

Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte	83	S. 125 - 140	Halle (Saale)	2000
--	----	--------------	---------------	------

## **Experimentelle Branntkalkerzeugung in einem germanischen Grubenofen als Pilotversuch**

von Rosemarie Leineweber, Halle (Saale), und Kay-Uwe Uschmann, Berlin

Im Rahmen der Erforschung des germanischen Kalkbrennens wurde Mitte Juni 1997 der bundesweit erste Versuch einer Rekonstruktion der dabei verwendeten Brennanlagen und deren Inbetriebnahme durchgeführt.<sup>1</sup> Nach langjähriger theoretischer Beschäftigung des Autors, K.-U. Uschmann, mit der Erzeugung und Verwendung von Branntkalk bei den Germanen reifte der Entschluß, den Bau und das Brennen experimentalarchäologisch nachzuvollziehen. Die Autorin, R. Leineweber, hatte in der Altmark in den vergangenen Jahrzehnten mehrere dieser germanischen Ofenanlagen ausgegraben und sie bereits in anderen Versuchen erprobt.<sup>2</sup> Nun sollte der erste Brennversuch von Kalk in einem germanischen Ofen, der im Experimentiergelände der Langobardenwerkstatt in Zethlingen, Altmarkkreis Salzwedel, geplant war, als Teamarbeit beider Autoren unter Mithilfe von Frau F. Elsweiler, Studentin der Ur- und Frühgeschichte an der Humboldt-Universität zu Berlin, weitere Erkenntnisse bringen. Unterstützt wurde dieses Projekt auch vom Museumspark der Baustoffindustrie Rüdersdorf.

### Das archäologische Experiment

Ausgangspunkt sind stets archäologische Befunde und Funde und auf deren Interpretation<sup>3</sup> basierende Hypothesen<sup>4</sup> über Entstehungsprozesse technischer oder baulicher Anlagen und deren Nutzung bzw. Herstellungsprozesse von Gegenständen oder Materialien. Das Experiment soll ebenso Aussagen zum Originalzustand einer Anlage sowie deren Gebrauchsfähigkeit überprüfen.<sup>5</sup> Auch hier ist analog zur Natur- und Sozialwissenschaft eine Gesamtdokumentation des Experiments, seiner Voraussetzungen, seiner Ausgangssituation, des angewandten Instrumentariums, des Prozeßverlaufs und letztendlich der Ergebnisse unerlässlich. Erst auf dieser Grundlage kann - mit Bezug auf die Ausgangsfragestellung - eine Deutung des Versuchsergebnisses im Abgleich mit dem archäologischen Befund erfolgen.

Im Vorfeld jedes Experiments liegt die Phase der Erprobung, der praktischen Vorstufen. Oft macht erst das Erlernen einstiger Techniken die Durchführung eines Versuches möglich. Weder praktisches Können noch lebenslange Erfahrung sind durch moderne Analyseverfahren aufzuwiegen. Meßreihen dienen der Dokumentation und darüber hinaus der Kontrolle oder dem Abgleich eigener gewonnener praktischer Erfahrungswerte mit meßtechnisch faßbaren Größen. Vor Zeitaufwandsberechnungen muß jedoch gewarnt werden, weil den heutigen Experimentatoren trotz des Übens die generationenlange empirische Erfahrung (prä-)historischer Bevölkerungen fehlt.

Da im allgemeinen der erste Versuch nicht gelingt, stellt er jedoch eine Variante des auch der experimentellen Archäologie zu zollenden „Lehrgeldes“ dar, dem die Fehlersu-

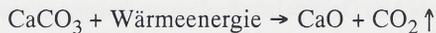
che folgt. Oft äußert sich gerade darin der Widerspruch zwischen theoretischer Überlegung und deren Umsetzung in die Praxis. Die experimentelle Archäologie zeigt also Lösungsvarianten auf, die von den Experimentatoren jedoch stets kritisch zu hinterfragen sind. Unter diesen Voraussetzungen stellt jedes abgeschlossene Experiment - unabhängig davon, ob mit positivem oder negativem Ergebnis - ein Stück Kenntnisfindung dar und trägt so zur Erweiterung archäologischer Erkenntnisse bei.

Den üblichen Literaturstudien zu Kalkbrennversuchen folgte die sich als schwierig gestaltende Suche nach Wiesenkalk<sup>6</sup> als Ausgangsstoff und nach Personen - den Kalkbrennern -, die das Brennen selbst als Handwerk ausgeübt haben. Dabei stellte sich heraus, daß bisher kein Brennversuch in einem germanischen Ofen bekannt geworden ist und lediglich die Erfahrungen aus dem römischen Bereich<sup>7</sup> und dem Mittelalter für den vorgesehenen Versuch heranzuziehen waren. Auch gelang es weder, einen Kalkbrenner ausfindig zu machen, noch eine Lagerstätte von Wiesenkalk aufzuspüren. Daher mußte der Versuch, auf Literaturquellen und Informationen aus der modernen Industrie basierend, ohne einschlägige praktische Sachkenntnis sowie außerdem ersatzweise mit Muschelkalk aus dem Museumspark der Baustoffindustrie Rüdersdorf bei Berlin durchgeführt werden.

### Der chemische Prozeß

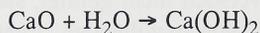
Der genaue Vorgang der Kalkzirkulation<sup>8</sup>, der heute in den nachfolgenden vereinfachten chemischen Formeln dargestellt wird, war den Völkern des freien Germanien natürlich unbekannt.

Als Ausgangsstoff benötigt man immer Calciumcarbonat. Die in der Natur anzutreffenden Kalksteinsorten weisen außer  $\text{CaCO}_3$  auch Verunreinigungen in verschiedenster Stärke auf.<sup>9</sup> Je nach der Verwendung können diese von Vorteil oder Nachteil<sup>10</sup> sein. Der theoretische Ablauf der ersten Phase, einer stark vereinfachten endothermen Reaktion, wird allgemein so angegeben:



Aus Calciumcarbonat, das mit Hilfe von Wärmeenergie erhitzt wird, entweicht unsichtbar Kohlendioxyd. Unter Laborbedingungen benötigt man dazu eine Energiemenge von 178,1 kJ. In der Praxis muß eine größere Menge Energie zugeführt werden, da sich noch vor Beginn des eigentlichen Brennprozesses im Kalkstein gebundenes Wasser lösen und anschließend ausgetrieben werden muß. Um eine komplette Umwandlung zu gewährleisten, benötigt man bei einem Druck von 1,013 bar eine Temperatur von 908°C. Letztendlich gewinnt man auf Grund der Molverhältnisse aus 100 g Ausgangsmaterial etwa 56 g Branntkalk und 44 g Kohlendioxyd.

