

\* DIPL.-REST. INGRID WIESNER

Diplom 2006 im Studiengang Objektrestaurierung; Restauratorin in der Archäologischen Restaurierung des Landesamts für Denkmalpflege BW; Doktorandin und seit 2012 wiss. Mitarbeiterin an der Staatl. Akademie im DFG-Projekt »Untersuchung neuer Konservierungsmittel und Bestimmung von prozessrelevanten Eigenschaften bei der Gefrierdrying von Feuchtbodenfunden«

# DIE KONSERVIERUNG VON FEUCHTBODENFUNDEN – ENTWICKLUNG UND FORSCHUNGSBEDARF

INGRID WIESNER\*

2010 wurden 111 Fundplätze, 15 davon in Baden-Württemberg, unter dem Titel »Prähistorische Pfahlbauten um die Alpen« in die Weltkulturerbe-Liste der UNESCO aufgenommen. Der Grund hierfür ist, dass sich in diesen Fundstätten organische Materialien

unter Wasser über Jahrtausende erhalten haben. Deshalb bieten diese Fundstellen hervorragende Bedingungen für die archäologische und naturwissenschaftliche Forschung (Abb. 1).

Zu den Feuchtbodenfunden zählen alle Funde aus organischen Materialien, die aus sogenannten Feuchtböden geborgen wurden und pflanzlichen bzw. tierischen Ursprungs sind. Beispielsweise sind hier Materialien wie Rinde, Bast, Holz, Textilien und Leder, aber auch Kompositwerkstoffe wie Geweih und Knochen zu nennen (Abb. 2 und 3). Während der langen Lagerung im feuchten Boden werden die Artefakte langsam abgebaut, wobei sie durch das Wasser, das alle Hohlräume ausfüllt, in ihrer Form und Struktur stabilisiert werden. Die nassen organischen Funde sind sehr empfindlich gegenüber mechanischen Schäden und anfällig für biologischen Abbau. Trocknet beispielsweise wassergesättigtes Holz ohne konservatorischen Eingriff, resultiert dies in einer irreversiblen Schädigung durch Schrumpfung, Deformation, Delamination, Versprödung und Rissbildung. Durch diesen sogenannten Zellkollaps kann der Fund vollständig zerfallen. Diese Schäden werden durch die Oberflächenspannung von Wasser und die

beim Trocknen entstehenden Kapillarkräfte verursacht, denen die abgebauten Zellwände nicht mehr standhalten können. Durch den Wasserverlust in der Struktur schrumpft das Holz, bis nur noch ein Bruchteil des ursprünglichen Volumens vorhanden ist.

Dementsprechend muss das fragile Fundmaterial durch gezielte Maßnahmen lesbar gemacht und stabilisiert und vor seinem Zerfall bewahrt werden. An die konservatorischen und restauratorischen Maßnahmen sind höchste Ansprüche gestellt, um das Kulturgut möglichst unverändert in einen trockenen, gesicherten, ansprechend aussehenden und vor allem langzeitstabilen Zustand zu überführen. Nur so ist zu gewährleisten, dass die Funde der Öffentlichkeit und künftigen Wissenschaftlern zur Verfügung stehen.

Abb. 1 (→S. 95)

Tauchgrabung im Bodensee (Foto: LAD)



Abb. 2 (→S. 95)

Eines der ältesten Räder: Der Radfund aus dem Olzreuter Ried, 2900 v.Chr. wurde mit PEG 2000 und anschließender Gefriertrocknung konserviert (Foto: Y. Mühleis, LAD).



## 1. DIE ENTWICKLUNG DER NASSFUNDKONSERVIERUNG

Aufgrund der genannten Schwierigkeiten wurden bereits seit Mitte des 19. Jahrhunderts geeignete Konservierungsmethoden gesucht, um das empfindliche Fundmaterial vor dessen Zerfall zu bewahren.

