

**BAUTECHNIK IM ANTIKEN UND
VORANTIEN KLEINASIEN**

Internationale Konferenz
13.-16. Juni 2007 in Istanbul

Herausgegeben von
Martin Bachmann

(OFFPRINT / AYRIBASIM)

Bautechnik im antiken und vorantiken Kleinasien

Herausgegeben von
Martin Bachmann

BYZAS 9

Veröffentlichungen des Deutschen Archäologischen Instituts Istanbul

© 2009 Ege Yayınları

ISBN 978-975-807-223-1

Umschlaggestaltung
Martin Bachmann

(Aufnahme: Mauerwerkspartie der hell. Stadtmauer von Oinoanda 2007)

Redaktion

Martin Bachmann, Celine Wawruschka, Lena Kühne

Druck

Graphis Matbaa

Produktion und Vertrieb

Zero Prod. Ltd.

Abdullah Sokak. No: 17 Taksim 34433 Istanbul-Turkey

Tel: +90 (212) 244 75 21 Fax: +90 (212) 244 32 09

info@zerobooksonline.com

www.zerobooksonline.com/eng/

Inhalt

Vorwort	IX
Im Spannungsfeld zwischen Tradierung und Innovation. Die Bautechnikgeschichte Kleinasiens im Licht der Beiträge des Kolloquiums Martin Bachmann	1
Exploring Building Continuity in the Anatolian Neolithic; Functional and Symbolic Aspects Bleda S. Düring	23
Erkenntnisse aus der ländlichen Architektur in Thrakien für das Verständnis der vorgeschiedlichen Flechtwerkbauweise. Rekonstruktionsversuche zu den Bauten der Schicht 2 des Siedlungshügels Aşağı Pınar Zeynep Eres	39
Das Wissen der neolithischen Bauleute. Zu den epistemischen Fundamenten der kleinasiatischen Bautechnik Dietmar Kurapkat	65
Alte Paradigmen und neue Erkenntnisse zur hethitischen Holz-Lehmziegel-Architektur Dirk Paul Mielke	81
Vom Plan zur Durchführung - Gedanken zur Planung und Baudurchführung in hethitischer Zeit Andreas Schachner	107
Die Techniken der Steinbearbeitung in der hethitischen Architektur des 2. Jahrtausends v. Chr. Jürgen Seeher	119
Staudämme – Ein besonderer Aspekt der hethitischen Baukunst Andreas Hüser	157
Stones of Ayanis: New Urban Foundations and the Architectonic Culture in Urartu during the 7 th C. BC Ömür Harmanşah	177
Wilhelm Dörpfeld's Theory of Wood and Mudbrick Architecture: Implications and a Reassessment Elizabeth Riorden	199

Die hölzerne Grabkammer von Tatarlı: Ein hochentwickeltes Beispiel antiker anatolischer Blockbautradition aus dem 5. Jh. vor Christus Alexander von Kienlin	211
The Architectural Investigation of the Protopalatial Site of Monastiraki, Crete Maria Teresa Como, Athanasia Kanta, Massimiliano Marazzi	225
Die Bedeutung inschriftlicher Zeugnisse für die Bauforschung Jürgen Hammerstaedt	243
Transport, Versatz und Verbindung von Bauteilen des archaischen Artemistempels von Ephesos - und ein rätselhafter Hebe-Mechanismus? Anne Ohnesorg	251
Bautechnische Eigenheiten im hellenistischen Wehrbau Kilikiens Timm Radt	269
Der hellenistische Naiskos von Didyma im Licht seiner Versatzmarken des 3. Jhs. v. und des 3. Jhs. n. Chr. Ulf Weber	295
Lewis in Hellenistic and Roman Building at Pergamon William Aylward	309
Versatzmarken am Propylon des Heiligtums für Apollon Karneios in Knidos Hansgeorg Bankel	323
Chronology of the Temple Tombs in Rough Cilicia Murat Durukan	343
Early Examples of So-Called Pitched Brick Barrel Vaulting in Roman Greece and Asia Minor: A Question of Origin and Intention Lynne C. Lancaster	371
Zum Baubetrieb Kleinasiens in der römischen Kaiserzeit Georg A. Plattner	393
Röhren im Scheitel. Zur Bautechnik römischer Tonnengewölbe. Ausbau der Rüstungen aus den Substruktionen des Traianeums in Pergamon Klaus Nohlen	409
Die Reliefdarstellung einer antiken Steinsägemaschine aus Hierapolis in Phrygien und ihre Bedeutung für die Technikgeschichte Klaus Grewe	429
Bautechnik von Tabernakelfassaden des 2. Jhs. n. Chr. in Ephesos und in Kleinasien Ursula Quatember	455
Theater Ephesos – Aspekte der Adaption im Zuschauerraum der römischen Zeit Hanna Liebich – Gudrun Styhler	469
Ziegelmauerwerk in Ephesos Hilke Thür	483
Warum konnte der römische Ziegelbau in Kleinasien keine Erfolgsgeschichte werden? Ulrike Wulf-Rheidt	497
Baukonstruktion und Bautechnik des Zeustempels von Aizanoi im Vergleich zu anderen Pseudodipteroi Thekla Schulz	509

Bautechnik am Theaterstadion in Aizanoi: Notwendigkeit oder Teil des Entwurfskonzeptes?	
Corinna Rohn	527
»So bieten diese zerstückten Ruinen einen höchst seltsamen Anblick dar, einem riesigen Skelett vergleichbar«. Zum Steinfachwerkbau im antiken Kleinasien	
Dorothea Roos	539
Spätantike und frühbyzantinische Bautechnik im südlichen Kleinasien	
Ina Eichner	551
Anschriften der Autoren	571

Die Reliefdarstellung einer antiken Steinsägemaschine aus Hierapolis in Phrygien und ihre Bedeutung für die Technikgeschichte

Klaus GREWE

»Es ist das Schneiden der Quadersteine und Marmorblöcke zu Schalen und Tafeln, wenn es durch Menschenhände geschehen soll, eine so saure, als langsame und wenig fördernde Arbeit, dass man nicht unbillig auf die Erfindung einer solchen Maschine bedacht gewesen...«

J. Leupold – J. M. Beyer (1735)

Zusammenfassung

In der Antike bestand ein enormer Bedarf an Marmorplatten, um in den reichen Villen und vor allem in den Thermen die Fußböden zu belegen und die Wände zu verkleiden. Über deren Herstellung gaben bisher lediglich einige antike Schriftquellen Auskunft. Die archäologischen Funde zweier Marmorwerkstätten in Gerasa und Ephesus ließen erste Einblicke in das Herstellungsverfahren in byzantinischer Zeit zu. Durch die Entschlüsselung eines Reliefs aus Hierapolis in Phrygien (2. Hälfte 3. Jh. n. Chr.) wird nun deutlich, mit welcher technischer Raffinesse die Antike sich dieses Problems angenommen hat: Die Kraftübertragung von einem Wasserrad über Zahnräder, Kurbelwelle und Schubstangen auf eine Doppel-Steinsäge ist in dem Relief fein herausgearbeitet. Es könnte sich dabei um die erste bildliche Darstellung eines Getriebeantriebs in der Geschichte der Technik handeln.

Einleitung

Im Gräberfeld rechts und links der Zufahrtsstraße nach Hierapolis in Phrygien (heute Pamukkale/Türkei) befinden sich unzählige Sarkophage mit Inschriften, seltener auch mit bildlichen Darstellungen. Bezüglich ihrer Bedeutung bisher unerkannt war eine Reliefdarstellung im Giebelfeld an der Stirnseite des Sarkophags von Markos Aurelios Ammianos, datiert in die zweite Hälfte des 3. Jhs. n. Chr., die bei genauerer Betrachtung ein technikgeschichtliches Motiv erkennen ließ. Die Darstellung zeigt eine von einem



Abb. 1
Hierapolis.
Relief einer
antiken Doppel-
Steinsäge auf dem
Sarkophag des
M. Aur. Ammianos
(2. Hälfte 3. Jh.
n. Chr.).

Wasserrad angetriebene Doppel-Steinsäge¹. Damit steht eine für die Technikgeschichte einzigartige Quelle zur Verfügung (Abb. 1).

Da antike Baubeschreibungen oder Konstruktionspläne für technische Bauwerke oder technische Einrichtungen und Gerätschaften nur selten erhalten sind, müssen Rekonstruktionen technischer Vorgänge in der Regel anhand archäologischer Funde und Befunde vorgenommen werden. Es ist nur in Einzelfällen möglich, die Funktionsweise einer technischen Einrichtung aufgrund der Konstruktionszeichnung oder Beschreibung des antiken Ingenieurs oder Konstrukteurs zu rekonstruieren. Das gilt gleichermaßen für technische Großbauten wie auch für handwerkliche und technische Geräte. Antike Textstellen sind da nicht immer eindeutig, wie an zwei Beispielen belegt sein soll: Während der Text des antiken Ingenieurs Nonius Datus über den Bau eines Aquäduktes in Saldæ (Mitte 2. Jh. n. Chr.) sehr genau und eindeutig die Planung und Vermessung eines Tunnels beschreibt², ist Vitruv bei der Beschreibung seines Chorobates – eines antiken Nivelliergerätes – wesentlich unpräziser³. Deshalb bleibt dem Ingenieur unserer Tage nichts anderes übrig, als sein Wissen aus dem Technikbau oder dem technischen Gerät selbst zu gewinnen, es förmlich herauszulesen. Er muss also den Bauwerkscode oder das Konstruktionsprinzip entschlüsseln, wobei er oftmals nur spärliche Reste eines Bauwerks oder eine schematisierte Darstellung zur Verfügung hat.

Technische Darstellungen aus der Antike, wie die Beschreibung eines Tunnelbaus, sollten deshalb nach Möglichkeit von Historikern und Ingenieuren gemeinsam gelesen werden.

¹ Das bis dahin nicht erkannte Relief wurde dem Verfasser bei der Grabungskampagne in Hierapolis im Sommer 2005 vorgelegt und von ihm erstmals entschlüsselt. Besonderer Dank gilt Prof. Francesco D'Andria, dem Direktor der MAIER (Missione Archeologica Italiana di Hierapolis) für die Gelegenheit zur Bearbeitung des Ammianos-Reliefs. Die Inschriften des Sarkophages hat Tullia Ritti bearbeitet; ihr ist für eine stets kollegiale Zusammenarbeit zu danken; die deutsche Übersetzung der Ammianos-Inschrift machte dankenswerterweise W. Eck. Für gewinnbringende Diskussionen zur Technik antiker Steinsägemaschinen danke ich besonders P. Kessener, F. Mangartz und J. Seigne.

² Grewe 1998, 134–139.

³ Vitruv VIII, 5,1–3; Grewe 1985, 18–21.

Th. Mommsen, der den antiken Text auf dem Grabstein des Nonius-Datus bezüglich der Baubeschreibung des Tunnels in Saldae zu lesen hatte, hat diese Erfordernis klar erkannt, denn er schreibt, es »wird vielleicht ein verständiger Ingenieur unserer Epoche aus dem Bauwerk selbst dasjenige zu lösen wissen, was uns im Bericht seines römischen Vorfahren unverständlich bleibt«⁴.

Im Falle von Vitruvs Text über den Chorobates wird das noch deutlicher: Da die Zeichnungen zum Text Vitruvs verloren sind, kann lediglich der Text für eine Rekonstruktion dieses antiken Nivelliergerätes herangezogen werden und der ist so wenig eindeutig, dass seit Leonardo da Vinci Ende des 15. Jhs. fast ein Dutzend Funktionsmodelle vorgelegt worden sind. Erstaunlicherweise sind einige dieser Rekonstruktionen in der Praxis überhaupt nicht einsetzbar, andere hingegen – auch die von Leonardo da Vinci – entsprechen dem Text Vitruvs so wenig, dass man die dort skizzierten Modelle nicht mehr als Chorobates des Vitruv, sondern als Neuerfindungen der Renaissance bezeichnen muss.

Dieser Hinweis auf frühere Rekonstruktionsversuche nach technischen Texten der Antike ist notwendig, um die Schwierigkeiten bei der Rekonstruktion der Steinsäge nach dem Relief auf dem Sarkophag des Markos Aurelios Ammianos aufzuzeigen, denn auch diese Darstellung ist nicht eindeutig. Es hatte schon bei der ersten Betrachtung den Anschein, als habe Ammianos mit diesem Relief in erster Linie seine Getriebeerfindung zeigen wollen und nur in zweiter Linie die angeschlossene Steinsäge. Die Inschrift auf dem Sarkophag nennt zwar Ammianos als Konstrukteur der im Relief gezeigten Anlage, sagt ansonsten aber nichts über die Konstruktion und die Funktionsweise. Wir sind also auch in diesem Fall auf die Aussagefähigkeit des Reliefs, auf Vergleichsbeispiele an anderen Orten und auf die Plausibilität der zur Rekonstruktion führenden Gedankengänge angewiesen.

Geschichtliche Quellen und archäologische Befunde

Wie so oft in der technikgeschichtlichen Forschung wird man bezüglich der Beantwortung einer bautechnischen Frage bei Vitruv fündig. Bei der Beschreibung einer Wassermühle zeigt er uns die Kraftübertragung von einem Wasserrad über die Welle und das an deren anderem Ende angebrachte Zahnrad auf ein weiteres Rad, welches für die Umdrehung des Mühlsteines sorgt: »Nach demselben Prinzip werden auch Wassermühlen getrieben, bei denen sonst alles ebenso ist, nur ist an dem einen Ende der Welle ein Zahnrad angebracht. Dies ist senkrecht auf die hohe Kante gestellt und dreht sich gleichmäßig mit dem Rad in derselben Richtung. Anschließend an dieses größere Zahnrad ist ein (kleineres) Zahnrad horizontal angebracht, das in jenes eingreift. So erzwingen die Zähne jenes Zahnrades, das an der Welle (des Schaufelrades) angebracht ist, dadurch dass sie die Zähne des horizontalen Zahnrades in Bewegung setzen, eine Umdrehung der Mühlsteine«⁵.