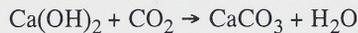
Durch diese thermische Zersetzung kann als Zwischenprodukt das Calciumoxid hergestellt werden. Eine wesentliche Eigenschaft des Calciumoxides besteht darin, sich mit Wasser zu Calciumhydroxid umzusetzen. Diese als Hydratation bezeichnete, nun exotherm ablaufende Reaktion wird mit folgender chemischer Gleichung dargestellt:



Das Calciumhydroxid als Produkt dieses Vorganges bildet eine weitere Zwischenstufe innerhalb der Kalkzubereitung und Verarbeitung. Kennzeichen dieser Reaktion ist eine

starke Wärmeentwicklung während des Löschvorganges.<sup>11</sup> Wie schnell dabei die Temperatur während des Prozesses ansteigt, hängt primär vom Brenngrad des Calciumoxides ab.<sup>12</sup> Ein Weichbrand löscht deshalb schnell und bei großer Wärmeentwicklung, während ein Hartbrand<sup>13</sup> träge reagiert und eine Wärmefreisetzung nur sehr langsam stattfindet.

Generell geht man davon aus, daß etwa 700 g Wasser notwendig sind, um aus 1 kg Calciumoxid ein Calciumhydroxidpulver herzustellen. Unterschieden durch die Menge verwendeten Wassers, unterteilt man den Vorgang in Naß-<sup>14</sup> und Trockenhydratation<sup>15</sup>. Beide Arten sind auch für die Bearbeitung in der römischen Kaiserzeit realistisch.<sup>16</sup> Wird dann z. B. eine Hauswand mit gelöstem Calciumhydroxid getüncht, erfolgt eine neue Reaktion, die Carbonisation:



Sobald Luft an das verstrichene Calciumhydroxid kommt, beginnt sofort die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Umgebung. Gleichzeitig wird während der Aushärtungsphase das überflüssige Wasser freigesetzt. Endprodukt ist wieder ein Kalkstein - diesmal aber eine dünne, jedoch sehr stabile Schicht -, der andere Baumaterialien vor Witterungsunfällen schützt.<sup>17</sup>

## Dokumentation

Um eine möglichst umfassende Rekonstruktion von Aufbau und Brennverlauf zu garantieren und die dabei gemachten Fehler später besser analysieren zu können, reichte eine einfache Fotodokumentation nicht aus. Zusätzlich wurde eine Videokamera eingesetzt, die die wichtigsten Geschehnisse ausführlicher belegen konnte. Um die Aufnahmequalität zu erhöhen, wurde neben der üblichen VHS-Technik auch die SVHS-Technik angewendet.

Während des Experimentes wurden die Temperaturen der Abgase, des Steingewölbes und des Brennraumes stündlich festgehalten, es wurde dabei versucht, immer dieselben Meßpunkte zu treffen, um einen hohen Grad an Vergleichbarkeit zu erreichen. Gelegentlich erfolgten auch weitere Temperaturmessungen in den Abgasen und auf der Außenseite der Lehmdecke. Nach Abschluß des Brennprozesses, in der Abkühlungsphase, fand im Zeitraum von sechs Stunden eine Dokumentation weiterer Vergleichsmessungen statt, so daß mit den einzelnen Beobachtungen, die schriftlich festgehalten wurden, ein gutes, komplexes Bild der angewandten Technologie entstand.

## Ofenbau

Auf Wunsch des Autors sollte der Brennversuch in einem Ofen vollzogen werden, der einem Grabungsbefund von 1959 aus Berlin-Bellevue entsprach (Abb. 1).<sup>18</sup> Dem Ausschachten der ovalen Grube in den Abmessungen 2,5 m x 2,2 m an der Oberfläche und 1,6 m x 1,2 m Grundfläche in 1,1 m Tiefe folgte das Auskleiden dieser Grube mit in fetten Lehm gesetzten Feldsteinen und das Verstreichen der Zwischenräume mit anstehendem Lehm, der mit Sand und Schamotte (zerkleinerte Lehmwand abgerissener Ofenanlagen) gemagert war. Somit entstand eine relativ glatte Innenseite und zugleich eine Stabilisierung der Grubenwand im weichen anstehenden Sand. Am Boden der Grube wurde

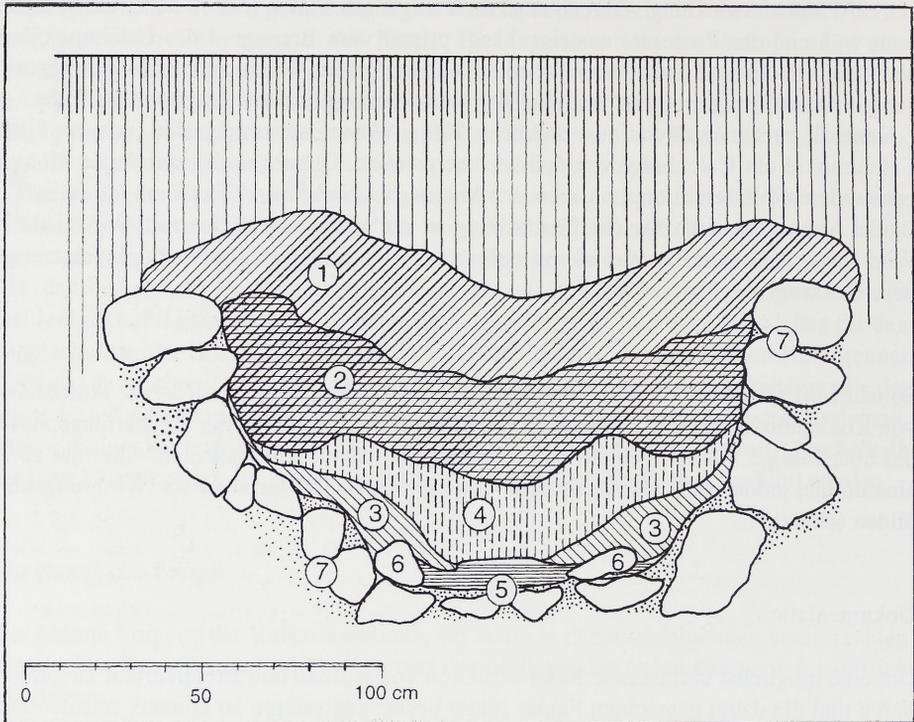


Abb. 1: Profil von Berlin-Tiergarten (v. Müller/Zimmermann 1960, Abb. 16). Beschreibung: 1/2 Lehmbruch mit Holzabdrücken; 3 Kalk auf Bankrest; 4 eingespülter Sand; 5 Steinpflaster, darauf Holzkohle; 6 verrutschte Steine; 7 Grube im Sandboden aus Feldsteinen; c Mittelpunkt