### 1.1 ANFÄNGE

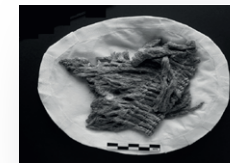
Eine der ersten Strategien war die Alaun-Methode zur Konservierung von archäologischem Nassholz, welche von C.B. Herbst 1861 in Skandinavien entwickelt wurde (Braovac und Kutzke 2012: 482, Christensen 1951: 55). Beispielhaft sei hier die Konservierung der Holzfunde aus dem Grabhügel von Oseberg genannt, einem der wichtigsten Fundkomplexe der Wikingerzeit (834 n. Chr.), der 1904 in Norwegen entdeckt wurde. Die meisten Fragmente wurden in einer gesättigten Alaun-Lösung ( $KAl(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$ ) gekocht, mit einem Überzug aus Leinöl versehen und mit Nägeln, Metallstiften, Klebstoffen, Füllstoffen – darunter rezentes Holz – sowie einem Überzug aus Kunstharz versehen. Die Funde sind erhalten geblieben, sind jedoch sehr fragil, rissig und brüchig und können ihr Eigengewicht kaum tragen. Bei feuchter Lagerung können sich auf der Oberfläche Ausblühungen des Salzes bilden (Rosenqvist 1959: 13ff) und der pH-Wert des Holzes ist stark sauer. Aufgrund dieser Probleme bleibt die Bewahrung der Osebergfunde weiterhin eine große Herausforderung, wobei interdisziplinäre Forschung den Abbaumechanismen und möglichem konservatorischen Eingriffen auf den Grund gehen (Braovac und Kutzke 2012: 481f).

### 1.2 DIE ALKOHOL-ÄTHER-METHODE

Neben der Alaun-Methode waren auch die Tränkung von Objekten mit Ölen und Harzen wie Leinöl, Carbolineum, Glycerin, Terpeninöl, Leim, Tapetenkleister oder die Verkieselung mit Wasserglas mit bescheidenen Erfolgen üblich (Rathgen 1924). Die unbefriedigende Situation bewog B. Christensen (1951) im Dänischen Nationalmuseum in Kopenhagen dazu, eine neue Methode zu entwickeln. Neben Versuchen zur Lösungsmitteltrocknung publizierte er 1951 die Alkohol-Äther-Methode, bei der nach und nach das

Abb. 3 (→S. 96)

Ein neolithisches Zwirngeflecht aus dem Degersee wurde mit hochmolekularem PEG getränkt und gefrier-getrocknet (Foto: Y. Mühleis, LAD).



Wasser in der Holzstruktur durch das Lösungsmittel Ethanol, dieses anschließend durch Ether ersetzt wird. In der letzten Stufe wird der Fund in Dammarharz, der in Ether gelöst ist, getränkt und anschließend im Vakuum getrocknet. 1948 wurde diese Methode am Schweizerischen Landesmuseum eingeführt und modifiziert, indem neben Dammarharz unter anderem auch Kolophonium, Standöl, Öllack und Rizinusöl verwendet wurden (Kramer und Mühletaler 1967: 78ff, Kramer 1979: 127f). Aufgrund der guten Resultate ist sie heute noch trotz des hohen sicherheitstechnischen Aufwands beim Umgang mit Großmengen leicht flüchtiger Lösemittel im Schweizerischen Nationalmuseum Zürich gebräuchlich.

### 1.3 MELAMINHARZE

Bereits in den 1930er-Jahren wurden Versuche zur Konservierung von Nasshölzern mit Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsharzen durchgeführt, die aber nicht weiter verfolgt wurden (Bill und Mühlethaler 1979: 101). Im Jahre 1960 publizierten Haas und Müller-Beck die Konservierung von Nasshölzern mit Arigal C, einem Melaminharz der Firma Ciba. Dabei wurden die Funde mit dem gelösten Vorkondensat Arigal C, dem ein Katalysator zugegeben wurde, getränkt und im Wärmeofen durch Polykondensation irreversibel vernetzt. Nachdem Arigal C nicht mehr zu beziehen war, wurde von Ciba-Geigy alternativ Lyofix 4036 (Lyofix DML) angeboten. Nach der Konservierung wurde ein Überzug aus einer Lösung eines Polyvinylacetats aufgetragen (Ebert 1977). A. Haas (1985) beschreibt aufgrund von Engpässen in der Produktion die Herstellung von Melamin-Formaldehyd-Vorkondensaten und Versuche mit Lyofix DML. Anschließend wurde ein konservierter Fund von F. Schweingruber und W. Schoch mikroskopisch untersucht. Diese bestätigten ein optimales Konservierungsergebnis, da sich das Melaminharz in der sekundären Zellwand niederschlägt. Jedoch zeigte sich, dass die mit Arigal beziehungsweise Lyofix konservierten Funde viele Querrisse aufwiesen. Zudem waren schwer zu entfernende Niederschläge des Harzes auf deren Oberfläche durch das schnelle Aushärten des Harzes sichtbar.

Im Römisch-Germanischen Zentralmuseum in Mainz (RGZM), das seit 1963 Erfahrungen mit der Konservierung von Nasshölzern mit Melamin/Aminoharzen aufweist, wurde Anfang der 90er-Jahre

die Methode durch die Initiative von A. Kramer (RGZM) und Wissenschaftlern der BASF modifiziert und 1998 von M. Wittköpper als »Kauramin Tränkharz® CE 5549 flüssig« publiziert. Die Neuerung bestand darin, die Lebensdauer des Tränkbades zu verlängern, um »spontan entstehende Harzniederschläge auf der Oberfläche zu verhindern«. Zudem wurde das Aminoharz durch Modifikation mit Ethylenglykol flexibler, was die Neigung zur Bildung der Querrisse verhindern sollte.

