

# Klimatechnik in römischen Bauten

Autor(en): **Brödner, Erika**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Jahresberichte aus Augst und Kaiseraugst**

Band (Jahr): **3 (1983)**

PDF erstellt am: **28.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-395423>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## Klimatechnik in römischen Bauten

Erika Brödner

Klimatechnik ist die Bezeichnung für ein Spezialgebiet, das sich mit der Luftkonditionierung von Innenräumen beschäftigt. Häufig wird daher auch von «Lufttechnik» gesprochen. Erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden die Heizungs- und Lüftungsfachleute darauf aufmerksam, dass keineswegs die Temperatur allein ein dem Menschen angenehmes Klima verschafft. Die «Behaglichkeitstemperatur» ist von zahlreichen Faktoren abhängig, von denen hier die für unsere Probleme wichtigsten aufgezählt werden sollen: die Temperaturen der Raumluft an verschiedenen, im Koordinatensystem festgelegten Messpunkten, die Temperaturen der den Raum umgebenden Flächen vor allem im Bereich des Bewegungsraumes des Menschen (untere Zonen der Wände, Fussboden, Türen, Fenster, Brüstungen, Luftfeuchtigkeit, auch Luftfeuchte genannt<sup>1</sup> und Luftbewegung).

Die Forschung auf dem Gebiet der antiken Heizung, speziell der römischen Hypokaustenanlagen, hat sich bisher fast ausschliesslich mit dem Begriff der Temperaturregelung, d. h. der Innenraumerwärmung beschäftigt. Erst seit kurzem bezieht man die Untersuchungen auch auf die anderen Faktoren der Luftkonditionierung.<sup>2</sup>

Wir kennen heute bis in Einzelheiten gehend das Funktionsschema der römischen Hypokaustenheizung: Abb. 1 zeigt das System einer solchen Heizung mit tubulierten Wänden.

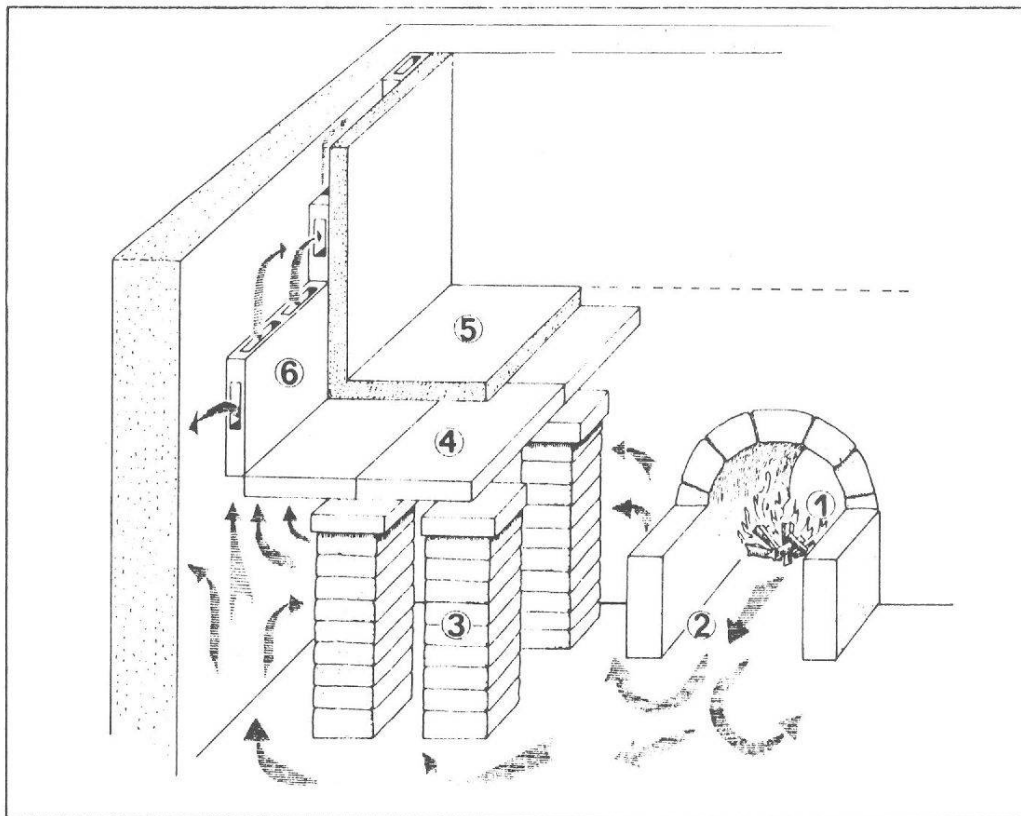


Abb. 1 Schema einer Hypokaustanlage. 1 Feuerungsraum, 2 Heizkanal, 3 Hypokaustpfeiler, 4 Suspensurplatten (Ziegel oder Naturstein), 5 Fussboden, 6 Wandheizungsziegel (tubuli), s. Anm. 3.

Wir sehen das Praefurnium mit der Feuerstelle, den Doppelboden, getragen von den Hypokaustenpfeilern (Hypokausten- bzw. Hohlraum, auch Hypokaustum genannt), die tubulierten Wandflächen und die Abzüge für die Heizgase. Es gibt im Verlauf der Entwicklung der Heiztechnik innerhalb des römischen Reiches eine grosse Zahl von Varianten; doch das Grundprinzip bleibt gleich. Die Aussenschalen des Gebäudes selbst ebenso wie die tragenden Innenwände bilden die raumgrossen Heizkörperflächen mit Strahlungswärme zu den Sälen hin<sup>3</sup>.

Einige Beispiele mögen die Verschiedenartigkeit der Gestaltungsweise der einzelnen Elemente verdeutlichen.

### **Praefurnien**

Die grosse, überwölbte Öffnung ist bei dem Praefurnium in den Nordthermen von Timgad (Algerien) sorgfältig mit hochfeuerfesten Ziegeln ausgefütert und zu der von dem Heizungstechniker gewünschten Gestalt geformt worden (Abb. 2). Auf eine gute Vertei-



*Abb. 2* Timgad, Praefurnium in den grossen Nordthermen.

lung der Heizgase zum Hypokaustenraum hat der Ingenieur bei der Heizanlage in einer römischen Villa in Basse-Wavre (Belgien) Wert gelegt (Abb. 3)<sup>4</sup>. Man sollte bei künftigen Untersuchungen das Augenmerk noch mehr als bisher auf die einzelnen Teile des Praefurniums richten: Unter der allgemeinen Bezeichnung «Praefurnium» ist einmal die Feuerstelle zu verstehen, auf der das Feuer entfacht wird. Für diesen Vorgang wird ein starker Zug benötigt. Voraussetzung dafür ist ein Abzug in unmittelbarer Nähe des Praefurniums, dessen Wirkkraft nach dem Entfachen bis zum Nachlegen des Brennstoffes ausgeschaltet werden kann<sup>5</sup>.

Präefurnium und eigentlicher Ofen (Furnium) bilden fast immer eine Baueinheit, d. h. der Raum für den Abbrand ist einfach die Verlängerung bzw. Erweiterung der Feuerstelle zum Hypokaustum hin, oft auch noch in dieses hineinragend. Der Rückteil kann speziell für die Vermeidung «toter Winkel» im Hypokaustenraum ausgestaltet werden. Zur Regu-

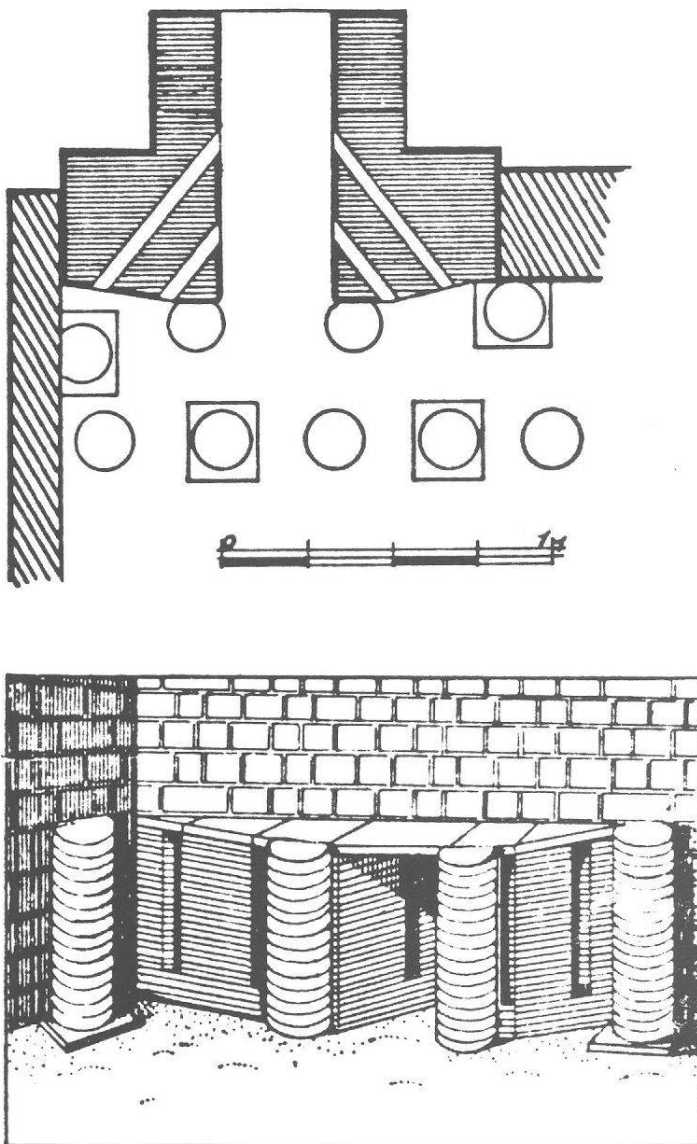


Abb. 3 Basse-Wavre, Belgien, Praefurnium in einer römischen Villa. R. De Maeyer, De Romeinsche Villa's in Belgie, Antw. 1937.

lierung der Luftzufuhr zum Ofen und damit der Temperatur der Heizgase wird es Klappen oder Bleche gegeben haben, wie ein solches in den Stadtbädern von Herculaneum gefunden worden ist (Abb. 4) <sup>6</sup>.