gemäß dem Befund eine hufeisenförmige umlaufende Konsole von ca. 0,3 m Breite und 0,25-0,3 m Höhe aus Feldsteinen und Lehm angelegt. Sie sollte dem später einzubringenden Kraggewölbe aus Kalkstücken als Widerlager dienen (Abb. 2). Für die Brenngrube waren etwa  $0,4 \text{ m}^3$  Lehm verwendet worden. Das anschließende Befeuern der Grube diente dem Austreiben der Feuchtigkeit, damit dem Festigen der Grubenkonstruktion und bildete so die Voraussetzung zum Einbringen des Kalkes. Der Raum zwischen der Konsole wurde mit Holzscheiten aufgefüllt. Diese mußten in der Art einer Stützkonstruktion für ein Gewölbe tonnenförmig eingeschichtet werden. Nachdem der Muschelkalk auf entsprechende, d. h. leicht trapezoide Stückform zugeschlagen worden war, wurde mit dem Beschicken des Ofens begonnen, wobei der Kalk in der Art eines falschen Gewölbes<sup>19</sup> aufzuschichten war (Abb. 3). Hier machte sich als Einschränkung die fehlende Erfahrung der Experimentatoren im Umgang mit dem Rohstoff bemerkbar. Auch beim Einstapeln der Kalksteine<sup>20</sup> wäre der Rat oder die Mithilfe eines Maurers von Vorteil gewesen, wie sich später herausstellen sollte.

In der Mitte der Längsseiten, am hinteren Ende und in der Mitte der Ofenanlage blieben während des Einfüllens der Kalksteine durch Platzhalter aus Stangenholz die später freizubrennenden Züge der Durchgasungspfeifen ausgespart.

Da es ungewiß war, wie sich Kalkstein und Lehmdecke in der Trocknungs- und Brennphase, z. B. bei zu erwartendem unterschiedlich starkem Schwund, verhalten würden,



Abb. 2: Hufeisenförmige Bank und Steinwandung



Abb. 3: Kalksteingewölbe auf Lehrgerüst, links und rechts ein eingebauter Holzbalken, der spätere Abzug

überdeckte den Kalkstein eine etwa 0,2 m starke isolierende Kontaktsperre aus Reisig und Stroh, die nun den eingebrachten Muschelkalk von der Lehmdecke und von herabfallenden Lehmklumpen trennte. Diese Zwischenlage sollte ebenso Trockenrisse im Lehm wie auch ein Verbinden von Lehm und Kalk mit nachfolgend mangelhafter Durchgasung verhindern.

Den Abschluß der Aufbauphase bildete die arbeitsaufwendige Deckenkonstruktion des Kalkbrennofens. Hierzu wurden entsprechend der archäologischen Befunde Rundhölzer von 8 cm bis 12 cm Durchmesser und 2,5 m bis 3,0 m Länge mit einem Stroh-Lehmgemisch umkleidet, nebeneinander zu einer abdeckenden Fläche auf der Ofengrube angeordnet und die Zwischenräume mit Lehm gleicher Magerung abgedichtet. In der Deckenkonstruktion blieben die vier Abzugslöcher über den Pfeifen in den Abmessungen 0,2 m x 0,2 m ausgespart. Den Abschluß zur Feuerung hin bildete ein Riegel aus zwei übereinander liegenden und mit einem Durchmesser von 0,15 m auch stärkeren Stangenhölzern in Lehmmantelung. Die Feueröffnung begrenzten seitlich aufgebraachte Rundhölzer auf eine lichte Weite von 0,6 m x 0,4 m. Für diese Abdeckung von bis zu 0,2 m Stärke wurden ca. 0,5 m<sup>3</sup> mit Sand und Schamotte gemagerter Strohlehm hergestellt und verarbeitet.

Die Aufbauphase der Anlage vom Auslesen der Feldsteine, dem Transport aller Rohstoffe, Ausheben der Grube, Aufbereiten und Verarbeiten des Lehms, Zurichten des Kalksteins, Einbau des Gewölbes bis zum Fertigstellen der Ofendecke hatte bis zu diesem Zeitpunkt ca. 70 Personenstunden in Anspruch genommen, wobei zu beachten ist, daß diese Zeitangaben lediglich ausweisen, wie schnell Menschen des 20. Jh. bestimmte Handlungen ausführen und diese daher keine Relevanz für historische Zeitabläufe besitzen.<sup>21</sup>

## Versuch

Wie bereits oben erwähnt, war die umlaufende Feldsteinkonsole das Bauelement, welches einen direkten Hinweis auf die angewendete Technologie gab. Diese Stufe und die Tatsache, daß beim Kalkbrennen mit Holz als Heizmaterial die langen Flammen durch die Kalksteine züngeln müssen, ließen den Rückschluß zu, daß nur eine Überwölbung des Brennraumes mit Hilfe des Rohstoffes die Realisierung des Brennprozesses ermöglichen konnte.<sup>22</sup> Während im hinteren Teil ein stabiles Kraggewölbe entstand, wurde der vordere Abschnitt der Brennkammer durch drei Steinbögen überbrückt. Nach Abschluß dieser Arbeit waren über 500 kg Muschelkalk über der Brennkammer aufgeschichtet und bereit zum Brennen.

Wegen einer Schlechtwetterperiode verzögerte sich der Brennbeginn. Nachmittags um 16 Uhr wurde der Ofen angefahren. Da zu Beginn des Brennexperimentes feuchtes, regnerisches Wetter vorherrschte, mußte eine provisorische Überdachung errichtet werden. Spezielles Werkzeug wurde während der Dauer nicht benötigt. Um das Brennmaterial an die festgelegte Stelle in der Brennkammer zu befördern, benötigte man lediglich eine stabile Eichenholzstange.