Aufgrund der guten Formstabilisierung wird das Harz jetzt unter dem Namen Kauramin 800 bis heute am RGZM verwendet (<http://www.rgzm.de/kur>), wobei die nach der Konservierung stark ausgebleichte Oberfläche mit Wachsen, Kunstharzen oder Ölen behandelt und gefestigt wird (Wittköpper 1998: 281). Derzeit werden mit dieser Methode die 31 Schiffswracks konserviert, die bei Bauarbeiten während des Marmaray-Projektes im Istanbuler Stadtteil Yenikapi geborgen wurden (Kocabas 2012: 1). Die Überprüfung der Alterungsstabilität sowie der Möglichkeiten der Neukonservierung des irreversibel aushärtenden Konservierungsmittels stehen noch aus. Inwieweit gefestigte Hölzer durch Emission von Formaldehydspuren andere empfindliche Materialien gefährden, ist ungeklärt.

#### 1.4 POLYETHYLENGLYKOL

Bereits 1948/49 wurde in Schweden und in den USA die Konservierung von rezentem Holz mittels Polyethylenglykol (PEG), einer Art wasserlöslichem Wachs, beschrieben. Nur wenige Jahre später erwähnte Stamm die Möglichkeit, archäologisches Nassholz mit PEG zu behandeln. Rosenqvist und Organ beschrieben 1959 unabhängig voneinander die Verwendung von Polyethylenglykol und erzielten damit eine gute Formstabilisierung. So wurden ganze Schiffe mit dieser Methode konserviert. Das prominenteste Beispiel ist die schwedische Vasa, das Schlachtschiff von König Gustav Adolf II, das 1628 auf seiner Jungfernfahrt sank und erst 1961 gehoben wurde. Die Konservierung, Trocknung und Restaurierung der Vasa dauerte bis zu ihrer Ausstellung 1988 27 Jahre (Elding 2012: 371). Großprojekte, wie die Konservierung der 1962 gefundenen Wikingerschiffe von Skudelev in Dänemark, verbesserten die Techniken und das Wissen über die Konservierungsmethode, indem die Ketten-

länge des PEG-Moleküls dem Abbaugrad angepasst wurde (Jensen et al 2011: 15ff). Während der Konservierung der Bremer Kogge, dessen Holz unterschiedliche Abbaugrade aufweist, wurde von P. Hoffmann die Zwei-Stufen-Tränkung entwickelt. Die Verwendung von niedermolekularem PEG bei der ersten Tränkung zielt auf die Stabilisierung der intakten Zellwände des gut erhaltenen Holzkerns. Anschließend wurde hochmolekulares PEG eingesetzt, um die stark abgebauten Bereiche, bei denen nur fragmentarische Zellwände vorhanden sind, zu konservieren (Hoffmann 1986: 110). Großformatige Holzobjekte werden heute immer noch mit dieser Methode konserviert.

#### 1.5 SACCHAROSE UND ZUCKERALKOHOLE

Seit der Publikation von beispielsweise Parrent (1985), der vertretbare Stabilisierungsergebnisse von Nassholz erzielte, wurden viele Versuche mit dem preisgünstigen Konservierungsmittel Saccharose (Rohrzucker) durchgeführt (u. a. Koesling 1992, Hoffmann 1996). Beispielsweise wurden ein bronzezeitlicher Einbaum aus Ivera, Italien (Strigazzi 1997: 258) und der 18 Meter lange, mittelalterliche Lastensegler von Immenstadt am Bodensee mit normalem Haushaltszucker konserviert. Der Vorteil der Methode erschien in der Affinität des Zuckers zu Holz, seiner kleinen Molekülgröße und der damit verbundenen schnellen und effektiven Konservierung zu liegen. Als Nachteil dieser Konservierungsmethode erwies sich jedoch, dass sie im Gegensatz zu anderen Verfahren weniger verlässliche Ergebnisse liefert, und dass die Lösungen nur durch massiven Einsatz von Bioziden stabilisiert werden können (u. a. Hoffmann 1996: 231, Mietke und Martin 1999: 289). Denn durch Säure oder enzymatischen Abbau von Mikroorganismen wird das Disaccharid Zucker in seine stark hygroskopischen Bausteine Glucose und Fruktose gespalten (u. a. Schiweck 1996: 241). Aus diesem Grund geben heute viele Restauratoren anderen Methoden den Vorzug, weshalb die Zuckerkonservierung heute kaum noch Anwendung findet.