Die Praefurnien der Scholastikibäder in Ephesos liegen im Geschoss unterhalb der Hypokaustenräume (Abb. 5) ebenso wie einige Feuerstellen der Antoninusthermen von Karthago und der Kaiserthermen von Trier. W. Reusch bezeichnet sie sinngemäss als Subfurnien.

## Hypokausten

Das Hypokaustum wird aus einem, zwei oder auch mehreren Räumen gebildet, die durch Öffnungen unterschiedlicher Grösse bis zu weiten Bogengängen hin miteinander verbunden sind. Abmessungen und Zahl der für das Hypokaustum vorgesehenen Praefurnien entscheidet über die Menge an Wärmeeinheiten (Kalorien), die in der Zeiteinheit eingebracht werden können. Durch Vielzahl der Praefurnien konnte man sich dem unterschiedlichen Bedarf wesentlich besser anpassen. Es liessen sich auch Teilreparaturen und Reinigung des Systems einfacher durchführen.

In den Nordostprovinzen des römischen Reiches sind häufig grosse Tonröhren als Hypokaustenteile verwandt worden. Bei dem hier gezeigten Beispiel eines Hypokaustenraumes in den Grossen Thermen von Odessos (Warna, Bulgarien) sind jeweils zwei kürzere Rohre übereinandergesetzt worden (Abb. 6). Ziegelbogenkonstruktionen im Hypokaustum sind

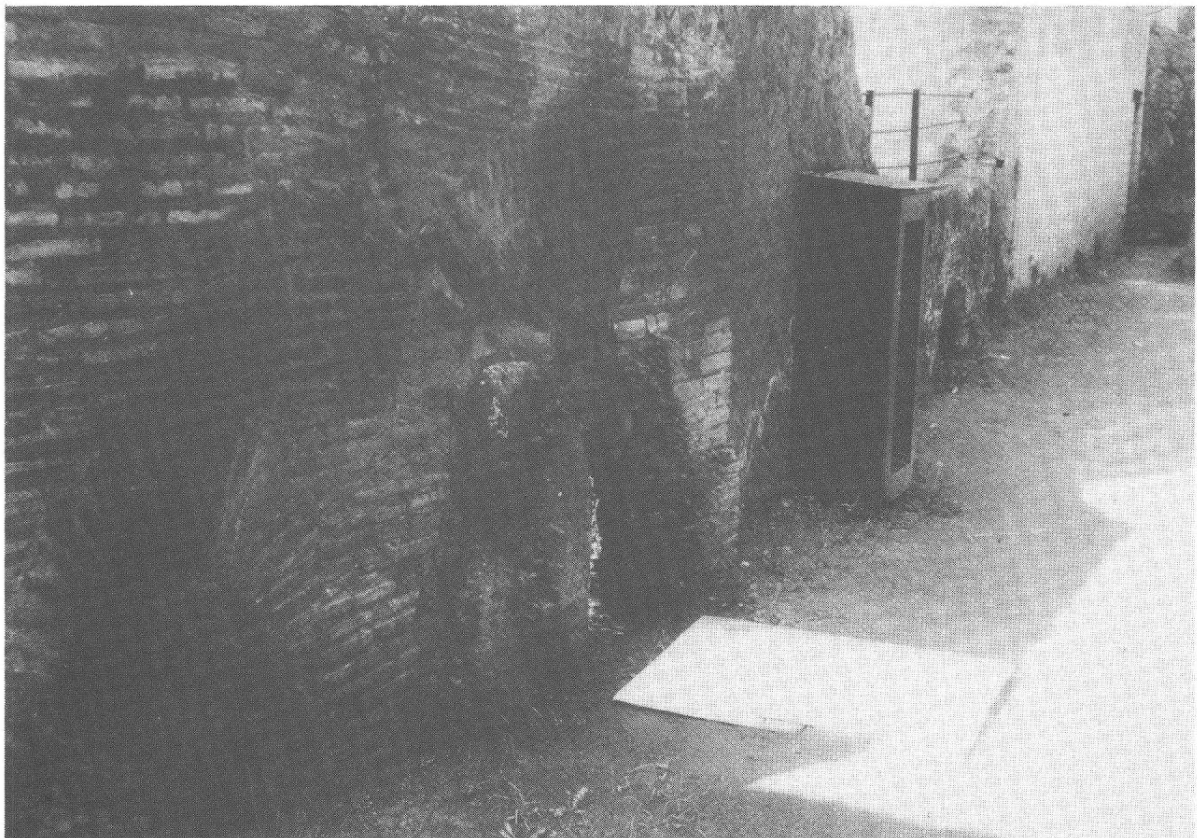


Abb. 4 Herculaneum, Praefurnium des Männerbades in den Stadtthermen.



*Abb. 5* Ephesos, die Scholastikiabäder.



*Abb. 6* Odessos, Warna, Hypokaustenraum in den Thermen, s. Anm. 7.

u. a. in den Heilbädern von Pautalia (Kjustendil, Bulgarien), in den Bädern von Dinogetia (Donaudelta) sowie denen von Histria (Istria, Rumänien) anzutreffen<sup>7</sup>. Säulenförmige Werksteinpfeiler tragen die schweren, steinernen Deckenplatten des Hypokaustenraumes der römischen Bäder am oberen Gymnasium in Pergamon (Abb. 7). In Fiesole dagegen wurde ein grosser Teil der Pfeiler aus achteckigen Ziegelplatten aufgemauert (Abb. 8).

### **Wandhohlräume, Tubulatur und Rauchgasabzüge<sup>8</sup>**

Neben rechteckigen oder runden tubuli sind verschiedene andere Arten von Hohlwandkonstruktionen anzutreffen<sup>9</sup>. Grosse Sammelabzüge (Schornsteine) sind bisher selten identifiziert worden, so in den Thermen von Ankara und Bône (Hippo Regius, Algerien).

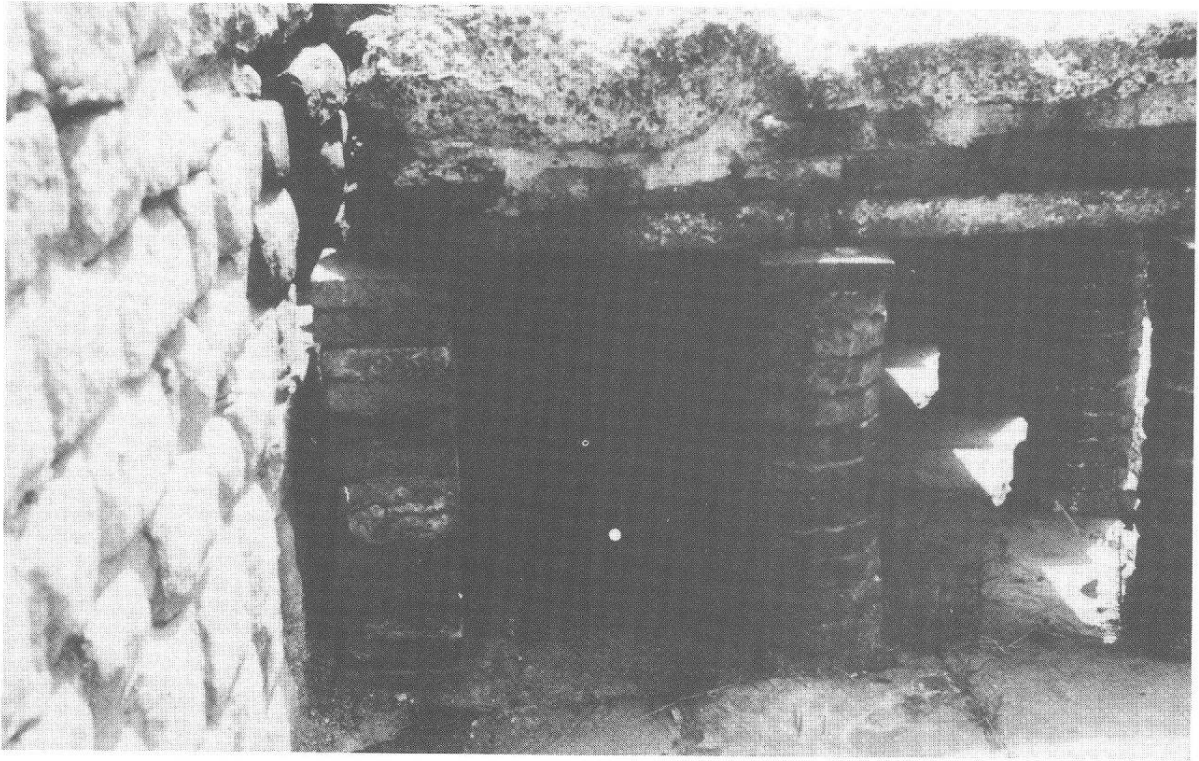
Neben der Hypokaustenheizung gab es, vor allem für Wohnräume, die Kanalheizung; in aufwendigeren Gebäuden (Palästen, Villen, Versammlungs- und Sporthallen) (Abb. 9) findet man Kombinationen von Hypokausten und Kanälen. In einem Haus in Lauriacum wurde eine reine Wandheizung entdeckt, die es sicherlich nach Bedarf auch an manchen anderen Orten gegeben hat<sup>10</sup>.

Die Entwicklungsgeschichte der römischen Hypokausten- und Kanalheizung aus hellenistischen Anfängen ist in den beiden letzten Jahrzehnten durch Forschungen transparenter gemacht worden<sup>11</sup>.