Vitruv – von dem man es also in erster Linie erwartet hätte – hat sich mit dem Thema ›Steinschneiden‹ überhaupt nicht beschäftigt. Lediglich an einer Stelle erwähnt er

⁴ Th. Mommsen, Tunnelbau unter Antoninus Pius. in: AZ NF III, 1871, 5 zitiert in: Grewe 1998, 5.

⁵ Vitruv X, 5.2.

Marmorplatten als Wandverkleidung, nämlich im Hause der Königs Mausolos in Halikarnassos.⁶

Auch Plinius, der dabei aber etwas mehr ins Detail geht, erwähnt das Haus des Mausolos: »Die Erfindung, Marmor in Platten zu zerschneiden, stammt vielleicht aus Karien. Soviel ich wenigstens finde, war das Haus des Mausolos in Halikarnassos das älteste, dessen Ziegelwände mit prokonnesischem Marmor verkleidet waren. <Mausolos> starb im zweiten Jahr der 107. Olympiade, im 403. Jahr der Stadt Rom [351 v. Chr.]. Der erste, der in Rom ganze Wände seines Hauses auf dem mons Caelius mit Marmortafeln verkleiden ließ, war, wie Cornelius Nepos berichtet, Mamurra, ein aus Formiae stammender römischer Ritter, Pionieroberst des C. Caesar in Gallien... .

M. Lepidus, gleichzeitig mit Q. Catulus Konsul, ließ als erster von allen in seinem Haus Schwellen aus numidischem Marmor legen, was großen Anstoß erregte. Er war Konsul im 676. Jahre unserer Stadt [78 v. Chr.]. ... Unter diesen ›Liebhabern‹ war es meiner Meinung nach zuerst M. Scaurus, dessen Bühne marmorne Wände hatte; ich kann aber nicht sicher sagen, ob sie aus geschnittenem oder aus festen Stücken von geglättetem Marmor gebaut waren, wie dies heute beim Tempel des Iuppiter Tonans auf dem Kapitol der Fall ist. Ich finde nämlich in Italien <zur damaligen Zeit> noch keine Spuren von geschnittenem Marmor«⁷.

Plinius geht allerdings auch auf die Technik der Steinsägen ein, indem er erwähnt, dass das Schneiden des Steins eigentlich nicht mit dem Sägen von Holz vergleichbar ist, sondern dass es sich hierbei eher um ein ›Schneiden‹ des Steins handelt: »Doch wer auch immer als erster auf den Gedanken kam, <den Marmor> zu schneiden und aus Prunksucht zu teilen: er hatte einen unglücklichen Einfall. Das Schneiden geschieht mit Sand und hat den Anschein, durch das Eisen bewirkt zu werden, indem die Säge in einer sehr schmalen Linie auf den Sand drückt und durch bloßes Hin- und Herziehen <den Marmor> zerschneidet. Hierfür wird äthiopischer Sand bevorzugt; denn auch das kam noch hinzu, dass man <bis> von Äthiopien das herbeschaffte, womit man den Marmor schnitt, ja sogar aus Indien, von wo man Perlen zu holen nach den strengen Sitten <der Alten> als unwürdig galt. Der <indische> Sand wird als zweitbestes Mittel gelobt; weicher ist jedoch der äthiopische. Er schneidet, ohne rau zu machen, der indische glättet nicht in gleicher Weise, doch empfehlen die Fachleute, ihn in gebranntem Zustand zum Polieren des Marmors zu verwenden. Einen ähnlichen Fehler hat der Sand von Naxos und der von Koptos, der >der ägyptische‹ heißt. Dies waren die alten Methoden zum Schneiden von Marmor. Später wurde ein nicht weniger empfehlenswerter <Sand> auf einer Sandbank des adriatischen Meeres gefunden, die bei Ebbe bloßliegt, aber nicht leicht wahrzunehmen ist. Die betrügerische Absicht der Handwerker hat es übrigens schon gewagt, mit jedem beliebigen Sand aus allen Flüssen zu schneiden, eine Übervorteilung, die nur wenige bemerken. Der gröbere Sand reibt nämlich in breiteren Einschnitten, nimmt mehr Marmor hinweg und erfordert durch seine Rauheit mehr Arbeitsaufwand beim Polieren; auf diese Weise

⁶ Vitruv II, 8.

⁷ Plinius, nat.hist. XXXVI, 6–8.

verlieren die geschnittenen Platten an Stärke. Zum Polieren des Marmors wird dagegen thebaischer Sand verwendet sowie der aus Tuff- oder Bimsstein gewonnene«⁸.

J. Röder schreibt nicht zu Unrecht, dass Plinius zwar richtig erkannt habe, dass nicht das Eisen, sondern der Sand für den eigentlichen Sägevorgang ursächlich ist, dass Plinius' ›moralisierenden Betrachtungen‹ allerdings weitergehend nichts für die Technik des Steinsägens hergeben⁹. Es bleibt sogar offen, ob in der Frühzeit Handsägen oder wassergetriebene Sägemaschinen zum Einsatz gekommen sind.

Bis zum Auffinden der ersten Sägespuren an Marmorplatten und Sarkophagen war es allein die Schriftstelle des römischen Dichters Ausonius, die einen direkten Hinweis auf den Einsatz von wassergetriebenen Sägemaschinen für das Altertum gab. Wenn Ausonius in seiner »Mosella« (371 n. Chr.) schreibt:

»Dir [Mosella], so rasch sie's vermögen, mit kosendem Wasser zu dienen,
drängen die reißende Kyll, die Ruwer, berühmt durch den Marmor.
Treffliche Fische bevölkern die Kyll, in eiligen Kreisen
dreht dort die Ruwer die körnerzermahlenden Steine und zieht durch
glasglatte Blöcke aus Marmor die kreischenden Sägen und lässt von
beiden Gestaden ein unablässiges Lärmen vernehmen«¹⁰,

dann setzt das voraus, dass hier vom Wasser der Ruwer angetriebene Steinsägemaschinen im Einsatz gewesen sein müssen¹¹. Weitere wassergetriebene Steinsägen sind ebenfalls im 4. Jahrhundert n. Chr. bei Gregor von Nyssa¹² und Ammianos Marcellinus¹³ erwähnt, ohne dass dabei auf die technische Ausführung näher eingegangen wird.

Erst die archäologischen Funde von Gerasa (Jordanien) und Ephesus (Türkei) führten zu konkreten archäologischen Belegen für die Anwendung von Sägemaschinen – allerdings in byzantinischer Zeit.

Gerasa

In einem 8,65 m × 6,65 m großen Raum am Artemis-Tempel von Gerasa fanden sich bei archäologischen Untersuchungen nach 1930 Einrichtungen, die auf eine sekundäre Nutzung als Steinsägewerkstatt hindeuteten¹⁴: Es fanden sich Aussparungen in einer Wand, die der Wasserzuführung gedient hatten, es fand sich der Graben für ein Wasserrad mit beidseitig *in situ* erhaltenen Auflagermauern für die Wasserradachsen und es fanden sich zwei Säulenstücke von 1,67 m und 1,51 m Länge mit Durchmessern von rund 1 m, die in

⁸ Plinius, nat.hist. XXXVI, 9.

⁹ Röder 1971, 307, Anm. 33.

¹⁰ Ausonius, Mosella, 359–364; in metrischer Übersetzung vorgelegt von B. K. Weis (Darmstadt 1994).

¹¹ Simms 1983; Wikander 1981; Wikander 1989; Warnecke 1997.

¹² Hom. III 656a M.

¹³ Res gestae XXIII, 4,4.

¹⁴ Seigne 2000; Seigne 2002a; Seigne 2002b; Seigne 2002c; Seigne 2006.



Abb. 2
Gerasa. Spuren
einer mit vier
Sägeblättern
bespannten
Gattersäge
in einer zur
Weiterverwendung
vorgesehenen
antiken Säule;
6. Jh. n. Chr.

keinerlei Bezug zur Architektur inmitten des Raumes lagen. Da beide Säulenstücke eindeutige Sägespuren aufwiesen – und zwar in Längsrichtung der Säulen – scheint man in diesem Raum eine Werkstatt eingerichtet zu haben, in der Säulen vom Portikus des Artemistempels zu Marmorplatten zerlegt werden sollten. Da die Werkstatt nach der Aufgabe des Tempels im 5. Jahrhundert n. Chr. und vor dem alles verheerenden Erdbeben des Jahres 749 n. Chr. eingerichtet worden sein muss, legt Seigne diese Aktivitäten in die Zeit Justinians (527–565 n. Chr.)¹⁵.

Die Sägespuren in den beiden Säulenstücken belegen einen Sägebetrieb mit zwei nebeneinander stehenden Gattersägen in deren Sägerahmen jeweils vier Sägeblätter nebeneinander einspannt waren (Abb. 2). Beide Sägen wurden von einem Wasserrad angetrieben, wobei die Schubstangen (Pleuelstangen) über Kurbelwellen an beiden Enden der Radachsen oder an beiden Seiten des Wasserrades exzentrisch angebracht gewesen sein müssen. Aufgrund der Tiefe des Wassergrabens und des Abstands der Radlagersteine lässt sich ein Wasserrad mit einer Breite ca. 0,50 m und einem Durchmesser von 4,00 m bis 4,50 m rekonstruieren. Die Position des Wasserrades und die Raumgröße lassen nur die Annahme zu, dass beide Sägen nebeneinander gestanden haben müssen.

Der archäologische Befund war also recht eindeutig: hier hatte man zum ersten Mal eine Steinsägewerkstatt angetroffen, in der nach einer Methode gearbeitet worden sein muss, die uns bei Ausonius nur aufgrund ihrer Betriebsgeräusche beschrieben ist. Vom Sägebetrieb selbst war aber außer den beiden Werkstücken am Ort nichts erhalten.

¹⁵ Seigne 2002a, 212; Seigne 2006, 388.



Abb. 3
Ephesus. Spuren
einer mit zwei
Sägeblättern
bespannten
Gattersäge
in zwei
Marmorblöcken;
6. Jh. n. Chr.

Ephesus

Ein der Steinwerkstatt von Gerasa durchaus ähnlicher Befund wurde zwischen 1969 und 1985 vom Österreichischen Archäologischen Institut (ÖAI) bei den Ausgrabungen im Hanghaus 2 von Ephesus gemacht¹⁶. Auch dieser Befund wird in das 6. Jh. n. Chr. datiert, und auch hier wurde ein ehemals anders genutzter Raum zu einer Steinwerkstatt umfunktioniert. Kanäle und Gräben belegen die Betriebswasserzuführung und die Ableitung des Abwassers. Die Positionierung des (nicht mehr vorhandenen) Wasserrades, dessen Durchmesser bis 2,8 m betragen haben könnte, bereitet aufgrund der Befundlage keine Schwierigkeiten. Der deutlichste Hinweis auf eine Steinwerkstatt sind zwei *in situ* befindliche Steinblöcke, die Spuren von nicht vollendeten Sägevorgängen zeigen. Holzteile der Säge oder des Antriebs haben sich auch hier nicht erhalten, jedoch lassen die Unterbauten einen gewissen Einblick in den Sägebetrieb zu. Dazu gehören neben Balkenlöchern und Auflagern für die Radkonstruktion vor allem die Gerinne für das Abwasser des Wasserradkastens und das ausgespülte Schleifmittel.

An den beiden Marmorblöcken sind für unsere Betrachtungen vor allem die Schleifspuren interessant. Man erkennt an den Innenseiten beider Blöcke von oben nach unten durchgängige Schnittflächen, die von einem bereits abgeschlossenen Sägevorgang herühren müssen. Danach müssen beiden Blöcke neu positioniert worden sein, denn ein neuer Sägevorgang ist begonnen, aber nicht vollendet worden: In beiden Blöcken sind jeweils zwei Schnittspuren über die gesamte Länge der Blöcke zu sehen, die aber in beiden Fällen nur eine handbreit tief in den Stein eingeschnitten sind. Das zeigt, dass hier mit einem doppelblättrigen Sägegatter gearbeitet worden ist und zwar gleichzeitig in beiden Steinen, denn der Vorgang wurde abgebrochen, als man in beide Steine gleich tief eingedrungen war (Abb. 3).

¹⁶ Schjøler 2005; Mangartz 2006.



Abb. 4
Hierapolis,
Ammianos-Relief.
Detail mit Wasserrad
und Aufschlagwasser.



Abb. 5
Hierapolis,
Ammianos-Relief.
Details der
Kraftübertragung
auf die beiden Sägen
mit Welle, Kammrad,
Drehling und
Schubstangen.

Das Ammianos-Relief einer Steinsäge von Hierapolis

Als erstes fällt in der Abbildung das große Antriebsrad ins Auge, das rechts im Bild zu sehen ist. Es hat den Anschein als sei hier ein mittelschlächtiges Wasserrad dargestellt: das Wasser trifft also in halber Höhe des Rades auf die Schaufeln. Voraussetzung für den Betrieb eines solchen Rades ist ein Aufstau und eine künstliche Heranführung des Wassers. Der Aufprall des Wassers auf die Schaufeln treibt das Rad an und hält es in einer konstanten Drehbewegung. Durch diese Einrichtung ist die für den Betrieb der Säge notwendige Energie bereitgestellt (Abb. 4).