Der entfachte Ofen reagierte anfangs etwas träge. Das provisorische, aus Eichenholz erbaute Lehrgerüst behinderte die Sauerstoffzirkulation innerhalb des Brennraumes erheblich. Besonders der hintere Teil der Anlage wurde kaum erwärmt. Der Versuch wurde fortgesetzt, jedoch infolge hoher Luftfeuchtigkeit und ständig zu erwartender Regengüsse mittels technischer Hilfsmittel befördert, d. h. das Feuer wurde durch ein schwaches

Gebläse in Gang gebracht und gehalten. Wie sich später herausstellen sollte, war der Windzug für das Brennverfahren allerdings etwas zu stark. Nach einer Stunde Anheizen - das Stützgerüst war teilweise verbrannt - rächte sich die laienhafte Vermischung von Krag- und Tonnengewölbe. Der erste Steinriegel brach zusammen. Die keilförmigen Bogenstücke hatten nicht genug Auflage und konnten die Spannkraft deshalb nicht an die Feldsteinwände abgeben. Glücklicherweise hielten die nachfolgenden Bögen längere Zeit.

Das wichtigste Merkmal der ersten Stunden war die Wasserdampfabgabe, durch die die Anlage in Schwaden eingehüllt wurde. Diese Entwässerung lief bei einer Temperatur von 150-250°C ab. Nicht nur die Austrocknung der Lehmdecke erfolgte in dieser Zeit<sup>23</sup>, es begann auch das Austreiben des im Muschelkalk gebundenen Wassers. Am Rand der vier Abzugslöcher bildeten sich während dieser Phase einzelne Kondenswassertropfen. Besonders gut zog die linke Pfeife, gefolgt von der rechten. Dagegen gab die hintere erst nach ca. zwei Stunden den ersten Wasserdampf ab. Um den hinteren Abzug zu stimulieren, wurde die zentrale Pfeife abgedeckt. In Verbindung mit dem Gebläseeinsatz stieg so natürlich die Temperatur im Ofen sprunghaft an. Innerhalb einer Stunde erbrachte die Temperaturmessung im Brennraum eine Erhöhung von über 350°C auf ca. 800°C. Dies hatte zur Folge, daß ein Teil der Steine ungleichmäßig erhitzt wurde und durch die dabei entstehenden großen Spannkraft im Kristallgitter zerbarsten.<sup>24</sup> In dieser Phase stürzte ein weiterer Teil des vorderen Gewölbes ein, ohne jedoch den weiteren Brennprozeß deutlich zu behindern. Ursache war zum einen die Unerfahrenheit des Baumeisters, der die auftretenden Spannkraft innerhalb des Tonnengewölbes falsch einschätzte, zum anderen aber auch die Ungeduld. Eine zu schnelle Temperaturerhöhung im System durch den Gebläseeinsatz förderte die Instabilität in den Steinen, die regelrecht explodierten, und führte explizit zum Zusammenbruch jenes Gewölbeteiles. Die ungebremste Neugier und das heute allgemein übliche Bestreben, alles in kürzerer Zeit zu schaffen, hatten sich gerächt.

Von der Notwendigkeit des Einsatzes eines modernen Gebläses war man nach den dumpfen Explosionen nicht mehr überzeugt. Damit nicht noch weitere Fehler hinsichtlich der Temperaturführung im Ofen unterliefen, wurde es nach eingehender Sofortanalyse ausgeschaltet. Die Anlage blieb davon unbeeindruckt. Sie brannte von nun an ohne weitere Komplikationen und brauchte keinerlei moderne Hilfsmittel.

Natürlich wurde die Phase der Entwässerung durch den Gebläseeinsatz wesentlich verkürzt.<sup>25</sup> Bereits nach sechs Stunden herrschten im Brennraum Temperaturen von 885°C und in den Abzugslöchern wurden zwischen 529°C und 691°C gemessen. Immer häufiger schlugen kleine rote Flammen aus den beiden seitlichen Pfeifen heraus (Abb. 4).<sup>26</sup> Trotz Schließung der zentralen Abzugsöffnung wurde die hintere Pfeife kaum aktiviert. Selbst bei starker Feuerung war nur sehr selten ein „kleiner Fuchs“ zu beobachten, meist kam bloß etwas weißlicher Rauch. Erst beim Ausräumen der gebrannten Steine wurde die Ursache dafür erkannt. Das rückwärtige Gewölbeteil war stabil, aber zu dicht und mächtig gesetzt worden, die Flammen hatten kaum eine Chance, die Steinschicht zu umspielen und die Entfernung zwischen der Brennkammer und dem Abzugsloch zu überbrücken.

Nachdem ein Teil der eingestürzten Gewölbeteile geborgen war<sup>27</sup>, begann eine kurze Experimentierphase. Über eine Stunde wurde versucht, Klarheit über die Möglichkeiten einer Steuerung des Brennprozesses zu erhalten. Durch das Schließen der beiden Seitenpfeifen wurde die hintere Abzugsöffnung zwar stärker aktiviert, negativer Effekt war jedoch das Herausschlagen von Flammen aus der Feuerungsöffnung: Der beabsichtigte Abzug der Verbrennungsgase aus dem Brennraum durch die Pfeifen ins Freie war nicht



Abb. 4: Aus den hinteren Abzügen schlagen zwei „Füchse“  
(Rüdersdorfer Versuch)

mehr gewährleistet, da die Feueröffnung und damit das Sauerstoffangebot größer waren als die Summe aller Durchmesser der jetzt funktionsfähigen Pfeifen. Dies verhinderte eine natürliche Durchgasung während des Brennprozesses. Nachdem die Seitenöffnungen wieder in Betrieb gesetzt waren, blieb die hintere Pfeife noch für 10 Minuten aktiv, ehe der oben beschriebene alte inaktive Zustand wieder eintrat.

Nach sieben Stunden hatte sich das restliche Kalksteingewölbe etwas gesenkt, der Spalt zwischen Lehmdecke und Kalkstein wurde größer. Die Temperaturmessungen im Steingewölbe, die an den einzelnen Abzugsöffnungen durchgeführt wurden, ergaben Differenzen von bis zu  $200^{\circ}\text{C}$ <sup>28</sup>, wobei natürlich die rückwärtige Steinschichtung unter der hinteren Pfeife noch immer deutlich zu kühl war. Im Brennraum dagegen herrschten schon  $990^{\circ}\text{C}$ . Von nun an wurden dreimal pro Stunde Kiefernholzstangen nachgelegt. Die Phase der weiteren Temperaturerhöhung hatte begonnen, und es wurde darauf geachtet, daß dies allmählich erfolgte. Messungen an der steinernen Ofenwand zeigten, daß die Temperatur mit  $500^{\circ}\text{C}$  noch nicht sehr hoch war und Stabilitätsverluste deshalb unwahrscheinlich waren. Die Abgastemperaturen, kurz über den Öffnungen gemessen, schwankten nun um  $550^{\circ}\text{C}$ .