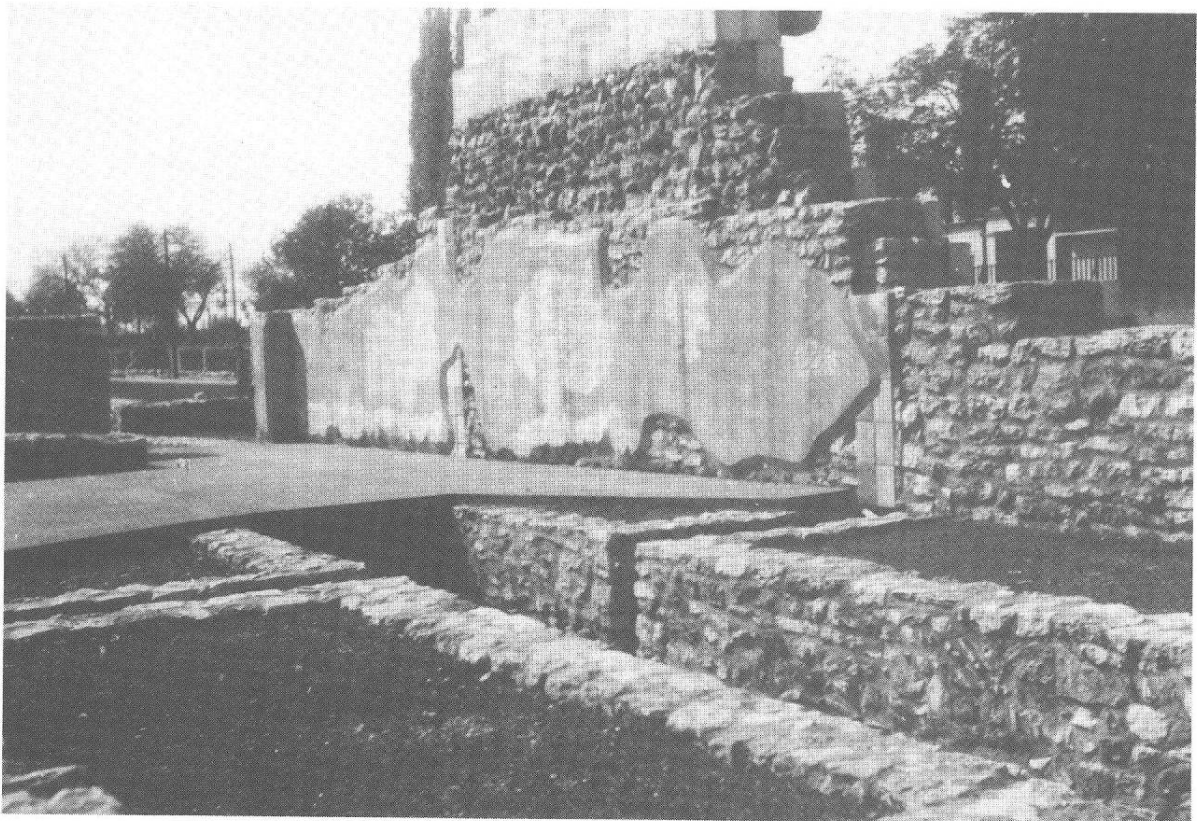
Bereits in der zweiten Hälfte des zweiten vorchristlichen Jahrhunderts lassen sich hypokaustierte, unter der Casa del Fauno in Pompeji sogar tubulierte Baderäume finden. Die



*Abb. 7* Pergamon, Hypokaustempfeiler aus den römischen Bädern auf der Gymnasiumsterrasse.



*Abb. 8* Fiesole, Hypokaustenpfeiler in den Bädern.



*Abb. 9* Aquincum, beheizte Sporthalle.



Vermutung, dass Sergius Orata der Erfinder dieser Heizungsart sei, ist dadurch hinfällig geworden<sup>12</sup>.

Wie uns die Karte des römischen Reiches (Abb. 10) zeigt, waren die klimatischen Bedingungen sehr unterschiedlich. Die antiken Techniker lernten auf empirischem Wege im Verlauf der Zeit immer besser, die Heizungsanlagen den jeweiligen Forderungen anzupassen. Im technischen Erfahrungsschatz bestanden selbstverständlich grosse Unterschiede, ob es sich um ein Gebiet alter Kultur und Zivilisation oder um eine neu eroberte Landschaft (z. B. Dakien) handelte. Dass man von der Zentrale in Rom Experten in die Provinzen schickte bzw. solche angefordert wurden, verdeutlicht sehr anschaulich der Briefwechsel zwischen Trajan und Plinius dem Jüngeren<sup>13</sup>.

In den Bädern wurde die Heizung mit der Warmwasserbereitung kombiniert. Das kleine Bad von Furfooz (Abb. 11), in den Ardennen gelegen, wurde in den fünfziger Jahren unseres Jahrhunderts rekonstruiert und Heizversuche dort durchgeführt, allerdings ohne Einschaltung der Warmwasserbereitungsanlage<sup>14, 15</sup>. Metallene Heisswasserkessel über dem erweiterten Ofenraum, die testudo oberhalb des Praefurniums sowie Metallschalen unterschiedlicher Form und Grösse, meist zum Feuerraum hin konkav gewölbt<sup>16</sup>, dienten u. a. der Erwärmung des Badewassers, dessen Temperatur immer höher, und dessen Quantität

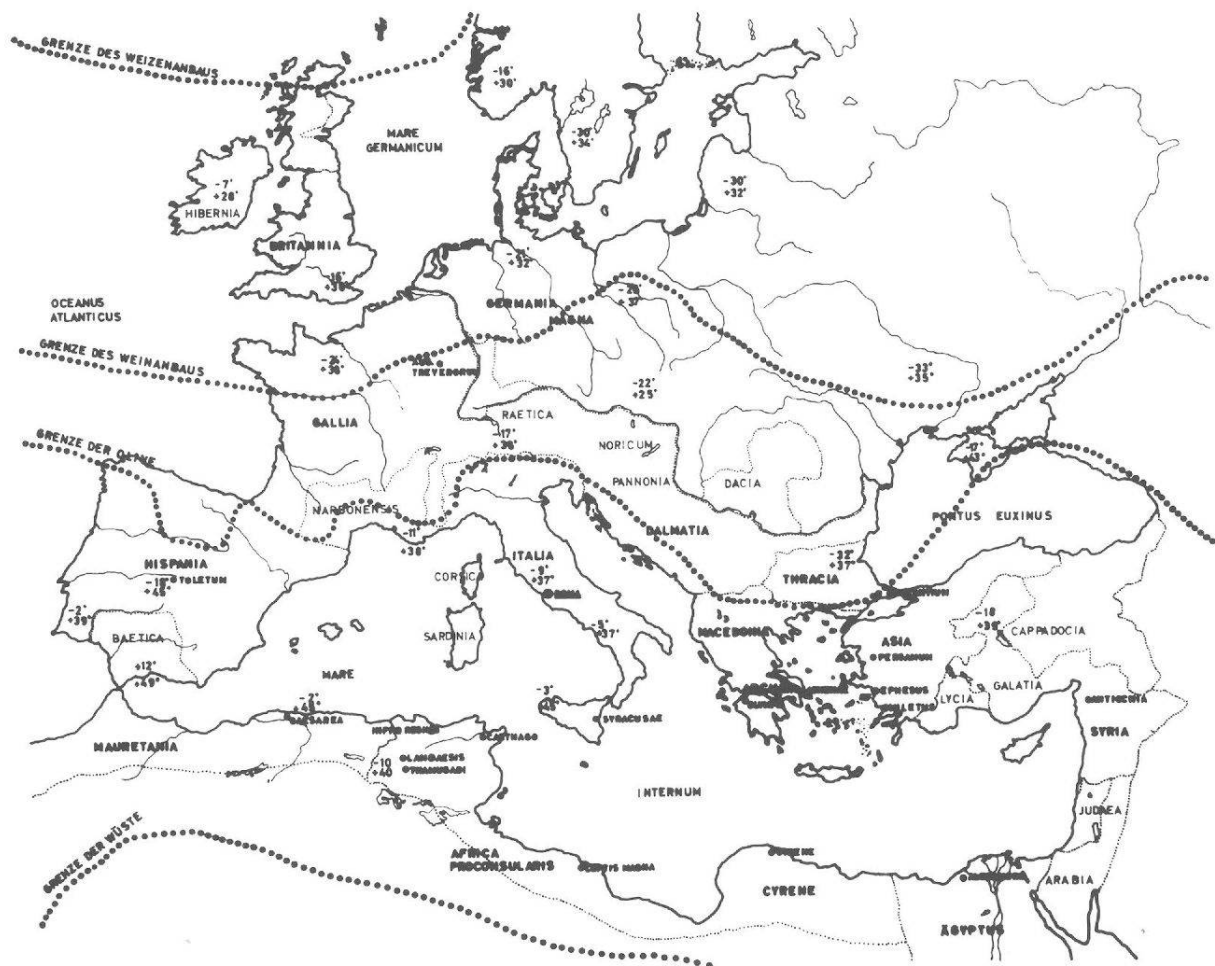
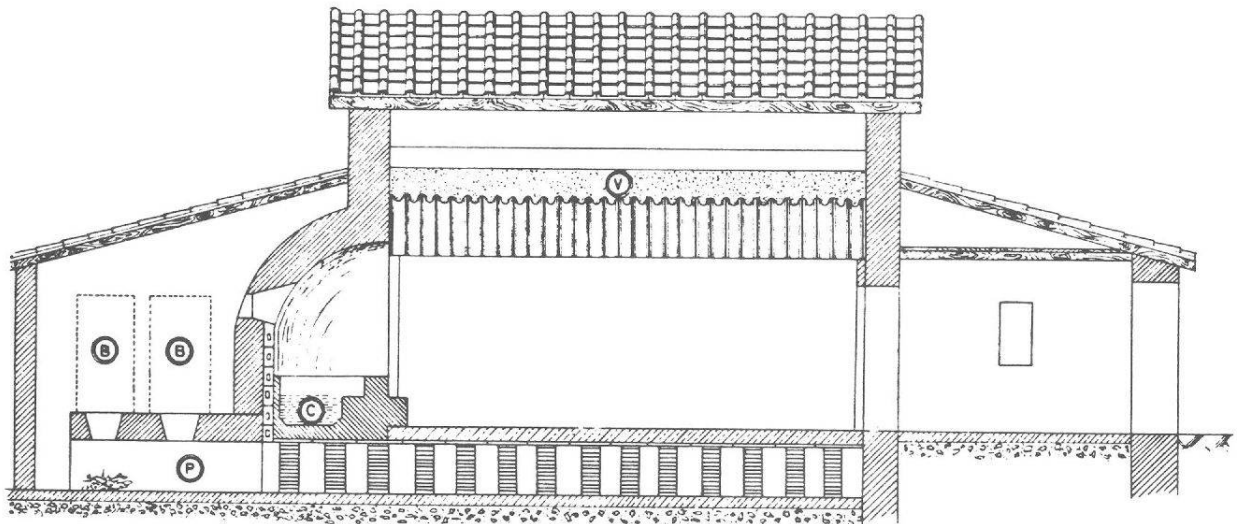


Abb. 10 Karte des römischen Reiches mit Angabe der Klimazonen sowie der Maximal- und Minimaltemperaturen.