Zahlreiche Forschungen zur alternativen Verwendung von biologisch schwerer abbaubaren Zuckeralkoholen beschäftigten sich beispielsweise mit Lactitol, Trehalose und Mannitol (Morgós et al. 2008, Murray 1985).

## 1.6 DIE GEFRIERTROCKNUNG

Die Anwendung der Gefriertrocknung von archäologischen Funden wurde vermutlich erstmals Mitte der 1950er-Jahre in den Niederlanden, in der Sowjetunion, in Dänemark, England und der Schweiz durchgeführt (Ambrose 1990: 237). Die Gefriertrocknung basiert darauf, dass das imprägnierte Objekt zunächst eingefroren wird. Durch die Absenkung des Drucks in der Gefriertrocknungsanlage erfolgt die Sublimation des gasförmigen Wassers aus der Struktur. In der Gefriertrocknungsanlage resublimiert das Wasser auf einem gekühlten Kondensator als Eis. Dadurch wird die flüssige Phase im Objekt vermieden, bei der Oberflächenspannungen auftreten. Durch die Volumenzunahme von Wasser beim Einfrieren wird das Fundmaterial jedoch beschädigt und sehr trocken und brüchig (Ambrose 1990: 242, Organ 1959: 100).

Christensen (1970) fand einen Weg, diese Schäden zu vermeiden, in dem er das Gefriertrocknungsverfahren in Kombination mit dem Lösungsmittel Tertiärbutylalkohol anwendete. A. Rosenqvist (1959) beschreibt das Verfahren an den Oseberg-Funden. In den 1960er-Jahren wurden erstmals archäologische Nassholzfundstücke aus Papua-Neuguinea mit niedermolekularem PEG getränkt und anschließend gefriergetrocknet (Ambrose 1990: 242). Das niedermolekulare PEG dient als Cryoprotektor und verhindert das Ausdehnen des Wassers beim Einfrieren.

In ihrer Forschung kombinierten C. Cook und D. Grattan (1990) niedermolekulares und hochmolekulares PEG mit der Gefriertrocknung, um die Menge an verwendetem PEG genau dem Abbaugrad und der Holzart des Fundes anzupassen (<http://www.cci-icc.gc.ca/tools-outils/pegcon/index-eng.aspx>). Diese Methode ist heute weit verbreitet und liefert gute Resultate.

Der Nachteil in der Anwendung des hygroskopischen niedermolekularen Polyethylenglykols ist, dass der Schmelzpunkt der wässrigen Lösung bei einer Gefriertrocknung nicht unterschritten werden kann (Jensen und Schnell 2005). Zudem sind sie bei der Lagerung mobil, wandern aus dem Objekt heraus und bergen aufgrund ihrer Hygroskopizität ein erhöhtes Risiko von Abbaureaktionen nach der Konservierung. Dementsprechend ist zumeist nur hochmolekulares PEG 2000 für die Vortränkung gebräuchlich – insbesondere in den skandinavischen Ländern (Jensen et al. 2011).

Hinsichtlich der technischen Anforderungen bei der Gefriertrocknung von Feuchtbodenfunden beschreiben Hoffmann et al. (1991: 202) vergleichende Untersuchungen zur Trocknung von Holzartefakten. Aufgrund der erhöhten Strahlungswärme und des mangelnden Abtransportes des Wasserdampfes wird eine Gefriertrocknung mit gekühltem Rezipienten empfohlen. Darüber hinaus zeigten Forschungen von P. Jensen und seinen Kollegen (2009) weitere technische Anforderungen an den Gefriertrocknungsprozess auf.

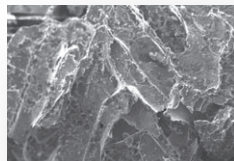
## 2. FORSCHUNGSARBEITEN DER STUTTGARTER AKADEMIE

An der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste waren die Lösungsversuche zur Konservierung und Trocknung von archäologischen Nassfunden bereits im zweiten Jahrgang des Studiengangs Objektrestaurierung ein Thema der Abschlussarbeiten. Petra Sterz verglich 1993 in ihrer Diplomarbeit verschiedene Konservierungs- und Trocknungsverfahren von archäologischem Nassleder. Zwei Jahre später untersuchte Inka Potthast (1995) in ihrer Diplomarbeit mit Zucker konserviertes, archäologisches Nassholz mittels Computertomographie. Mit der Konservierung eines textilen Fundobjektes befasste sich Ulrike Rothenhäusler (2002) in ihrer Diplomarbeit. In einer Semesterarbeit untersuchte Maja Weichert (2001) die Gefriertrocknung mit Trockenmittel in einer Gefriertruhe – eine kostengünstige Alternative zur Vakuumgefriertrocknung. Für das Labor für Archäometrie und Konservierungswissenschaften der Akademie konnte C. Krekel im Jahre 2005 ein atmosphärisches Rasterelektronenmikroskop (REM) mit Kühleinrichtung beschaffen, womit das Forschungsspektrum erweitert wurde. Die publizierte Diplomarbeit von Ingrid Wiesner (2009) befasste sich mit archäologischem Nassleder und zeigte die Komplexität der Vorgänge bei der Gefriertrocknung (Wiesner und Krekel 2009).