Die Übertragung der Drehbewegung auf den Mechanismus der Steinsäge ist im Relief anschaulich dargestellt. Nach Aussage der Darstellung bildet die Achse (Welle) des Wasserrades die Verbindung zu einem Zahnradgetriebe (Abb. 5). Da der Künstler die Räder dieses Sägewerkes und die Achse von der Breitseite darstellen wollte, musste er die Radansichten um 90 Grad drehen, sonst wären sie als Räder gar nicht erkennbar geworden.

Das Zahnrad ist am Ende der Achse (Radwelle) des Wasserrades fest montiert und dreht sich im Gleichlauf mit dem Wasserrad. Das Zahnrad (Kammrad) wiederum überträgt die

Kraft auf ein drittes Rad (Drehling), das als Kurbelwelle dient: hier wird die Drehbewegung des Wasserrades in eine horizontale Bewegung umgesetzt (rotierende Bewegung → linear oszillierende Bewegung). Zur weiteren Kraftübertragung auf die angeschlossene Steinsäge dienen Schubstangen. Diese sind nicht an der Achse des Drehlings montiert, sondern an zwei Hubzapfen, die an beiden Seiten des Rades exzentrisch angebracht sind. Diese Hubzapfen vollziehen beim Betrieb der Anlage Kreisbahnen um die Achse des Drehlings und bewegen auf diese Weise die angeschlossenen Schubstangen hin und her. Der Durchmesser der von den Hubzapfen vollzogenen Kreisbahnen entspricht damit genau der Länge, der von den Schubstangen zurückgelegten Horizontalbewegungen und damit auch der Arbeitsbewegung der angeschlossenen Sägen. Da die Kurbelwelle im Relief etwas kleiner dargestellt ist als das Kammrad, müsste die Drehzahl der Kurbelwelle etwas höher gelegen haben als die der Antriebsräder.

Die beiden Steinsägen mit den beiden Steinblöcken sind sehr anschaulich und detailgetreu, aber vereinfacht und symbolisierend dargestellt. Vom Typ her handelt es sich in beiden Fällen um Spannsägen, bei denen die Sägeblätter durch einen Rahmen die nötige Spannung erhalten. Dargestellt sind sie während des Sägebetriebs, denn die Sägeblätter haben jeweils einen Steinblock bereits zur Hälfte zersägt. Die dargestellte Säge entspricht einer einfachen Zimmermannssäge, wie sie auch bei der Holzbearbeitung eingesetzt wird (Abb. 6). Im Steinsägebetrieb nennt man eine einblättrige Säge ›Trennsäge‹, während eine mehrblättrige Säge als ›Gattersäge‹ bezeichnet wird.

Wenngleich die beiden Sägen sehr detailgetreu und richtig dargestellt sind, fehlt in der Darstellung eine Art Aufbau, mittels dessen die Sägen geführt werden. Ein glatter Sägeschnitt ist mit einer Steinsäge nämlich nur möglich, wenn das Sägeblatt in streng senkrechter Stellung gehalten wird und auch seitlich keine Taumelbewegungen vollführen kann. Dazu bedarf es eines Gehäuses in Kastenform, in den der Spannrahmen eingehängt ist. Beim Sägevorgang wird dieser Rahmen mittels der Schubstange hin- und hergezogen, wobei das Sägeblatt sich in den Stein einschneidet. Dazu muss dem Spannrahmen mit dem eingespannten Sägeblatt neben der Möglichkeit zur horizontalen Bewegung ein weiterer Spielraum gegeben sein, nämlich der von oben nach unten. Aber auch diese

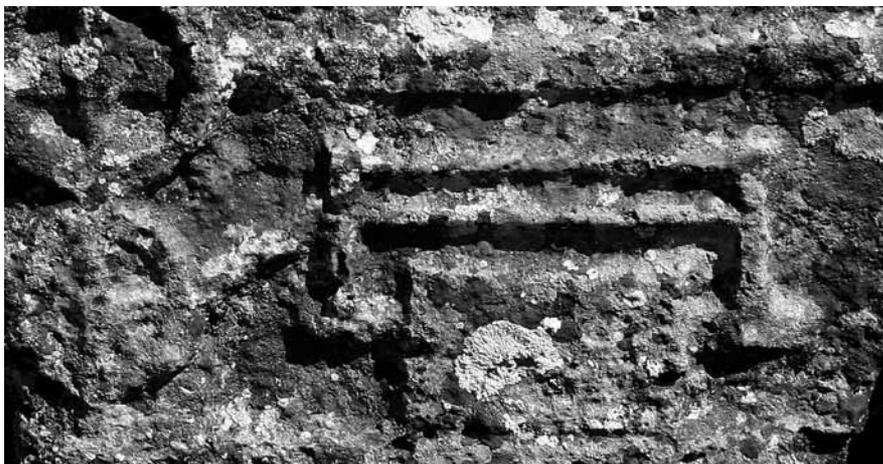


Abb. 6
Hierapolis,
Ammianos-
Relief. Detail der
Kraftübertragung
vom Drehling mit
der Kurbelwelle
über eine
Schubstange auf
eine der beiden
Sägen.
Der dargestellte
Steinblock
ist zur Hälfte
eingeschnitten.

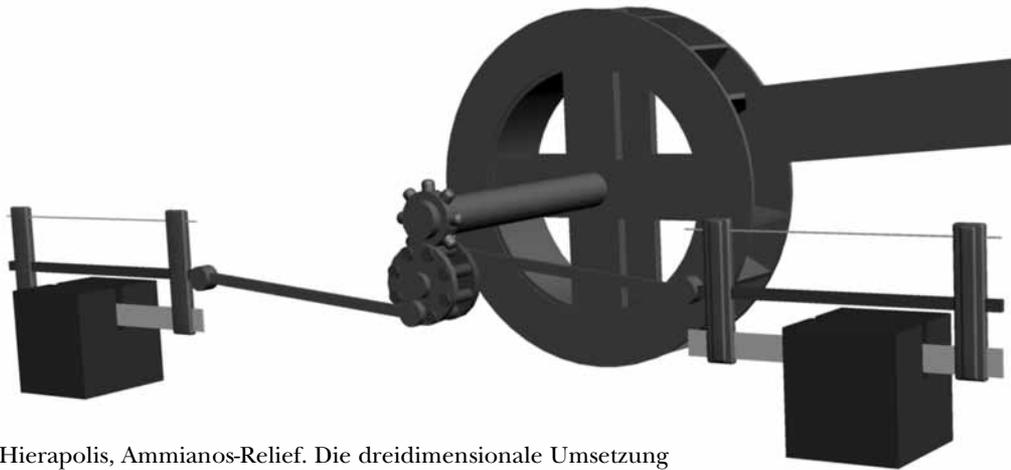


Abb. 7 Hierapolis, Ammianos-Relief. Die dreidimensionale Umsetzung der Reliefdarstellung zeigt die von Ammianos gewählte Technik der Kraftübertragung. Auf die Darstellung von Wellzapfen oder Radstühlen zur Lagerung der Welle wird verzichtet; das Mühlrad und das Getriebe schweben also frei in der Luft. Auch die Säge ist nur symbolisch dargestellt, denn sie hat weder eine horizontale noch eine vertikale Führung.

Bewegungsrichtung muss streng geführt werden, damit die gesägten Steinplatten nicht nur gleichmäßig dick werden, sondern zudem auch noch ebene Oberflächen erhalten.

Die Grundvoraussetzungen für die Durchführung des Sägevorgangs, nämlich die Möglichkeiten zur Führung des Sägeblattes sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung sind im Ammianos-Relief nicht dargestellt. In der Darstellung steht die Säge wie von selbst auf dem Stein, sie hat keinerlei Führung in vertikaler Richtung und ist auch nach den Seiten hin nicht abgestützt. Hier hat der Steinmetz seine Darstellung am stärksten generalisiert, denn er verzichtet auf alle weiteren technischen Details und zeigt nur die Säge. Man kann allerdings annehmen, dass die Darstellung eines kompletten Sägewerkes den Steinmetz ganz sicher überfordert hätte. Auch die für das Steinsägen unverzichtbaren Hilfsmittel wie Wasser und Schleifsand sind vom Künstler in das Relief nicht eingebracht worden. Vermutlich wäre eine detailliertere Zeichnung allerdings nicht klarer geworden, sondern hätte den Betrachter nur noch mehr verwirrt. Auch die Darstellung der Lagerung der Räder auf Wellzapfen oder Radstühlen hat er sich erspart, um eine Übersichtlichkeit seines Reliefs zu erhalten (Abb. 7).

Aber dennoch stellt sich die Frage, warum Ammianos den Antrieb der Säge mit derart großer Sorgfalt und Detailfreudigkeit darstellen ließ, die Säge selbst hingegen nur mit ihren unbedingt notwendigen Merkmalen, um sie als solche zu erkennen. Einer der Gründe hierfür ist sicher, dass die dargestellte Szene klar erkennbar sein sollte. Es könnte aber auch noch etwas anderes hinzukommen: Ammianos zählte nicht unbedingt die Säge zu seinen großen erfinderischen Leistungen, sondern für ihn war der von einem Wasserrad ausgehende Antrieb der Säge mitsamt seinem Getriebe, der Kurbelwelle und den Schubstangen das Wichtige. Einfache Sägen mag es zu seiner Zeit auch für den Handbetrieb des Öfteren gegeben haben, Sägewerke, wie wir eines auf dem Ammianos-Sarkophag erkennen können, dürften dagegen viel seltener – wenn überhaupt an einem anderen Ort – anzutreffen gewesen sein. Vermutlich haben wir hier eine der ältesten Darstellungen

eines Getriebes vor uns. Nicht ohne Grund bezeichnet Ammianos sich in der Inschrift auf dem Sarkophag als »geschickten *Daedalus*«, womit er sich in diesem Fall den Ruhm eines Erfinders anheftet:

Text on the pediment:	M. Αὐρ. Ἀμ[μ]ια[ν]ῶς Ἱεραπο- λίτης τροχοδέ- [δ]αλος (?) ἐποίησεν Δαίδαλ(ου)ῆς τέχνη
on the boss:	καὶ νῦν ἔ- δε μενῶ.

Translation: M. Aur. Ammianos, citizen of Hierapolis, skillful as Daedalus in wheel-working (?), made (the represented mechanism) with Daedean craft (or: 'with the skill of Daedalus'); and now I'll stay here.

»M. Aur. Ammianos, Bürger von Hierapolis, geschickt wie Daedalus bei der Herstellung einer (sich wie ein Rad drehenden) Maschine, schuf diese mit dem Geschick des Daedalus. Und jetzt werde ich (in diesem Sarkophag) für immer ruhen«¹⁷.

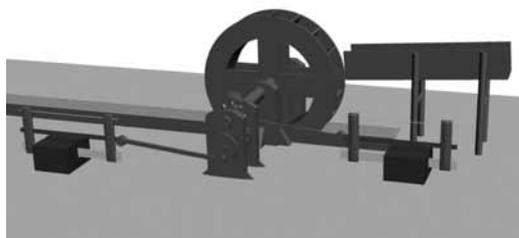


Abb. 8 Hierapolis, Ammianos-Relief.
Dreidimensionale Darstellung der
Sägemaschine mit der notwendigen Ergänzung
der Wasserrad- und Getriebelagerung.

Ammianos wollte mit der Darstellung auf seinem Sarkophag, der schließlich an der Hauptzufahrtsstraße zur Stadt aufgestellt war, die Vorbeikommenden nicht mit einer unkomplizierten Handsäge beeindrucken, sondern vielmehr mit einer von Wasserkraft betriebenen Großsäge – und auch dabei begnügte er sich nicht mit einer einfachen Anlage, sondern er zeigte derer gleich zwei (Abb. 8).

Für Ammianos schien es wichtig, der Nachwelt die Kenntnis von seiner Erfindung einer Sägemaschine zu hinterlassen. Für diese Mitteilung wählte er ein Giebelfeld seines Sarkophagdeckels. Hier ließ er ein Relief anbringen, das seine Erfindung mit den wesentlichen Einzelheiten zeigte. Mit der Darstellung der komplizierten Antriebstechnik seiner Kraftmaschine wollte er den Betrachter beeindrucken. Die Steinsäge ist nur symbolisch für den hier gewählten Verwendungszweck der Maschine dargestellt, zumal die Einzelheiten der Säge in einem Steinrelief kaum herauszuarbeiten gewesen wären. Es sei nicht unerwähnt, dass mit dieser Antriebsmaschine auch andere Werkbänke anzutreiben gewesen wären.

Die Rekonstruktion des Sägevorgangs

In Ermangelung archäologischer Funde und Befunde sind die früheren Rekonstruktionen von Steinsägen meist sehr vorsichtig vorgenommen worden. So waren es in der Regel handbetriebene Sägen, die für den Einsatz im Steinbruch oder zum Schneiden von Marmor beschrieben wurden. Das ist nicht verwunderlich, denn bis zu den Funden von

¹⁷ Die Inschrift wurde von T. Ritti gelesen; deutsche Übersetzung von W. Eck.

Gerasa und Ephesus war es einzig die Literaturstelle bei Ausonius, die einen Hinweis auf eine wassergetriebene Steinsäge gab. Durch die Enträtselung des Ammianos-Reliefs von Hierapolis kam nun ein weiterer Baustein zu einer Rekonstruktion hinzu.