COUPE PAR A.B.C.D.

- (P) Foyer („praefurnium“).
- (C) Baignoire chaude.
- (T) Baignoire tempérée.
- (F) Baignoire froide.
- (E) „Cheminées“ (conduits d'évacuation des gaz).
- (V) Voûte en béton léger.
- (B) Chaudières.

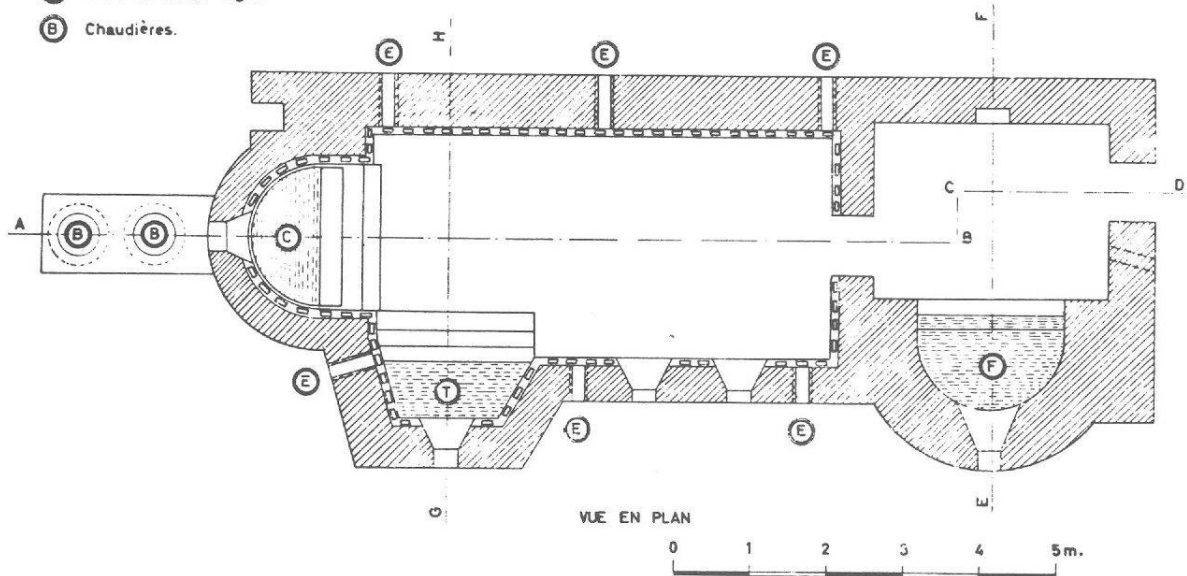


FIGURE N°4

Abb. 11 Furfooz, Grundriss und Schnitt (s. Anm. 15).

im Verlauf der Jahrhunderte immer grösser gewünscht wurde<sup>17</sup>. In jeder Badeanlage spielte neben der Raumtemperatur die von den Badegästen erwartete, unterschiedliche Luftfeuchtigkeit in den Sälen eine Rolle. Bei geschickter Planung der kombinierten Heiz- und Warmwasserbereitungsanlage liessen sich die Satt- und Feuchtdämpfe zur Regulierung des Feuchtigkeitsgrades verwenden<sup>18</sup>.

Exakte Messungen sind im Februar und März 1968 in einem aus dem 15. Jahrhundert stammenden islamischen Bad, dem Inçirli (Feigenbaum)-Hamam in Bursa (Türkei) durchgeführt worden (Abb. 12, 13). Die Heizanlage, eine durch vereinzelte Hypokaustenpfeiler erweiterte Kanalheizung, ist nach römischem Vorbild mit der Warmwasserbereitung kombiniert. Sie wurde zur Zeit der Messungen noch ausschliesslich mit Holz (meist Buchenholzscheiten aus den nahe gelegenen Bergwäldern) beheizt und gestattete daher analoge Schlussfolgerungen für den Betrieb der römischen Anlagen<sup>19</sup>.

Sicherlich hat es neben der Strahlungsheizung auch eine Konvektionsheizung (Luftheizung) in römischen Bauten gegeben. Diesbezügliche Untersuchungen sind von mir in den letzten Jahren mit finanzieller Unterstützung der DFG durchgeführt worden, unter anderem Probeheizungen auf der Saalburg, über deren Ergebnisse auf einem Kongress in Strassburg im Herbst 1976 referiert wurde<sup>20</sup>.

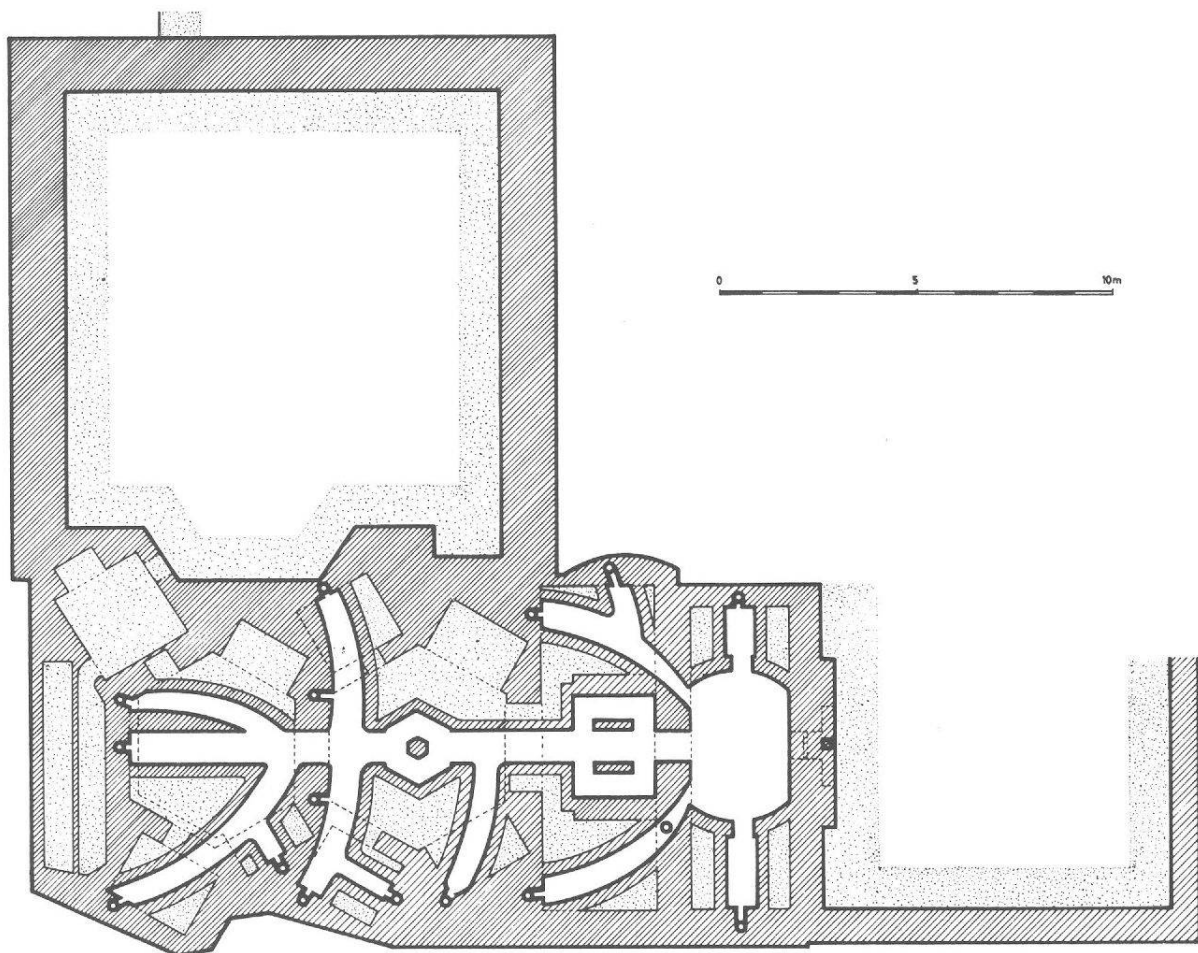


Abb. 12 Bursa, Türkei. Islamisches Bad, Inçirli (Feigenbaum) Hamam, Kanalsystem.