Aktuell (2012 bis 2014) wird in diesem Bereich ein Drittmittelprojekt der Akademie von der DFG gefördert, das in Kooperation mit dem Landesamt für Denkmalpflege durchgeführt wird. Ziel ist es, die Gefriertrocknungsmethode für archäologische Feuchtbodenfunde weiterzuentwickeln, indem Konservierungslösungen auf deren Eignung für die Gefriertrocknung untersucht und deren Rahmenbedingungen bestimmt werden.

Abb. 4 (→S. 96)

Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der gefriergetrockneten Struktur einer ehemals 20%igen Lösung aus PEG 4000 zeigt den Negativabdruck eines Eiskristalls (Foto: I. Wiesner).



Neben den allgemeinen Kriterien wie Alterungsstabilität, Oberflächenspannung oder dem pH-Wert, die bei der Auswahl eines Konservierungsmittels zu beachten sind, gibt der physikochemische Zustand des Konservierungsmittels während der Gefriertrocknung wichtige Hinweise für die Gestaltung des Gefriertrocknungsprozesses. Zunächst werden die Lösungen eingefroren. Konservierungsmittel wie hochmolekulare Polyethylenglykole, die in einer wässrigen Lösung vorliegen und beim Einfrieren zur Kristallisation neigen, durchlaufen eine eindeutige Phasenänderung von flüssig nach fest. Zuerst kristallisiert das Wasser aus, so dass sich die Lösung immer weiter aufkonzentriert. Schließlich wird die Lösung bei der eutektischen Temperatur ( $T_{eu}$ ) und einer bestimmten eutektischen Konzentration vollständig fest. Dagegen vollzieht sich der Phasenübergang von Konservierungsmitteln, die eine amorphe Struktur bilden wie Saccharose, langsam. Reines Eis friert immer weiter aus und die Konzentration und damit die Viskosität der Lösung nehmen immer weiter zu. Bei der Glasübergangstemperatur der maximal gefrierkonzentrierten Lösung  $T_g'$  ist das System jedoch vollständig als Glas erstarrt.

Während der sich anschließenden Primärtrocknung wird das Eis durch Sublimation aus dem System entfernt. Der wichtigste Parameter bei dem Gefriertrocknungsprozess ist die Temperatur des Objektes, die immer unterhalb der kritischen Temperatur ( $T_g'$  oder  $T_{eu}$ ) liegen muss. Am Ende der Trocknung ist das Wasser aus der Struktur des Konservierungsmittels entfernt, das als Gerüstbildner vorliegt. Bei kristallinen Stoffen sind die Abdrücke der ehemaligen Wasserkristalle deutlich zu sehen (**Abb. 4**).

Überschreitet die Objekttemperatur jedoch einen bestimmten Wert, wird das Konservierungsmittelgemisch flüssig. Durch das Auftauen der Lösung und der bei der Verdunstung entstehenden Spannungen bildet sich keine stabilisierende Gerüststruktur. Ein auf diese Weise getrocknetes Objekt kann dadurch beschädigt werden. Dennoch sollte die Temperatur so hoch wie möglich gewählt sein, um Zeit und Kosten zu sparen. Denn je höher die Temperatur ist, desto schneller ist die Trocknung zu Ende. Die Optimierung des Verfahrens setzt voraus, dass die kritische Temperatur, bei der das Konservierungsmittelgemisch gerade noch fest ist, bekannt ist.

Abb. 5 (→S. 96)

Gefriertrocknungstisch des Gefriertrocknungsmikroskops (Foto: I. Wiesner)



In Kooperation mit dem Institut für pharmazeutische Technologie der Universität Nürnberg-Erlangen werden diese Eigenschaften kalorimetrisch (Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)) bestimmt. Hier wird die Reaktionsenthalpie einer Probelösung im Vergleich zu einer Referenzprobe gemessen, die einem Zeit-Temperatur-Programm unterworfen ist. Endotherme oder exotherme Reaktionen wie das Schmelzen oder die Kristallisation einer Probe werden registriert. In einem sogenannten Thermogramm können dann  $T_{eu}$  sowie  $T_g'$  abgelesen werden (Wiesner und Beirowski 2012).

