) zeigt die horizontale Verteilung des elektrischen Widerstandes im Boden zwischen ca. 2 und 4 m Tiefe. Dabei wurden in einer flächenhaften Auslage insgesamt 100 Elektroden im Abstand von je 3 m platziert. Noch deutlicher werden die gemessenen Anomalien des elektrischen Widerstandes in b) sichtbar: Dort sind nur die Bereiche der höchsten Widerstände in ihrer räumlichen Ausbreitung dargestellt, alle niedrigeren Werte wurden ausgeblendet. Potentielle archäologische Befunde können damit lagegenau bestimmt werden.

Chronometrischer Teil

Es existiert bisher im gesamten südamerikanischen Raum für keine archäologische Kulturregion eine Chronologie, die ausreichend durch chronometrische Daten untermauert wäre. Da generell Schriftzeugnisse und zumeist auch stratigraphische Befunde fehlen, kann in vielen Fällen nur mit Stilabfolgen gearbeitet werden. Das sich daraus ergebende dringende Desiderat an Datierungen soll nun durch physikalische Methoden wie Radiokohlenstoff (^{14}C) - sowohl in ihrer klassischen Variante als auch als moderne Beschleuniger-Methodik AMS für kleinste Probenmengen - an biogenen Materialien und optische stimulierter Lumineszenz an Gesteinen sowie an Keramik gedeckt wer-

den. Ein besonderes Ziel ist dabei die numerische Datierung der bekannten *Geoglyphen* von *Nasca*. Bisher konnten diese Erdzeichnungen mit Hilfe archäologischer Merkmale nur grob zeitlich eingeordnet werden. Durch eine neuartige Lumineszenzmethodik wird nun zum ersten Mal versucht, die Schaffung der *Geoglyphen* direkt zu datieren.



Abbildung 4.33: Geoglyphe (Erdzeichnung) auf der Hochfläche von Cerro Llipata bei Palpa/Peru (oben). Die geometrischen Formen sind z.T. nur aus großer Höhe in ihrem vollen Umfang zu erfassen. Sie wurden von den Menschen der Nasca-Kultur durch Umlagerung der meist dunklen Steine und Freilegen des helleren Wüstenbodens hervorgebracht. Dabei wurden immer wieder belichtete Flächen quarz- und feldspathaltiger Gesteine abgedunkelt, die nun die numerische Datierung der Scharrbilder ermöglichen sollen (unten).

Bei der Datierung wird die Tatsache ausgenutzt, dass das latente Lumineszenzsignal in den Gesteinsmineralen Quarz und Feldspat durch Lichteinwirkung gelöscht wird. Da dieses Signal durch die natürliche Radioaktivität wieder aufgebaut wird, kann die vom Mineral absorbierte Energie (Dosis) als ein Maß für die Bestrahlungsdauer (Alter) dienen. Wird ein solches angeregtes Mineral optisch stimuliert, z. B. durch einen Laser, leuchtet es kurz auf - eine Erscheinung, die als optisch stimulierte Lumineszenz (*OSL*) bezeichnet wird. Zusammen mit der Information über die Dosisleistung (Dosis pro Zeit), der das Mineral ausgesetzt war, kann der Zeitpunkt der letzten Belichtung berechnet werden. Die *Geoglyphen* wurden angelegt, indem die Gesteine der Wüstenoberfläche

zur Seite geräumt wurden, wobei die Gesteinsoberflächen dem Tageslicht ausgesetzt gewesen waren. Nach dem Niederlegen der Gesteine blieb die Unterseite vom Licht abgeschirmt.

Unter der Voraussetzung, dass der Stein seither nicht mehr bewegt wurde, kann mit Hilfe des Lumineszenzsignals aus Quarz- und Feldspatmineralen dieser abgedunkelten Gesteinsoberfläche die Anlage der Erdzeichnungen datiert werden. Es versteht sich von selbst, dass die Beprobung im Dunkeln, also nachts vorgenommen werden muss. Dazu werden die Steine zunächst aus dem Boden herausgezogen. Dann werden drei bis vier kleine Kerne aus der Unterseite der Steine gebohrt und lichtdicht verpackt. Die Probenahme erfolgt quasi zerstörungsfrei, denn die Steine werden wieder in ihre ursprüngliche Position zurückgesetzt. Unser neuer Ansatz besteht darin, die Lumineszenz und die Dosisleistung der Minerale in ihrem Gesteinsverbund zu messen.

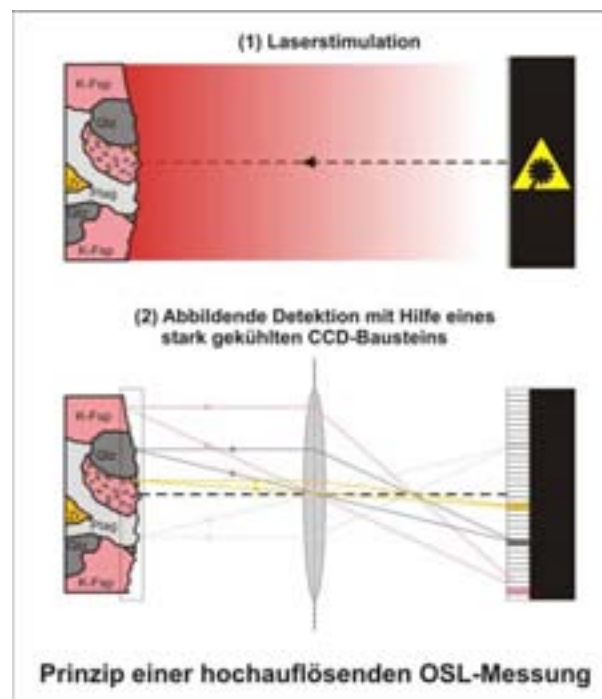


Abbildung 4.34: Schematische Darstellung einer Lumineszenz-Messung: die polyminerale Gesteinsoberfläche (links) hat beim natürlichen radioaktiven Zerfall freierwerdende Energie gespeichert. Nach Stimulation mit einem Laser (1) wird ein Teil dieser Energie als sichtbares Licht abgegeben. Dieses schwache Leuchten der Probe wird durch eine abbildende Optik und einen hochauflösenden Detektor erfasst (2).

Gesteinsoberflächen bestehen meist aus einem komplexen Mineralgemisch. Die darin enthaltenen Quarze und Feldspäte besitzen individuelle Lumineszenz- und Dosisleistungseigenschaften. Und selbst innerhalb einer Mineralart kommt es u.a. aufgrund von Schwankungen im Gehalt von Haupt- oder Spurenelementen zu erheblichen Variabilitäten. Diese Problematik bewog uns, die Dosis sowie Dosisleistung mikroskopisch ortaufgelöst zu bestimmen. Die technischen Möglichkeiten zum Nachweis sehr

geringer Lichtintensitäten haben sich in den letzten Jahren verbessert. So bieten mit flüssigem Stickstoff gekühlte, hintergrundbeleuchtete *CCD*-Bausteine heute nicht nur bessere Quantenausbeuten als Photomultiplier, sondern liefern darüber hinaus auch eine hochauflösende Bildinformation (Digitalkamera). Dies ermöglichte die Entwicklung eines Gerätes, das mit Hilfe einer lichtstarken Optik das Lumineszenzleuchten einer Probe auf einen hochempfindlichen Chip abbildet. Der Chip besteht in unserem Fall aus 363000 Bildpunkten, die unabhängig voneinander Photonen zählen können und jeweils einen etwa 25 mal 25 μm großen Bereich der Probe abdecken. Wenn genügend Lumineszenzintensität vorhanden ist, kann für jeden dieser winzigen Bereiche die Dosis bestimmt werden.

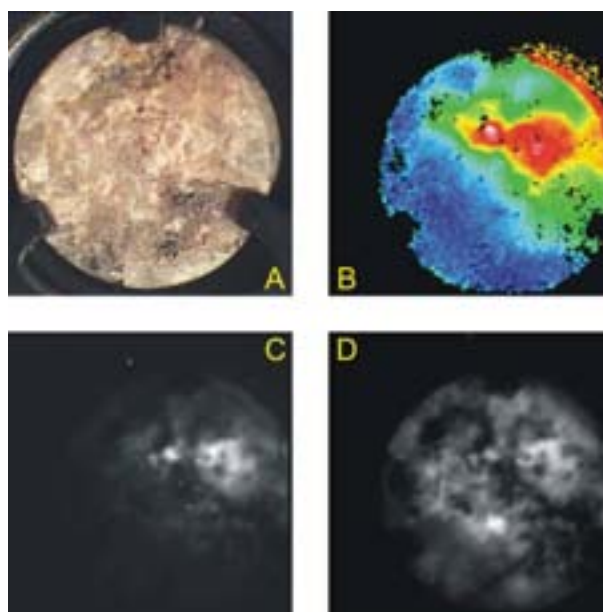


Abbildung 4.35: Hochauflösende Lumineszenzmessungen an einer Gesteinsoberfläche (A) aus einer Wehrmauer der Burg Lindenfels im Odenwald. Aufnahme (C) zeigt das seit der Errichtung in dem Granit aufgebaute Lumineszenzsignal. Es wird mit dem Signal verglichen, das durch eine gleichmäßige radioaktive Bestrahlung, also eine künstliche Alterung im Labor entstanden ist. Dadurch ist es möglich, die Menge der gespeicherten Energie (Dosis) für jeden Bildpunkt auszuwerten (B) und bildhaft für die verschiedenen Minerale des Gesteins darzustellen. Diese an einem Objekt bekannten Alters getestete Methodik soll nun auf die Geoglyphen von Palpa angewendet werden.

Ein solches Datierungsverfahren ist allerdings nur dann wirklich sinnvoll, wenn die Dosisleistung auf einer äquivalenten Skala gemessen werden kann. Dies geschieht derzeit für die relevanten Radionuklide mit neutroneninduzierten Kernspaltspuren für Uran und Thorium sowie mit der Elektronenmikrosonde für Kalium.



Kapitel 5

Einzelberichte zur Formanalyse

5.1 Hochoflösende Farbholographie für die Archäologie

Gert von Bally, Holger Deleré, Dieter Dirksen und Walter Sommerfeld

Förderkennzeichen 03VB9MU1 (01.11.96-31.10.99)

Wichtige Fundstücke für die Erforschung alter Kulturen werden weltweit in Museen verstreut aufbewahrt. Ein Transport aus dem Museum heraus ist in der Regel ohne besondere Schwierigkeiten nicht realisierbar. Das führt zu der Situation, dass viele Objekte dem Forscher für seine Untersuchungen nicht zur Verfügung stehen. Fotografien können zwar einzelne Details der Fundstücke dokumentieren - die räumliche, d.h. dreidimensionale Struktur vermögen sie jedoch nicht wiederzugeben. In vielen Fällen ist sie es aber gerade, die eine detaillierte Auswertung erst ermöglicht.

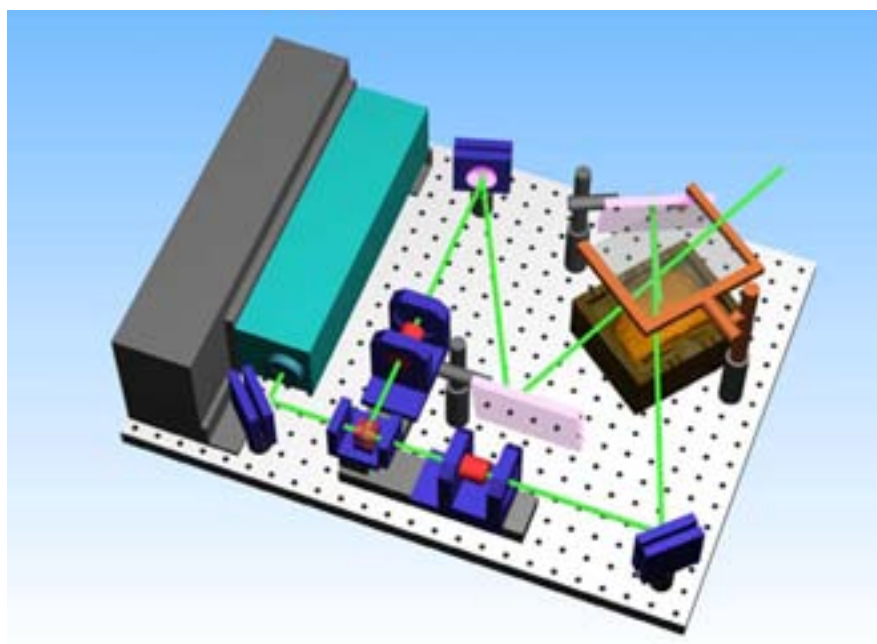


Abbildung 5.1: Mit der mobilen holographische Kamera können Objekte vor Ort aufgezeichnet werden.

Ein typisches Beispiel für diese Problematik bieten die Keilschrifttafeln, die einzigartige Dokumente der alten Kulturen beispielsweise des Zweistromlandes, mit bekannten Zentren wie Babylon oder Ur, darstellen. Viele dieser frühen Schriftdokumente sind noch nicht entziffert und aufgrund der teilweise filigranen Strukturen ist dies anhand von Fotos häufig auch nicht, oder nur unter großen Schwierigkeiten, die natürlich Irrtümern Vorschub leisten, möglich. Hinzu kommt, dass sich ein erheblicher Teil dieser Fundstücke an Orten befindet, die aufgrund der politischen Situation ohnehin nur einen beschränkten Zugang erlauben. Aber auch für viele andere wertvolle oder fragile Kulturgüter besteht ein Bedarf an einer Dokumentationsform, die die räumliche Struktur des Objektes mit einschließt.