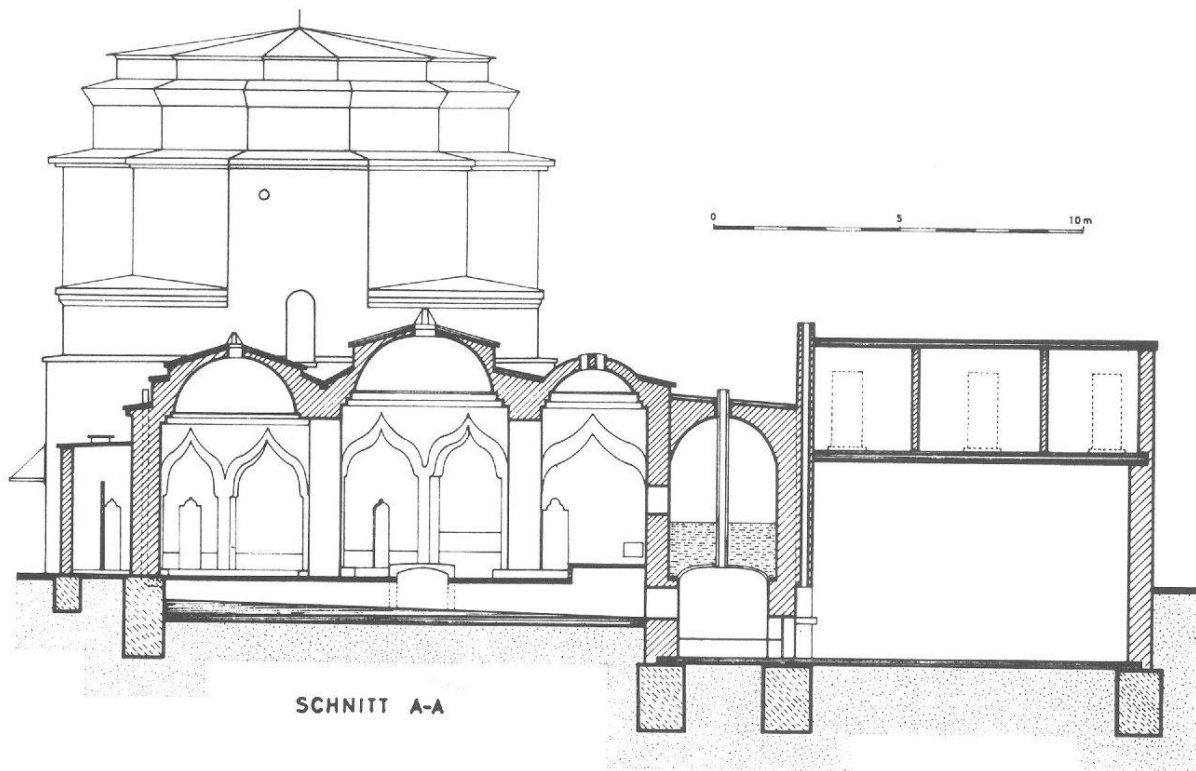


Abb. 13 Bursa, Türkei. Islamisches Bad, Inçirli (Feigenbaum) Hamam, Längsschnitt (s. Anm. 2).

Der Unterschied zur Strahlungsheizung besteht darin, dass es ausser den Rauchgasabzügen bzw. Schornsteinen auch Verbindungen zu den Innenräumen gibt. Wir verfügen heute über ausreichende Kenntnisse mittelalterlicher Luftheizungsanlagen, die im Prinzip den römischen Luftheizungen gleichen, nur in Gestaltung und Konstruktion von diesen abweichen<sup>21</sup>.

Der Betrieb einer Luftheizung verläuft folgendermassen: Es wird an- und aufgeheizt, die Rauchgasabzüge bleiben geöffnet, dagegen werden die Verbindungen zu den Sälen geschlossen. Sobald sich die Speicher erwärmt (erhitzt) haben, lässt man das Feuer ausgehen, schliesst die Schornsteine und Abzüge, öffnet dagegen die Verbindungen zu den Innenräumen. Die durch das Praefurnium eindringende Frischluft erwärmt sich an dem heissen Mauerwerk und steigt durch die Öffnungen in die zu beheizenden Räume. Obligatorisch sind bei dieser Anlage in den Räumen befindliche und von dort ins Freie führende Abluft-einrichtungen in Form von Fenstern, Lüftungsclappen oder Abzugsrohren. Für Heizungen dieser Art kommt als Brennmaterial nur sehr trockenes Holz oder Holzkohle in Frage.

Besonders geeignet ist die Luftheizung in allen nur temporär genutzten Sälen, in den Heissluftbädern (laconica), in Wohnräumen, vor allem aber auch in Obergeschosszimmern. Winkelmann berichtet mehrmals über den Fund derartiger Heizanlagen. In den Briefen des jüngeren Plinius werden an zwei Stellen anschaulich Einrichtungen dieser Art beschrieben. Seitdem das Augenmerk der Bauforscher auf das Vorhandensein von Luftheizungen in römischen Bauwerken gelenkt worden ist, sind in zahlreichen Räumen direkte Verbindungen vom Hypokaustum zum Innenraum sowie Abzüge vom Innenraum ins Freie identifiziert worden<sup>22</sup>.

Bei Kombination von Strahlungsheizung und Luftheizung lässt sich eine dem Aussenklima schnell anzupassende «Behaglichkeitstemperatur» schaffen. Es sei darauf hingewiesen, dass heute in grossen Kirchenräumen, in denen sich hochempfindliche Kunstschätze befin-

den, nur durch eine solche Kombinationsheizung die den komplexen klimatischen Bedingungen entsprechende Atmosphäre geschaffen werden kann<sup>23</sup>.

Energieförderant war in römischer Zeit in erster Linie Holz, wobei man genau über die Verbrennungseigenschaften der einzelnen Holzarten Bescheid wusste, wie es uns Vitruv und andere Autoren in ihren Schriften dokumentieren<sup>24</sup>. Vermutlich wurde das Holz in Form von Scheiten vorgetrocknet (gedarrt). Eine interessante Arbeit über den Verbrauch an Holzmengen in den Bädern und dem entsprechenden Grössenbedarf an Waldflächen gibt T. Rook in seiner Dissertation<sup>25</sup>. Daneben wurde vor allem für die Luftheizung und die Heizbecken in den Räumen<sup>26</sup> Holzkohle verwendet.

Natürliche Wärmeenergieförderanten wie heisses Quellwasser, heisse Gase und Dämpfe in vulkanischen Gebieten wurden seit ältester Zeit ausgenutzt. Das römischen Heilbädern entsprechende Jenikaplıdscha in Bursa wurde durch ein in den Wänden raffiniert verteiltes Rohrnetz nicht nur mit Badewasser versorgt, sondern es wird auch von den durch die Rohre erwärmten Wänden her beheizt. Mehrfach konnten die Spuren ähnlicher Anlagen in römischen Heilbädern nachgewiesen werden<sup>27</sup>.

Auf Verdampfungseinrichtungen für Heizzwecke in römischen Bädern wird zum ersten Mal in Arbeiten des Istituto di Architettura della Scuola Ingegneri di Roma hingewiesen. Leider sind diese Untersuchungen, die vor allem in den grossen und kleinen Bädern der Villa des Hadrian bei Tivoli stattgefunden haben, nach dem Tode von Professor Rocatelli nicht fortgesetzt worden. Als besonders geeignete Forschungsobjekte in dieser Hinsicht erscheinen mir die Scholastikiabäder und das Variusbad (beide in Ephesos) (Abb. 5 und 14, 15), ferner die vorzüglich erhaltenen Heizungsanlagen des Bades der Villa Herculia (bei

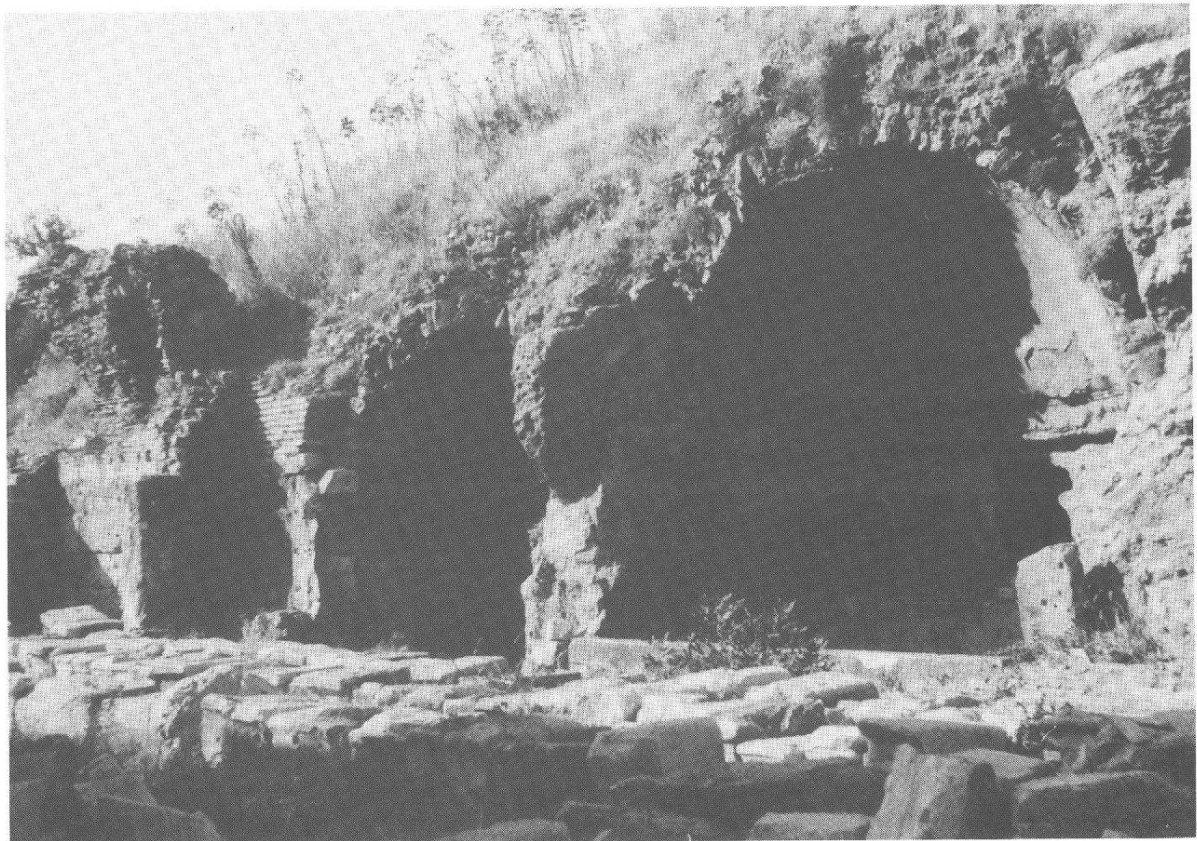


Abb. 14 Ephesos, das Variusbad.