Ein besonderer Schwerpunkt des Projektes besteht darin, die Konservierungsmittel in einem eigens für das Projekt beschafften Gefriertrocknungsmikroskop systematisch während der Gefriertrocknung zu analysieren (**Abb. 5**, Wiesner et al. im Druck). Dieses besteht aus einem Durchlichtmikroskop (Axio Scope.A1, Carl Zeiss) und einem Gefriertrocknungstisch (FDCS 196, Linkam Scientific Instruments, UK), der mit flüssigem Stickstoff gekühlt und mit einer Vakuumpumpe (IImvac GmbH, Germany) evakuiert werden kann. Der Druck in der Kammer wird mit einem Pirani-Messfühler überprüft. Während einer Messung wird der Zustand der Probe mit einer Kamera (Firewire, Pixelink) aufgenommen; die Bilder können anschließend mit der Software Linksys 32 (Linkam Scientific Instruments, UK) analysiert werden.

Zur Analyse der Lösungen werden diese in der Gefriertrocknungskammer zwischen zwei Objektträgern platziert. Ein Abstandhalter garantiert eine gleichmäßige Schichtdicke und damit Reproduzierbarkeit. Schon beim Einfrieren der Lösung können wichtige Hinweise über die Eigenschaften des Konservierungsmittels im polarisierten Licht dokumentiert werden. Nach dem Evakuieren der Gefriertrocknungskammer erfolgt die Trocknung entlang einer Sublimationsfront von außen ins Innere des Tropfens. Der dunkle Bereich im Durchlicht zeigt die bereits gefriergetrocknete Matrix (**Abb. 6 und 7**).

Durch die Auswertung der bei der Messung erhobenen Bild- daten können Rückschlüsse auf die kritische Temperatur geschlossen werden. Insbesondere kann nur mit dieser Methode die Kollapstemperatur von amorphen Mischungen bestimmt werden, die im Allgemeinen um ein paar Grad über  $T_g'$  liegt. Bei dieser Temperatur kollabiert die gefriergetrocknete Substanz: Es entstehen

Abb. 6 (→S. 96)

Eine Lösung aus 20% PEG 2000 während der Gefrierdrying. Der dunkle Bereich zeigt die gefriergetrocknete Substanz; in der Bildmitte zeigen Blasen das Schmelzen der Lösung bei  $-16,7^{\circ}\text{C}$ . Im hellen Bereich liegt die Lösung gefroren vor (Foto: I. Wiesner)

Risse und Löcher im Sublimationsbereich oder in der gefriergetrockneten Matrix, die mit Hilfe eines Pol-Filters und einem Lambdaplättchen präzise detektiert werden können.

Der Vorteil des Verfahrens gegenüber der DSC liegt darin, dass vergleichende Aussagen über die Trocknungseigenschaften des Konservierungsmittels gemacht und damit die Eignung eines Konservierungsmittels für die Gefrierdrying beurteilt werden kann. Zudem wird die kritische Temperatur im dynamischen Gefrierdryingprozess analysiert, was den realen Bedingungen entspricht. Dennoch sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Daten aus dem beschriebenen Labormaßstab in die praktische Arbeit der Nassfundkonservierung zu übertragen.



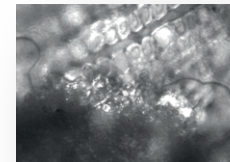
#### FAZIT

Die Methoden der Nassfundkonservierung haben sich zweifelsfrei weiterentwickelt. Jedoch hat sich im praktischen Alltag gezeigt, dass noch bis heute Forscher selten in der Archäologie auf bereits konservierte Funde zurückgreifen können. Aufgrund der langwierigen und kostspieligen Konservierung und des hohen Fundaufkommens zählt das Material Nassholz zu den am aufwändigsten und schwierigsten zu konservierenden Materialien. Auf die Herausforderung, die die organischen Feuchtbodenfunde mit sich bringen, sollten Restauratoren in ihrer Ausbildung vorbereitet werden. Zudem müssen einfachere und effektivere Methoden entwickelt werden, um zukünftiges Fundmaterial und insbesondere die zahlreich vorhandenen organischen Objekte, die nicht aus Holz bestehen, besser zu erhalten. Der Studiengang will zu beidem beitragen.