An dieser Stelle kann nun die Holographie einen wichtigen Beitrag leisten, jene optische Technik der dreidimensionalen Wiedergabe, die 1948 von Dennis Gabor (Nobelpreis 1971) entwickelt wurde, und die den meisten von den kleinen Hologrammen auf Bankkarten und ähnlichem bekannt sein dürfte. Bei diesem Verfahren wird ein Gegenstand auf einer speziellen Fotoplatte aufgezeichnet, indem sowohl die Fotoplatte als auch der Gegenstand mit Laserlicht beleuchtet werden. Überlagern sich diese beiden Lichtfelder auf der Fotoplatte entsteht - bedingt durch die speziellen Eigenschaften des Laserlichts - ein mikroskopisch feines Muster aus hellen und dunklen Streifen. Wird die Fotoplatte nach der Entwicklung mit Laserlicht oder - je nach angewandter Technik - auch mit *normalem* Licht ausgeleuchtet, erscheint der aufgezeichnete Gegenstand als plastische, dreidimensionale Rekonstruktion - und wenn die Aufzeichnung mit den drei Grundfarben erfolgte - auch in Farbe.



Abbildung 5.2: *Fragmente eines Originalobjektes, die zum Beispiel in verschiedenen Museen oder Sammlungen aufbewahrt werden, können vor Ort getrennt voneinander holographisch aufgezeichnet und in einem modifizierten Kopierprozess am Labor für Biophysik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, auf eine einzige Hologrammplatte übertragen werden (holographische Rekombination) Die Abbildung zeigt die vollständige sumerische Tontafel, aus den Fragmenten zusammengesetzt mit mikroskopischer Detailgenauigkeit, ohne dass die Bruchstücke an einem Ort zusammengetragen werden mussten.*

Diese Technik wird nun in einem gemeinsam von Physikern des Labors für Biophysik der Universität Münster und Archäologen der Universität Marburg betriebenen Forschungsprojektes dazu benutzt, kulturhistorische Objekte dreidimensional zu dokumentieren und zu archivieren. Dazu wurde eine mobile holographische Kamera entwickelt

mit der vor Ort in Museen in aller Welt Objekte, wie die schon erwähnten Keilschrifttafeln, aufgezeichnet werden können (s. Abb. 5.1).

Abbildung 5.2 zeigt eine sumerische Tontafel, die vom rekonstruierten Hologramm aufgenommen wurde. Sowohl die Farben der Tafel als auch ihre plastische Form sind darin gespeichert und lassen ein Betrachten aus verschiedenen Blickwinkeln zu. Damit wird es nun auch möglich, die Schrift wie beim Original zu entziffern, indem man das Hologramm dreht und wendet, um auch kleinste Vertiefungen und andere Strukturen erkennen zu können.

Bestimmte Hologrammtypen lassen sich darüber hinaus, wie ein Foto vom Negativ, kopieren. Damit wird es möglich, ein holographisches Archiv anzulegen, in dem die Originalvorlagen aufbewahrt und bei Bedarf für Interessenten wie Museen oder Forschungseinrichtungen Kopien angefertigt werden. Auch lassen sich mit dieser Technik entfernt aufbewahrte Fragmente einzeln aufzeichnen und optisch wieder rekombinieren.



Abbildung 5.3: *Computerrekonstruktion der Oberfläche eines holographisch aufgezeichneten Objektes.*

Für manche Analysen werden aber - über den visuellen Eindruck hinaus - genaue quantitative Daten benötigt. Ein Beispiel ist die *Digitalisierung* eines Gegenstandes, d.h. die Bestimmung eines dichten Netzes von Oberflächenkoordinaten, um daraus im Computer ein dreidimensionales, *virtuelles* Abbild zu berechnen, das dann analysiert oder auch über das Internet als Bestandteil eines *virtuellen Museums* der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden kann. Falls das Original hierfür nicht zur Verfügung steht, kann diese Aufgabe auch mit dem Hologramm gelöst werden. Dafür wurde eine speziell angepasste Form der Stereobildauswertung (Photogrammetrie) entwickelt, die es erlaubt, auch bei holographisch aufgezeichneten Objekten präzise Koordinaten zu bestimmen. Sind auf diese Weise genügend Oberflächenpunkte vermessen worden, kann eine Computerrekonstruktion der Oberfläche erfolgen, die durch Überlagerung mit fotografischen Aufnahmen ebenfalls eine farbige und plastische Wiedergabe ermöglicht (s. Abb. 5.3).



Abbildung 5.4: *Holographische Kamera im Einsatz.*

Mit der in diesem Projekt erstmalig durchgeführten Adaption holographischer Techniken an die Anforderungen im Bereich der Altorientalistik und Archäologie wurden den auf diesen Gebieten arbeitenden Wissenschaftlern somit neue Hilfsmittel und Werkzeuge zur Verfügung gestellt, die, als Beitrag der Naturwissenschaften, bei der Erforschung und Dokumentation dieses bedeutenden kulturellen Erbes helfen.

5.2 Fundstücke in der virtuellen Realität - dreidimensionale archäologische und historische Befunddokumentation durch optische Digitalisierung

Dieter Dirksen, Carsten Thomas, Zoltán Böröcz, Gert von Bally, Peter Funke, Sabine Rieckhoff und Joseph Maran

Förderkennzeichen 03VB9MU2 (01.11.97-30.06.01)

Die klassischen Hilfsmittel zur Dokumentation archäologischer Grabungssituationen bestehen in der Anfertigung von Zeichnungen und in der punktuellen Vermessung einzelner Merkmale mit mechanischen Hilfsmitteln. Genauso ist es in der Epigraphik, d.h. in der wissenschaftlichen Analyse historischer Inschriften, wie sie etwa auf Steinen hinterlassen wurden, üblich, das Schriftrelief durch ein rein mechanisches Abdruckverfahren - den Abklatsch - zu dokumentieren, bei dem ein feuchtes Papier in die Vertiefungen hineingedrückt wird. Diese Techniken sind, obwohl sie den Archäologen seit langer Zeit wertvolle Dienste leisten, mit gravierenden Einschränkungen verbunden: Zum einen sind sie sehr zeit- und arbeitsintensiv, sowie - im Falle der Grabungsdokumentation - auf eine relativ geringe Zahl von Merkmalen beschränkt, zum anderen ist die Abdrucknahme bei empfindlichen Oberflächen nicht unproblematisch und die entstehenden Abklatsche nicht ohne weiteres kopierbar. Eine der wichtigen Herausforderungen des Informationszeitalters besteht aber gerade darin, Informationen computergerecht aufzubereiten, um sie der Fachwelt und dem Publikum zugänglich zu machen und bei ihrer Analyse auf die vielfältigen Möglichkeiten der Informationstechnik zurückgreifen zu können.



Abbildung 5.5: Treppe zwischen der Ober- und Unterburg auf dem Grabungsgelände in Tiryns, Griechenland.

Um diesem Ziel ein Stück näher zu kommen, wurde das Vorhaben *Aktive optische topometrische Verfahren für die Epigraphik und Archäologie* als interdisziplinäres Projekt einer Arbeitsgruppe aus Archäologen, Historikern und Physikern der Universitäten

Münster, Heidelberg und Leipzig initiiert. Das Ziel des Projektes liegt in der Erweiterung des in den Kulturwissenschaften zur Verfügung stehenden Arsenal an Verfahren zur Befunddokumentation und -analyse durch digital-optische 3D-Messtechniken. Mit den vorliegenden Ergebnissen werden die klassischen Dokumentationsmethoden wie Zeichnung und Abdrucktechniken durch naturwissenschaftlich-technische Lösungsbeiträge ergänzt.

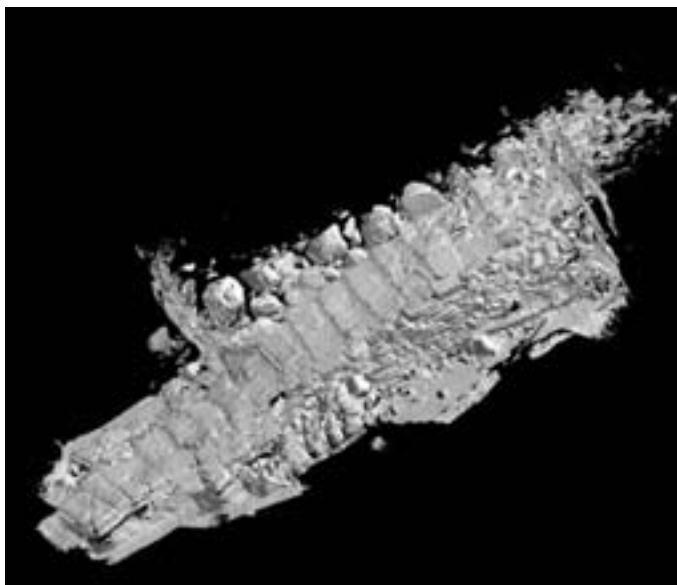


Abbildung 5.6: Die topometrische Messung an der in Abb. 5.5 dargestellten Treppe ergab einen Datensatz von ca. 30 Mio. 3D-Koordinatenpunkten, die das Objekt mit einer Auflösung von 1 - 3 mm wiedergeben.

Das topometrische Messverfahren, d.h. ein Verfahren, mit dem die Form einer Oberfläche vermessen wird, das dabei zum Einsatz kommt, ist die Streifenprojektionstechnik. Dabei handelt es sich im Prinzip um ein Stereobildverfahren: Mit zwei elektronischen Kameras wird das Untersuchungsobjekt gleichzeitig aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen. Ein zusätzlicher Projektor (ähnlich einem Diaprojektor) projiziert dabei eine Folge unterschiedlicher Lichtmuster aus parallelen hellen und dunklen Streifen auf das Objekt. Dadurch, dass die Streifen dem Profil der Oberfläche folgen, erscheinen sie aus dem Blickwinkel der jeweiligen Kamera verzerrt. Diese Verzerrungen beinhalten somit Informationen über die räumliche Oberflächenstruktur.

Ein wichtiger Teil der Arbeiten besteht in praktischen Tests des Systems. Dafür wurden bereits umfangreiche Felderprobungen, zum überwiegenden Teil in internationaler Zusammenarbeit an bedeutenden kulturhistorischen Objekten, durchgeführt. Dabei sind besonders die Grabungen an der von der *UNESCO* zum Weltkulturerbe erklärten antiken Burg von Tiryns, Griechenland, und am gallo-römischen Oppidum des Centre Archéologique Européen du Mont Beuvray, Frankreich, hervorzuheben. Abbildung 5.5 zeigt eines der im Zuge dieser Kampagnen vermessenen Objekte.

Mit einer Grundfläche von mehr als 20 m² handelt es sich um eines der größten, bislang mit dieser Technik vermessenen Objekte. Aber es sind nicht nur die großen Objekte, für die dieses Verfahren eine neue Form der Dokumentation ermöglicht: in Abbildung 5.7 ist ein etwa 5 cm hoher Terracotta-Kopf (Fund aus der Grabung in Stratos, Griechenland) als digitale Rekonstruktion dargestellt. Dabei wurden für die Gesamtaufnahme mehrere Einzelmessungen durchgeführt, deren Teilresultate hier in unterschiedlichen Farben wiedergegeben werden.

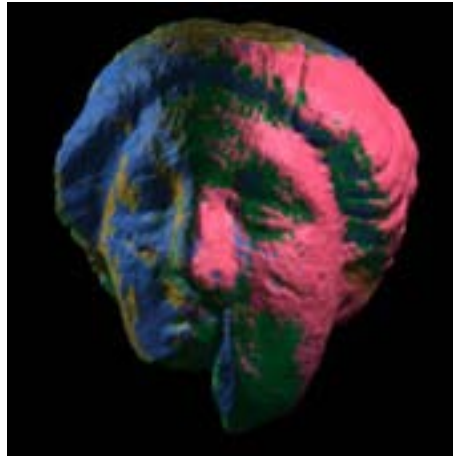


Abbildung 5.7: *Digitale Rekonstruktion eines ca. 5 cm hohen Terracotta-Kopfes aus der Grabung in Stratos, Griechenland.*

Durch die erarbeiteten Mess- und Auswertetechniken konnte das Spektrum der in Epigraphik und Archäologie verfügbaren Dokumentations- und Analysewerkzeuge wesentlich erweitert werden. Sie eröffnen darüber hinaus weitreichende Möglichkeiten sowohl zum Austausch wissenschaftlicher Daten mittels digitaler Netzwerke - wovon besonders internationale Kooperationen profitieren könnten - als auch für die multi-mediale öffentliche Präsentation aktueller Forschungsergebnisse.



Kapitel 6

Einzelberichte zur Datierung

6.1 Radiolumineszenz von Feldspäten soll neues Licht auf die altsteinzeitliche Vergangenheit des Menschen in Mitteleuropa werfen

Gunter Erfurt und Matthias R. Krbetschek

Förderkennzeichen 03KR9FR2 (01.01.99-31.03.03)

Einleitung

Die zeitliche Einordnung des ersten Erscheinens, der Entwicklung und Migration des altsteinzeitlichen Menschen in Mitteleuropa sind von großer anthropologischer und kulturhistorischer Bedeutung. Zur Beantwortung dieser Fragen werden seit längerem auch lumineszenzdosimetrische Verfahren der Datierung von archäologischen Objekten und jungen (quartären) geologischen Bildungen benutzt. Lumineszenzphänomene in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen sind sehr vielfältig und deren Nutzung aus unserem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Das Leuchten eines Fernseh- oder Computerbildschirms, einer Energiesparlampe oder der Kontrolleuchten eines elektronischen Gerätes sind nur einige Beispiele. Etwa 3/4 der mehreren Tausend in der Natur vorkommenden Minerale lumineszieren, wenn man sie mit ionisierender Strahlung anregt, die z.B. bei der Umwandlung radioaktiver Nuklide entsteht (Radiolumineszenz, s. Abb. 6.1).