Handgetriebene Steinsägen waren, wenn man von kleinen von Hand geführten Modellen einmal absieht, nur als Pendelsägen zu rekonstruieren. »Das Prinzip der alten [Pendel-] Steinsäge besteht darin, dass ein hochkant gestellter Rahmen, in den ein ungezahntes Eisenband eingespannt wird, mittig oder an beiden Enden pendelnd aufgehängt ist. Durch die Hin- und Herbewegung des Sägeblattes (Hub- oder Horizontalschub) wird feuchter Quarzsand (Sägeschlamm) in den Stein eingerieben und dieser durch langsames Ablassen des Sägerahmens durchgeschnitten. Durch das Pendeln berührt die Sägeschneide den Boden des Sägekanals nur kurzfristig und schwingt dann bis zu den Umkehrpunkten aus (Aushub, Vertikalhub, Lufthub). Während dieses Vorgangs kann der Sägeschlamm entlang der Blattflanken bis unter die Schneide dringen. Er wird beim Rückschwingen des Sägeblattes unter die Schneide in den Sägekanal geschlagen und tiefte diesen ein. Bei diesem Vorgang wird freilich nicht nur der Stein, sondern auch das Sägeblatt abgenutzt«¹⁸.

Da die Sägeblätter nicht gezahnt waren, kam den Bestandteilen des Sägeschlammes und seiner Wirkungsweise eine besondere Bedeutung zu. Röder führt dazu verschiedene Wirkungsweisen an, kommt aber zu dem Schluss, »dass hauptsächlich neben der Meißelwirkung die Zerspanung (Hobelwirkung) am Boden des Sägekanals wirksam war. Hier setzten sich die Körner immer wieder in dem weichen Eisen des Sägeblattes fest. Das überschüssige Sandmaterial aber wurde an die Seiten der Schneidkante gedrückt und wirkte hier auf dem Wege der Druck- und Kerbrollung. Die Anteile der einzelnen Wirkweisen waren recht verschieden je nach Sandart, Aufgabemenge, Vorschubdruck und die Art des zu sägenden Gesteins und seiner Bestandteile«¹⁹.

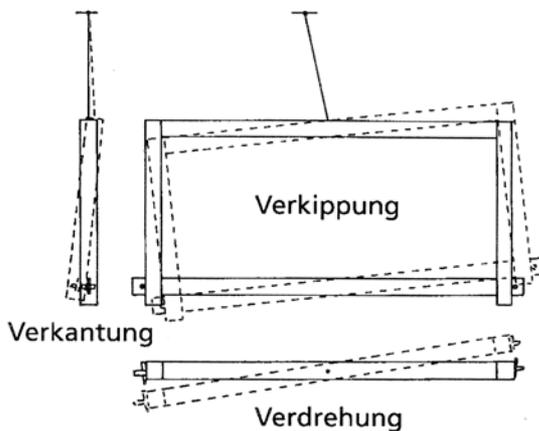


Abb. 9 Die möglichen Laufabweichungen einer Pendelsäge (nach J. Röder). Eine Sägemaschine ohne strenge Horizontalführung würde besonders zur Verkippung neigen.

Die von Röder für die Pendelsäge genannten Möglichkeiten der Laufabweichung »Verkantung, Verkippung und Verschwenkung (Verdrehung)« waren Wirkungsgrade, die für eine wassergetriebene Sägemaschine von der Konstruktion her ausgeschlossen werden mussten (Abb. 9). Bei der handgetriebenen Säge lag es am Geschick der Steinbrucharbeiter, die Säge so zu führen, dass ein möglichst sauberer Schnitt im Stein zustande kam. Bei der Sägemaschine waren die vom Wasserrad ausgehenden wirksamen Kräfte so zu lenken, dass die angeführten Laufabweichungen möglichst vermieden

¹⁸ Röder 1971, 307–308.

¹⁹ Röder 1971, 308.

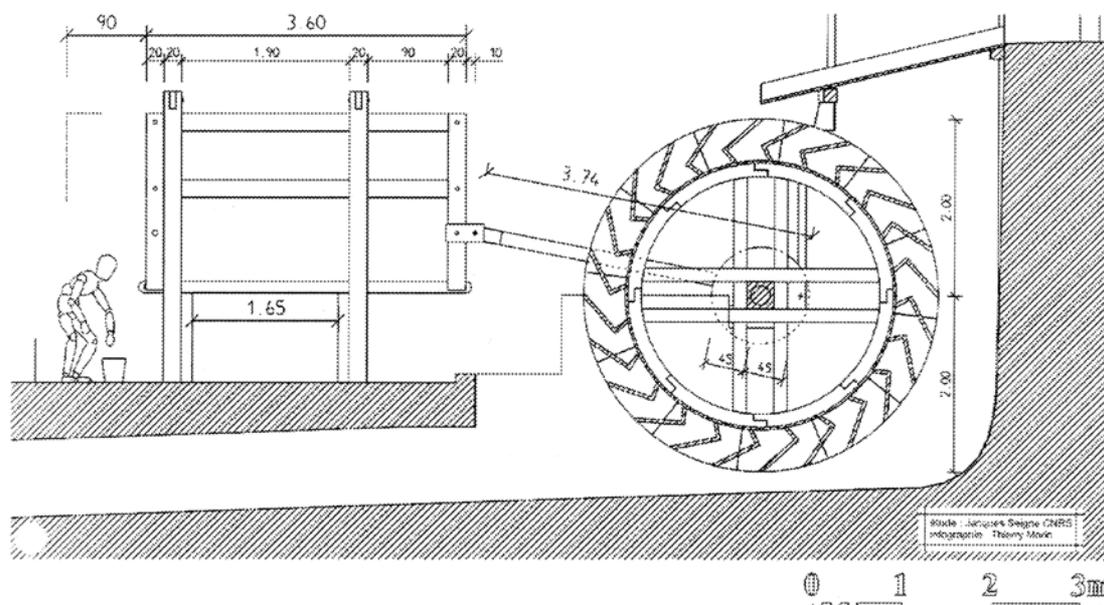


Abb. 10 Gerasa. In der Rekonstruktion der Sägemaschine nach J. Seigne ist keine horizontale Führung des Sägerahmens vorgesehen.

wurden. Das war allerdings nur zu erzielen, wenn das Sägeblatt durch den Maschinenantrieb sowohl vertikal als auch horizontal zwangsweise geführt wurde – nur dadurch war eine glatte Schnittfläche zu erreichen.

Die bisher vorgelegten Rekonstruktionsmodelle von Seigne für Gerasa, von Schiøler und Mangartz für Ephesus und von Kessener für das Ammianos-Relief von Hierapolis sind in dieser Hinsicht nicht überzeugend, denn in keiner dieser Rekonstruktionen ist die Säge wirksam gegen Verkippung geschützt²⁰.

Die beiden Ephesus-Rekonstruktionsmodelle sind weder gegen Verkippung, noch gegen Verkantung und Verdrehung der Sägen geschützt. Bei der leichtesten Achsverdrehung des Wasserrades müssten die Sägerahmen unkontrolliert Schwingen und Tanzen.

Im Falle der Gerasa-Säge liegt diese Fehlrekonstruktion daran, dass Seigne den hochkant gestellten Rahmen für die Einspannung der Sägeblätter von den Handsägen übernommen hat²¹. In Seignes Sägerekonstruktion wird der Sägerahmen mit den Sägeblättern in einem Sägestell nur in vertikaler Richtung geführt – in horizontaler Richtung ist der Sägerahmen völlig führungslos und würde im Betrieb von der Schubstange in die vom Wasserradantrieb vorgegebene Richtung gezogen. Eine solche Säge lässt zwar ein einigermaßen gegen Verschwenkung und Verkantung geschütztes Sägen zu, sie ist aber keineswegs gegen die Verkippung der Säge geschützt (Abb. 10).

²⁰ Es ist bemerkenswert, dass es bisher für keine der vorgeschlagenen Rekonstruktionen einen funktionstüchtigen Nachbau gibt. Im beeindruckenden Nachbau in Gerasa ist die Säge durch zusätzliche Einbauten in ihren vertikalen Bewegungen so eingeschränkt worden, dass sie sich lediglich hin- und herbewegen und somit in den Stein überhaupt nicht eindringen kann.

²¹ Seigne 2000; Seigne 2002a; Seigne 2002b; Seigne 2002c; Seigne 2006.

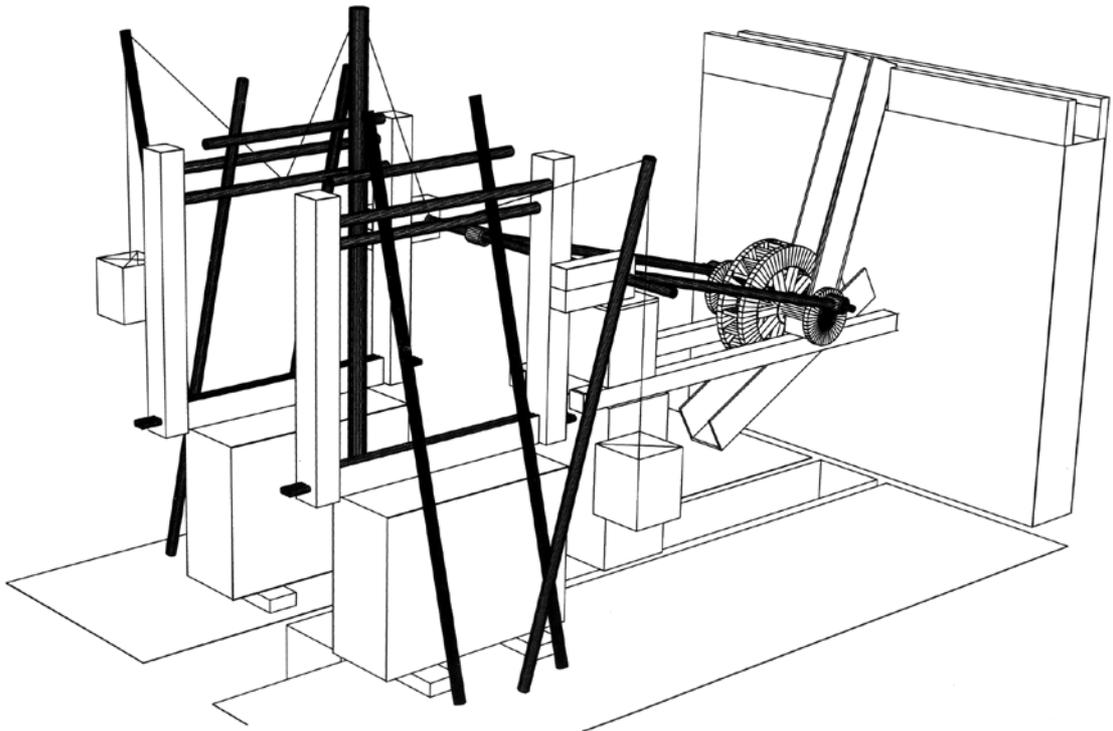


Abb. 11 Ephesus. In der Rekonstruktion der Sägemaschine nach Th. Schiøler ist der Sägerahmen frei pendelnd aufgehängt.

Schiøler und Mangartz rekonstruieren statt des vertikal aufgehängten Rahmens einen horizontal schwebenden Rahmen, der über vier an seinen Ecken angebrachten Seilen mit Gegengewichten in der Balance gehalten werden soll²². Hier sorgt noch nicht einmal ein Sägestell dafür, dass die Säge in der Vertikalen streng geführt wird. Die leichteste Unwucht in der Antriebswelle müsste bei diesen Modellen zum ›Taumeln‹ und ›Baumeln‹ des Sägerahmens führen. Diese Säge wäre gegen keine der von Röder genannten Laufabweichungen geschützt gewesen. (Abb. 11 und 12).

Kessener macht in seiner Hierapolis-Rekonstruktion denselben Fehler, den wir schon bei Seigne am Beispiel Gerasa gesehen haben²³: Er übernimmt die Reliefdarstellung wie eine Konstruktionszeichnung. In seiner Rekonstruktion findet sich zwar ein Sägestell hinzugefügt, die Führung des Sägerahmens ist aber auch bei ihm nur in vertikaler Richtung gewährleistet (Abb. 13).

Dieser Art Sägeblattführung hätte in allen zuvor genannten Rekonstruktionen zur Folge gehabt, dass der Sägekanal nicht horizontal ausgeführt worden wäre, sondern eine – vermutlich sogar stark – konkav gewölbte Bogenform erhalten hätte. Die Ursache hierfür ist konstruktionsbedingt. Da bei der wassergetriebenen Sägemaschine die kreisförmige

²² Schiøler 2005; Mangartz 2006.

²³ H. P. M. Kessener in Grewe – Kessener 2007.

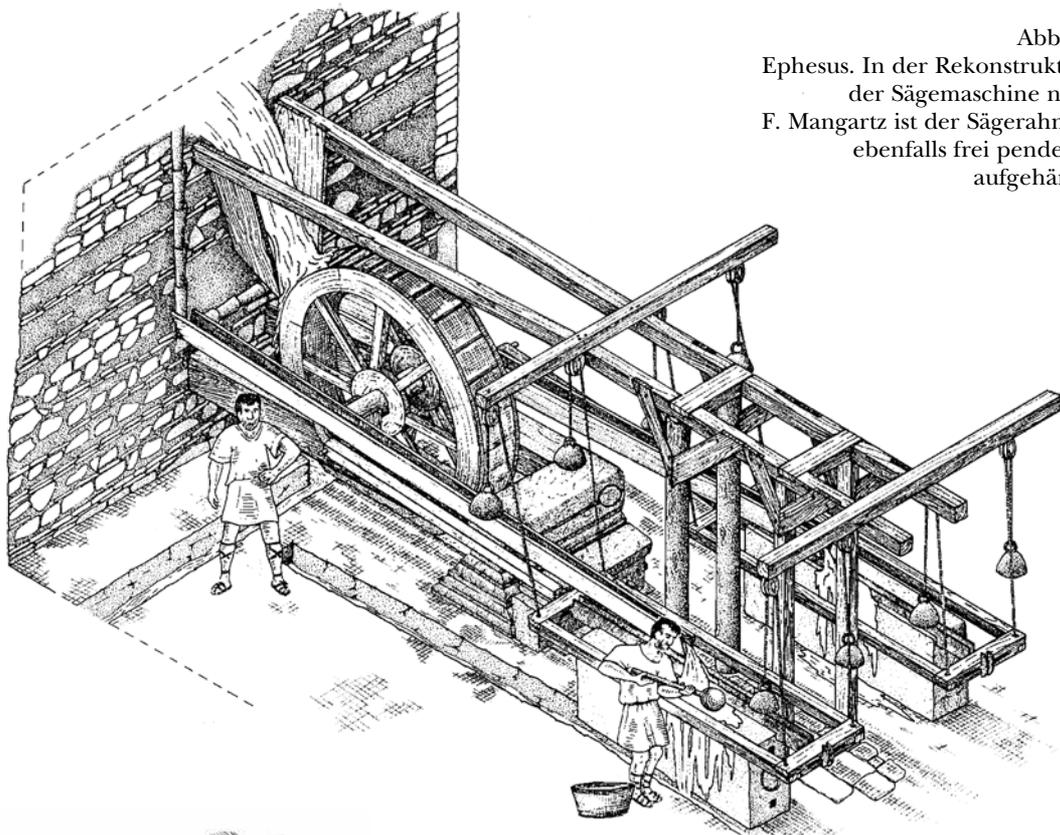


Abb. 12
Ephesus. In der Rekonstruktion
der Sägemaschine nach
F. Mangartz ist der Sägerahmen
ebenfalls frei pendelnd
aufgehängt.