LITERATUR: Ambrose, W.R., *Application of freeze-drying to archaeological wood*. In: *Archaeological wood: properties, chemistry, and preservation. Advances in chemistry* 225. R.M. Rowell und R.J. Barbour (Hrsg.). American Chemical Society, Washington, DC, United States (1990): 235–261 · Bill, J. und B. Mühlethaler, *Zum Aufbau und zur Entwicklung der Holzkonservierung*. In: *Zeitschrift für Schweizerische*

Abb. 7 (→S. 96)

Ein Dünnschnitt aus Holz, der in eine Matrix aus 20% PEG 2000 eingebettet ist, während der Gefrierdrying. Der dunkle Bereich zeigt die gefriergetrocknete Substanz; in der Bildmitte zeigen Blasen das Schmelzen der Lösung bei  $-17,0^{\circ}\text{C}$ . Im hellen Bereich liegt die Lösung gefroren vor (Foto: I. Wiesner)



*rische Archäologie und Kunstgeschichte* 36/2 (1979): 99–102 · Braovac, S. und H. Kutze, *Past conservation treatments and their consequences: the Oseberg find as a case study*. In: *Proceedings of the 11th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Greenville 2010*. K. Strætkvern und E. Williams (Hrsg.). ICOM Committee for Conservation. Working Group on Wet Organic Archaeological Materials, Bremerhaven, Germany (2012): 481–495 · Christensen, B.B., *Om Konservering af Mosefundne Traegenstande; Aarbøger for nordisk oldkyndighed og historie* (1951): 22–62 · Christensen, B.B., *The conservation of waterlogged wood in the National Museum of Denmark*; Nationalmuseet (Denmark), Copenhagen, Denmark (1970) · Cook, C. und D. W. Grattan, *A method of calculating the concentration of PEG for freeze-drying waterlogged wood*. In: *Proceedings of the 4th ICOM-Group on wet organic archaeological materials conference*. P. Hoffmann (Hrsg.). ICOM-CC Group on wet organic archaeological materials. Bremerhaven 1990: 239–252 · Ebert, H., *Zur Feuchtholzkonservierung*. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren* 8/1, Gruppe 8 (1977): 78–80 · Elding, L.L., *Vasa; recent preservation research*. In: *Proceedings of the 11th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Greenville 2010*. K. Strætkvern und E. Williams (Hrsg.). ICOM Committee for Conservation. Working Group on Wet Organic Archaeological Materials, Lulu.com (2012): 371–382 · Haas, A., *Neue Entwicklungen bei der Naßholzkonservierung mit Melamin-Formaldehyd-Kondensaten*. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren* 18/1, Gruppe 8 (1985): 122–127 · Jensen, P., A.H. Petersen und K. Strætkvern, *From the Skuldelev to the Roskilde ships – 50 Years of shipwreck conservation at the National Museum of Denmark*. In: *Shipwrecks 2011*. 18.–21. Oktober, Stockholm. M. Ek (Hrsg.): 20–27., <http://shipwrecks2011.com/conference-proceedings> (27.7.2013) · Jensen, P. und U. Schnell, *The implications of using low molecular weight PEG for impregnation of waterlogged archaeological wood prior to freeze-drying*. In: *Proceedings of the 9th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Copenhagen, 7.–11. June 2004*, P. Hoffmann, K. Strætkvern, J. A. Spriggs und D. Gregory (Hrsg.), ICOM Committee for Conservation. Working group on wet organic archaeological materials, Bremerhaven (2005): 279–310 · Jensen, P., K. Strætkvern, U. Schnell und J.B. Jensen, *Technical specifications for equipment for vacuum freeze-drying of PEG impregnated waterlogged organic materials*. In: *Proceedings of the 10th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Amsterdam 2007*, K. Strætkvern und D.J. Huisman (Hrsg.), Amersfoort: Rijksdienst voor Archeologie Cultuurlandschap en Monumenten. Nederlandse archeologische rapporten (NAR) 37 (2009): 417–438 · Müller-Beck, H.J. und A. Haas, *A method for wood preservation using Arigal C*. In: *Studies in Conservation* 5/4 (1960): 150–158 · Hoffmann, P., R. Riens und D. Eckstein, *Zur Gefrierdrying schwer zu konservierender Naßhölzer*. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren* 24/1(1991): 139–205 · Hoffmann, P., *Zur Naßholzkonservierung mit Zucker am Deutschen Schiffahrtsmuseum – eine Bilanz*. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren* 30/1 (1996): 231–240 · Hoffmann, P., *On the stabilization of waterlogged oakwood with PEG. II. Designing a two-step treatment for multiquality timbers*. In: *Studies in Conservation* 31 (1986): 103–113 · Kramer, W., *Die Alkohol-Äther-Harz-Methode*. In: *Zeitschrift für Schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte* 36/2 (1979): 127–131 · Kramer, W. und B. Mühlethaler, *Über die Erfahrungen mit der Alkoholäthermethode für die Konservierung von Nassholz am Schweizerischen Landesmuseum*. In: *Zeitschrift für Schweizerische Archäologie und*