Drei Stunden später wurde die Befuerung intensiviert, d. h. innerhalb von 40 Minuten nun viermal nachgelegt und somit eine weitere Steigerung der Temperatur auf über  $700^{\circ}\text{C}$  erreicht. Im Brennraum war bei einer vorherrschenden Temperatur von über  $1065^{\circ}\text{C}$  ein großes Glutbett entstanden. Der trotz Windstille an der Feueröffnung entstehende Sog zog den Sauerstoff permanent in den Verbrennungsraum, und es entstanden dabei deutliche Flammenwirbel. Lange Flammen fanden den Weg zwischen die lockere Steinschichtung, die mittlerweile leicht rot erglühte. Regelmäßig schlugen die Füchse nun aus

den seitlichen Deckendurchbrüchen. Allerdings änderte sich in diesem Abschnitt die Priorität. Zuvor war besonders die linke Pfeife durch große Füchse und hohe Meßwerte aufgefallen. In ihrem Inneren durch einen von der Decke abgelösten Lehmbatzen behindert, wurde der Gasaustritt hier beachtlich gebremst und damit die rechte Pfeife für den Rest der Zeit zum Hauptabzug. Hier schlugen die Flammen bis zu 50 cm über die Lehmdecke und erleuchteten die nächtliche Umgebung.

Bis hierhin, zehn Stunden nach Brennbeginn, waren keine wesentlichen Veränderungen an der Lehmdecke beobachtet worden. Dies änderte sich sukzessiv mit steigender Kraft des Feuers. Kleine, schmale Risse wurden sichtbar und gaben schwarzen Rauch ab, ein Zeichen, daß die Verbrennung der inneren Holzelemente im vollen Gang war. Dabei erhitze sich der Lehmmantel beachtlich.<sup>29</sup> Über mehrere Stunden konnte dieses Geschehen verfolgt werden; zum Schluß waren nur noch kurze Holzstummel am Rand der Ofenabdeckung übrig. Die Lehmdecke besaß nun Röhren, die während des Brennvorganges zu Pfeifen umgewandelt wurden und zugleich wärmeisolierende Wirkung hatten.

Mit den Temperaturerhöhungen zwischen der 10. und 12. Stunde des Versuches änderte sich die Flammenfärbung auffällig in violett. Der eigentliche Brennvorgang, die Entsäuerung des Kalksteins, hatte begonnen. Jetzt gaben die Steine CO<sub>2</sub>-Gas ab und verwandelten sich allmählich in Branntkalk CaO. Der Gasaustritt war nicht nur an der aktuellen Flammenfarbe, sondern auch am sauren Geschmack auf den Lippen zu erkennen.

Während dieser Zeit wurde innerhalb einer Stunde fünf bis sechsmal Kiefernholz nachgelegt. Sehr gut war zu erkennen, daß die Kalksteine rot glühten. Einwandfrei brannte der rechte Teil der Anlage. Zwischen der 15. und 16. Stunde wurden die maximalen Temperaturen erreicht. Entsprechend der bereits oben beschriebenen Schwerpunktsverlagerung auf die rechte Ofenseite, waren hier über 900°C festzustellen. Im dortigen Steingewölbe erschienen die hellrot glühenden Steine fast glasig-durchsichtig. Über der flachen Lehmdecke erzeugten die hohen Abgastemperaturen einen flimmernenden Hitzespiegel.

Nach abermaligen Versuchen zur Steuerung des Brennverlaufes wurde der Versuch um 10 Uhr vormittags nach einer Dauer von 18 Stunden beendet. Der Brennraum, durch herabgefallene Kalksteine verkleinert, war restlos mit Holzglut angefüllt und somit eine Temperatursteigerung nicht mehr möglich.

Fast alle Öffnungen wurden nun mit Lehm verschlossen.<sup>30</sup> Entsprechend den Erkenntnissen aus dem provinzialrömischen Brennversuch sollte damit eine vollständige Durchgarung der Kalksteine garantiert werden.<sup>31</sup> Um den Abkühlungsvorgang genau zu dokumentieren, wurden die Temperaturmessungen der Abgase, des Steingewölbes und der Ofenwand noch sechs Stunden fortgesetzt. Während die Temperaturen im Gewölbe nur etwa 20°C pro Stunde abnahmen, fiel der Abgaswert pro gleichem Zeitraum stärker (etwa 50°C). Die Messungen an der Feldsteinwand erbrachten dagegen eine Temperaturreduzierung von ca. 30°C pro Stunde. Nach 24 Stunden ständiger Beobachtung des Brennprozesses stellte man die Messungen ein und ließ die Anlage bis zur völligen Abkühlung über Nacht ruhen.

Am nächsten Morgen war ein kleiner Teil der zentralen Lehmdecke eingestürzt. Dem Anschein nach hatten die erheblichen Temperaturunterschiede (im Ofen noch ca. 400°C und Nachttemperaturen von 10°C) zu Spannungen in der Lehmdecke geführt, die, unterstützt von einer hohen Luftfeuchtigkeit, den Teileinsturz herbeiführten. Der in Originallage befindliche Teil der Lehmdecke war noch sehr gut erhalten und erschien weiterhin stabil. Die Stangenhölzer waren im Lehmverband vollständig verbrannt und hatten ein System von parallel verlaufenden Röhren hinterlassen (Abb. 5). Die Lehmbruchstellen



Abb. 5: Blick auf die Überreste der Lehmabdeckung

ließen die Abdrücke von Fingern und Strohagerung noch gut erkennen. Die 12-15 cm starke Lehmschicht unterteilte sich in zwei deutlich differenzierbare Horizonte. Der Hauptteil war rot bis rotbraun gebrannt, grenzte sich aber auf der Oberseite von einer 2-3 cm starken tiefschwarzen, durch Rußpartikel und verkohlte Magerung hervorgerufenen Schicht ab, auf der manchmal noch intakte Strohalmreste nachweisbar waren. Der Lehm hatte infolge der vorherrschenden Temperaturen nur an wenigen Stellen eine Dauerumwandlung der Kristallstruktur in der Garbrandphase erreicht.<sup>32</sup> Beim Abbau stellte sich dann heraus, daß die Lehmbrocken schnell zerbröselten und ihre Überreste im Umkreis der Anlage in die Oberfläche eingetreten wurden. Diese Tatsache zeigt einleuchtend auf, wie gering die Möglichkeit bei archäologischen Untersuchungen ist, eine vollständige Abdeckung zu finden und somit konkrete Hinweise zum Ofenaufbau zu erhalten. Auch eine mögliche Mehrfachnutzung der Anlage kann somit an Hand der überlieferten Oberbaureste kaum geklärt werden.