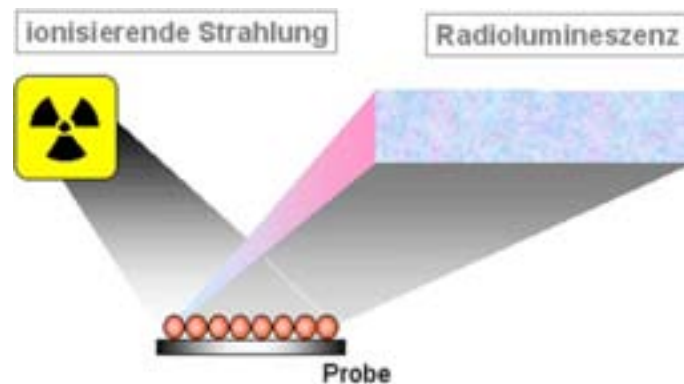


Abbildung 6.1: *Unter der Einwirkung von ionisierender Strahlung (natürlich sowie künstlich) emittieren Minerale Licht (Radiolumineszenz). Dessen Intensität steht im direkten Zusammenhang mit der absorbierten Strahlungsenergie.*

Die dabei erzeugte Umverteilung (*Unordnung*) von Ladungsträgern (z.B. Elektronen) erzeugt gleichzeitig ein auch nach Millionen von Jahren abrufbares Signal, welches Aufschluss über die absorbierte Strahlungs-dosis (*Paläodosi*s) gibt. Bei den Lumineszenz-Altersbestimmungen nutzt man dafür sowohl ein allorts vorhandenes natürliches Feld ionisierender Strahlung, als auch die beschriebene Lumineszenzfähigkeit besonders an Quarzen und Feldspäten. Da diese als Hauptbestandteile vieler quartärer Gesteine

und besonders häufig auch in Objekten von archäologischem Interesse vorzufinden sind (Bau- und Gebrauchskeramik, Archäosedimente, Feuersteinartefakte u.a.), stellen sie gleichzeitig natürliche Strahlungsdosimeter dar. Bei konventionellen Lumineszenz-Altersbestimmungen wird das oben angesprochene Signal durch thermische (Thermolumineszenz, *TL*) oder optische Stimulation (Optisch Stimulierte Lumineszenz, *OSL*) im Labor abgerufen. Über entsprechende Kalibrierungen bestimmt man daraus die sog. *Paläodosis*, also genau die Energiemenge, die seit dem zu datierenden Ereignis gespeichert wurde. Wichtig ist, dass dieser Zeitpunkt u.a. durch thermische Einwirkung oder Lichtexposition fixiert wurde. Das Strahlungsfeld, durch welches die *Paläodosis* aufgebaut wird, wird vor allem durch die Umwandlung natürlicher Radionuklide (und einem geringen Anteil kosmischer Strahlung) gebildet. Seine Stärke (Energiedosisleistung) lässt sich aus deren Konzentration in der Probe, die man mit verschiedensten Methoden bestimmen kann (z.B. Gammaskopie, Massenspektrometrie) berechnen. Das Alter ergibt sich dann aus dem Quotienten der *Paläodosis* und der Stärke des natürlichen Strahlungsfeldes (Dosis pro Zeit).

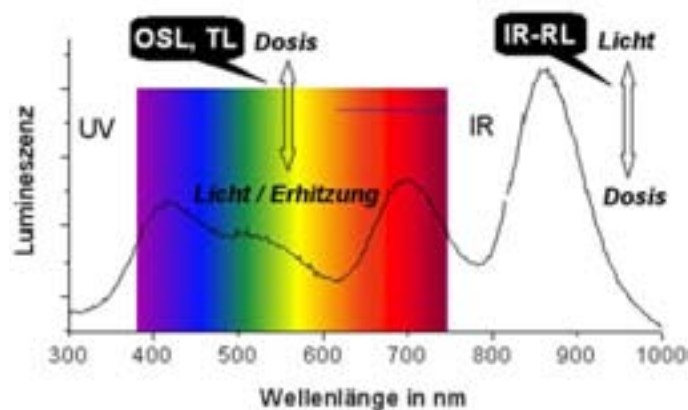


Abbildung 6.2: Das neu entwickelte Infrarot-Radiolumineszenz-Datierungsverfahren (IR-RL) nutzt ein sehr langzeitstabiles Signal (bis ca. 300.000 Jahre) im infraroten Emissionsbereich von Kali-Feldspat. Im Vergleich zu konventionellen Methoden verringert sich die Lumineszenzausbeute mit steigender Absorption von Strahlungsenergie aufgrund anderer physikalischer Vorgänge.

Neue elektronische Unordnung im Mineral kann zeitliche Ordnung im Paläolithikum schaffen

Konventionelle Altersbestimmungen mittels *TL* oder *OSL* haben meist ihre Datierungsobergrenze bei ca. 100.000 Jahre. Damit sind Fragen des ersten Erscheinens des Menschen in Mitteleuropa und dessen Kulturentwicklung und -ausbreitung nicht sicher zu beantworten. Gleichzeitig besteht - betrachtet man die Befunde der bekannten geologisch-archäologischen Aufschlüsse - gegenwärtig keine Aussicht, die offenen Probleme ohne diese Art physikalischer Altersbestimmung klären zu können. Vor wenigen Jah-

ren wurde ein bisher unbekanntes Lumineszenzphänomen an Kalifeldspäten entdeckt, dessen Anwendung als Datierungsmethode das Vermögen besitzt, einen Altersbereich bis ca. 300.000 Jahre zu bestimmen und offene archäo- und geochronometrische Fragen des Paläolithikum zu beantworten. Dieses Verfahren wird aufgrund seiner Emissionswellenlänge im infraroten Bereich sowie der Lumineszenzanregung durch ionisierende Strahlung als Infrarot-Radiolumineszenz (*IR-RL*) bezeichnet (s. Abb. 6.1 und 6.2).

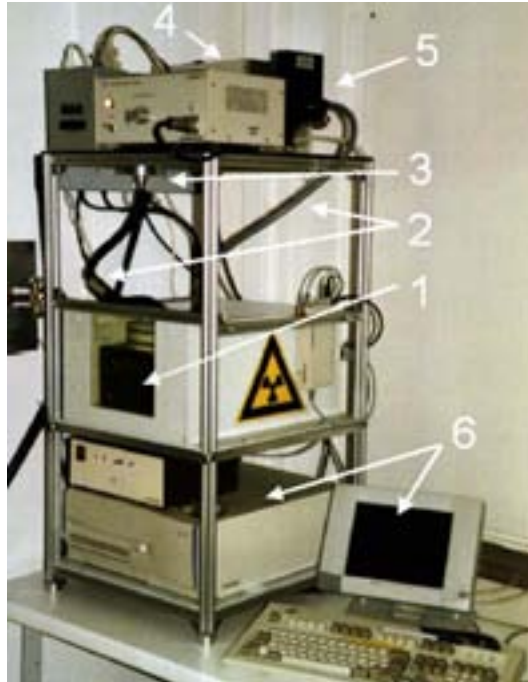


Abbildung 6.3: *Automatisiertes IR-RL-Messsystem: 1-Messkammer mit Bestrahlungs- bzw. Lumineszenzanregungsquellen, 2-flexible Faserlichtleiter für Lumineszenzlicht und Bleichungslicht, 3-Bleichungslampe mit sonnenähnlichem Spektrum zum Rücksetzen der Lumineszenzsignale, 4- Sekundärelektronenvervielfacher für breitbandige Lumineszenzdetektion, 5-automatischer Filterwechsler zum Einstellen des Detektionsbereiches, 6-Steuerrechner.*

Der physikalische Unterschied zu konventionellen Lumineszenzmethoden liegt darin, dass keine sekundäre Anregung der Lumineszenz durch Wärme bzw. Licht (*TL*, *OSL*) erfolgt. Vielmehr wird die Lumineszenz gemessen, die während der Bestrahlung mit ionisierender Strahlung frei wird. Ein weiterer Unterschied ist der gegenläufige Zusammenhang zwischen Lumineszenzausbeute und Strahlungsabsorption - je mehr davon absorbiert wird, desto weniger luminesziert die Probe (s. Abb. 6.2). Der Prozess der Ladungsträgerumverteilung, der im Vergleich zu anderen Lumineszenzmethoden mathematisch-physikalisch wesentlich einfacher und genauer beschrieben werden kann, geht mit steigender Absorption der Strahlung kontinuierlich zurück, und die Lumineszenzausbeute erreicht schließlich ein Minimum (siehe Fallbeispiel unten). Eine weitere, wichtige Voraussetzung zur Anwendung der *IR-RL* als Datierungsmethode ist die sehr schnelle Beeinflussung des Lumineszenzsignales durch Lichtexposition, um den Zustand

zum Zeitpunkt der Formationsbildung zu rekonstruieren. Um bei den konventionellen Methoden (*TL*, *OSL*) Lumineszenz zu erzeugen, muss die Umverteilung der Ladungsträger im Labor wieder rückgängig gemacht werden. Dieser Vorgang kann jedoch durch verschiedene Einflüsse gestört sein und das Datierungsergebnis, insbesondere bei alten Proben, verfälschen. Hingegen wird bei der *IR-RL* durch weitestgehende Simulation der natürlichen Vorgänge im Labor der Grad der Umverteilung direkt und kontinuierlich gemessen - ein grundlegend physikalischer Vorteil!

Entwicklung von automatischer Infrarot-Radiolumineszenz-Messtechnik

In vorangegangener Forschung konnten einige wichtige Grundlagen dieser neuen Datierungsmethode untersucht werden. Ausserdem wurden bereits präzisere Alterswerte an einzelnen paläolithischen Fundstellen erarbeitet (z.B. Paläolithfundstelle Gröbern bei Leipzig). All diese Messungen wurden mit einem Spektrometersystem aufgezeichnet, weshalb quantitative Auswertungen sehr aufwendig waren. Erstes Ziel war daher, das neue Verfahren messtechnisch soweit voranzubringen, dass weitere physikalische Grundlagenuntersuchungen und spätere Routinedatierungen effizient durchgeführt werden können (s. Abb. 6.3).

Mit dem eigens entwickelten Gerät können zeitgleich 10 Proben von nur ca. 2 mg untersucht werden, wobei alle Schritte der Rekonstruktion der *Paläodosi*s im Gerät durchgeführt werden, was viele Fehlerquellen konsequent ausschließt. Die für die Datierung wichtige Stimulation der Lumineszenz sowie die Rekonstruktion der Umverteilung der Ladungsträger im Mineral wird durch den Einsatz von 10 Cäsium-137-Konversionselektronen-Strahlern durchgeführt. Im Vergleich zu konventionellen Lumineszenz-Datierungsmethoden, die mit ca. 6-10 Messpunkten (Lumineszenz in Abhängigkeit der absorbierten Dosis) auskommen müssen, um die *Paläodosi*s unter komplizierten Bedingungen rekonstruieren zu müssen, sind, mit der damit verbundenen Erhöhung der Genauigkeit, mit der *IR-RL* bis zu 1000 Messpunkte einfach zu bestimmen. Die Lumineszenzmessung erfolgt in bis zu 4 verschiedenen Wellenlängenbereichen, die mittels optischer Filter je nach Einsatzfall bestimmt werden. Da die Intensität der *IR-RL* extrem gering ist, erfolgt die Lichtdetektion mit einem sogenannten Sekundärelektronenvervielfacher, der schon aus kleinsten Mengen an ultravioletten, sichtbaren und infraroten Lichtphotonen messbare, elektrische Impulse erzeugt.

Fallbeispiel und Ausblick

Auch wenn noch nicht alle Fragen der sehr aufwendigen Energiedosiskalibrierung der verwendeten Cs-137-Quellen geklärt sind, erfolgte bereits eine große Anzahl von Messungen an Proben aus Paläolithfundstellen. So wurde z.B. die Erfassung des Zusammenhanges zwischen *IR-RL* und absorbierter Strahlungsenergie aus Proben der Paläolithfundstellen im Bereich der Braunkohlen-Tagebaue Markleeberg-Nord (bei Leipzig), Gröbern (bei Leipzig), Rösa-Sauselitz (s. Abb. 6.4) und vielen anderen archäologisch relevanten Grabungen abgeschlossen.

All diesen Fundstellen ist gemein, dass die quartären Sedimentkörper archäologische Artefakte enthalten, deren archäometrische bzw. geoarchäologische Einordnung aufgrund ihres geschätzten hohen Alters erschwert ist. Sobald die noch bestehenden physikalischen Probleme (z.B. Energiedosiskalibrierung) vollständig aufgeklärt sind, eröffnet diese neue Methode ein viel versprechendes Werkzeug zur Bestimmung bisher nicht erfassbarer Altersbereiche unter Nutzung der Lumineszenztechnik. Gelingt es z.B. die Entstehung der umgebenden Sedimentkörper der Artefakte mit der *IR-RL* zu datieren, dann könnte dies die altsteinzeitliche Vergangenheit des Menschen in Mitteleuropa tatsächlich aufklären helfen.