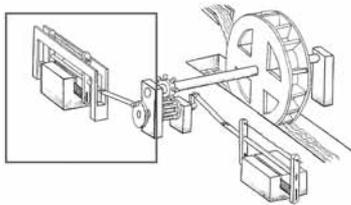


Abb. 13
Hierapolis. Auch in P. Kesseners
Zeichnung der Sägemaschine wird die
Säge nur vertikal geführt.

Bewegung des Wasserrades über die an eine Kurbelwelle angeschlossene Schubstange (Pleuelstange) in die Horizontalbewegung der Säge umgesetzt werden muss, treten Kräfte auf, die die Sägeblattführung beeinflussen. So bestimmt die Länge der Kurbelwelle den horizontalen Bewegungsbereich der Säge, dieser entspricht nämlich exakt dem Durchmesser des von der Kurbelwelle vollzogenen Kreises. Wenn nun das Sägeblatt lediglich in einen hochkant gestellten Rahmen eingespannt und dieser mit der Schubstange verbunden ist, so wird die Horizontalbewegung nicht streng geführt, sondern sie ist direkt von der Kurbelwelle abhängig: Die Kreisbewegung der Kurbelwelle überträgt sich über die Schubstange auf die Säge, die wegen der auf sie einwirkenden Zug- und Schubkräfte die Bewegung der Kurbelwelle nachzuvollziehen sucht: Die Bewegung der Säge wird sich dabei auf einer Schleppkurve (Traktrix) vollziehen, da sie immer in die Richtung gezogen wird, in der sich die Kurbelwelle bei ihrer Kreisbewegung gerade befindet.

Diese Schleppkurve wird sich bei der Zugbewegung auf einer anderen Bahn befinden als bei der Schubbewegung. Das ist am ehesten an einem Beispiel aus dem Straßenverkehr zu verdeutlichen, da es mit der Schleppkurve eines Anhängers zu vergleichen ist,

der von einem Kraftwagen gezogen wird: Fährt ein solches Gespann um eine Kurve, so wird der Anhänger die vom Kraftwagen vorgelegte Kurve nicht nachvollziehen, sondern diese stattdessen regelrecht schneiden. In der Praxis wird der Kraftwagen die Kurve auf der Fahrbahn umrunden, während der Anhänger über die Bordsteinkante der Kurve gezogen wird. Noch gravierender wirkt sich die Traktrix bei der Rückwärtsfahrt aus, wenn also der Anhänger vom Kraftwagen geschoben wird. Jeder der dieses Manöver als ungeübter Fahrer einmal versucht hat, kennt das Ergebnis: der rückwärts geschobene Anhänger wird sich nicht auf der bei der Zugfahrt beschriebenen Schleppkurve bewegen, sondern sich stattdessen querstellen. Erst mit viel Feingefühl und Fahrpraxis wird es einem Fahrer gelingen, die einzig fahrbare Traktrix zu finden, um den Anhänger in eine gewünschte Richtung zu bugsieren.

Ganz ähnlich ist das Verhalten von Sägen, die entweder in einem hochkant gestellten Rahmen in einem Sägegestell ohne horizontale Führung untergebracht wurden oder deren Rahmen an vier Seilen frei schwebend aufgehängt wurden. Da ein solcher Sägerahmen nur im ersten Fall in vertikaler Richtung zwangsgeführt ist, also in horizontaler Richtung ein völlig freies Spiel hat, wird die an der Schubstange beweglich angehängte Säge sich bei jeder Zugbewegung verkippen. Je nach Drehrichtung der Kurbelwelle wird sie dabei nach unten oder oben gezogen werden. Noch stärker wird sich diese Schleppkurve bei der Schubbewegung auswirken; hinzu kommt, dass ein Teil der Schubkraft ins Leere laufen wird. Als Ergebnis wird sich ein völlig uneinheitlicher Sägekanal zeigen, der nicht die gewünschte horizontale Schnittlinie, sondern eine konkave Wölbung mit stark eingeschnittenen Enden aufweist (Abb. 14 a–e).

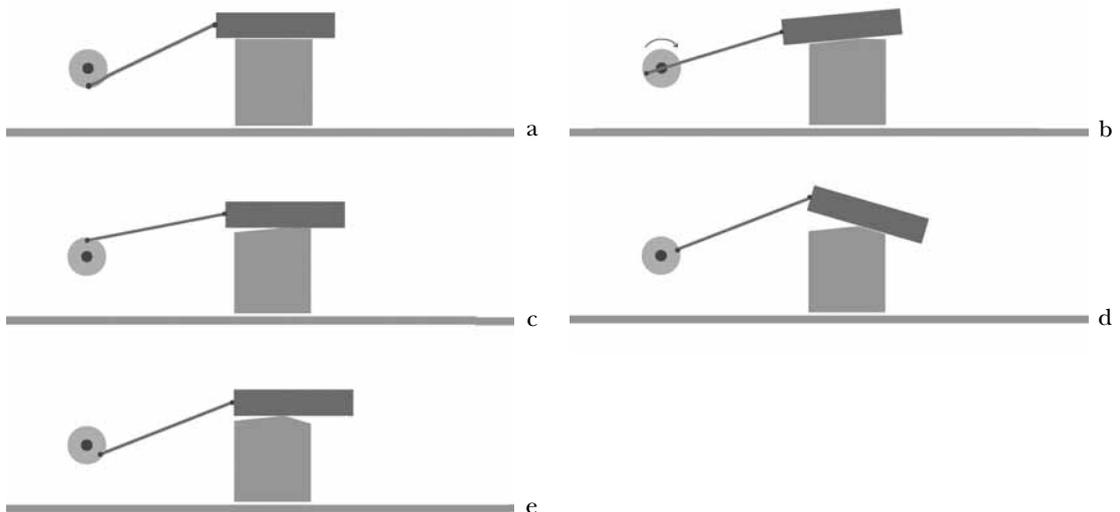


Abb. 14 Auswirkungen der Schleppkurve beim Betrieb einer horizontal nicht geführten Säge:
 a) Der Sägerahmen mit den Sägeblättern wird auf dem Steinblock in Position gebracht;
 b) Die Kurbelwelle zieht den Sägerahmen auf einer Schleppkurve in ihre Richtung;
 c, d) Beim Übergang vom Ziehen zum Schieben verkippt der Sägerahmen und ein Teil der Schubkraft stößt ins Leere; e) Bei der folgenden Umkehr vom Schieben zum Ziehen kippt der Sägerahmen von einer Schräglage in die andere. Im Moment des Kippens setzt der Sägevorgang für einen Augenblick aus, was zu einem ›Buckel‹ in der Schnittkante führen muss.

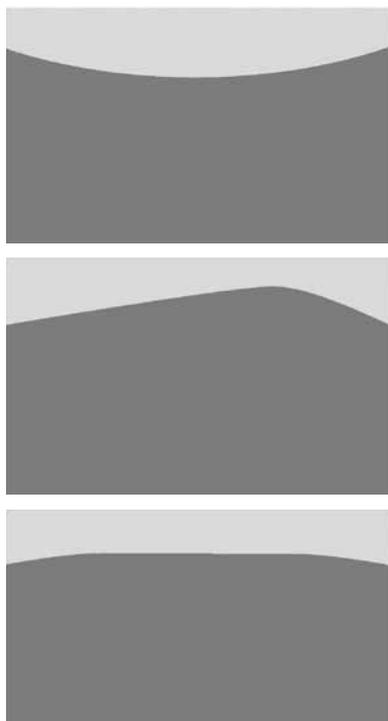


Abb. 15 Typische Schnittkanten als Auswirkungen verschiedener Sägetechniken: a) Eine mittig aufgehängte Pendelsäge mit abgerundetem Sägeblatt wird eine konvexe Schnittkante verursachen; b) Eine Sägemaschine ohne strenge horizontale Führung des Sägerahmens wird einen »Buckel« in der Schnittkante verursachen; c) horizontale Schnittkante einer sowohl vertikal als auch horizontal streng geführten Säge; die leichten Abrundungen an den Enden sind von der ruckartigen Schubumkehr verursacht.

Jeder Marmorblock, der mit einer nach Seigne, Schiøler, Mangartz oder Kessener rekonstruierten Sägemaschine geschnitten worden wäre, müsste nach diesen Vorgaben einen von der Horizontalen abweichenden Sägeschnitt aufweisen. Die in Gerasa angesägten Marmorsäulen und die in Ephesus gefundenen Marmorblöcke zeigen aber völlig andere Schnittspuren, sie sind nämlich tatsächlich annähernd horizontal. Die beiden Marmorblöcke von Ephesus zeigen auf ihre Längen von ca. 2,2 m eine konkave Wölbung von lediglich 12 mm (nördlicher Block), resp. 15 mm (südlicher Block)²⁴.

Diese geringen Wölbungen können nur das Ergebnis einer horizontal streng geführten Säge sein; mit den angebotenen Rekonstruktionen wäre ein solches Ergebnis jedenfalls niemals zu erreichen gewesen²⁵.

Dieses Beispiel zeigt, dass eine solche Sägemaschine ohne zwangsweise Führung in vertikaler und horizontaler Richtung nicht einwandfrei funktionieren kann.

Um ein funktionierendes Modell einer Steinsägemaschine zu erhalten, müssen die aus den archäologischen Quellen bisher gewonnen Erkenntnisse natürlich in den Entwurfsplan einfließen. Das heißt zum einen, dass die im Ammianos-Relief dargestellten Einzelteile der Sägemaschine sich im Modell wieder finden müssen. Weiterhin müssen sich die in den in Gerasa und Ephesus gefundenen Werkstücken sichtbaren Arbeitsspuren auf den Sägevorgang zurückführen lassen; es kann also nicht etwa eine Säge rekonstruiert werden, die völlig andere Arbeitsspuren als die vorgefundenen hinterlassen würde. Da jede Laufabweichung der Säge ihre Spuren in der Schnittfläche des Steins hinterlassen würde, ist eine Rekonstruktion anzustreben, die derartige Laufabweichungen möglichst ausschließt (Abb. 15).

Zieht man die frühen neuzeitlichen Mühlenhandbücher zu Rate, kommt man genau zu dieser Erkenntnis. Um diese Anforderungen zu erfüllen, hat J. C. Sturm, der nach eigener Aussage zuvor mehrere schlecht funktionierende Steinsägen gesehen hat, 1718 ein neues Modell entwickelt und beschrieben.²⁶

²⁴ Die Messergebnisse lieferte mir freundlicherweise G. Wiplinger, ÖAI Wien.

²⁵ Dass auch eine streng horizontal geführte Säge einen leicht konkav gewölbten Sägeschnitt verursacht, liegt an der ruckartigen Richtungsänderung zwischen dem Schieben und Ziehen des Spannrahmens; s. u.

²⁶ Sturm 1718, Tab. XXXVII.

Die Sturmsche Sägemaschine besteht aus einem feststehenden Sägebock (in diesem Fall ein regelrechtes Holzgehäuse), in welchem als bewegliches Teil der Sägeschlitten hin- und her bewegt wird; der zu sägende Steinblock ist auf einem Holzbock im Inneren gelagert (Abb. 16). Diese Säge zeichnet sich durch eine zwangsweise Horizontal- und Vertikalführung des Sägeblattes sowie eine automatische Sandberieselung und Wasserbeträufelung aus. Sie wird über ein Getriebe angetrieben, das aus einem Kammrad mit 48 Kämme und einem Drehling mit 16 Stäben (Stöcken) besteht.

Der Sägeschlitten (Sägewagen) ist der bewegliche Teil dieser Sägemaschine, der vom Getriebe angetrieben über acht Rollen auf zwei seitlichen Holzbalken hin- und herbewegt wird. In dem horizontal bewegten Sägeschlitten sind an den Schmalseiten mittig zwei senkrecht stehende Hölzer angebracht, die der vertikalen Führung des Sägeblattes dienen. Mit dem Einschneiden in den Steinblock rutscht das Sägeblatt in den ›Faltzen‹ der Vertikalhölzer tiefer. Damit das kraftvoll geschieht, sind an beiden Enden des Sägeblattes Gewichte aufgelegt²⁷. Mit diesen Vorrichtungen ist das Sägeblatt nicht nur horizontal, sondern auch vertikal zwangsweise geführt!