Die gebrannten Kalksteine hatten ihr Aussehen kaum verändert, besaßen aber nun teilweise eine gelb-schweflige Färbung. Der zu große Temperatursprung in der Entwässerungsphase hatte zu vielen feinen Haarrissen in den Steinen geführt, Erklärung für die Knallgeräusche innerhalb dieses Zeitraumes. Neben der offenkundigen Gewichtsreduzierung<sup>33</sup>, zeugte auch ein anderer, hellerer Steinklang vom erfolgreichen Verlauf des Brennprozesses.

Das verwendete Brennholz war bis auf eine dünne Asche-Holzkohle-Schicht (ca. 5 cm stark), die sich auf der Grubensohle abgelagert hatte, vollständig umgesetzt worden. Bei einer kompletten Abdeckung des Glutbettes in der Abkühlungsphase mit Sand oder Erde hätte man als Nebenprodukt mehrere Säcke vorzüglicher Holzkohle gewinnen können.<sup>34</sup>

Der Unterbau der Anlage hatte keinerlei größeren Schaden genommen. Sowohl die Feldsteinkonsole als auch die Steinwände waren unversehrt. Nach einer gründlichen Rei-

nigung und Ausbesserung dieser Bauteile mit Lehm hätte ein erneuter Brennprozeß vorbereitet und anschließend durchgeführt werden können.

Der Bergung des Rohstoffes folgte ein erster Löschversuch. Einige vollständig abgekühlte Kalksteine, die durch Gewicht und Klang als gebrannt charakterisierbar waren, wurden in eine Schüssel gelegt und mit Wasser übergossen. Unter deutlicher Wärmeentwicklung (ca. 110°C) zeigte sich der allmähliche Zerfall in angelöschtes Branntkalkpulver (Ätzkalk).<sup>35</sup> Weitere Tests waren nicht ganz so erfolgreich, da manche großen Steine nur unzureichend gebrannt waren. Es wurde aber deutlich, daß die ungebrannten Kernstücke kompakt erhalten blieben und sich nur die Außenschicht als Branntkalk abschälte, so daß selbst eine effektive Nutzung sogenannter „Möpfe“<sup>36</sup> erreicht wurde. Nachdem eine kleine Erdgrube (0,4 m<sup>3</sup>) mit Ätzkalkpulver gefüllt war, wurde der Rest des Branntkalkes gemeinsam mit den Fehlbränden in die Anlage geschüttet und vollständig abgelöscht.

### Wichtigste Ergebnisse

Wie überall in der experimentellen Archäologie war auch beim Kalkbrennen zu registrieren, wie unersetzlich die Erfahrung - trotz modernster Hilfsmittel und heutigem Bildungsstand - ist, sollen Prozesse begriffen und gesteuert werden. Selbst die gründlichste archäologische Aufnahme grabener Objekte erweist sich für einen Rekonstruktionsversuch als ungenügend, ist jedoch zugleich dessen wichtigste Voraussetzung. Unklarheiten zu Bauteilen und Fragen zur Technologie können durch Ausgrabungen kaum beseitigt oder geklärt werden.

Der bundesweit erste Versuch zur Erzeugung von Branntkalk in einem germanischen Brennofen war ein notwendiger Schritt, auch dieser experimentalarchäologisch als Desiderat geltenden Technologie näher zu kommen. Der Pilotversuch in beschriebener Verfahrensweise mußte daher „bei Null“ begonnen und all die Fehler mußten erst einmal gemacht werden, um sie als solche zu erkennen und daher künftig auszuschließen. Auch dieses Experiment hat trotz - oder besser gerade wegen - dieser Fehler zur Erweiterung der Erkenntnisse dieses Produktionsverfahrens beigetragen. Fehlerquellen werden auch bei neuen Experimenten entstehen. Nur sie fördern im nachhinein die aktive Auseinandersetzung mit den Problemen und sind das eigentliche „Salz in der Suppe“.

Ein zweiter Brennversuch, der in der zweiten Oktoberwoche 1997 im Museumspark der Baustoffindustrie Rüdersdorf stattfand, verlief wesentlich erfolgreicher als das Zethlinger Experiment (Abb. 6). Einige individuelle Fehlerquellen konnten dort als Ergebnis des ersten Versuches ausgeschaltet werden, so daß am Ende eine Ausbeute von über 80 % Branntkalk erzielt wurde. Ohne Nutzung moderner Hilfsmittel wurde während eines 22stündigen Brennverlaufes eine konstantere Temperaturführung innerhalb des Systems beobachtet, die eine hohe Qualität des Endproduktes garantierte. Da noch einmal derselbe archäologische Befund herangezogen wurde und ferner der gleiche Rohstoff Anwendung fand, steht jetzt eine vorzügliche Parallele zur Verfügung, die an sich und im Vergleich noch auszuwerten ist. Schon jetzt kann jedoch ausgesagt werden, daß der erste Versuch ein bis zwei Stunden zu früh beendet worden ist und daß anderenfalls bei Berücksichtigung dieser Tatsache eine wesentlich höhere Ausbeute erzielbar gewesen wäre.

### Individuelle Fehler:

1. Der Gewölbeaufbau als Verbindung von Kraggewölbe und Tonnengewölbe erhöhte das Risiko des Einsturzes.



Abb. 6: Rüdersdorfer Ofen nach dem Brand mit intaktem Kalksteingewölbe

2. Die absolute Größe der verwendeten Kalksteine hätte kleiner sein müssen, um die gleichmäßigere Durchgarung zu fördern.
3. Der hintere Teil des Gewölbes wurde zu dicht gesetzt, die Flammen konnten nicht alle Steine gleichmäßig erwärmen.
4. Der Einsatz des Gebläses war nicht notwendig, führte sogar durch zu schnelle Temperaturerhöhung zum teilweisen Einsturz des Gewölbes und verhinderte das vollständige Austreiben des Wassers.
6. Das zu frühe Beenden des Brennens verhinderte die komplette Umsetzung zu Branntkalk.
7. Mehrere kleinere Abzugslöcher hätten möglicherweise eine bessere Steuerung des Ofens bewirkt.