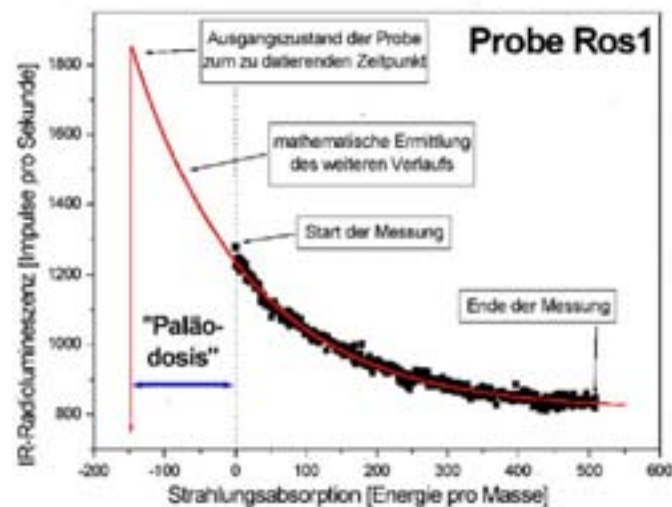


Abbildung 6.4: IR-RL-Messung einer Sedimentprobe aus der Fundstelle im Bereich des Tagebaus Rösa-Sauselitz. Die Bestimmung des Zusammenhanges zwischen Strahlungsabsorption und Lumineszenzausbeute erfolgte durch die Messung an 400 Punkten (schwarze Punkte). Die Ermittlung der Paläodosis erfolgt nach der Nullsetzung des Lumineszenzsignals als Simulation des Ausgangszustandes des Sedimentkörpers zum Zeitpunkt seiner Entstehung. Damit ist die seit der Entstehung bis zum Zeitpunkt der Probenahme absorbierte Strahlungsenergie bestimmt und ein Alter der Probe ermittelbar.

6.2 Eine physikochemische Uhr in Eiweißen zur Datierung von Skelettfunden? - Revision der Aminosäurendatierung

Stefanie Ritz-Timme und Reimer Dobberstein

Förderkennzeichen 03RTX3KI (01.06.01-31.05.04)

Einleitung

Die Konstituierung eines wissenschaftlich fundierten Menschenbildes steht im Mittelpunkt des Erkenntnisinteresses der geistes-, kultur- und gesellschaftswissenschaftlichen Humanwissenschaften. Dabei ist es von besonderer Bedeutung, den Menschen in seiner Geschichte zu sehen. Zu den geisteswissenschaftlichen Schlüsselfragen gehören daher Problemstellungen wie die Besiedlungsgeschichte der Kontinente, der Ursprung menschlichen Kunstschaffens, des Jenseitsglaubens oder des Schamanismus. Die Beantwortung dieser Fragen erfordert empirisch abgesicherte Aussagen und dementsprechend eine möglichst genaue Datierung der verfügbaren archäologischen und fossilen Quellen. Jeglicher methodischer Fortschritt auf dem Gebiet der Datierung von Skelettfunden ist potentiell mit einem geisteswissenschaftlichen Erkenntnisgewinn verbunden. Ohne eine zuverlässige Datierung bleibt die historische Bedeutung wichtiger Funde im Dunkeln. Die geisteswissenschaftliche Relevanz suffizienter Datierungsmethoden für Skelettfunde kann somit gar nicht hoch genug bewertet werden. Das derzeit zuverlässigste Verfahren, die Radiocarbon(^{14}C)-Methode, ist nicht in allen Fällen einsetzbar; der Bedarf an Alternativverfahren ist hoch.

Die Aminosäurendatierung: Nutzung einer physikochemischen Uhr in Eiweißen zur Datierung

Schon seit den 70er Jahren wird in Knocheneiweißen eine physikochemische Uhr vermutet, die zur Datierung von Skelettfunden genutzt werden kann. Das entsprechende Verfahren wurde als Aminosäurendatierung bezeichnet, weil es auf der Beurteilung von Aminosäurenveränderungen basiert, die während der Liegezeit zunehmend auftreten. Bei der Biosynthese menschlicher und tierischer Eiweiße werden ausschließlich *L-Aminosäuren* eingesetzt. Unter bestimmten Bedingungen kann eine spontane, nicht-enzymatische Umwandlung der *L-Aminosäurenreste* in ihre *D-Form* (Razemisierung) auftreten. Die am schnellsten razemisierende Aminosäure Asparaginsäure kann bereits im Verlauf des Lebens (d.h. bei 37°C über maximal ca. 100 Jahre) eine messbare Razemisierung zeigen; andere Aminosäuren razemisieren intravital nur wenig oder gar nicht. Nach dem Tod, unter völlig neuen physikochemischen Voraussetzungen und über lange Zeiträume, kommt es zur Razemisierung zahlreicher Aminosäuren und damit zu einer allmählichen Akkumulation der *D-Formen* mit zunehmendem Intervall nach dem Tod. Die Aminosäurendatierung basiert auf dem resultierenden Zusammenhang zwischen D-Aminosäuregehalt der untersuchten Gewebe und der Liegezeit. Das Verfahren wurde in den 70er Jahren euphorisch als Alternativmethode zur Radiocarbon(^{14}C)-Datierung

gefeiert. Nachdem es aber zu spektakulären Fehldatierungen gekommen war, wurde die Methode heftig kritisiert und als kaum akzeptabel angesehen.

Nach derzeitigem Wissensstand beruhen die Fehldatierungen offensichtlich darauf, dass der Einfluss der Eiweißkomposition der untersuchten Proben, die durch Zersetzungsprozesse (Degradation) bestimmt werden, unterschätzt wurde. Dadurch wurde die physikochemische Uhr der Aminosäuredatierungen falsch *kalibriert*. Nur durch Untersuchung von Proben mit bekannter, definierter Eiweißkomposition ist das Bezugssystem für die physikochemische Uhr in den Eiweißen *kalibriert*. Nur so können Aminosäuredatierungen zu brauchbaren Ergebnissen führen.

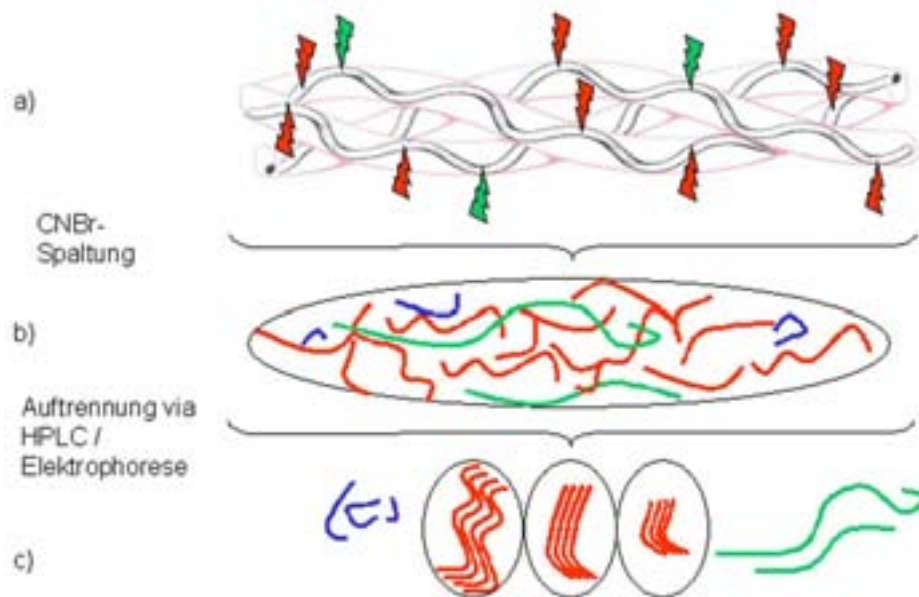


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der Präparation definierter Kollagenfragmente aus degradiertem Knochenmaterial: a) Durch Cyanbromid wird das Kollagenmolekül an definierten Stellen (rot gekennzeichnet) gespalten. Neben den möglicherweise bereits aufgrund natürlicher Degradationsvorgänge (an den grün gekennzeichneten Stellen) vorliegenden Bruchstücken entstehen dadurch definierte, bekannte Kollagenfragmente. b) In den Proben liegen jetzt definierte, bekannte Kollagenfragmente (rot) neben undefinierten, natürlichen Fragmenten (grün) sowie undefinierten, durch Kombination natürlicher Degradationsvorgänge und Cyanbromidwirkung entstandene Bruchstücke (blau) vor. c) Durch Hochdruckflüssigkeitschromatographie (HPLC) und Elektrophorese werden die definierten Kollagenfragmente (rot) nach Cyanbromidspaltung isoliert. Diese können zur Aminosäuredatierung herangezogen werden.

Revision der Aminosäuredatierung

Vor diesem Hintergrund wird im *Institut für Rechtsmedizin des Universitätsklinikums Schleswig-Holstein (Campus Kiel)* ein neues Verfahren zur Aminosäuredatierung erarbeitet, das auf der Analyse aufgereinigter, definierter Eiweißfraktionen basiert. Zielei-

weiß ist dabei Kollagen, das ca. 90 % der organischen Knochenmatrix entspricht. Als Ansatz zur Präparation definierter Kollagenfraktionen wurde die Spaltung mit Cyanbromid gewählt, die zu charakteristischen, definierten Fragmenten des Kollagens führt (s. Abb. 6.5).

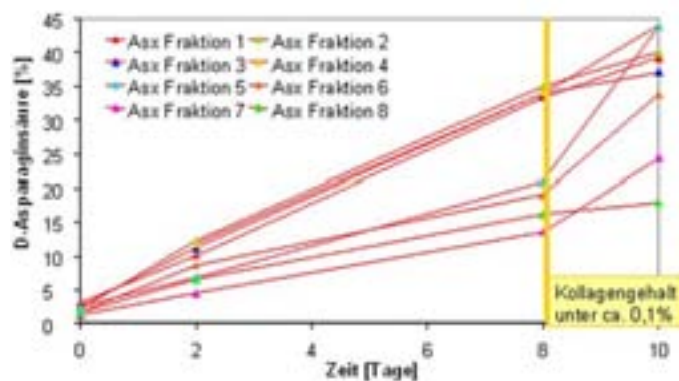


Abbildung 6.6: Elektrophoretische Darstellung des Kollagenfragmentmusters natürlich gealterter Knochenproben nach Cyanbromidspaltung (15 % Gel, Coomassie-Färbung). MG: Molekulargewichtsmarker (kD); 23, 500, 1700, 400: Liegezeit in Jahren. Das Bandenmuster entspricht unabhängig von der Liegezeit dem eines frischen Knochens. Dies gilt bis zu einem kritischen Degradationszustand, der in-vitro-Alterungsversuchen (Hitzeversuch) bei ca. 0,1 % Kollagengehalt lag.

Dabei musste zunächst untersucht werden, ob sich Kollagenfragmente nach Kollagen-spaltung mit Cyanbromid auch bei sehr alten Knochen präparieren lassen. Vor diesem Hintergrund wurden zunächst künstlich (im Hitzeexperiment) und natürlich gealterte Knochen untersucht. Es zeigte sich, dass auch in sehr altem, fortgeschritten abgebauten (degradierten) Knochen noch intaktes Kollagen enthalten ist, erkennbar an einem erhaltenen charakteristischen Fragmentmuster nach Spaltung mit Cyanbromid (s. Abb. 6.6).

Künstlich gealterte Knochenproben zeigen mit zunehmender Alterung einen Anstieg der *D*-Aminosäurenkonzentrationen in den Kollagenfragmenten nach Cyanbromidspaltung, wobei die Geschwindigkeit der Zunahme der *D*-Aminosäurenkonzentration fragmentspezifisch ist (s. Abb. 6.7).

Aufgrund der bislang erarbeiteten Daten ist davon auszugehen, dass Kollagenfragmente nach Cyanbromidspaltung als definierbare, auch bei fortgeschritten degradierten Knochen präparierbare Eiweißfraktionen als Untersuchungsmaterial zur Aminosäurendatierung eingesetzt werden können. Damit erscheinen eine Kalibrierbarkeit der physikochemischen Uhr in den Knocheneiweißen und eine Revision der Aminosäurendatierung möglich. Wie erfolgreich eine solche Revision sein kann, wird derzeit durch Untersuchung natürlich gealterter Knochen geklärt.

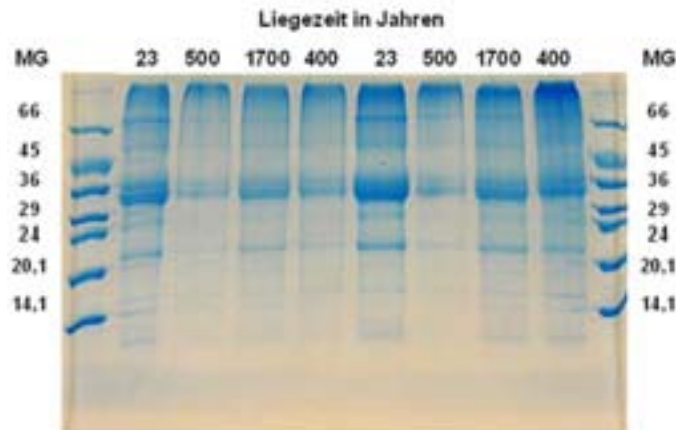


Abbildung 6.7: Anstieg des D-Asparaginsäuregehaltes mit zunehmender Alterung von Knochenproben im Hitzeversuch (90°C). Mit Asx Fraktion 1-8 sind unterschiedliche, mittels HPLC präparierte Kollagenfragmentpools gekennzeichnet. Ab Tag 10 des Hitzeexperiments war ein kritischer Degradationszustand mit einem Kollagengehalt von unter 0,1 % erreicht, ab hier konnten keine zuverlässig definierbaren Fragmentpools mehr untersucht werden. Nach zumeist nahezu linearem Anstieg der Werte bis Tag 8 fällt in einigen Fragmentpools ein sprunghaftes Ansteigen der Werte auf, was auf die degradationsbedingt inhomogene Eiweißzusammensetzung der Proben ab Tag 10 zurückzuführen sein dürfte.