Es fällt in diesem Modell aber vor allem eines auf: Hier wird nicht etwa das Sägeblatt von der Schubstange hin- und hergezogen, sondern ein auf Rädern beweglicher Sägeschlitten, in den das Sägeblatt vertikal beweglich eingehängt ist. Da Sturms Säge nur über ein Sägeblatt verfügt, ist die beschriebene Art der Unterbringung ausreichend. Bei Sägen mit mehreren Sägeblättern nebeneinander (Gattersägen), müssen diese in Rahmen (Gatter) eingespannt sein, wobei sich dann der gesamte Rahmen im Sägeschlitten selbsttätig absenken hat. In keinem Fall wirken sich die Zug- und Schubkräfte des Antriebs direkt auf das Sägeblatt aus, sondern immer indirekt über einen Sägeschlitten.

Diese Anforderung stellen auch Leupold und Beyer an eine Steinsägemaschine. Leupold und Beyer bemängeln, dass die meisten der von ihm angetroffenen Sägen diese Anforderungen nicht erfüllen und empfehlen – »weil uns keine bessere Invention zu Händen gekommen« – die bei L. C. Sturm schon früher publizierte Steinsäge²⁸.

Leupold nennt als wichtigste Eigenschaften einer solchen ›Steinsäge-Mühle‹:

1. das kontinuierliche Hin- und Herbewegen der Sägeblätter²⁹,
2. das gleichmäßige Einschneiden in den Steinblock³⁰,
3. die Leichtgängigkeit der Sägemaschine³¹,
4. die selbsttätige Berieselung des Sägeschnittes mit dem Schleifmittel Sand³²,
5. die gleichmäßige Beträufelung des Sägeschnittes mit Wasser³³.

²⁷ Sturm nennt ein Gewicht von »zwei Centnern«.

²⁸ Leupold – Beyer 1735, 115–116, Taf. XL.

²⁹ »Daß die Säge kontinuierlich in dem Hin- und Wiedergehen einschneide«.

³⁰ »Daß der Schnitt einmahl so starck wie das andere mahl geschehe«.

³¹ »Daß sie nicht schwer gehe, sondern ohne Knarren und Poltern fein stille fort arbeite«.

³² »Daß ohne Menschen Zuthun, der Sand vor sich in den gantzen Schnitt laufe«.

³³ »Daß Wasser aber nicht nur an einer Stelle, sondern stets auch hin und wieder über den gantzen Schnitt zutropffe, weil sonsten, wo die Säge an einem Orte trocken, an dem andern aber naß schneidet, die Arbeit viel zu schwer gehet.«

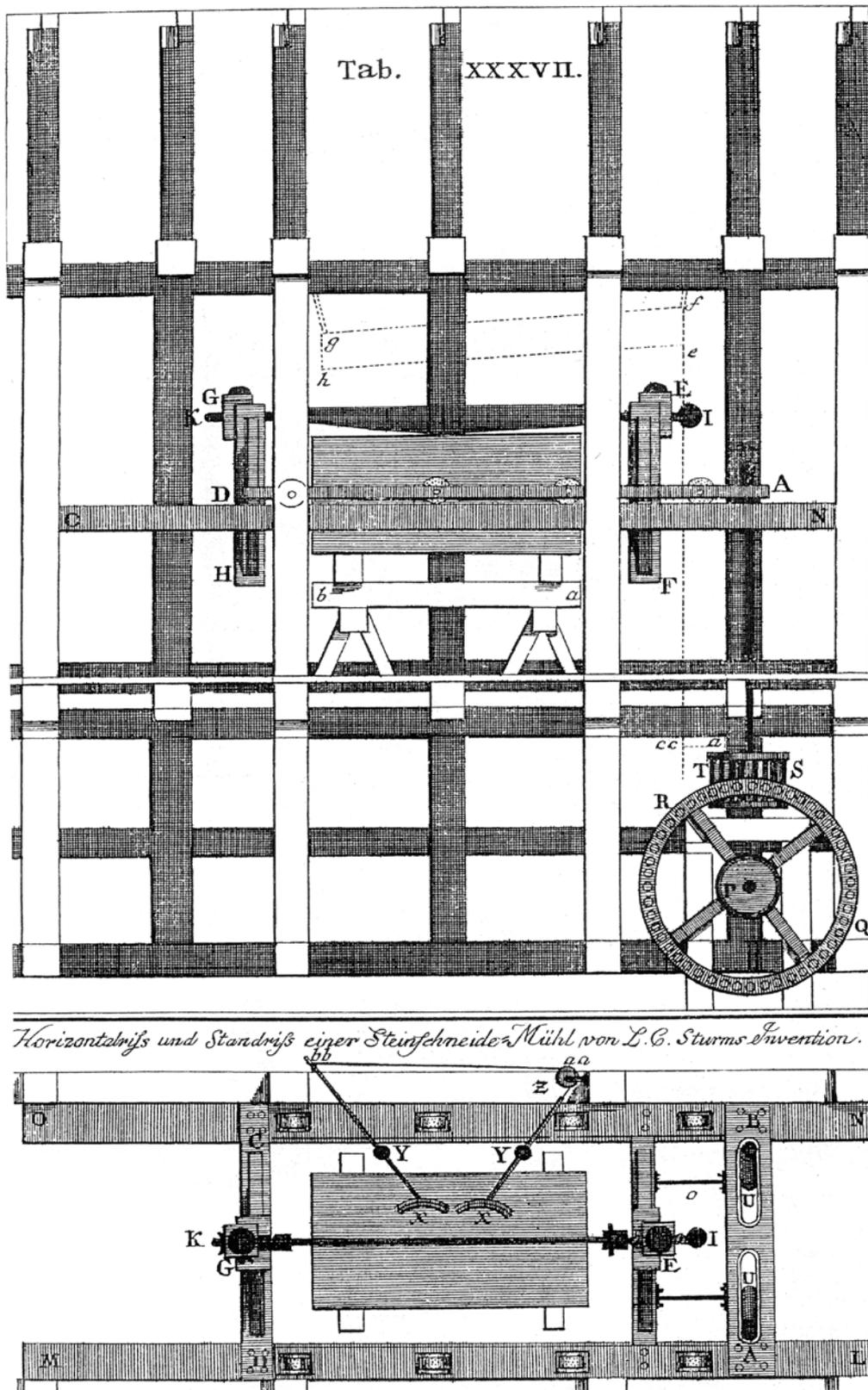


Abb. 16 »Steinschneide-Mühle« von L. C. Sturm (1718). In dem von einem Zahnradgetriebe hin und her bewegten Sägeschlitten ist ein Sägeblatt in einen vertikal beweglichen Rahmen eingespannt.

Fasst man alle bisher aufgezeigten Überlegungen zusammen, müsste nun eine funktions-tüchtige Rekonstruktion zu bauen sein. Ein Zufall wollte es allerdings, dass der Verfasser vor wenigen Jahren in Schwerin das funktionstüchtige Modell einer Steinsägemaschine fand. Diese war zwar in einem historischen Mühlengebäude untergebracht, es handelte sich allerdings um den Nachbau nach historischen Vorlagen.

Das Schweriner Modell einer Steinsäge

Die Gefahr bei der Rekonstruktion technischer Vorgänge oder Gerätschaften liegt immer darin, nicht das wirkliche Vorbild aus antiker Zeit zu treffen, sondern statt dessen eine Neuerfindung vorzulegen. Es wäre durchaus verlockend, sich bezüglich einer solchen Rekonstruktion bei den frühen modernen Sägemaschinen umzuschauen. Die Sägen sind allerdings komplett aus Eisen hergestellt und schon deshalb mit antiken Vorläufern nicht vergleichbar³⁴.

In Schwerin hatte man sich in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts die Aufgabe gestellt, das Gebäude einer zerfallenen historischen Schleifmühle mit altem Baumaterial wieder aufzubauen und danach mit neuem Leben zu erfüllen. Danach war zwar ein altes Mühlengebäude, in dem seit 1705 Steine geschnitten und poliert worden waren, als historischer Baukörper wiederhergestellt, von der Inneneinrichtung fehlten allerdings die wesentlichen Bestandteile³⁵. Für die Rekonstruktion der Mühle in den Jahren 1983 bis 1985 bediente man sich der Vorbilder aus historischen Handbüchern des 18. Jhs., wobei besonders Leupold und Beyer, die sich aber selbst auf Sturms »Vollständige Mühlen-Baukunst« beziehen, herangezogen wurden³⁶.

Die Säge ist Teil einer mit Wasserkraft angetriebenen Doppelanlage bestehend aus einer Steinsäge und einer Schleifmühle³⁷. Die Steinsäge von Schwerin ist der Ammianos-Säge in der Funktionsweise des Sägeantriebs derart ähnlich – die Technik der Kraftübertragung vom Wasserrad auf die Säge ist praktisch identisch –, dass sie hier als Vergleichsmodell näher vorgestellt werden soll (Abb. 17). Da die aus Holz gebaute Sägemaschine aus einer gleichermaßen einfachen wie effektiven Konstruktion besteht, kann sie durchaus als Vorbild für die Rekonstruktion des römischen Vorläufermodells dienen.

³⁴ Die modernsten Steinsägen werden computergesteuert mit Sägeseilen betrieben und können als Vergleiche nicht mehr herangezogen werden. Prospekte von 1920/30 der ehemaligen Maschinenfabrik Carl Meyer, die 1993 von der Fa. Burkhardt GmbH – damals noch unter dem Namen »Eisenwerk Hensel« firmierend – übernommen wurde, zeigen feststehende Gattersägen, in denen Spannrahmen mit eingespannten Sägeblättern (Gatter) hin- und herbewegt wurden. Die Sägen wurden von Elektromotoren angetrieben, wobei die Kraftübertragung – wie bei der Ammianos-Säge – über Kurbelwellen und Schubstangen geschah.

³⁵ Von den Originalteilen fand sich vor dem Wiederaufbau lediglich ein Segment des Kammrades. Bei der Rekonstruktion wurden folgende Holzarten verwendet: Schubstange – Esche, Zahnräder – Eiche, Zähne – Weißbuche (im Sommer geschlagen, zweimal jährlich mit Rindertalg eingefettet gegen Holzwürmer), für die Lager der Mühlräder wurde Fockholz verwendet; frdl. Hinweis von W. Leide, Schwerin.

³⁶ Sturm 1718; Leupold – Beyer 1735; Behrens 1789.

³⁷ Die Mühle stammt aus dem Jahre 1705; die Steinsägemaschine wurde 1753–1755 eingebaut und diente bis zur Fertigstellung des Schweriner Schlosses im Jahre 1857 der Steinverarbeitung, die 1983 wiederhergestellte Anlage dient heute Museumszwecken. Die Schleifmühle Schwerin befindet sich in der Trägerschaft des Stadtgeschichts- und Museumsvereins Schwerin e. V. – W. Leide und J. Moll ist für sachkundige Auskünfte freundlich zu danken. Die Fotodokumentation führte freundlicherweise P. Schmidt, Schwerin durch.



Abb. 17
Alte ›Schleifmühle‹
in Schwerin.
Nach historischen
Vorbildern
nachgebaute
Steinsäge.

Mit der Schweriner Sägemaschine steht der Forschung ein 1:1-Modell einer antiken Steinsäge zur Verfügung. Auf diese Weise werden auch die in der Ammianos-Säge nicht dargestellten Maschinenteile sichtbar, und es kann das Bild der kompletten und funktionstüchtigen Anlage vorgestellt werden. Ein besonderes Merkmal ist die nachgewiesene Tauglichkeit des Schweriner Modells.

Die Säge wird von einem mächtigen, hölzernen Wasserrad (Dm 4,45 m; b 1,6 m) angetrieben, das an der Außenwand des Gebäudes über dem Mühlenbach angebracht ist und unterschlächtig angetrieben wird. Bei günstigen Bedingungen werden 12 U/min und damit eine Leistung von 6 PS erreicht. Von hier aus wird die Drehbewegung des Wasserrades über die Radwelle von 5,5 m Länge in das Innere des Gebäudes übertragen. Dort dreht sie ein großes Kammrad³⁸ (Dm 2,2 m). Von diesem Kammrad aus werden zwei

³⁸ Zahnrad mit im Außenrand seitlich eingebrachten Zähnen.