#### Erlangte Erkenntnisse:

1. Die Bauform, eine trichterförmige Brenngrube mit umlaufender Konsole, eignet sich vorzüglich für die Herstellung des Branntkalkes.
2. Sandboden erleichtert den Bau wesentlich und erhöht gleichzeitig die Wärmespeicherung.
3. Der Aufbau bindet nur wenige Arbeitskräfte direkt, Hilfen beim Transport und bei der Lehmaufbereitung würden die Bauzeit wesentlich verkürzen.
4. Besondere Arbeitsgeräte zum Bau der Anlage sind nicht notwendig.
5. Sowohl die Bank als auch die trichterförmig angelegten Wände unterstützen den Gewölbeaufbau des Rohstoffes.

6. Eine Feueröffnung in Hauptwindrichtung fördert den Brennprozeß. Auch ohne künstliche Windzufuhr zieht der entfachte Ofen die notwendige Menge Luftsauerstoff. Moderne Hilfsmittel und eine vorgelagerte Bediengrube sind nicht notwendig.
7. Die Reisig-/Strohschicht zwischen Kalkstein und Lehmdecke unterstützt den Gasaustritt.
8. Die Abzugsöffnungen wurden zur Steuerung des Brennprozesses herangezogen. Ihr Schließen oder Öffnen ermöglichte eine gute Regulierung des Brandes.
9. Spezialgeräte für den Brennprozeß sind nicht erforderlich. Die für die Erzeugung des Branntkalkes notwendige Temperatur wird erreicht und längere Zeit gehalten.
10. Die Lehmdecke hält trotz vollständiger Verbrennung der Holzkonstruktion.
11. Die Dauer des Brennprozesses kann voraussichtlich auf ca. 24 Stunden reduziert werden.
12. In der Abkühlungsphase könnten als Nebennutzungen noch zusätzlich Holzkohle gewonnen oder Nahrungsmittel auf der Lehmdecke vorgetrocknet werden.
13. Die Qualitätskontrolle des Endproduktes erfolgte sehr schnell und unkompliziert.
14. Die Bergung des Branntkalkes gelang nur bei Zerstörung der Lehmdecke, die einem weiteren Prozeßablauf ohnehin nicht standgehalten hätte.
15. Jede neue Beschickung benötigt eine neue Lehmabdeckung, deren Errichtung allerdings nicht sehr schwierig erscheint.
16. Die Nähe zum Wasser verringert die Ätzgefahr des gebrannten Kalkes.
17. Eingebrochene Deckenteile liegen ungeordnet im Grubeninneren, d. h. die Interpretation eines archäologischen Befundes kann schnell zu falschen Schlußfolgerungen über die Konstruktion der Abdeckung führen.
18. Große Teile der abgebauten Lehmdecke zerfallen in kurzer Zeit und können somit kaum archäologisch nachgewiesen werden. Nach der Beräumung und Säuberung kann die Brenngrube erneut genutzt werden.
19. Die Gefahr einer gesundheitlichen Beeinträchtigung während des Brennprozesses und der Verarbeitung des Branntkalkes ist ziemlich hoch und sollte nicht unterschätzt werden.

## Zusammenfassung

Dieser bundesweit erste Brennversuch in einem germanischen Kalkbrennofen erbrachte wichtige Erkenntnisse über die Technologiebeherrschung, Wirtschaftsweise und Spezialisierung innerhalb der verschiedenen Ofentypen (Backöfen, Töpferöfen, Rennöfen, hier: Grubenbrennöfen) im freien Germanien der römischen Kaiserzeit. Weitere Brennversuche, insbesondere mit dem Rohstoff Wiesenkalk, könnten das bisher gewonnene Bild vervollständigen und abrunden.

## Summary

Experimental calcination in a Germanic pit kiln as a trial experiment

In 1997 the authors built the first reconstructed lime kiln of the Teutons. The kiln structure corresponds to the kiln found during excavations in Berlin-Bellevue 1959 and dated

to the Roman period. Chemical analysis of the residue in the kiln showed a large content of  $\text{CaCO}_3$ .

The main attention of the article is given to the full description of the kiln experiments: the construction, the experiment, the results and the mistakes. The free standing calcining kilns excavated in Poland, north and central Germany were powerful producing items, with stone, timber, and clay constructions. Their underground parts were found at a depth of 0,6-2,0 m and their diameter was 2,0-4,0 m.

Raw material for the production of lime were meadow marls abundant around the settlements.

## Anmerkungen

- <sup>1</sup> dazu auch Uschmann 1997a, S. 217 f.
- <sup>2</sup> so zum Garen von Fleisch, Kohlemeilern und im Grubenbrand
- <sup>3</sup> als Einstieg Uschmann 1992, S. 317 ff.
- <sup>4</sup> Überlegungen bei Uschmann 1997, S.77 ff.
- <sup>5</sup> ausführlicher dazu Leinweber 1996, S. 184 f.
- <sup>6</sup> „Wiesenkalk“ ist in der archäologischen Forschung allgemein anerkannt, wird aber in der Geologie auch durch folgende Begriffe ersetzt: Seekreide, Seemergel, Seekalk, Seetravertin, Teichkreide, Uferkreide, Kalkmudde, Characeenkreide, Wiesenkreide, Wiesenmergel, Weißerde u. ä.: Jäger 1965, S. 35.
- <sup>7</sup> Sölter 1970
- <sup>8</sup> Wichtige physikalische und chemische Eigenschaften für Kalkstein, Branntkalk und Kalkhydrat sind bei Berens 1972, S. 229 ff., ausführlich behandelt und auch einem Laien erschließbar.
- <sup>9</sup> Lösliche Bestandteile wie  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sind dafür zuständig, daß das Produkt als hydraulischer Kalk, also auch als Unterwasserbaustoff eingesetzt werden kann: Ost/Rassow 1965, S. 405.
- <sup>10</sup> Besonders  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  begünstigt die Versinterung der Oberflächen des Rohstoffes durch die Bildung von Calciumferriten oder Calciumaluminiumferriten, die eine gute Entsäuerung verhindern; ungenügend gebrannter Kalk entsteht: Berens 1972, S. 179.
- <sup>11</sup> Unter knackenden und zischenden Geräuschen verliert der gebrannte Stein seine Gestalt und zerfällt zu Pulver (Ätzkalk).
- <sup>12</sup> Das Löschverhalten wird weiterhin durch die Temperatur von Wasser und Branntkalk sowie die darin auftretenden Fremdbestandteile beeinflusst: Berens 1972, S. 198.
- <sup>13</sup> Beim Weichbrand bleibt eine hohe Porosität erhalten, der Hartbrand verdichtet den Kalk und verringert dessen Porosität; das Aufnahmeverhalten zu Wasser wird stark erschwert: Werner/Schlegel 1976, S. 41.
- <sup>14</sup> Calciumoxid wird mit einer vier- bis fünffachen Menge Wasser vermischt und ein breiiges Produkt gebildet: Werner/Schlegel 1976, S. 43.
- <sup>15</sup> Ein Calciumoxid-Wasser-Molverhältnis von etwa 1:2 führt zum Ätzpulver: Werner/Schlegel 1976, S. 43.
- <sup>16</sup> Eine dritte Art, das Löschen mit Wasserdampf, ist erst im Industriezeitalter nachweisbar.
- <sup>17</sup> Lehm, Holz, Ziegel werden so vor der Feuchtigkeit geschützt.
- <sup>18</sup> gut dokumentiert von v. Müller/Zimmermann 1960, S. 109 ff.
- <sup>19</sup> Wiesenkalk kann in unterschiedliche Formen gebracht werden, die sich für Ungeübte leichter zur Errichtung eines Gewölbes eignen (z. B. Ziegelform).
- <sup>20</sup> Über die großen Gewölbesteine wurden kleinere Kalksteinbrocken (max. Kantenlänge 10 cm) aufgeschüttet.
- <sup>21</sup> siehe dazu Leinweber/Lychatz 1998, S. 271 f., Kapitel „Das archäologische Experiment“