Sollte es gelingen, die Aminosäurendatierung durch Untersuchung definierter Kollagenfragmente zu rehabilitieren und zu einem brauchbaren Datierungsverfahren zu machen, stünde ein hochinteressantes neues Instrumentarium zur Datierung von Skelettfunden zur Verfügung. Es ist zu erwarten, dass ein entsprechendes Verfahren auch Datierungen jenseits des von der Radiokarbon(^{14}C)-Methode erfassbaren Zeitintervalls (bis ca. 50.000 Jahre B.P.) ermöglicht. Darüber hinaus könnte es der Überprüfung bislang zweifelhafter oder umstrittener, geisteswissenschaftlich relevanter Datierungen dienen.

Wie wichtig und erstrebenswert eine solche neue Datierungsmethode wäre, lässt sich am Beispiel der *Neandertaler-Diskussion* darstellen: Der Neandertaler, ein hochspezialisierte pleistozäner Jäger, besiedelte das mittelpaläolithische Europa und Vorderasien. In diesem zwischen 200.000 und 40.000 Jahren B.P. zu datierenden Zeitraum gelangt die ^{14}C -Datierung an die Grenzen ihrer Anwendbarkeit. Eine Überprüfung der Datierungen durch ein suffizientes alternatives Datierungsverfahren für Skelettfunde wäre von unschätzbarem Wert, etwa bei der Rekonstruktion des kulturellen Verhältnisses von Neandertaler und modernem Menschen. Die Frage, ob an der Wiege des modernen Menschen die Ausrottung dieses stammesgeschichtlichen *Vetters* oder eine Vermischung mit ihm stand, berühren menschliches Selbstverständnis unmittelbar.

Kapitel 7

Einzelberichte zur Ortung

7.1 *SQUIDS* - Mit Supraleitertechnik auf den Spuren urgeschichtlicher Siedlungen

Tim Schüler, Andreas Chwala, Ronny Stolz, Rob Ijsselsteijn, Volkmar Schultze und Hans-Georg Meyer

Förderkennzeichen 03ME9JEN (01.05.99-30.04.02)

In den letzten zehn Jahren wurde aufgrund der Initiative des *Thüringischen Landesamtes für Archäologische Denkmalpflege* in Thüringen durch die intensive Befliegung mit Hilfe der Luftbilderkundung eine Vielzahl an neuen archäologischen Fundstellen entdeckt. Dabei handelt es sich zu einem überwiegenden Teil um flächenintensive Bodendenkmale wie Siedlungen, die zeitlich vom Neolithikum bis zum Mittelalter reichen. Dabei sind aber auch Erdwerke, das sind meist runde oder ovale Flächen, die durch einen einfachen oder zwei, manchmal auch noch mehr parallel laufende Gräben eingefasst werden. Die eingeschlossenen Flächen können beträchtliche Dimensionen erreichen, ein 1996 entdecktes Erdwerk bei Weimar umfasst z.B. ca. 16 Hektar.

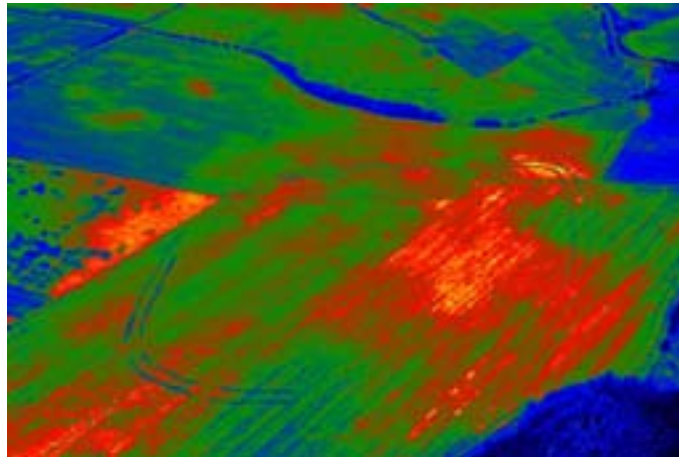


Abbildung 7.1: Falschfarben-Luftbild des neolithischen Doppelkreisgrabens bei Weimar. Mit einer Kantenlänge von ca. 400 m umschließt er eine Fläche von 16 Hektar.

Solche Grabensysteme wurden vor allem im Mittelneolithikum errichtet und sind mittlerweile aus mehreren Regionen in Zentraleuropa bekannt. Diese Anlagen finden in West- und Nordwesteuropa ihre Fortsetzung in modifizierter Form als Steinkreise. Nach bisherigem Kenntnisstand wurden diese Anlagen von mehreren mittelneolithischen Kulturen angelegt. Die Erforschung von Erdwerken gestattet somit wichtige Erkenntnisse über den geistigen und kulturellen Austausch zwischen den einzelnen Bevölkerungsgruppen in Europa und ist auch am *Thüringischen Landesamt für Archäologische Denkmalpflege* von besonderem Interesse, da solche Erdwerke in den letzten Jahren auch in Thüringen gefunden und beim Autobahn- und ICE-Trassenbau teilweise ausgegraben wurden.



Abbildung 7.2: Prototyp eines Hochtemperatur-SQUID-Gradiometers, das derzeit für den mobilen Einsatz optimiert wird. Das Hauptaugenmerk liegt dabei bei der mechanischen Stabilität.

Die geschlossene Untersuchung solcher großflächiger Bodendenkmale ist aber mit der konventionellen Methode der archäologischen Ausgrabung mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Neben der Luftbildprospektion, die meist nur Informationen von Teilbereichen der Objekte liefert, gibt es die Möglichkeit der näheren Untersuchung mit Hilfe von geomagnetischen Messungen. Dabei wird ausgenutzt, dass die Eisenminerale in der Verfüllung von Gruben, Gräben etc. durch Mikroorganismen unter sauerstoffreichen Bedingungen und Nährstoffzufuhr durch organische Reste verändert werden. Ein noch stärkerer Effekt wird durch Erhitzen des Bodens in oxydischer Atmosphäre im Feuer erzielt. Dadurch wird die Suszeptibilität des Verfüllmaterials gegenüber dem anstehenden Boden etwas erhöht. Das quasi homogene Magnetfeld der Erde wird durch die archäologischen Strukturen modifiziert. Der Effekt ist jedoch nur sehr schwach. Die dadurch hervorgerufenen Schwankungen des Erdmagnetfeldes liegen im Bereich von einem Zehntausendstel (das entspricht ca. 5 nT) und darunter. Die Anforderungen an die Magnetfeldsensoren für den Einsatz zur Erkundung archäologischer Objekte sind demzufolge sehr hoch.

Für die Untersuchung der oben genannten Objekte wird neben der sehr hohen Empfindlichkeit auch eine hohe Messgeschwindigkeit für große Flächenleistungen gefordert. Diese beiden Anforderungen zusammen erfüllen kommerziell angebotene Messgeräte nicht. Die Idee war deshalb, nicht auf sonst in der Geophysik übliche Messgeräte zurückzugreifen, sondern auf supraleitende **Quanteninterferometer-Detektoren** (*SQUID*), wie

sie am *Institut für Physikalische Hochtechnologie* in Jena entwickelt werden. Diese Sensoren sind die empfindlichsten Magnetfeldmessgeräte und werden z.B. schon erfolgreich in der Medizintechnik (elektrodenlose Herz- und Hirnstrommessung) eingesetzt. Je nach verwendetem Supraleitermaterial benötigen sie eine Kühlung mit flüssigem Helium (-269°C : *Tieftemperatur*) bzw. mit flüssigem Stickstoff (-196°C : *Hochtemperatur*). Die in Jena entwickelten Hochtemperatur-*SQUIDS* besitzen bereits eine ausreichende rauschbegrenzte Feldauflösung. Das niederfrequente Rauschen beträgt etwa $100\text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Die hier verfügbaren Tieftemperatursysteme sind noch um ein mehrfaches besser.

Das Problem, das es zu lösen gilt, um diese Sensoren für die Archäologie einsetzen zu können, besteht darin, sie resistent gegenüber Störfeldern zu machen und sie in ein stabiles kompaktes Messgerät zu integrieren, sie also feldtauglich zu machen. Für eine Unterdrückung von tiefliegenden Anomalien aufgrund von geologischen Störungen o.ä. ist es sinnvoll, nicht das Absolutfeld, sondern den Gradienten des Feldes auszuwerten. Dadurch kann der archäologisch interessierende Tiefenbereich von 0,3 m bis ca. 2,0 m hervorgehoben werden. Für die Gradientenmessung benötigt man zwei Sensoren. Da *SQUIDS* vektoriell arbeiten, muss die mechanische Steifigkeit der Verbindung zwischen den Sensoren sehr hoch sein. Das entwickelte sich als ein Kernproblem. Bis jetzt kann daher die gute Magnetfeldauflösung der Hochtemperatur-*SQUID*-Sensoren beim bewegten System noch nicht vollständig ausgenutzt werden.

Ein Lösungsweg besteht in der Integration des Gradiometers auf einem Chip. Dieser Weg lieferte für ein Tieftemperatur-System bereits überzeugende Resultate. Für den Test der Geräte wird das Erdwerk bei Weimar herangezogen. Dabei bilden die für den Archäologen besonders interessanten Torbereiche die Schwerpunkte.

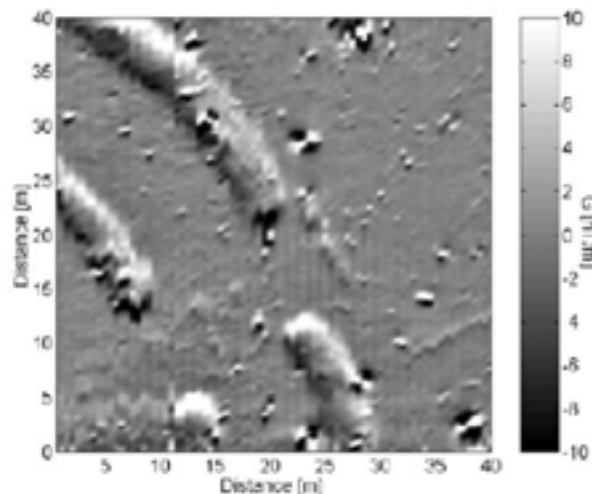


Abbildung 7.3: Magnetisches Abbild der nordöstlichen Torsituation des Doppelkreisgrabens bei Weimar, aufgenommen mit einem Tieftemperatur-*SQUID*-Gradiometer.

Bisher sind drei Tore festgestellt worden. An einer ausgewählten Stelle in der Nähe eines Tores werden derzeit die Doppelgräben archäologisch untersucht. Durch die Grabung soll vor allem Fundmaterial geborgen werden, welches eine genauere zeitliche Einordnung des Erdwerkes gestattet. Außerdem können so durch die Kenntnis der Form und Tiefe der Gräben wichtige Rückschlüsse für die Interpretation der Gradientenkartierung der neuentwickelten Geräte gezogen werden.

7.2 Trecker und Sensoren - Geophysik erforscht antike Siedlungsräume

Wolfgang Rabbel und Andreas Müller-Karpe

Förderkennzeichen 03RAX4KI und 03MKX4MR (01.08.01-31.07.04)

Neue Anforderungen in der archäologischen Prospektion

In der Archäologie rückt die Erforschung der Lebensumstände der Bevölkerung im Altertum mehr und mehr in den Mittelpunkt des Interesses. Dazu begibt man sich quasi von den Höhen der Akropolis hinab in die Niederungen der antiken Unterstädte und des Umlandes der Städte. Die Weiträumigkeit dieser Untersuchungsareale stellt jedoch neue Anforderungen an die Untersuchungsmethodik. Für die archäologische Prospektion gilt es nicht allein, grabungswürdige Objekte aufzufinden, sondern Siedlungsräume als Ganzes großflächig zu erfassen.



Abbildung 7.4: *Multi-Sensor-System im Einsatz*

Für diese Aufgaben sind geophysikalische Prospektionsmethoden besonders gut geeignet. Das Spektrum geophysikalischer Messverfahren, die in der Archäologie zum Einsatz kommen, reicht von der Geoelektrik und Magnetik bis zu Elektromagnetik und Georadar. Mit computergestützten Auswertetechniken werden detailgenaue Karten physikalischer Bodenparameter und auch 3D-Abbildungen des Untergrundes erstellt, die zur Rekonstruktion antiker Siedlungsstätten, zur Kartierung geologischer Schichten und

zur Objektortung genutzt werden können. Zu einer umfassenden Charakterisierung des archäologischen Gehaltes der Böden müssen vergleichende Messungen mit unterschiedlichen physikalischen Sensoren durchgeführt werden.

Eine besondere wissenschaftlich-technische Herausforderung besteht nun darin, ein geländetaugliches Messverfahren zu entwickeln, das

- über ein cm-genaues Auflösungsvermögen verfügt,
- für die Kartierung Hektar bis Quadratkilometer grosser Areale tauglich ist,
- möglichst viele Sensoren auf ökonomische Weise gleichzeitig zum Einsatz bringt.