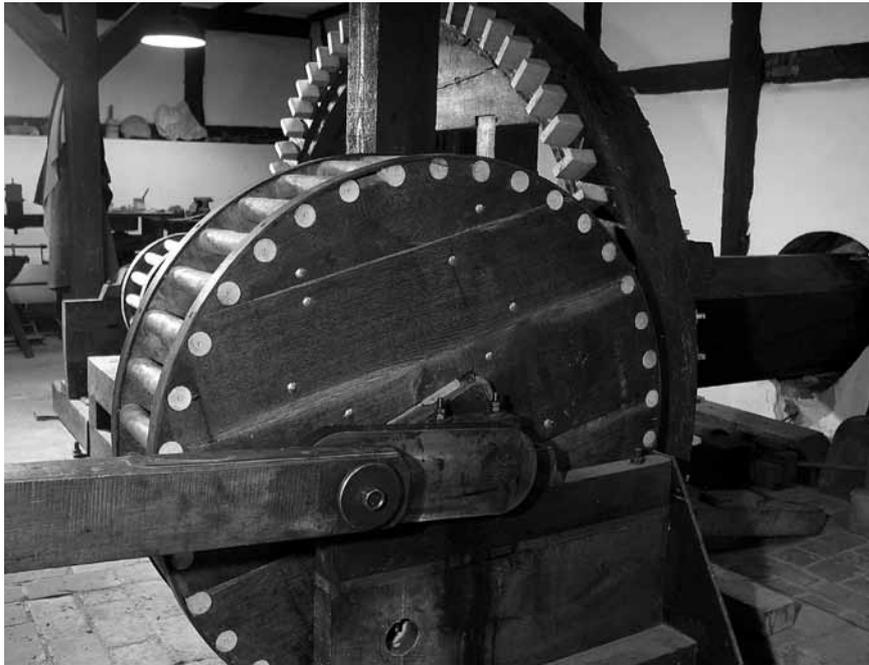


Abb. 18
Alte ›Schleifmühle‹
in Schwerin. Die
Kraftübertragung
vom Zahnrad über
Drehling und
Schubstange auf
den Sägeschlitten
entspricht im
Wesentlichen der
Darstellung auf
dem Ammianos-
Relief. (Lediglich
das Kammrad des
Getriebes im Relief
ist hier durch ein
Kronrad ersetzt.).

kleinere Räder (Drehlinge) mit den Kurbelwellen angetrieben: auf der einen Seite der Antrieb für die Steinsäge und auf der anderen Seite der Antrieb für die Schleifmühle. Die Übertragung der rotierenden Bewegung in eine linear oszillierende Bewegung geschieht in Schwerin und bei der Ammianos-Säge auf dieselbe Art und Weise, nämlich über eine an die jeweilige Kurbelwelle angehängte Schubstange. Als kleiner Unterschied zur Ammianos-Säge ist die Kurbelwelle in Schwerin aus Stahl (früher Schmiedeeisen) auf die Achse montiert worden, während sie in Hierapolis vermutlich als Hubzapfen in der Seitenwand des Rades untergebracht war. Die Schubstange ist bei beiden Modellen aus Holz (Abb. 18).

Mit der Schubstange erreicht die Kraftübertragung die Säge. Um den Anforderungen nach einem glatten Sägeschnitt gerecht zu werden, besteht die Säge aus drei deutlich getrennten Bauteilen: dem Sägertisch, dem Sägeschlitten (Sägewagen) und dem Spannrahmen. Damit sind die Anforderungen nach einer zwangsweisen Führung der Sägeblätter sowohl in horizontaler Richtung als auch in vertikaler Richtung gewährleistet³⁹.

Der Sägertisch ist der feststehende Unterbau der Steinsäge. Er gleicht einem massiven Tisch ohne Tischplatte, an deren Stelle der zu sägende Steinblock gelagert ist. In die beiden Außenholme der Längsseiten des Sägertisches sind Schienen eingelassen, in denen der Sägeschlitten hin- und hergeschoben werden kann⁴⁰ (Abb. 19).

³⁹ Der Nachbau der Schweriner Sägemaschine wurde 1983 bis 1985 nach Vorbildern aus der Fachliteratur des 18. Jahrhunderts gebaut. Da auf diese Weise eine funktionstüchtige Säge entstanden ist, die alle Anforderungen an einen glatten Schnitt erfüllt, scheint es erlaubt, das in Schwerin verwirklichte Modell für die Rekonstruktion des antiken Vorgängers als Vorbild zu nehmen, zumal der Getriebeantrieb der Schweriner Säge bis in die Einzelheiten der Reliefdarstellung aus Hierapolis entspricht.

⁴⁰ Bei größeren Anlagen könnte auf den Tisch verzichtet werden, wenn die Schienen stattdessen in den Boden eingelassen wären.



Abb. 19 Alte ›Schleifmühle‹ in Schwerin, Nachbau einer historischen Sägemaschine. Säge Tisch mit zwei eingelassenen Schienen für den Sägewagen.

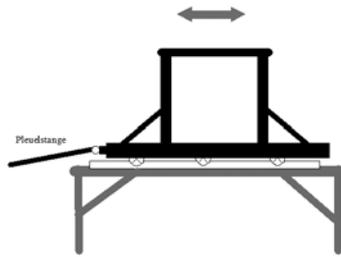


Abb. 20 Der Sägewagen (Sägeschlitten) wird von der Pleuelstange (Schubstange) auf sechs Rollen hin und her bewegt.

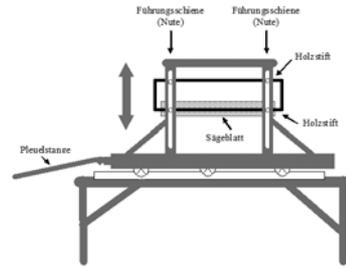


Abb. 21 Kleine Holzstifte im Sägerahmen sind in die vier Führungsschienen des Säge tisches eingepasst und ermöglichen ein gleichmäßiges Absenken des Sägerahmens.

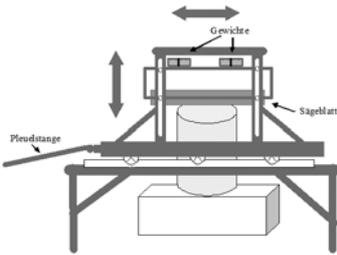


Abb. 22 Von der Pleuelstange wird der Sägewagen hin- und hergeschoben. Gleichzeitig wird der eingehängte Sägerahmen von aufgelegten Gewichten nach unten gedrückt, und die Sägeblätter schneiden sich in den Steinblock ein.

Der Sägeschlitten läuft auf drei Paar Rädern und wird mittels der an der Frontseite eingehängten Schubstange bewegt. Durch die Führung des Wagens in den Schienen des Säge tisches ist zwangsweise eine gleichmäßige Horizontalbewegung gewährleistet, wodurch ein glatter Horizontalschnitt möglich wird (Abb. 20).

Der Schnitt wird mittels zweier parallel geführter Sägeblätter ausgeführt, die in einen Spannrahmen eingespannt sind. Der Spannrahmen sorgt für eine gleichmäßige Vertikalbewegung, wodurch wiederum auch glatte Vertikalschnitte gewährleistet sind. Dazu sind am Spannrahmen insgesamt acht Holzstifte angebracht worden, die in die Führungsschienen (Nuten) der senkrechten Ständerhölzer des Sägeschlittens eingepasst sind. Diese Holzstifte sorgen für ein sauber geführtes Absenken des Spannrahmens beim Eindringen der Sägeblätter in den Steinblock (Abb. 21).

Den notwendigen Druck dafür bewirken mehrere Gewichte, die man auf den Spannrahmen aufgelegt hat⁴¹. Damit diese Gewichte bei den Hin- und Herbewegungen des Sägevorgangs nicht herunterfallen, hat man sie durchbohrt und durch Holzstifte auf der Oberseite des Spannrahmens fixiert (Abb. 22).

Nur durch das gleichzeitige Einwirken der horizontalen und vertikalen Kräfte auf die Sägeblätter werden die gewünschten glatten Schnitte erreicht. Theoretisch müsste diese

⁴¹ Die Gewichte sind notwendig, um einen vertikalen Druck des mit zwei Sägeblättern bestückten Sägerahmens auf den zu sägenden Stein auszuüben. Bei mehr als zwei Sägeblättern nimmt das Eigengewicht zu, so dass beispielsweise bei acht Blättern ganz auf Zusatzgewichte verzichtet werden kann. Das Gewicht des Spannrahmens beträgt ca. 50 kg.

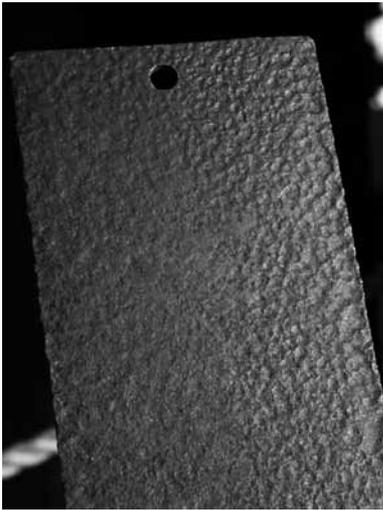


Abb. 23 Alte ›Schleifmühle‹ in Schwerin. Ungezahntes Sägeblatt, Teilansicht.



Abb. 24 Alte ›Schleifmühle‹ in Schwerin. Während das Schleifmittel von Hand aufgestreut wird, rinnt das Wasser aus einer kleinen Leitung auf die Schnittstelle.

Säge einen exakt horizontalen Sägeschnitt hinterlassen. Da eine solche Säge aber nicht ohne ein gewisses ›Spiel‹ des Spannrahmens im Sägeschlitten zu bauen ist, kommt es zu einer unvermeidbaren, allerdings nur sehr geringfügigen Verkippung, deren Auswirkungen beim Wechsel von der Schubbewegung zur Zugbewegung (und umgekehrt) zutage treten. Da hier ein ruckartiger Richtungswechsel vollzogen wird, schneidet das Sägeblatt an den beiden Enden des Schnittkanals etwas stärker ein, als im durchgängigen Mittelteil der Schnittlinie. Auf diese Weise entstehen an den beiden Enden des Schnittkanals leichte Abflachungen, die eine – allerdings nur schwache – konkave Form der Schnittlinie verursachen. Die Stärke dieser Ausformung ist u.a. abhängig von der Abnutzung der Holzstifte des Spannrahmens und der Führungsschienen des Sägeschlittens.

Bei den Sägeblättern handelt es sich um einfache Eisenblätter ohne Zähne⁴² (Abb. 23). Die Sägewirkung wird erreicht durch Zugabe von Schleifmitteln in Form von Wasser und Schleifsand (Schmirgel) auf die Schnittstellen (Abb. 24). Hier könnte nun der Einwand erfolgen, dass ein streng horizontal geführtes Sägeblatt das Schleifmittel nicht zur Wirkung kommen lässt, da es nicht in den Schleifkanal unter dem Sägeblatt eindringen kann. In dieser Hinsicht wirkt sich allerdings das Verhalten des Sägeschlittens bei dem zuvor beschriebenen ruckartigen Richtungswechsel positiv aus (Abb. 25). Da sich bei diesen sich ständig wiederholenden Richtungswechseln die Säge stets ein wenig anhebt, kann das Schleifmittel vom zugeführten Wasser in den Schleifkanal unter dem Sägeblatt eingespült werden.

Um den Steinblock vor dem Anschnitt in Position zu bringen, kann der Spannrahmen mittels Seilen hochgezogen und niedergelassen werden. Zu diesem Zweck ist der Rahmen an seinen vier Ecken an Seilen aufgehängt. Die Seile sind paarweise so angebracht

⁴² Spätere Ausführungen von Sägeblättern haben an der Unterkante rechteckige Aussparungen, um dem Schleifmittel zu größerer Wirkung zu verhelfen; in modernen Sägemaschinen wird mit Sägeseielen gearbeitet.

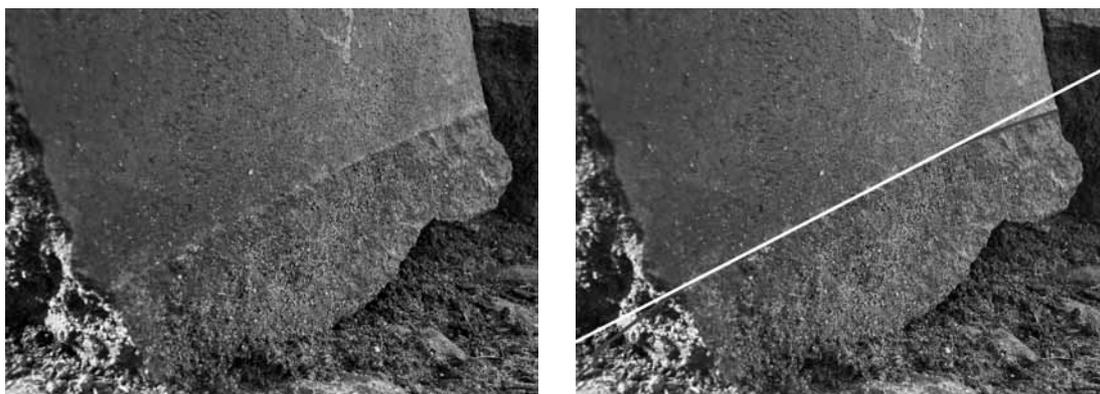


Abb. 25 a, b Das Werkstück aus Schwerin zeigt deutlich die Schnittlinie, wie sie von einer horizontal und vertikal geführten Steinsäge verursacht ist: Die Enden der Schnittlinie sind leicht abgeflacht, da die Säge beim ruckartigen Richtungswechsel stets ein wenig stärker einschneidet. (Das linke Teilstück des Steins ist abgebrochen).

worden, dass sie über eine in der Oberkante des Sägewagens angebrachte Walze laufen und durch Drehung derselben gleichmäßig gehoben oder abgelassen werden können. Auf diese Weise lässt sich bei Bedarf – z. B. nach Beendigung des Sägevorgangs oder beim Bruch eines der Sägeblätter – der Rahmen hochziehen.

Schlussbetrachtung

Die Reliefdarstellung einer antiken Steinsägemaschine auf einem Sarkophag in Hierapolis kann als einer der bedeutendsten Funde der jüngeren technikgeschichtlichen Forschung gelten. Hier ist erstmals die Kraftübertragung von einem Wasserrad über ein Getriebe bildlich dargestellt. Ammianos, der sich in der Inschrift als »geschickten Erfinder« bezeichnet, kam es offensichtlich in erster Linie darauf an, diese Kraftmaschine, als seine vielleicht bedeutendste Lebensleistung, für die Nachwelt darzustellen. Dass mit dieser Maschine eine Doppel-Steinsäge angetrieben wurde, ist im Relief durch die symbolische Darstellung zweier einfacher Spannsägen, die jeweils einen Steinblock zur Hälfte zerschnitten haben, dargestellt.