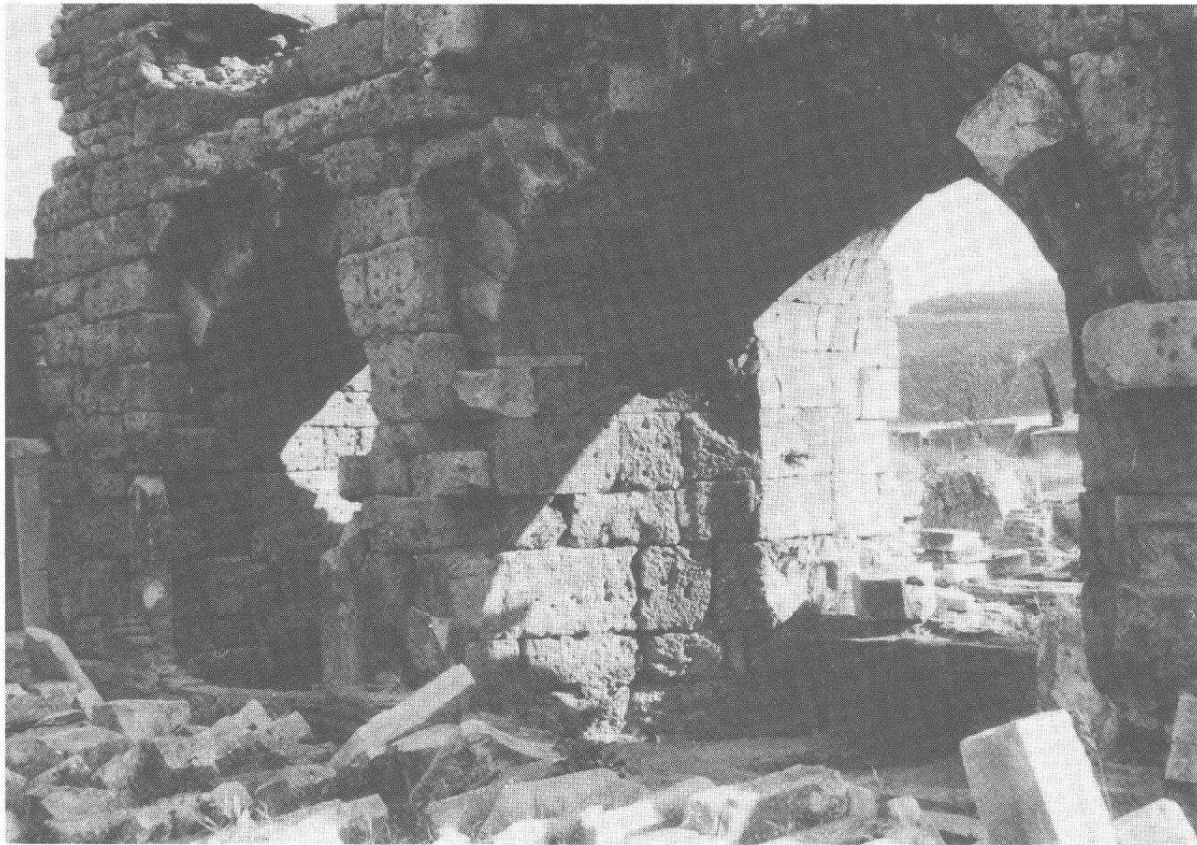


Abb. 15 Ephesos, das Variusbad.

Piazza Armerina, Sizilien). Die grossen Thermen von Ankara mit fast vollständig intaktem Heizgeschoss könnten ebenfalls bei eingehenderen Untersuchungen manche Aufschlüsse bringen (Abb. 16). Die Thermen von Thenae (Tunesien), Gemellae (Sahara, Limes), Salmis (Zypern) und zahlreiche Anlagen in Campanien bergen noch viele Geheimnisse der antiken Klimatechnik in ihren Mauern. Nur die enge Zusammenarbeit von Archäologen, Bauforschern und Ingenieuren wird uns der Lösung der zahlreichen anstehenden Rätsel näher bringen.

Zum Schluss möchte ich auf die unterschiedlichen Grössenordnungen der Gebäudekomplexe, vor allem der Thermen, im Verlauf der Entwicklung römischer Architektur vom ersten bis zum fünften nachchristlichen Jahrhundert hinweisen. Die Zentralthermen von Pompeji sind ein Reihenbad mit laconicum. Sie waren im Jahre 79 n. Chr. noch nicht in Benutzung genommen worden. Wir können sie also als ein Bad mit für damalige Zeit modernster technischer Ausstattung betrachten. Die Abmessungen sind dagegen eher bescheiden zu nennen. Am Beginn des dritten Jahrhunderts wurden die Thermen von Ankara (Abb. 16 und 17) gebaut von beachtlicher Ausdehnung und mit einer dem extremen Klima Anatoliens angepassten überdimensionalen Heizung ausgestattet, die die Klimatisierung nicht nur der Baderäume, sondern auch des Schwimmbeckens, der Sporthalle und des Apodyteriumsaaes ermöglichte; eine gewaltige technische Leistung! Höhepunkt an Grösse, Prunk und Komplexität der klimatechnischen Anlagen stellen die Diokletiansthermen in Rom dar (Abb. 18). Mit unseren derzeitigen Erkenntnissen können wir das Funktionsschema und den Betriebsablauf noch nicht vollständig durchschauen. Immerhin sind wichtige Schritte in dieser Richtung in den vergangenen Jahrzehnten gemacht worden.

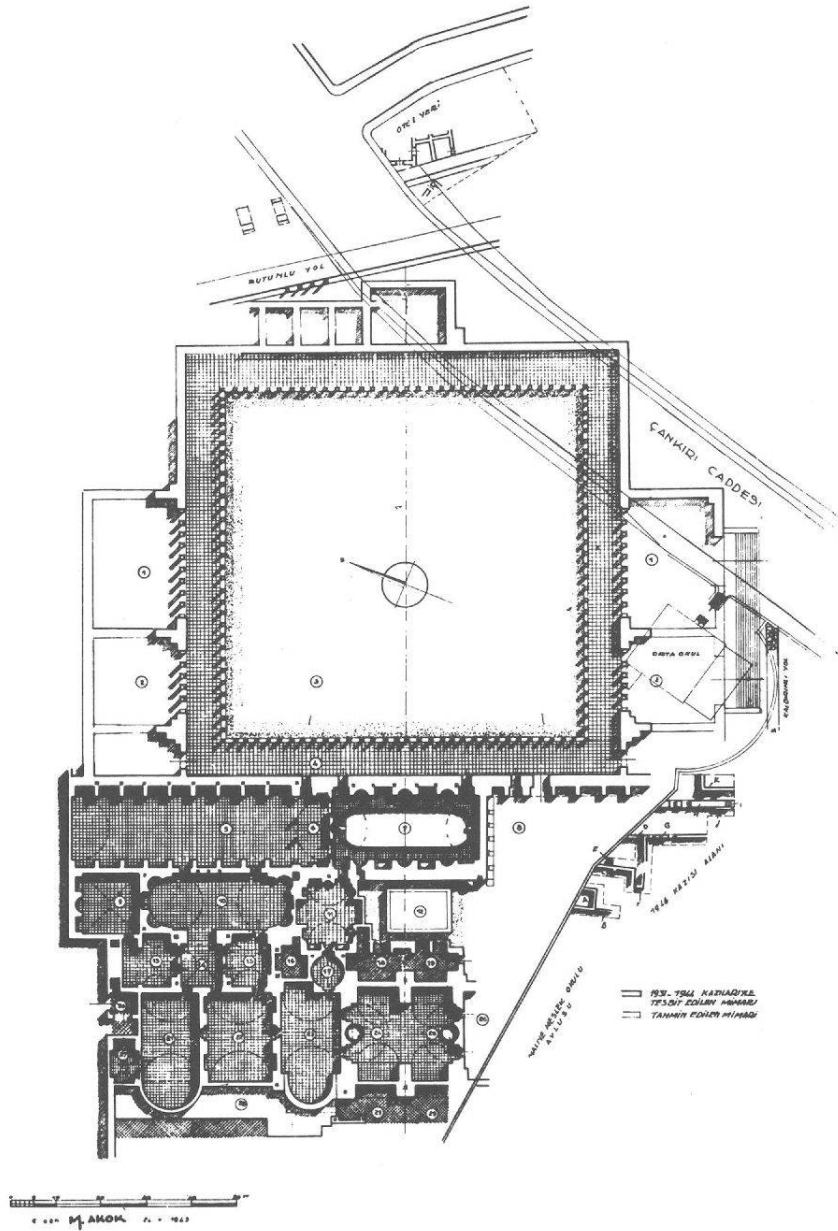


Abb. 16 Ankara, Grundriss der Thermenanlage.