In unserem vom *BMBF* geförderten Forschungsprojekt wird daher ein motorisiertes geophysikalisches Multisensor-System entwickelt (s. Abb. 7.4), bei dem auf einem Geräteträger drei verschiedene Messverfahren montiert werden: Mit engabständigen Fluxgate-Magnetometern werden subtile räumliche Änderungen des Erdmagnetfeldes aufgezeichnet, wie sie durch stärker oder schwächer magnetisierte archäologische Objekte, die im Untergrund verborgen sind, hervorgerufen werden. Auf diese Weise erhält man Karten *magnetischer Anomalien*, aus denen z.B. Stadtpläne antiker Städte ohne Spatenstich abgelesen werden können. Die Hethiterstadt Sarissa in Anatolien (s. Abb. 7.8) ist nur eines von zahlreichen Beispielen, bei denen diese Messtechnik grosse Erfolge verbuchen konnte. Elektromagnetische Messungen liefern Informationen über die elektrische Leitfähigkeit des Bodens. Sie eignen sich ausgezeichnet für die Detektion von Zonen unterschiedlicher Bodenfeuchte, aber auch zur Klassifizierung von Bodentypen.

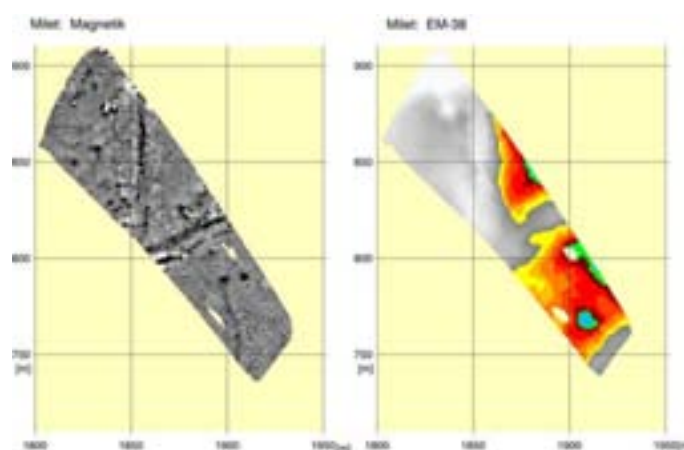


Abbildung 7.5: Auf Grund von GPS -Positionierung online erstellte Karte der magnetischen (links) und elektromagnetischen (rechts) Messdaten im Süden der antiken Ruinenstadt Milet (Westtürkei). Die in der Magnetik identifizierbaren Strukturen könnten sehr wahrscheinlich den Verlauf der heiligen Straße mit benachbarten Grabbauten wiedergeben. Senkrecht dazu verläuft ein ehemaliger Suchschnitt. Die in der elektrischen Leitfähigkeit unterscheidbaren Bodentypen korrelieren mit diesem Befund.

Ein schönes Beispiel aus der antiken Grossstadt Milet (Westtürkei; s. Abb. 7.5) zeigt, wie magnetische und elektromagnetische Messungen einander ergänzen: Während es mit der Magnetik gelingt, Reste einer Nekropole zu lokalisieren, zeigt die Elektromagnetik abrupte Wechsel der elektrischen Leitfähigkeit, die sowohl mit der Nutzung als auch mit dem Bodentyp in Verbindung gebracht werden können. Magnetometer und elektromagnetischen Sonden zeigen zwar die Position von interessanten Objekten an, erlauben jedoch nur sehr ungenaue Angaben über ihre Tiefenlage. Für die Tiefenbestimmung werden daher zusätzlich Bodenradargeräte eingesetzt. Sie arbeiten mit elektromagnetischen Impulsen von einigen hundert MHz. Wie nach dem Echolotverfahren lassen sich mit Georadargeräten Tiefenpläne der verborgenen archäologischen Targets herstellen, aus denen dreidimensionale Ansichten rekonstruiert werden können.

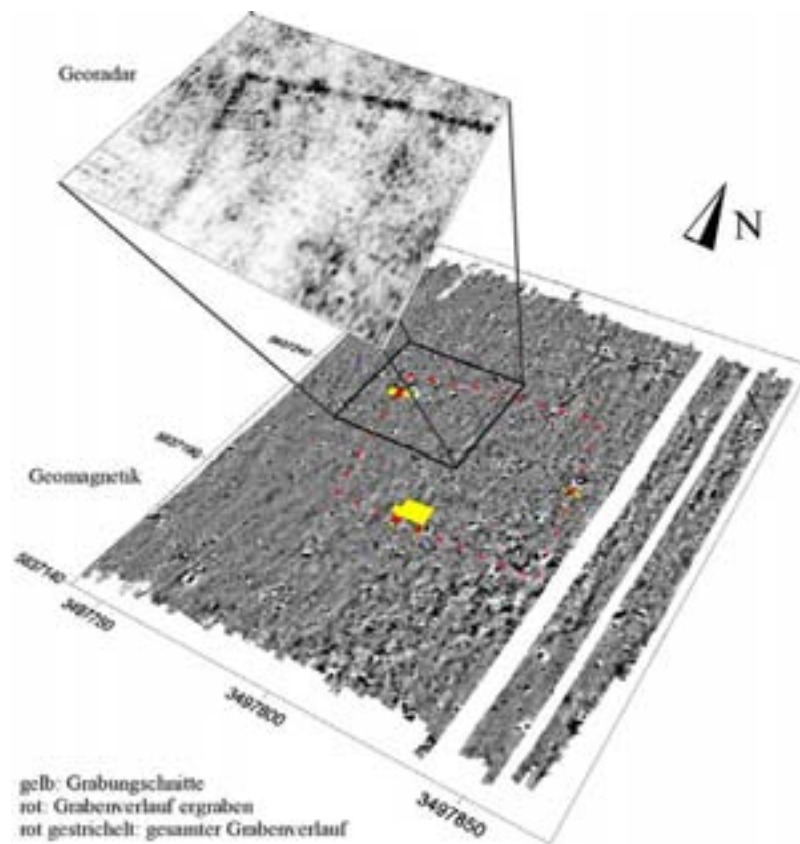


Abbildung 7.6: Vermessung einer früh-neuzeitliche Schanzenanlage in Oberhessen mit Georadar (oben) und Geomagnetik (unten). Die der archäologische Struktur zugeordneten linearen Anomalien beider Messverfahren ergänzen sich gegenseitig. Die Radarmessungen zeigen den Verlauf eines verfüllten Grabens, der infolge seines erhöhten Wassergehalt für das Radar sichtbar wird. In der Magnetik bildet sich der Graben nur als eine kaum sichtbare Anomalie ab (rote Linie), weil die magnetischen Eigenschaften der Grabungsfüllung sich nur sehr gering von der Umgebung unterscheiden.

Das Beispiel in Abbildung 7.6 zeigt die Vermessung einer früh-neuzeitlichen Schanzenanlage mit Geomagnetik und Georadar. Während ein Schanzgraben in der Tiefenkarte des Radar klar hervortritt, zeichnet er sich in der Geomagnetik wegen mangelnden Kontrastes in den magnetischen Bodenparametern gar nicht ab - auch dies ein schönes Beispiel für die Notwendigkeit, unterschiedliche Prospektionsverfahren parallel einzusetzen.

Das neu entwickelte Multi-Sensor-System wird für die Lokalisierung und Kartierung alter Siedlungen, Befestigungen und Kultanlagen sowie von Gräbern bzw. Grabbauten eingesetzt. Hinzu kommt die Erfassung alter Wirtschafts- und Infrastruktureinrichtungen wie Bewässerungskanäle, Brunnenschächte bzw. Zisternen. Die Prospektionsergebnisse sind somit nicht nur für die Archäologie sondern auch, zum Beispiel, für Kultur- und Wirtschaftsgeographie oder Landschaftsökologie von Bedeutung.

Entwicklung eines Multi-Sensor-Systems

Der synchrone Einsatz unterschiedlicher Prospektionsverfahren an einem Objekt ist also wichtig, da erst durch die Erfassung verschiedener physikalischer Eigenschaften des Untergrunds eine differenzierte Materialansprache ermöglicht wird. Die Kartierungen müssen gleichzeitig erfolgen, damit die Kosten der Vermessung gering gehalten werden und unterschiedliche Witterungseinflüsse auf die Messungen ausgeschlossen werden können.

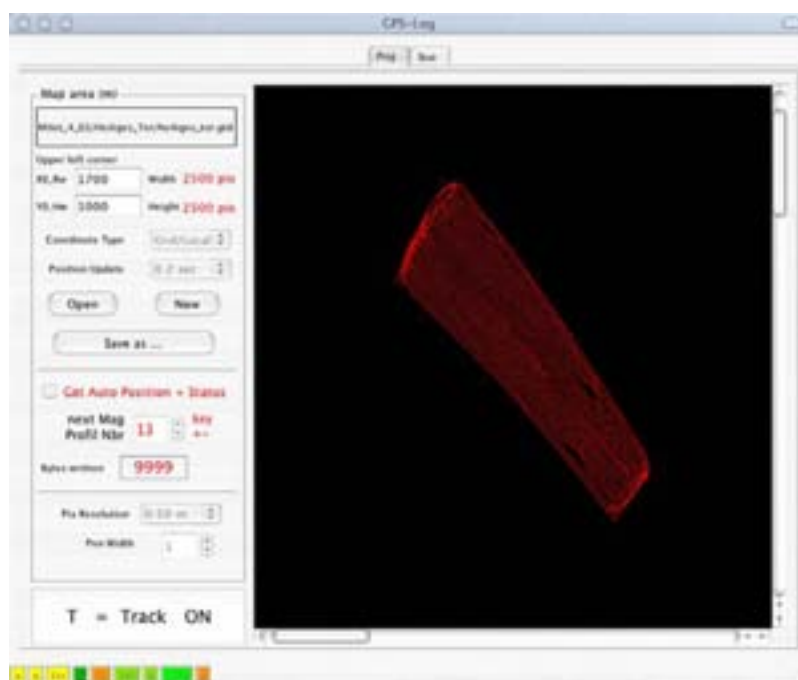


Abbildung 7.7: *Auf Grund von GPS -Positionierung online erstellte Karte der Fahrspur des Mess-Systems.*

Als Geräteträger wurde ein Messzug konstruiert (s. Abb. 7.4), der auch unter erschwerenden Geländebedingungen eine kontrollierte Fortbewegung im Feld sicherstellt. Der Messzug besteht aus einem kleinen Allradschlepper als Zugmaschine und einem Anhänger als Sensorträger. Der Sensorträger muss dabei unmagnetisch sein und so konstruiert sein, dass sich die Sensoren nicht untereinander beeinflussen. Um Störeffekte von der Zugmaschine auf die Magnetikmessungen zu minimieren, werden die Fluxgate-Sonden am hinteren Ende des Sensorträgers ca. 5.50 m hinter der Zugmaschine geführt. Eine im cm-Bereich genaue Positionsbestimmung wird durch das satelliten-gestützte *GPS*-Navigationssystem erreicht. Die neu entwickelte Software *NavTreck* überträgt die *GPS*-Koordinaten der Fahrspur in Echtzeit auf den Bildschirm eines Notebook-Computers, so dass der Fahrer stets über die bereits vermessenen Fläche informiert ist. Synchron werden die Sensordaten gespeichert. Abbildung 7.7 zeigt eine Bildschirmdarstellung der Steuereinheit während einer Messung in der antiken Stadt Milet, Westtürkei.

In Zusammenarbeit mit archäologischen Forschergruppen wird das Multi-Sensor-System zur Zeit an den folgenden fünf Grabungsstätten praktisch erprobt und optimiert:

- Hethitische Stadtanlage Sarissa in Kappadokien, Türkei (*Vorgeschichtliches Seminar der Philipps-Universität Marburg*; s. Abb. 7.8).
- Griechische Stadtanlage Milet in Westanatolien, Türkei (*Archäologisches Institut der Ruhr Universität, Bochum*; s. Abb. 7.5).
- Griechische Kolonie Selinunte in Sizilien, Italien (*Deutsches Archäologisches Institut, Rom*).
- Früh-Neuzeitliche Schanzenanlage in Oberhessen (*Vorgeschichtliches Seminar der Philipps-Universität Marburg*; s. Abb. 7.6).
- Erdwerk Plate in Mecklenburg-Vorpommern (*Landesamt für Bodendenkmalpflege Mecklenburg-Vorpommern*).

Die fünf Testgebiete repräsentieren ein breites Spektrum von archäologischen Denkmalsgattungen, Erhaltungs- und Bodenbedingungen. Die geophysikalische Prospektion wird durch archäologische Ausgrabungen und bodenkundliche Untersuchungen begleitet, so dass hier ein integrales Forschungskonzept realisiert wird, das den Anforderungen einer modernen Geoarchäologie der Lebensräume gerecht wird.