Die detailgetreue Darstellung des Sägeantriebs ließ eine funktionstüchtige Rekonstruktion zu, während die angetriebenen Sägen aufgrund der frühen Fachliteratur des 18. Jahrhunderts rekonstruiert werden mussten, um zu einem funktionstüchtigen Nachbau zu kommen. Da bisher angenommen wurde, Maschinenantriebe über ein derartiges Getriebe seien erst in mittelalterlichen Quellen zu finden, kommt der Entschlüsselung des Ammianos-Reliefs eine besondere Bedeutung für die Technikgeschichte zu.

Literaturverzeichnis

- Ausonius Ausonius, Mosella; deutsch von K. Weis (Darmstadt 1984).
- Behrens 1789 E. C. Behrens, Die practische Mühlen-Baukunst oder gründliche und vollständige Anweisung zum Mühlen- und Mühlen-Grundwerks-Baue mit den Haupt- und Spezialrissen zum gemeinnützigen Gebrauche für Bauliebhaber, Müller und Zimmerleute (Schwerin 1789).
- Grewe 1985 K. Grewe, Planung und Trassierung römischer Wasserleitungen. Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft, Suppl.bd. I. (Wiesbaden 1985) 18–21.
- Grewe 1998 K. Grewe, Licht am Ende des Tunnels, Planung und Trassierung im antiken Tunnelbau (Mainz 1998) 134–139.
- Grewe – Kessener 2007 K. Grewe – H. P. M. Kessener, A Stone Relief of an Water-powered Stone Saw at Hierapolis, in: *Énergie hydraulique et machines élévatrices d'eau dans l'Antiquité*, Actes du Colloques International, Collection du Centre Jean Bérard 27 (Naples 2007) 227–234.
- Leupold – Beyer 1735 J. Leupold, *Theatrum machinarum molarium*, oder Schauplatz der Mühlen-Baukunst. Welcher allerhand Sorten von solchen Maschinen, die man Muehlen nennet, so wohl histor. als pract, nebst ihren Grund- und Aufrissen vorstellet...; zusammengetragen von Johann Mattias Beyer (Leipzig 1735; Nachdruck Hannover 1982).
- Mangartz 2006 F. Mangartz, Zur Rekonstruktion der wassergetriebenen byzantinischen Steinsägemaschine von Ephesos, Türkei – Vorbericht, *AKorrBl* 36/4, 2006, 573–590.
- Mommsen 1871 Th. Mommsen, Tunnelbau unter Antoninus Pius, *AZ NF III*, 1871, 5.
- Plinius C. Plinius Secundus d. Ä., *Naturkunde*, deutsch von R. König und J. Hopp (Darmstadt 1992).
- Röder 1971 J. Röder, Marmor Phrygium – Die antiken Marmorbrüche von Iscehisar in Westanatolien, *JdI* 86, 1971, 253–312.
- Schiøler 2005 Th. Schiøler, How to Saw Marble, *Journal of the International Society of Molinology* 70, 2005, 34–35.
- Seigne 2000 J. Seigne, Note sur le sciage des pierres dures à l'époque romaine, *RACFr* 39, 2000, 223–234.
- Seigne 2002a J. Seigne, Une scierie mécanique au VIe siècle, *Archéologia* 385, 2002, 36–37.
- Seigne 2002b J. Seigne, Sixth-Century Waterpowered Sawmill, *Journal of the International Society of Molinology* 64, 2002, 14–16.
- Seigne 2002c J. Seigne, A Sixth Century Water-powered Sawmill at Jerash, *AAJ* 26, 2002, 205–213.
- Seigne 2006 J. Seigne, Water-powered Stone Saws in Late Antiquity. The Precondition for Industrialisation? in: G. Wiplinger (Hrsg.), *Cura Aquarum in Ephesos, Proceedings of the 12th Int. Congress on the History of Water Management and Hydraulic Engineering in the Mediterranean Region 2004*, *BABesch Suppl.12* (Leiden 2006) 383–390.
- Simms 1983 D. L. Simms, Water Driven Saws. Ausonius and the Authenticity of the Mosella, *Technology and Culture* 24, 1983, 635–643.
- Sturm 1718 L. C. Sturm, *Vollständige Mühlen-Baukunst* (Augsburg 1718).
- Vitruv Vitruv, *Zehn Bücher über Architektur*, deutsch von C. Fensterbusch (Darmstadt 1976).
- Warnecke 1997 H. Warnecke, Die antike Marmorsäge – Eine Werkzeugmaschine wird rekonstruiert, *RheinMusBonn* 2, 1997, 33–38.
- Wikander 1981 Ö. Wikander, The Use of Water Power in Classical Antiquity, *OpRom XIII*, 1981, 91–104.
- Wikander 1989 Ö. Wikander, Ausonius' Saw-Mills – Once More, *OpRom XVII*, 1989, 185–190.

Abbildungsnachweis

Umschlagbild:

M. Bachmann, Mauerwerksparie der hell. Stadtmauer von Oinoanda 2007.

Beitrag Aylward:

1 nach Drexell 1911, Taf. VI.21 – 4 Fränkel 1890, Nr. 169 – 6 Pergamon Museum, Berlin, Nr. V2.3–268. Alle anderen Abbildungen vom Autor.

Beitrag Bachmann:

1 Zeichnung Ekin Yerlikaya (DAI Istanbul) nach Naumann 1971, 22, Abb. 14 – 2 Zeichnung Ekin Yerlikaya (DAI Istanbul) nach Efe 2003, 98 – 3 Zeichnung Ekin Yerlikaya (DAI Istanbul) nach Harmankaya – Tanındı – Özbaşaran 1997 – 4 . 6–7. 10–12 Aufnahme M. Bachmann (2006) – 5 Aufnahme P. Oszvald (2001) – 8 Aufnahme D. Roos (2005) – 9 Zeichnung M. Bachmann, B. Kellner (DAI Istanbul).

Beitrag Bankel:

1. 2. 6. 7. 10–13. 15–17. 20. 26. 28. 30. 34. Valentina Hinz und Stefan Franz nach Angaben und Bauaufnahmen vom Autor. Alle anderen vom Autor.

Beitrag Como:

Alle Abbildungen vom Archiv der »Missione Monastiraki«.

Beitrag Durukan:

5. 7. 9. 11 nach Machatschek 1967 –14 Olba, Umzeichnung nach Erten 2007 und Foto nach Keil-Wilhelm 1931. Alle anderen Abbildungen vom Autor.

Beitrag Düring:

1 von M. Oberendorff nach Esin – Harmankaya 1999, 93, Abb. 9– 2 M. Oberendorff.

Beitrag Eicher:

Alle Abbildungen von der Autorin.

Beitrag Eres:

Alle Abbildungen vom Archiv des »Thracian Research Project«.

Beitrag Grewe:

1–6. 19–22 K. Grewe – 7–8. 14 H.-J. Lauffer – 9 J. Röder – 10 J. Seigne – 11 Th. Schjøler – 12 F. Mangartz – 13 P. Kessener – 15 F. Grewe – 16 nach L. C. Sturm – 17–18. 23–25 P. Schmidt.

Beitrag Harmanşah:

3 nach Çilingiroğlu 2003, Abb. 10. 2. Mit Genehmigung des »Ayanis Project«. Alle anderen Abbildungen vom Autor.

Beitrag Hüser:

3 d nach Samarin u.a. 1960, Abb. 186–189 – 4 b, nach Hampel 1991, Abb. 9 – 4 c nach Seeher 2006, Abb. 25 – 5 unten nach Seeher 2006, Abb. 28. Alle anderen Abbildungen vom Autor.

Beitrag Kienlin:

1 nach H. Uçankuş – 2 A. v. Kienlin, I. Dinkel – 3 A. v. Kienlin, Hartmann – 4 H. Uçankuş – 5. 7. 10 E. Emmerling – 6. 8–9 S. Demeter.

Beitrag Kurapkat:

2 K. Schmidt (DAI 2004) – 3. 4 D. Kurapkat (DAI 2000) – 5 DAI 1998 – 7–9 D. Kurapkat (DAI 2002) – 10. 16 D. Johannes (Badisches Landesmuseum 2007, 287–288 und 277) – 13 O. Aurenche 2007 – 14 nach Aurenche 1993, Abb. 11 – 15 nach Schirmer 1983, Abb. 2 – 17 vereinfacht nach Gourdin – Kingery 1975, 136–138. Alle anderen Abbildungen vom Autor.

Beitrag Lancaster:

2 Nach Aupert 1991, Abb. 4 und Aupert 1994, Abb. 1. **20** Reuther 1938, Abb. 99 a. 100. 101. Alle anderen Abbildungen von der Autorin.

Beitrag Liebich – Styhler:

9 von Gerkan – Müller-Wiener 1961, Tafel 9, Abb. 2. Alle anderen Abbildungen von den Autorinnen.

Beitrag Mielke:

1 Bittel – Naumann 1938, Abb. 16 – **2 a** Neve 1993, Fig. 2 – **2 b** Schirmer 1985, Fig. 126. – **3 a** Puchstein 1912, Abb. 88 – **3 b** Müller-Karpe, A. 1999, Abb. 7 – **3 c** Naumann 1971, Abb. 92 (Umzeichnung nach Bittel – Naumann 1938, Taf. 26 unten) – **4 a** Neve 1999, Beil. 9 (verändert) – **4 b** Neve 1999, Abb. 21c – **4 c** Neve 1999, Abb. 21f – **4 d** Neve 1999, Abb. 45 – **5 a** Bittel – Naumann 1938, Abb. 21 – **5 b** Naumann 1955, Abb. 78 – **5 c** Neve 1969, Abb. 2 – **6–8** Kuşaklı-Projekt – **9** B. Marr, N. Röring, D. P. Mielke. Alle anderen Abbildungen vom Autor.

Beitrag Nohlen:

2 Umzeichnung K. Nohlen, nach Modell H. Schleif – **3.5** Zeichnungen P. Feichtner nach Vorgaben des Verf. (im Original 1:100), bearbeitet von K. Größchen – **6** Zeichnung A. Schinz (im Original 1:50), bearbeitet von K. Größchen – **18** Zeichnung W. Gerhardt (im Original 1:20) – **19** Zeichnung M. Schmeling (im Original 1:20) - Alle übrigen Abbildungen vom Autor.

Beitrag Plattner:

10: Pensabene 2002, 55 Abb. 25 – **13** A. Sulzgruber, ÖAI – **16:** Mattern 2001, Taf. 62, 1. Alle anderen Abbildungen vom Autor.

Beitrag Quatember:

1, 2, 13 N. Gail (ÖAI) – **3.** Knackfuss 1924, Abb. 93 – **4.** Lanckoronski 1890, Taf. 27 – **6** W. Prochaska – **8** Wilberg 1943, Abb. 15 – **9** J. Roewer – **10** ÖAI Archiv, Inv.Nr. 303/14 – **11** Knackfuss 1924, Abb. 85 – **12** Lanckoronski 1890, Taf. 25. Alle anderen Abbildungen von der Autorin.

Beitrag Riorden:

1–5 von der Autorin – **6–7** nach Dörpfeld et al. 1902.

Beitrag Seher:

11 Neve 1969, Taf.12 b – **13** überarbeitet nach Neve 1985, Unterstadt/Tempel 1a, Abb. 4 und Neve 1995/96 Abb. 31c – **15, 21, 31** A. Schachner – **16.** M. Bachmann – **19** nach Neve 1992, Abb. 32 – **20** nach Puchstein 1912, Abb. 87 – **32** nach Lee 1986, 52 Diagramm 4 – **33** P. Oszvald – **35** nach Neve 2001, Taf. 75,c – Alle übrigen Abbildungen Boğazköy-Hattuša Projekt des DAI.

Beitrag Ohnesorg:

1 a Krischen 1938, Taf. 33 – **1 b** Ohnesorg, 2007, Taf. 38 – **2** Ohnesorg 2007, Abb. 23 – **3** Ohnesorg 2007, Abb. 22 – **4** Ohnesorg 2007, Taf. 2 oben – **5** Ohnesorg 2007, Taf. 14, Mitte rechts und Taf. 76/6 – **7** Ohnesorg2007, Abb. 10, ergänzt – **8** F. Fichtinger. Alle anderen Abbildungen von der Autorin.

Beitrag Radt:

1 T. Schwing – **2** D. Roos – **7** Durugönül, Taf. 12,1 – **9** links: J.-P. Adam – Mitte: nach S. Durugönül 1998, Abb. 21 – rechts: D. Roos, T. Radt – **10** M. Bachmann (DAI Istanbul) – **17** nach S. Durugönül. Alle anderen Abbildungen vom Autor.

Beitrag Rohn:

1 A. Attila – **2–4:** C. Rohn, A. Müller – **5** U. Bogenstätter, D. Fink, C. Wilkening – **6–8** K. Rheidt. Alle übrigen Abbildungen von der Autorin.

Beitrag Roos:

1–11 Bauaufnahmen und Fotos: Peter Baumeister, Turgut Saner, Dorothea Roos, Umzeichnung und Rekonstruktionen: D. Roos – **12** Durm 1905, 213, Abb. 216 – **13** Durm 1905, 214, Abb. 217 – **14** Pergamon Nr. 83/263–2 – **15** D. Roos.

Beitrag Schulz:

1 Hoepfner – Schwandner 1990 – **4** Naumann 1979, Taf. 22 d. Alle anderen Abbildungen von der Autorin.

Beitrag Schachner:

1–5 Bogazköy-Hattuša Expedition.

Beitrag Thür:

1 U. Outschar – **4** I. Adenstedt (ÖAW). Alle anderen Abbildungen von der Autorin.

Beitrag Weber:

1 nach Knackfuß 1941, Taf. 6–7, Z 145 – **2, 4–5** P. Grunwald (DAI Berlin). Alle anderen Abbildungen vom Autor.

Beitrag Wulf-Rheidt:

1 Jörg Denkinger (Architekturreferat DAI Berlin).