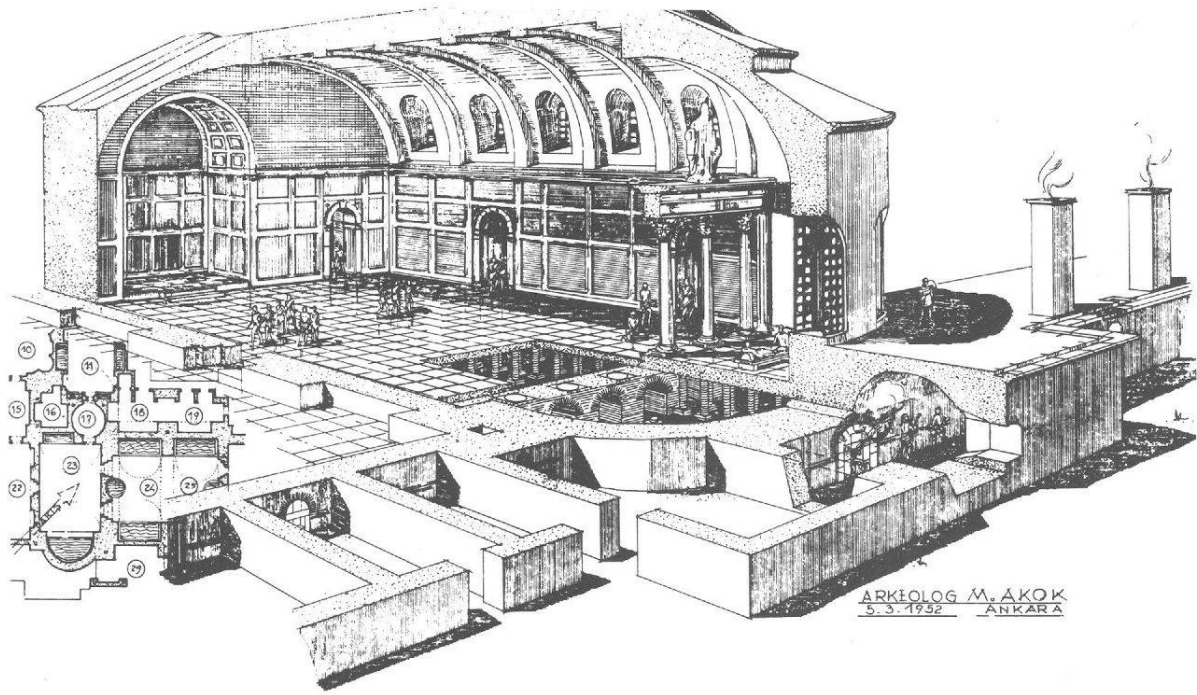


Abb. 17 Ankara, Blick in das Caldarium der Thermen (Rekonstruktionszeichnungen von M. Akök).

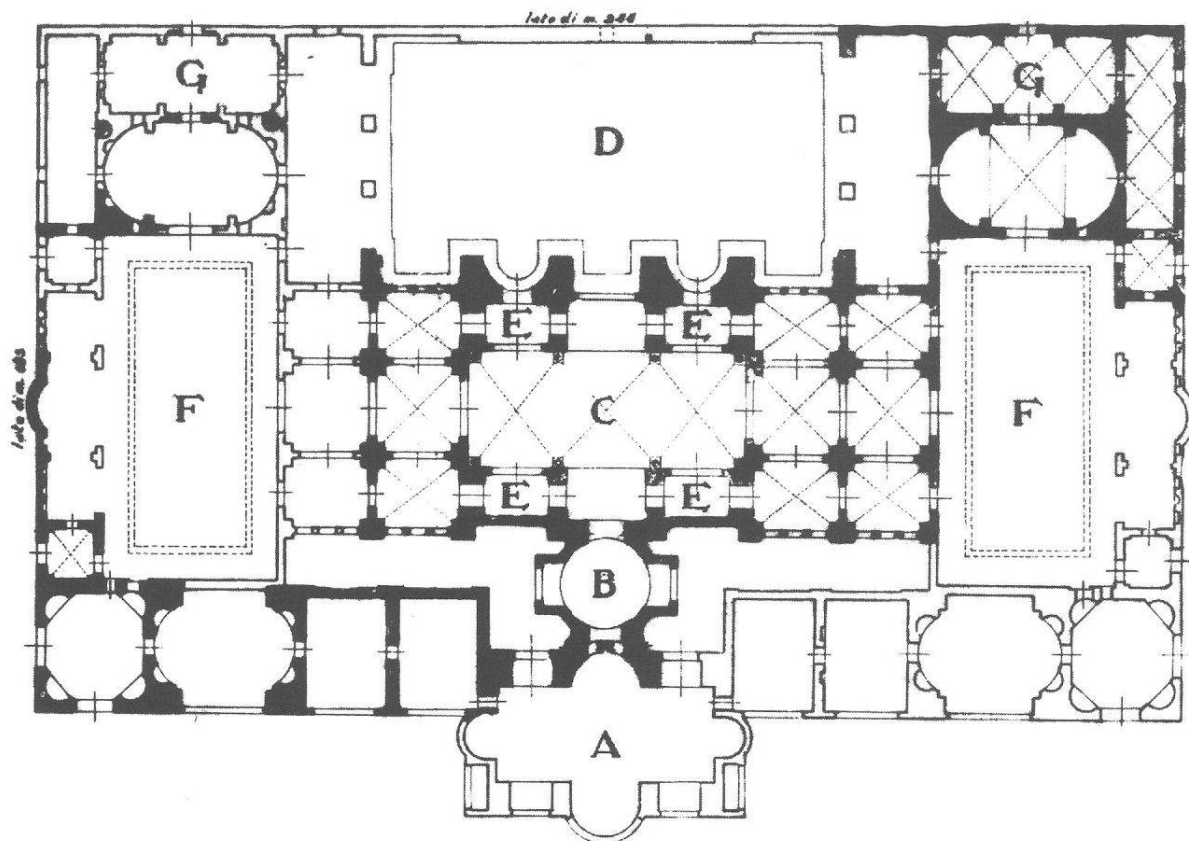


Abb. 18 Rom, Grundriss der Diokletiansthermen (S. Aurigemma, Le Terme di Diocleziano, Libreria dello Stato, Roma).  
A Caldarium, B Tepidarium, C-Frigidarium, D Natatio, F Sporthalle (Palaestra), G Apodyterium.



## **Zentrale Heizungen in römischer Zeit. Eine Zusammenstellung nach dem Stand heutiger Erkenntnis.**

### *Wärmeenergielieferanten*

Natürliche Wärmeenergie aus dem Erdinnern wie Fumarolen (heisse Gase, Dämpfe), heisses Wasser. Sonnenenergie. Künstliche Energieerzeugung durch Feuer, entfacht im Praefurnium, Weiterbrand und Glut im hinteren Teil des Praefurniums bzw. im anschließenden Furnium und den Verbindungsteilen zum Hypokaustum.

### *Brennmaterial*

Holz, Holzkohle, landschafts- und vorkommenbedingt auch Torf, Braunkohle, Steinkohle, Erdpech. Zum Anheizen: Reisig, Holzspäne, Baumrinden, leicht entzündbare pflanzliche Rückstände aller Art. Blasebalg. Abzüge in der Nähe der Feuerstelle. Art, Menge und Luftzufuhr bestimmt die Temperatur im Praefurnium.

### *Wärmetransportmedien*

Gase (Verbrennungsgase, Luft als Gas-Dampfgemisch, Erdgase); Wasser, Wasserdampf (gesättigter Dampf, Nassdampf, Heissdampf).

### *Wärmespeicher, Wärmeaustauscher*

Wände der Heizkanäle und Hypokaustenträume, Decke und Pfeiler des Hypokaustums, Rohrwandungen, Umfassungsmauerwerk der Wandhohlräume, Mauerwerk und Verkleidungen der Abzüge und Schornsteine, Wandungen der Heisswasserkessel und -becken, alle metallenen Trennvorrichtungen zwischen den Wärmetransportmedien (z. B. zwischen Feuer und Wasser bei der testudo).

### *Arten der Wärmeübertragung bei der römischen Heizung*

#### *a) Wärmestrahlung*

Strahlungsheizung ist die Raumheizungsart, bei der Wärmeübertragung von Heizflächen an den Raum, d. h. an Raumumgrenzungsflächen, an Einrichtungsgegenstände und Rauminsassen vorwiegend durch Wärmestrahlung stattfindet. Wärmeabgabe in Form von elektromagnetischen Wellen, deren Wellenlängen hauptsächlich im infraroten Bereich liegen.

#### *b) Konvektion, (Luft)-Wärmeströmung, Wärmemitführung*

Luftheizung nutzt den natürlichen thermischen Auftrieb der an aufgeheizten Flächen (Hypokaustenträumen, Kanalwandungen) vorbeistreichenden Luft. Die erwärmte Luft strömt durch Öffnungen in den Innenraum, der über Lüftungsklappen bzw. Entlüftungsröhre verfügen muss.

#### *c) Kombination von Strahlung und Konvektion*

#### *d) Wärmeleitung (Kontaktübertragung)*

Diese findet nur bei Strahlungsheizung statt, und zwar an den Fusssohlen (Fussbodenheizung) oder beim Anlehnen des Körpers an die erwärmte Wand.