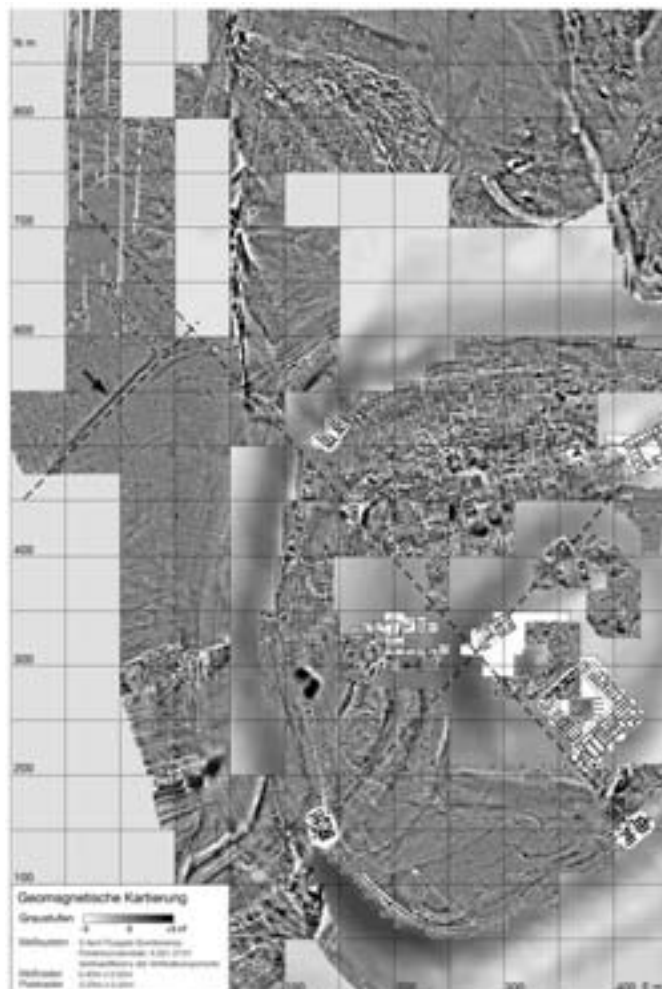


Abbildung 7.8: Grossräumige geomagnetische Kartierung der Hethitischen Stadtanlage Sarissa in Kappadokien (Türkei). Mit dem neu entwickelten motorisierten Multi-Sensor-System wurde die geomagnetische Vermessung von den Stadtmauern bis in die westliche Vorstadt vorangetrieben. Die neu entdeckte magnetische Struktur im nord-westlichen Außenbereich (Pfeil) zeigt dieselbe Orientierung wie die Planungsachsen der Stadt (gestrichelte Linien) und belegt somit eine Parzellierung auch des Umfeldes. Im Vergleich früheren magnetischen Messungen erzielt das motorisierte Multi-Sensor-System einen vielfachen Messfortschritt.

Anhang A

Antragsverfahren und Mittleinsatz

Die Antragsberatung wird beim Projektträger in enger Zusammenarbeit und Abstimmung mit dem *BMBF*-Fachreferat durchgeführt. Das Antragsverfahren sieht vor, dass dem Projektträger zunächst eine Projektskizze vorgelegt wird (davor steht häufig die Projektidee als Brief, E-Mail oder mündlicher Bericht). Anhand der Skizze wird geprüft, ob grundsätzlich Aussicht auf Förderung besteht. Die Skizze sollte in kurzer Form Auskunft geben über das Thema, die neuen naturwissenschaftliche Methode oder Technologie, die geisteswissenschaftliche Problemstellung, die internationale Zusammenarbeit sowie eine Einschätzung der Anwendungsmöglichkeiten und den geschätzten Gesamtaufwand für die Durchführung des geplanten Vorhabens. Wenn Aussicht auf Förderung besteht wird empfohlen, einen formalen Antrag einzureichen. Informationen, Skizzen- und Antragsformulare können im Internet abgerufen werden:

FZJ-PTJ:

<http://www.fz-juelich.de/ptj/index.php?index=492>

Elektronischer Antragsassistent *easy*:

<http://www.kp.dlr.de/profi/easy/index.htm>

Der Beratungsaufwand ist z.T. sehr umfangreich, insbesondere auch in administrativer Hinsicht, da Antragsteller aus den Geisteswissenschaften in der Regel lediglich Erfahrungen mit der *DFG*-Förderung (z.B. Normalverfahren) besitzen. Begutachtungsreife Anträge werden in der Regel extern begutachtet. Angesichts der inhaltlichen Ausdifferenzierung und Spezialisierung in den einzelnen Disziplinen ist die Auswahl der Gutachter z.T. ein schwieriger Prozess. Hierzu sind enge Kontakte zur entsprechenden Wissenschaftslandschaft unbedingt erforderlich, auch unter Einsatz zusätzlicher Hilfsinstrumente (wie z.B. Internet, Hochschullehrerverzeichnisse, Literatur- und Vorlesungsverzeichnisse, Veröffentlichungen im Sinne von *Wer macht was?*).

Im Förderschwerpunkt *NTG* standen in den Jahren 1996 bis 2003 Fördermittel in Höhe von ca. 8,1 Mio. € zur Verfügung. Dies entspricht einem Mittelvolumen von etwa 1,0 Mio. € pro Jahr. Die jährlichen Ausgaben für die einzelnen Projekte liegen im

Mittel bei 100.000 €/Jahr bei einer Regelförderzeit von 3 Jahren. Somit können bis zu 5 neue Vorhaben pro Jahr bewilligt werden während gleichzeitig etwa 5 Vorhaben abgeschlossen werden. Tendenziell wird ein Aufwärtstrend bei der Gesamtfördersumme der einzelnen Vorhaben verzeichnet, der in der steigenden Komplexität der Aufgabstellungen begründet ist.

<i>BMBF-Förderschwerpunkt NTG</i>		
Jahr	Fördermittel	Vorhabenanzahl
1996	0,89 Mio. €	23
1997	1,07 Mio. €	19
1998	0,86 Mio. €	20
1999	1,24 Mio. €	21
2000	1,07 Mio. €	17
2001	0,78 Mio. €	14
2002	1,01 Mio. €	18
2003	1,15 Mio. €	14

Anhang B

Abgeschlossene und laufende Vorhaben 1996 bis 2003

B.1 Vorhaben mit Schwerpunkt *Materialanalyse*

Kennzeichen	Thema	Institution	Beginn	Ende	Mittel (€)
03RI9BER	Analyse schwer oder nicht-flüchtiger organischer Substanzen mit Hilfe der Pyrolyse und Gaschromatographie im Bereich der Archäometrie	Staatliche Museen Preussischer Kulturbesitz Berlin	01.11.92	31.03.96	123.123,70
03PO9BON	Untersuchung zur Keramikproduktion und -distribution Bronzezeitlicher Siedlungen Griechenlands und der Aegaeis mit Hilfe der Neutronenaktivierungsanalyse	Universität Bonn	01.06.93	30.11.97	248.825,31
03BE9FRA	RBS- und NRA-Analysen an historischen Knochen	Universität Frankfurt	01.10.94	31.03.98	197.122,07
03BU9LEI	Quantitative und qualitative Analyse der Knochenmineraldichte sowie der Haupt- und Spurenelementgehalte an historischen Knochen mit PIXE, PIGE, RFA und NAA	Universität Leipzig	01.10.94	31.12.97	136.943,91
03SY9DRE	Entwicklung analytischer Verfahren für Untersuchungen historischer Rubingläser: Kunsthistorischer Teil	Staatliche Kunstsammlungen Dresden	01.10.94	30.09.96	53.142,68
03SC9TUB	Entwicklung analytischer Verfahren für Untersuchungen historischer Rubingläser: Chemisch analytischer Teil	TU Berlin	01.11.94	31.12.96	95.784,91
03CA9HUB	Herstellungstechniken und Herstellungswerkstätten von frühmittelalterlichen Glasperlen aufgrund der farbgebenden Komponenten und Mineralien	Humboldt Universität Berlin	01.04.96	31.07.00	116.610,22
03HO9DAR	Bestimmung der farbgebenden Verbindungen und Mineralien in altertümlichen Glasperlen	TU Darmstadt	01.04.96	31.03.00	124.319,60

Kennzeichen	Thema	Institution	Beginn	Ende	Mittel (€)
03M09B03	Elementaranalyse kulturhistorischer Objekte durch zerstörungsfreie, quantitative Röntgenfluoreszenz induziert durch weiße Synchrotronstrahlung	Universität Bonn	01.04.96	30.09.99	75.221,28
03NE9RO1	Ionenstrahlanalytische Charakterisierung von silikatischen Materialien zur zerstörungsfreien Diagnose an historischen Glas- und Emailobjekten	Forschungszentrum Rossendorf e.V.	01.04.96	31.05.00	221.394,02
03HE9GO1	Bestandsaufnahme vorliegender Kenntnisse und Prüfung der Eignung von DNA-Analysen für die archäometrische Bewertung kulturhistorischer Objekte und Artefakte	Universität Göttingen	01.11.96	31.01.98	110.955,45
03ST9KO2	Erschließung naturwissenschaftlicher Untersuchungsmethoden zur Charakterisierung historischer Textilfaserstoffe	Fachhochschule Köln	01.10.97	31.12.00	57.264,69
03HU9GO2	Biowissenschaftliche Archäometrie: Die Knochenmatrix als Datenspeicher individueller und kollektiver biographischer Ereignisse (I), DNA-Analysen von kulturhistorischen Objekten (II)	Universität Göttingen	01.11.92	01.11.97	682.740,32
03SN9MU2	Untersuchungen zur Erhaltung chinesischer Polychromien der Qin- und Han-Zeit mittels elektronenmikroskopischer, videoholographischer sowie ausgewählter biologischer und chemischer Methoden	Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege	01.01.98	31.12.00	305.425,32
03HE9GO2	Biologische Archive im Kulturerbe: Sozioökologische Folgen einer Cholera-Epidemie von 1837	Universität Göttingen	01.02.99	31.07.99	30.779,17
03MU9TUB	Entwicklung eines mobilen Gerätes für die Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse: Zerstörungsfreie Untersuchungen zur Chronologie Limousiner Maleremails	TU Berlin	01.04.99	30.04.02	366.908,17
03PE9FRE	Isotopenmessung von Osmium mit einem hochauflösenden Massenspektrometer zur Herkunftsbestimmung von keltischem und skythischem Gold	TU Bergakademie Freiberg	01.04.99	30.04.02	150.048,83
03HUX1GO	Paläogenetik als Schlüssel zum Kulturerbe - Entwicklung innovativer Techniken in der aDNA-Analytik	Universität Göttingen	01.07.01	30.06.04	325.823,61
03BUX1MZ	Biomolekulare Archäometrie des Neolithikums: Die ersten Bauern in Europa und der Ursprung der Rinder- und Milchwirtschaft	Universität Mainz	01.08.01	31.07.04	402.673,12
03MIX1TU	Kohlenstoffisotopie und Röntgendiffraktometrie von archäologisch relevanten Kalksamen	Universität Tübingen	01.04.02	30.06.03	71.428,00
03EIX1VP	Nasca: Entwicklung und Adaption archäometrischer Techniken zur Erforschung der Kulturgeschichte (geomorphologisch-bodenkundlicher Teil)	Universität Heidelberg	01.08.02	31.12.05	271.313,00
03REX1VP	Nasca: Entwicklung und Adaption archäometrischer Techniken zur Erforschung der Kulturgeschichte (archäologischer Teil)	Deutsches Archäologisches Institut Berlin	01.08.02	31.07.06	592.976,00

B.2 Vorhaben mit Schwerpunkt *Formanalyse*

Kennzeichen	Thema	Institution	Beginn	Ende	Mittel (€)
03VB9MUE	Holographische Aufnahmen zur Sicherung des Informationsgehaltes kulturhistorischer Quellen	Universität Münster	01.05.93	31.08.96	282.317,99
03WE9HUB	Holographische Mustererkennung zur Interpretation und Analyse von Tontafeln mit Keilinschriften	Humboldt Universität Berlin	01.05.93	30.06.96	171.050,65
03VW9MAI	Einsatz eines rechnergestützten Photogrammetrieverfahrens zur Bauaufnahme komplexer, historischer Großbauten am Beispiel des Doms in Siena	Universität Mainz	01.04.94	31.12.96	314.442,46
03ST9BER	SPUBITO: Verfahren zur Gewinnung von Tonsignalen aus Negativspuren in Kupfernegativen von Edison-Zylindern auf bildanalytischem/sensoriellem Wege (Spur-Bild-Ton)	Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V.	01.06.96	31.03.99	227.104,09
03WE9HU1	Holographische und kohärent-optische Filterung von handschriftlich erstellten kulturhistorischen Quellen	Humboldt Universität Berlin	01.10.96	30.09.99	212.659,59
03VB9MU1	Analyse und Dokumentation dreidimensionaler archäologischer Informationsträger durch höchstauflösende Farbholographie	Universität Münster	01.11.96	31.10.99	230.044,17
03VB9MU2	Aktive optische topometrische Verfahren für die Epigraphik und Archäologie	Universität Münster	01.11.97	30.06.01	250.258,58
03WNX2HD	Mathematische Grundlagen und computergraphische Rekonstruktion von Stalaktitengewölben (Muqarnas) in der islamischen Architektur	Universität Heidelberg	01.07.02	30.06.05	240.877,00

B.3 Vorhaben mit Schwerpunkt *Datierung*

Kennzeichen	Thema	Institution	Beginn	Ende	Mittel (€)
03ST9FRE	Physikalische Grundlagen der Lumineszenzdatierung	TU Bergakademie Freiberg	01.07.91	30.06.96	280.592,23
03WA9HEI	Optisch-Stimulierte Lumineszenz: Neue Datierungstechnologie in der Archäometrie	Heidelberger Akademie am MPI für Kernphysik	01.07.91	31.12.96	266.765,00
03DO9KIE	Tephrochronologische Datierung von Siedlungsphasen in Pollendiagrammen – Pollenanalytische Untersuchungen	Universität Kiel	01.08.92	28.02.98	199.645,47
03SC9KIE	Tephrochronologische Datierung von Siedlungsphasen in Pollendiagrammen – Tephrostratigraphische Untersuchungen	Forschungszentrum für Marine Geowissenschaften	01.08.92	28.02.98	221.444,11
03JU9DAR	Anwendung der 3-D-gekoppelten Tandem-Scanning-Mikroskopie zur Entwicklung, Erprobung und Standardisierung einer Methode zur Datierung von Kunstgegenständen anhand der Oberflächenspuren zeittypischer Bearbeitungsmaterialien	Hessisches Landesmuseum Darmstadt	01.02.93	30.06.96	214.632,76