- <sup>22</sup> wichtige Änderung gegenüber dem Rekonstruktionsvorschlag von v. Müller, der für eine einfache Lagerung auf der Bank plädierte: v. Müller/Zimmermann 1960, S. 124 ff.
- <sup>23</sup> Erste Trocknungsrisse in der Lehmdecke wurden sofort verschmiert.
- <sup>24</sup> Weiterhin versinterte die Kontaktzone zwischen der bereits dehydrierten äußeren Steinschicht und dem Kern, der noch Wasser enthielt. Damit wurde eine vollständige Entsäuerung des Kalksteines unmöglich.
- <sup>25</sup> Innerhalb dieses Zeitraumes wurden zwei- bis dreimal Kiefernholzstangen nachgelegt.
- <sup>26</sup> Diese Flammen werden auch als „Füchse“ bezeichnet.
- <sup>27</sup> Nach sieben Stunden waren lediglich zwei Gewölbegögen zusammengebrochen.
- <sup>28</sup> In der linken Pfeife wurden 705°C, in der rechten 660°C und in der hinteren Pfeife nur 510°C gemessen.
- <sup>29</sup> Um 2.40 Uhr herrschte auf der Oberfläche eine Temperatur von 197°C. Bis zur Beendigung des Brennprozesses wurde dieser Wert stichprobenartig überprüft. Es stellte sich heraus, daß die Temperatur im Laufe der Zeit noch bis 290°C anstieg, dann allerdings konstant innerhalb des Bereiches 210-220°C blieb.
- <sup>30</sup> Nur die hintere Pfeife blieb offen, damit weitere Meßdaten erfaßt werden konnten.
- <sup>31</sup> Sölter 1970, S. 39
- <sup>32</sup> Leineweber 1995, S. 189 f.
- <sup>33</sup> sehr wichtiges Merkmal bei einer schnellen Qualitätskontrolle bei der Beräumung des Ofens
- <sup>34</sup> Ethnographische Quellen belegen diese Vorgehensweise, dazu Bako 1954, S. 393 f.
- <sup>35</sup> Innerhalb von 34 Minuten wurde ein Stein, der noch 5 kg wog, zu einem festen Brei (ca. 14 Liter) umgewandelt.
- <sup>36</sup> „Möpse“ (auch „Kälber“; „Hunde“) - Fachausdruck für teilweise durchgebrannte Kalksteine

## Literaturverzeichnis

- Berens, L. W. 1972  
Kalk - Düsseldorf
- Bako, F. 1954  
Bäuerliches Kalkbrennen in Ungarn - Acta Ethnographica 3, Budapest, S. 339-418
- Jäger, K. D. 1965  
Nacheiszeitliche Klimaschwankungen und ihre besiedlungsgeschichtlichen Auswirkungen im südlichen Mitteleuropa - ungedruckte Diss. Jena
- Leineweber, R. 1995  
Brennversuche in nachgebauten Töpferöfen des 3. nachchristlichen Jahrhunderts - Experimentelle Archäologie, Bilanz 1994, Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 8, Oldenburg, S. 187-192
- Leineweber, R. 1996  
Experimentelle Archäologie - Archäologische Berichte aus Sachsen-Anhalt 1995/1, Halle (Saale), S. 183-192
- Leineweber, R./Lychatz, B. 1998  
Versuche im Rennofen - eine Bilanz - Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte 80, Halle (Saale), S. 263-304
- v. Müller, A./Zimmermann, M. 1960  
Ein kaiserzeitlicher Kalkofen aus Berlin-Tiergarten - Berliner Blätter für Vor- und Frühgeschichte 9, Berlin, S. 109-140
- Ost, H./Rassow, B. 1965  
Lehrbuch der chemischen Technologie 1 - Leipzig
- Sölter, W. 1970  
Römische Kalkbrenner im Rheinland - Führer Rheinisches Landesmuseum Bonn 31, Bonn

Uschmann, K.-U. 1992

Die trichterförmig eingetieften Brenngruben im Raum zwischen Weser und Oder in der Zeit vom 3. Jh. v. Chr. bis zum 4. Jh. n. Chr. - Ethnographisch-Archäologische Zeitschrift 33, Berlin, S. 317-326

Uschmann, K.-U. 1997

Versuch zur Herstellung von Branntkalk nach archäologischen Befunden der römischen Kaiserzeit. Ankündigung - Ethnographisch-Archäologische Zeitschrift 38, Berlin, S. 77-81

Uschmann, K.-U. 1997a

Versuch zur Herstellung von Branntkalk nach Befunden der römischen Kaiserzeit. Ergebnisse - Ethnographisch-Archäologische Zeitschrift 38, Berlin, S. 217-224

Werner, W./Schlegel, E. 1976

Über die Hydratation von Branntkalk - Freiburger Forschungshefte A 563, Freiberg, S. 37-84

Anschrift: Dr. phil. Rosemarie Leineweber, Landesamt für Archäologie - Landesmuseum für Vorgeschichte - Sachsen-Anhalt, Richard-Wagner-Str. 9-10, D - 06114 Halle (Saale); Dipl.-Prähist. Kay-Uwe Uschmann Wichertstr. 54, D - 10439 Berlin

Abbildungsnachweis: 1 M. Wiegmann, LfA; 2-6 Verfasser

Manuskriptabgabe: 13.11.1997