## Anmerkungen

- <sup>1</sup> Feuchte (Feuchtigkeit) der Luft ist ihr Gehalt an Wasserdampf (als Trockenluft-Wasserdampf-Gemisch). Luft ist gesättigt, wenn sie die für die betreffende Temperatur grösstmögliche Wasserdampfmenge enthält, sonst ungesättigt. Absolute Feuchte, Sättigungsgrad der Luft, relative Feuchte: Definitionen dieser Begriffe s. unter Stichwort «Feuchte der Luft» in Haeder/Reichow, Lexikon der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik, Marhold Berlin.
- <sup>2</sup> E. Brödner, Die technische Ausrüstung islamischer Bäder im Vergleich mit antiken Thermenanlagen in Technikgeschichte Bd. 42, 1975, Nr. 3, VDI-Verlag.
- <sup>3</sup> Abb. entnommen: Die Römer in Baden-Württemberg, Konrad Theiss Verlag, Stuttgart, S. 142.
- <sup>4</sup> R. De Maeyer, De Romeinsche Villa's in Belgie, Antw. 1937.
- <sup>5</sup> s. Anm. 2.
- <sup>6</sup> E. Brödner, Untersuchungen an den Heizungsanlagen der römischen Thermen in Nordafrika, Germania 36, 1958, Heft 1/2. E. Brödner, Frühe Hypokaustenanlagen in Technikgeschichte Bd. 43 (1976), Nr. 4, VDI-Verlag.  
Das auf Abb. 4 zu sehende Blech ist eine Nachahmung desjenigen, das zusammen mit einem Schürgerät bei der Freilegung am Praefurnium gefunden wurde.
- <sup>7</sup> Abb. 6 ist entnommen: Böttger, Döhle, Wachtel, Bulgarien, Eine Reise zu antiken Kulturstädten, VEB Berlin 1971. T. Ivanov, Etude sur l'hypocauste de l'époque romaine et de la haute époque byzantine en Bulgarie, Archaeologia 1, 1971, T. Ivanov, Die Heizung in der römischen Architektur von Moesien und Trakien, Augst, 3. Sympos.
- <sup>8</sup> Hypokaustum, Wandhohlräume bzw. Tubulatur und Rauchgasabzüge bilden ein zusammenhängendes System. Besondere Sorgfalt wurde auf die Konstruktion der Übergänge: Hypokausten-Wandhohlräume und Tubulatur-Abzüge gelegt. Es würde zu weit führen, an dieser Stelle auch nur die am häufigsten vorkommenden Lösungen aufzuzeigen. Eine Zusammenstellung fehlt bisher in der Literatur.
- <sup>9</sup> Die bekannten tegulae mammatae gehören zu den frühesten Hohlwandkonstruktionen, ferner die sehr unregelmässig geformten zylindrischen Tonröhren aus dem Bad unter der Casa del Fauno in Pompeji (s. Anm. 6). Letztere haben eine überraschende Ähnlichkeit mit Wandtubuli in den Bädern von Thenae (Algerien).
- <sup>10</sup> L. Eckhart in Forschungen in Lauriacum VI/VII (1960). Basilika mit Heizkanälen, «Haus der Heizkanäle». Vgl. I. Fitz, Gorsium, Neue Ausgrabungen in Acta arch. Acad. Scientiarum Hungaricae 24 (1972); Aquincum, Pauli-Wissowa Realencyclopädie Suppl. XI 1968.
- <sup>11</sup> E. Brödner, Zur Entwicklungsgeschichte des Bades 1. und 2. Teil, Antike Welt 1977 Heft 4, 1978 Heft 1, Raggi Verlag Feldmeilen. H. Eschebach, Die Stabianerthermen in Pompeji, DAI Bd. 13, De Gruyter 1979.
- <sup>12</sup> E. Brödner, Untersuchungen an frühen Hypokaustenanlagen, Technikgeschichte Bd. 43 (1976), Nr. 4, VDI-Verlag.
- <sup>13</sup> Plinius der Jüngere, Briefe an Kaiser Trajan mit dessen Antworten, 10. Buch, Tusculum-Bücherei, Heimeran Verlag München (zweisprachig).
- <sup>14</sup> Ein kurzer Bericht erschien über den Vorgang in den VDI-Nachrichten, von Kretschmer verfasst.
- <sup>15</sup> Abb. 11 ist entnommen aus J. Breuer, Les Bains Romains de Furfooz, Bulletin de Documentation (1957, 1. trimestre), Bruxelles.
- <sup>16</sup> E. Brödner, Zwei römische Metallbehälter aus Künzing (Niederbayern), Germania 38, 1960, Heft 3/4. Es sei ferner auf eine Vorrichtung in einem Warmwasserbecken des Caldarium in den Vorstadtthermen von Herculanum sowie eine Anlage in den Thermen von Cumae hingewiesen.
- <sup>17</sup> E. Brödner, Heizung und Klimatisierung in den grossen römischen Bauten. Ein Überblick über den Forschungsstand, erscheint in Technikgeschichte, Heft 2, 1980. H. Wachtler, Bäder und Badewesen der Römer in D. Krencker, O. Krüger, Die Trierer Kaiserthermen, Augsburg, 1929.
- <sup>18</sup> Wasserdampf. Beim Erwärmen eines offenen Behälters, der mit Wasser gefüllt ist, geht an der Oberfläche Wasser in dampfförmigen Zustand über. Solange Wasserdampf mit seiner Stammflüssigkeit in Berührung bleibt, ist er satt (Sattdampf, gesättigter Dampf). Bei Abkühlung kondensiert er, wobei sich Wassertröpfchen, die als Nebel in Erscheinung treten, bilden. Sattdampf ist unsichtbar. Wird beim Sieden des Wassers Stammflüssigkeit vom Wasserdampf mitgerissen, entsteht Nassdampf (Gemisch von Sattdampf und Tröpfchen). Wird Sattdampf von seiner Stammflüssigkeit getrennt und seine Temperatur weiter erhöht, so entsteht überhitzter Dampf, auch Heissdampf genannt. Es handelt sich dann nicht mehr um Dampf, sondern um ein Gas, dessen Verhalten den Gasgesetzen folgt (Haeder/Reichow, Lexikon der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik, Marhold, Berlin 1971).
- <sup>19</sup> S. Anm. 2, ferner E. Brödner, Heizungstechnische Untersuchungen an islamischen Bädern in Brussa, Bericht der Koldewey-Gesellschaft (25. Tagung 1969 in Speyer).

- <sup>20</sup> E. Brödner, Warmluft- und Flächenheizung in römischer Zeit. Neue Heizversuche 1976 auf der Saalburg. Der Bericht über das Colloquium (1.–3.10.1976 in Strassburg): Häusliche Heizung in den Rheinlanden von der Römerzeit bis hin zu unseren Tagen (*Le Chauffage domestique en Rhenanie*) mit mehreren für unser Thema interessanten Referaten (s. Anm. 23) ist noch nicht publiziert worden. Vgl. hierzu D. Baatz, Heizversuch an einer rekonstruierten Kanalheizung in der Saalburg, *Saalburg-Jahrbuch XXXVI 1979*; H. Hüser, Wärmetechnische Messungen an einer Hypokaustenheizung in der Saalburg, *Saalburg-Jahrbuch* s. oben.
- <sup>21</sup> Aus dem Mittelalter sind zahlreiche «Steinluftheizungen» bekannt geworden. Bei diesen Anlagen wurden die Pfeiler des Hypokaustum durch Basaltfeldsteine ersetzt, die oberhalb der Feuerung gelagert wurden. Diese dicke Steinschicht musste zum Glühen gebracht werden. Das Praefurnium steht mit einem Rauchkanal, der häufig sehr lang ist, in Verbindung. Er endet in einem oder mehreren Schornsteinen. Diese wurden geschlossen, sobald die Steine (Wärmespeicher) stark genug erhitzt waren. Dann öffnete man die Zuführungen zu den Sälen. In Reval (Baltikum) sind heute noch im Rathaus und im gotischen Gildenhause derartige Heizanlagen in Betrieb. Vgl. G. Fusch, *Über Hypokaustenheizungen*, Dissertation Hannover 1910.
- <sup>22</sup> Im Gegensatz zu D. Baatz halte ich die Arbeit von G. Fusch, *Über Hypokaustenheizungen*, Diss. Hann. 1910, für ausserordentlich aufschlussreich, wenn auch nicht in allen ihren Teilen auf dem letzten Stand der Erkenntnis. Auf S. 63 zitiert Fusch den Bericht Winkelmanns über eine Luftheizungsanlage in Herculanum: «In diesem Fussboden waren viereckige Röhren eingemauert, deren Mündung in das unterirdische Kämmerchen ausging. Die Röhren liefen vereinigt innerhalb der Mauer des Zimmers, das unmittelbar über dem Kämmerchen war, in einem bedeckten und mit einem Überzug von feingestossenem Marmor bekleideten Gang bis in das Zimmer des zweiten Stockwerkes, und da liessen sie die Hitze durch eine Art aus Ton gebrannten Hundeköpfen, die mit Stöpseln versehen waren, von sich.»  
In der Bayrischen Staatsbibliothek (München) befindet sich ein noch nicht edierter Brief Winkelmanns, der kürzlich im Börsenblatt in Fotokopie abgebildet war. Vermutlich handelt es sich auch hier neben anderem um Mitteilungen über Warmluftöffnungen in einem Raum einer grossen römischen Villa. Diese Angabe verdanke ich U. Pfriemer, München.  
Plinius der Jüngere, Ep. II, 17,23 und Ep. V, 6, 24.  
Öffnungen vom Hypokaustensystem zu den Innenräumen werden u. a. erwähnt bei A. Jorio, *Sistema di riscaldamento nelle antiche terme pompeiane XXVII ATI Napoli sett. 1972*.
- <sup>23</sup> Kirchenheizung. Bericht und Ergebnis, Tagung in Mainz 1972, *Das Münster XXV. Jahrgang*, Heft 4, *XXVI. Jahrgang*, Heft 1/2, München 1973. P. Schotes, Probleme der Kirchenheizung, Referat Tagung Strassburg, noch nicht publiziert. Die Firma Mahr, Aachen (unter der Leitung von Dr. Rütgers), hat spezielle Kombinationsheizungen (Strahlung-Konvektion) für anspruchsvolle Kirchenräume entwickelt. Bericht Strassburg noch nicht veröffentlicht.
- <sup>24</sup> H. Wachtler bei D. Krencker, *Trierer Kaiserthermen*, S. 333, Vitruv, 2, 9 und 10.
- <sup>25</sup> T. Rook, *The operation and fuel consumption of a suite of hypocausted baths*, University of London, Institute of Archaeology.
- <sup>26</sup> Rauchentwicklung und Rückstände sind bei Holzkohle von bester Qualität ausserordentlich gering. Man denke an die grossen Holzkohlenbecken in den Tepidarien der alten Bäder (Pompeji z. B.). Diese dienten sicherlich auch der Warmwasserbereitung.
- <sup>27</sup> B. Crova, *Le terme romane nella Campania*, 18. – *Atti VIII Conv. Naz. di Storia dell'Arch.* T. Ivanov s. Anm. D. Tzontchev, *Les bains de Hissar* (S. 195 f.), *Annuaire de la Bibliothèque Nationale du Musée Nationale de Plovdiv*, Sofia 1937.