*Kunstgeschichte* 25 (1967/68): 78–89 · Koesling, V., *Konsolidierung wassergesättigter Naßholzfunde mit heißen Zuckerlösungen*. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren* 25/2, Gruppe 8 (1992): 217–221 · Kocabas, U., *The Latest Link in the Long Tradition of Maritime Archaeology in Turkey: The Yenikapı Shipwrecks*. In: *European Journal of Archaeology* 15/1 (2012): 1–15 · Mietke, H. und D. Martin, *Zuckerkonservierung des Frieslandschiffes – chemisch-mikrobiologische Untersuchungen und Erkenntnisse*. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren* 33/1, Gruppe 8 (1999): 284–290 · Morgós, A., S. Imazu und K. Ito, *A summary and evaluation of 15 years research, practice and experience with lactitol methods developed for the conservation of waterlogged, degraded archaeological wood*. In: *ICOM-CC 15th Triennial Conference, New Delhi, 22–26 September 2008, preprints*. J. Bridgland (Hrsg). Allied Publishers, New Delhi (2008): 1074–1081 · Murray, H., *The use of mannitol in freeze-drying waterlogged organic material*. In: *The Conservator* 9 (1985): 33–35 · Organ, R.M., *Carbowax and other materials in the treatment of water-logged paleolithic wood*. In: *Studies in Conservation* 4 (1959): 96–105 · Parrent, J.M., *The conservation of waterlogged wood using sucrose*. In: *Studies in Conservation* 30 (1985): 63–72 · Potthast, I., *Computertomographische Untersuchungen zum Eindringverhalten von Saccharose-Lösung bei der Stabilisierung von archäologischem Nassholz*; Diplomarbeit, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (1995) · Rathgen, F., *Die Konservierung von Altertumsfunden, Teil II und III*; DeGruyter, Berlin (1924) · Rosenqvist, A.M., *The stabilizing of wood found in the Viking ship of Oseberg. Part I*. In: *Studies in Conservation* 4 (1959): 13–22 · Rothenhäusler, U., *Ein römisches Korbgeflecht aus Garzweiler Kr. Neuss – Freilegung, Konservierung und Herstellungstechnik*; Diplomarbeit, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (2002) · Schiweck, H., *Zucker/Saccharose – seine anwendungstechnisch relevanten Eigenschaften bei der Nassholzkonservierung*. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren* 29/2, Gruppe 8 (1996): 241–246 · Strigazzi G., *Nassholzkonservierung eines Einbaumschiffes der Bronzezeit*. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren* 30/1, Gruppe 8 (1997): 258–261 · Sterz, P., *Gefrier Trocknung von Nassleder*; Diplomarbeit, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (1993) · Weichert, M., *Versuche zur Gefrier Trocknung ohne Gefrier Trocknungsanlage*; Semesterarbeit, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (2001) · Wiesner, I., *Archäologisches Nassleder – Untersuchungen zur Konservierung mit Polyethylenglykol*; Schriftenreihe des Instituts für Museumskunde an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart Bd. 25. Anton Siegl Verlag, München (2009) · Wiesner, I. und J. Beirowski., *A Neolithic shoe from Sipplingen – Technological examination and conservation*. In: *Proceedings of the 11th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference: Greenville 2010*, K. Straetkvern und E. Williams (Hrsg), ICOM Committee for Conservation. Working Group on Wet Organic Archaeological Materials, Lulu.com (2012): 531–542 · Wiesner, I., G. Eggert und H. Gieseler, *Freeze Dry Microscopy – Real-Time Observation of the Drying Process*. In: *Proceedings of the 12th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Istanbul 2013*, im Druck · Wiesner, I. und C. Krekel, *Low Vacuum Scanning Electron Microscopy of Waterlogged Archaeological Leather*. In: *Proceedings of the 10th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Amsterdam 2007*, H. Huisman und K. Straetkvern (Hrsg), Drukkerij Stampij Amersfoort (2009): 741–760 · Wittköpper, M., *Der aktuelle Stand der Konservierung archäologischer Naßhölzer mit Melamin/Aminoharzen am Römisch-Germanischen Zentralmuseum*. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren* 49/2, Gruppe 8 (1998): 277–283 · [www.cci-icc.gc.ca/tools-ouils/pegcon/index-eng.aspx](http://www.cci-icc.gc.ca/tools-ouils/pegcon/index-eng.aspx) (27.7.2013) · [www.rgzm.de/kur](http://www.rgzm.de/kur) (27.7.2013)