Kennzeichen	Thema	Institution	Beginn	Ende	Mittel (€)
03WA9HE1	Th/U (Massenspektrometrische)-Datierung von archäologisch relevanten Karbonatablagerungen	Heidelberger Akademie am MPI für Kernphysik	01.01.97	30.06.00	112.674,41
03WA9HE2	Oberflächendatierung archäologischer Objekte	Heidelberger Akademie am MPI für Kernphysik	01.10.97	31.12.00	151.935,50
03KR9FR2	Radiolumineszenz in der Archäochronometrie und Geoarchäologie	TU Bergakademie Freiberg	01.01.99	31.03.03	186.966,15
03RTX3KI	Entwicklung einer revidierten Methode zur Aminosäurendatierung von Skelettfunden	Universität Kiel	01.06.01	31.05.04	221.443,58
03WAX3VP	Nasca: Entwicklung und Adaption archäometrischer Techniken zur Erforschung der Kulturgeschichte (chronometrischer Teil)	Heidelberger Akademie am MPI für Kernphysik	01.08.02	31.12.05	402.505,00

B.4 Vorhaben mit Schwerpunkt *Ortung*

Kennzeichen	Thema	Institution	Beginn	Ende	Mittel (€)
03KA9LVF	Hydroakustische Untersuchungen für ein in flachem Wasser einsetzbares fächerfähiges Sedimentecholot am Beispiel eines wikingerzeitlichen Seesperrwerkes	Archäologisches Landesamt Schleswig-Holstein	01.10.94	30.09.97	502.373,93
03LA9HE2	Die Bedeutung geomorphologischer Entwicklungen rekonstruiert aus Sedimentkörpern für die archäologische Forschung	Heidelberger Akademie am MPI für Kernphysik	01.01.98	31.12.00	170.638,55
03MA9HE2	Oberflächenprospektion als Methode zur Untersuchung anthropogener Landschaftsveränderung in historischen Dimensionen	Universität Heidelberg	01.01.98	31.12.00	154.754,76
03KR9LV2	Entwicklung eines vielstrahligen Sedimentecholots zum 3-d-Scannen für die marinarchäologische Prospektion im Hafengebiet des wikingerzeitlichen Handelsplatzes Haithabu	Archäologisches Landesamt Schleswig-Holstein	01.08.98	31.03.02	338.376,70
03ME9JEN	Neue Magnetfeldsensoren für die Archäologie	IPHT e.V. Jena	01.05.99	30.04.02	252.481,04
03LA9HE3	Die Bedeutung geomorphologischer Entwicklungen – rekonstruiert aus Sedimentkörpern – für die archäologische Forschung (Phase II)	Heidelberger Akademie am MPI für Kernphysik	01.12.00	31.12.02	136.377,91
03MA9HE3	Oberflächenprospektion als Methode zur Untersuchung anthropogener Landschaftsveränderung in historischen Dimensionen (Phase II)	Universität Heidelberg	01.01.01	31.03.03	166.392,27
03MKX4MR	Entwicklung eines Multi-Sensor-Systems zur geophysikalischen Prospektion in der Archäologie (bodenkundlich-archäologischer Teil)	Universität Marburg	01.08.01	31.07.04	164.963,72
03RAX4KI	Entwicklung eines Multi-Sensor-Systems zur geophysikalischen Prospektion in der Archäologie (naturwissenschaftlicher Teil)	Universität Kiel	01.08.01	31.07.04	320.915,93

Kennzeichen	Thema	Institution	Beginn	Ende	Mittel (€)
03SUX4KN	Komplexe geophysikalische Prospektion zur Früherkennung siedlungstopographischer und baustratigraphischer Strukturen in archäologischen Siedlungsruinen des Nahen Ostens	Universität Konstanz	01.01.02	31.12.04	181.549,52
03SCX4JY	Neue Magnetometersysteme für schnelle und hochauflösende großflächige archäologische Erkundung	IPHT e.V. Jena	01.01.03	31.12.05	462.347,00

Stichwortverzeichnis

- aDNA, 8, 9, 51–53, 112
- Aminosäurendatierung, 93–96
- Antrags ~
 - assistent (easy), 109
 - beratung, 109
 - formulare, 109
 - verfahren, 109
- Arbeitsgebiete
 - Aidonia, NE-Peloponnes, 55, 56, 61, 62
 - Anatolien, 52
 - Bayern und Böhmen, 36
 - Erdwerk Plate, Mecklenburg-Vorpommern, 106
 - Goslar, 47
 - Gröbern, 11, 91
 - Haithabu, 13, 114
 - Limoges, Frankreich, 22, 23
 - Lintong, China, 38–42, 45
 - Milet, Westtürkei, 103, 104, 106
 - Natanz, Iran, 10
 - Nieder-Hochrhein, 29, 30
 - Nordost-Peloponnes, 9, 14, 54–56, 62
 - Oberhessen, 104, 106
 - Odenwald, 77
 - Palpa, Südperu, 13, 14, 64, 65, 67–72, 75
 - Petri, NE-Peloponnes, 56
 - Phlious, NE-Peloponnes, 55–58, 63
 - Rösa-Sauselitz, 91, 92
 - Sarissa, Kappadokien, 103, 106
 - Selinunte, Sizilien, 106
 - Siena, Italien, 113
 - Stratos, Griechenland, 86
 - Tell Gjindaris, Syrien, 12, 19
 - Tiryns, Griechenland, 84, 85
 - Wallersdorf, 37
 - Weimar, 98, 100
 - West-, Süddeutschland, 27
 - Westtürkei, 36
- Arbeitskreis Archäometrie, 18
- ArtTAX[®]-Spektrometer, 9, 23
- Baggerschürfe, 57, 58
- Biowissenschaftliche Archäometrie, 9, 46, 47, 112
- Boden ~
 - geographie, 71
 - kunde, 57, 70, 112, 114
- Cäsium-137-Konversionselektronenstrahler, 91
- CCD-Kamera, 25
- Chronometrie, 57, 68, 74, 114
- Digitalkamera, 77
- DNA-Analyse, 8, 18, 46, 47, 49, 50, 53, 112
- El Niño, 67, 71, 72
- Elektronenstrahlmikroanalyse (ESMA), 25, 29, 77
- Elektrophorese, 94, 95
- Förder ~
 - kriterien, 7
 - rahmen, 7
- Förderbereiche, 5, 8
 - Datierung, 10, 87, 88, 93, 113
 - Formanalyse, 10, 79, 80, 84, 113
 - Materialanalyse, 8, 21, 22, 27, 33, 38, 46, 51, 54, 64, 111
 - Ortung, 12, 97, 98, 102, 114
- Fluxgate-Magnetometer, 103, 106
- Gaschromatographie, 111

- Geoarchäologie, 56, 57, 60, 61, 73, 92, 106, 114
- Geomorphologie, 55, 57, 60, 61, 67, 68, 70, 71, 73, 112, 114
- Geophysik, 98, 102
- Global Positioning System (GPS), 103, 105, 106
- GNAA, 18
- Hochdruckflüssigkeitschromatographie (HPLC), 94
- Holographie, 80, 81, 83, 112, 113
Farb ~, 10, 80, 113
- Hydroakustik, 114
- Internationale Zusammenarbeit, 7, 13
- Islamische Architektur, 10, 113
- Isotopenanalyse, 8, 15, 31, 33, 34, 36, 37, 112
- Kulturepochen
Altsteinzeit, 88, 92
Antike, 27, 32, 41, 42, 55, 59, 61
Archaikum, 61
Bronzezeit, 36, 55, 59–61, 111
Byzantinikum, 60, 62
Chalkolithikum, 60
Eisenzeit, 59, 60
Helladikum, 61
Historismus, 22, 23, 25
Keltenzeit, 36
Kupferzeit, 59, 60
Merowingerzeit, 27, 29, 30, 32
Mesolithikum, 53
Mittelalter, 22, 23, 27, 32, 48, 60, 62, 98
Mykenische Zeit, 54, 55
Nascazeit, 13, 14, 64–66, 68, 70–72, 75, 112, 114
Neolithikum, 9, 18, 51–54, 59–61, 63, 98, 112
Paläolithikum, 11, 89–91, 96
Paracaszeit, 66, 69, 70, 72
Qin- und Han-Zeit, 40, 41, 112
Römerzeit, 27, 29, 59, 60, 62
Renaissance, 22, 23, 25
Wikingerzeit, 114
- Landschaftsarchäologie, 9
- Laser-LEDs, 25
- Laser-Mikroanalyse, 25
- Lumineszenz, 19, 69, 72, 75–77, 88–92, 113
Infrarot Stimulierte (IR) ~, 11
Infrarot-Radio (IR-RL) ~, 89–91
Optisch Stimulierte (OSL) ~, 11, 57, 60, 63, 68, 74, 75, 89, 113
Photo ~, 11
Radio (RL) ~, 11, 88, 114
Thermische (TL) ~, 11, 89
- Magnetfeldsensoren, 99, 100, 114
- Massenspektrometrie, 8, 15, 34, 35, 112, 114
Gaschromatographie (GC-MS) ~, 46, 48
Laserablation (LA-ICP-MS) ~, 33, 34, 36
Sektorfeld ~, 33, 35
Thermionen (TIMS) ~, 29
- Mitteleinsatz, 109
- Multi-Sensor-System, 102, 103, 105–107, 114
- Multiplexanalysen, 50
- Nachwuchsförderung, 14
- Naturw. Grundlagenforschung, 2, 18
- Neandertaler, 96
- Neolithische Revolution, 9
- Neutronenaktivierungsanalyse (NAA), 8, 111
- NRA-Analyse, 111
- Oberflächendatierung, 114
- Paläogenetik, 48, 50, 51, 112
- Photogrammetrie, 66, 82, 113
- PIGE, 111
- PIXE, 111
- Pollenanalyse, 113
- Polymerasekettenreaktion (PCR), 18, 49, 52
- Projekt ~
skizzen, 109
träger Jülich, 3, 7, 8

- verbünde, 8, 13, 14, 18, 64
- Prospektion, 14, 68, 98, 102, 105, 114, 115
 - Archäologische ~, 12, 18, 19, 56, 57, 60–63, 73, 102, 114
 - Elektromagnetische ~, 12, 102–104
 - Geoelektrische ~, 12, 68, 70, 72–74, 102
 - Geomagnetische ~, 12, 68, 104, 105
 - Georadar, 19, 102, 104, 105
 - Luftbild ~, 12, 98, 99
 - Magnetische ~, 102–104
 - Marinearchäologische ~, 114
 - Refraktionsseismische ~, 70, 72
- Pyrolyse, 111
- Röntgen ~
 - diffraktometrie (XRD), 29, 112
 - fluoreszenzanalyse (RFA), 8, 23, 24, 29, 111, 112
- Radiocarbon(¹⁴C)-Datierung, 57, 68, 69, 74, 93, 96
- Rasterelektronenmikroskopie (REM), 29, 112
- RBS-Analyse, 111
- Restriktionsanalyse (RFLP), 49, 50
- Sedimentecholot, 114
 - vielstrahliges ~, 13
- Sedimentologie, 57, 71
- Sekundärelektronenvervielfacher, 90, 91
- Sondagen, 57
- SQUID-Gradiometer
 - Hochtemperatur (HTS) ~, 99, 100
 - Tieftemperatur (LTS) ~, 100
- SQUIDs, 98–100, 115
- Streifenprojektion, 85
- Supraleitertechnik, 98
- Synchrotronstrahlung, 6, 112
- Tandem-Scanning-Mikroskopie, 113
- Teilchenbeschleuniger, 2
- Tephrochronologie, 113
- Terrakottaarmee, 14, 38–43, 45
- U/Th-Kernspaltpuren-Methode, 77
- Untersuchungsgegenstände
 - Öle, 48
 - Abfallhaufen, 67
 - Antikes Gold, 14, 15, 33–37, 55, 112
 - Artefakte, 8, 11, 40, 48, 57, 89, 92, 112
 - Biomaterialien, 8
 - Bodensedimente, 54, 57–60, 67, 70–72
 - Bronzeobjekte, 41
 - Doppelkreisgräben, 98, 100
 - Edison-Zylinder, 113
 - Erdwerke, 98, 100
 - Felsbilder, 48
 - Gebäude, 113
 - Geoglyphen, 13, 64, 66, 68–72, 75, 77
 - Geomaterialien, 8, 9, 11
 - Glasperlen, 27–32, 111
 - Gräber, 65, 66
 - Kalksamen, 112
 - Kammergräbernekropole, 55
 - Karbonatablagerungen, 114
 - Keilschrifttafeln, 10, 80, 82, 113
 - Keramik, 8, 48, 53, 57, 58, 60, 74, 89, 111
 - Kupferobjekte, 22
 - Leder, 48, 49
 - Leime, Bindemittel, 48
 - Münzen, 33, 37
 - Maleremails, 9, 22, 23, 25, 26, 112
 - Muqarnas, 10, 113
 - Pergamente, 48, 49
 - Rüstungen, 39
 - Rubingläser, 111
 - Sarkophagwanne Echnatons, 35
 - Schanzenanlagen, 105
 - Schneckenschalen, 72
 - Seesperrwerke, 114
 - Skelettmaterialien, 9, 46–48, 52, 53, 93–96, 111, 112, 114
 - Steingeräte, 57
 - Terrakotta, 38–45, 86
 - Textilfaserstoffe, 112
 - Tontafeln, 10, 81, 82, 113
- Unterwasserarchäologie, 12

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.

Misbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

