

DIE THERMISCHE ANALYSE DER WÄRMEDISPERSION IM KLEINEN BAD VON PHASELIS

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde der Wärmeverlust im Kleinen Bad von Phaselis berechnet und der Massenstrom von Brennstoff und Gas anhand der Gasanalyse ermittelt. Mit der Festlegung der konstruktiven Wärme und des Koeffizienten für die Wärmeübergang wurde das Computerprogramm erstellt und mit der finiten Differenzmethode die Wärmeausbreitung und Übertragung zum Bad berechnet.

EINLEITUNG

Der Mechanismus des Hypokaustum, das zur Beheizung der Bäder diente, wurde bislang nicht ausreichend erklärt. Eine detaillierte Untersuchung bedarf den Ansatz eines Thermoingenieurs. Für die vorliegende Arbeit wurden sämtliche Bäder in der Türkei untersucht. Die Entscheidung fiel dabei auf das Kleine Bad in Phaselis, weil es einfacher zu analysieren und recht gut erhalten war.

Krenckers Werk [1] beinhaltet die erste umfangreiche Untersuchung der römischen Bäder. Obwohl seitdem viel Zeit vergangen ist, beschränken sich die Veröffentlichungen, vor allem die über die mangelhaft untersuchten Heizsysteme, allein auf die empirischen Arbeiten von Kretschmer [2] und Hüser [3] und die theoretischen Arbeiten von Thatcher [4], Joriá [5] und Rook [6].

Kretschmer berechnete die Wärmeübertragung vom Hypokaustum ins Bad (1760kcal/h), dabei wurden die Werte 21 C für die Raumtemperatur und 60-63 C für das Hypokaustum eingesetzt. Auch Hüser hat anhand einiger empirischer Arbeiten die Schwankungen in der Schornsteingaswärme innerhalb der Zeit graphisch dargestellt. Joriá berechnete, daß im Caldarium des Stabian-Bades in Pompeji 7kg Holz pro Stunde verbraucht wurde. Rook berechnete den jährlichen Holzverbrauch des Badehauses der Welwyn-Villa auf 114 Tonnen. Andererseits legte Thatcher für das Forum-Badehaus die Raumbedingungen zu verschiedenen Tages und Jahreszeiten fest.

DAS KLEINE BAD VON PHASELIS

Das Kleine Bad von Phaselis befindet sich im Südosten des Stadtzentrums. Es besteht zum größten Teil aus Konglomeratblöcken. Beim Bau

wurden außerdem auch Ziegelsteine, Mörtel und Schutt benutzt.

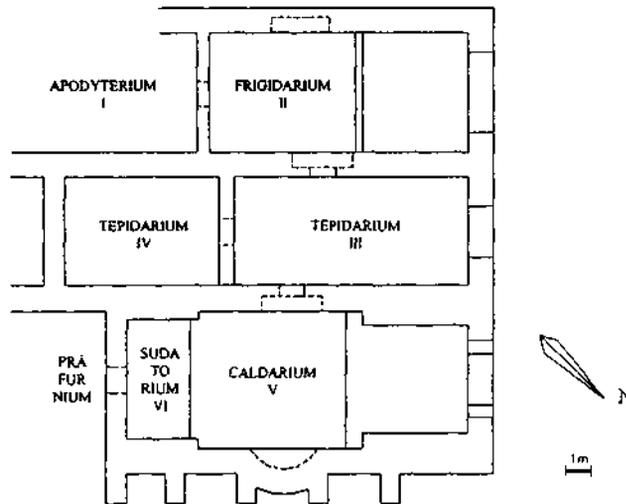


Abb. 1: Das kleine Bad von Phaselis

Es ist annehmbar, daß der noch nicht ausgegrabene Raum (I) zwischen der Bühnenmauer des Theaters und dem Frigidarium als Apodyterium (Auskleidezimmer) benutzt wurde. Eine Tür gewährt den Durchgang vom Apodyterium ins Frigidarium. Die Maße des Frigidariums (II) betragen 10x4.7m. Das Becken im Nordwesten des Raumes wurde später als byzantinische Schmiedeesse benutzt [7]. Außerdem befindet sich an der Nordwestwand eine 3.1m breite Fensteröffnung und in der Südwestmauer eine überwölbte Nische. Dieser Nische gegenüber ist die überwölbte Eingangstür des Tepidariums.

An der Nordostwand des 9.15x4.5m. großen Tepidariums (III) verlaufen drei Durchgänge für die Schornsteingase aus dem Caldarium. Ein weiterer Durchgang für die Zufuhr dieser Gase befindet sich oben. Dieser Raum (III) wird von den Wänden erhitzt. Die Ziegelsteine, die als Stützen in die Löcher an den Wänden plaziert wurden, tragen die Wandplatten [7] und in den Zwischenräumen, die dadurch entstehen, bewegen sich die warmen Schornsteingase, deren Energie sich in diesen Raum ergießt. Dieser Raum (III) hat Verbindungen zum Caldarium und dem anderen Tepidarium.

In der Südostecke des anderen Tepidariums (IV) liegt ein gut erhaltener Teil des Grundbaus und ein anderer Überrest desselben befindet sich in der Westecke. An der Südwestwand des Raumes (IV) befindet sich noch ein Durchgang ins Apodyterium, der aber später zugemauert wurde.

Die thermische Analyse der Wärmedispersion im kleinen Bad von Phaselis

Die Maße des Caldariums (V) betragen 11x5,5m. Die Breitenlänge geht im nordwestlichen Teil des Raumes jedoch auf 4,4m. zurück. Auch dieser Raum (V) wird durch die Wände erhitzt.

Nordöstlich vom Caldarium liegt das 2,4x4m. grobe Sudatorium (VI). Die Spuren einer 60cm. dicken Ziegelsteinwand zwischen diesen zwei Räumen sind noch erkennbar. Die Schornsteingase fließen aus der 1m breiten Öffnung des Präfurniums (Kamin) in das Hypokaustum unterhalb des Sudatoriums. Das Präfurnium wurde bislang nicht ausgegraben.

DIE ARCHITEKTONISCHE REKONSTRUKTION

Da die Ausgrabungsarbeiten am Kleinen Bad in Phaselis noch nicht abgeschlossen sind, konnte die erforderliche architektonische Rekonstruktion anhand der während den Ausgrabungen erhaltenen Informationen gestartet werden. Über den vorhandenen Bau, vor allem über das Hypokaustum, konnten architektonische Annahmen gemacht werden, die die Analyse erleichterten. Hier man nahm an, daß das Dach aus Bögen bestand. Das Tageslicht gelangte vermutlich durch ein kreisförmiges Fenster am Dach ins Sudatorium. Die Fensteröffnung im Frigidarium (II) war 3,1m. Da das Caldarium und das Tepidarium beheizte Räume waren, beschränkten sich hier die Fensteröffnungen auf 2m. Andererseits konnten diese Öffnungen aufgrund des notwendigen Tageslichts nicht noch kleiner ausfallen. Der obere Teil des Fensters hatte die Form eines Halbkreises.

Der Kamin wurde bislang nicht ausgegraben. Hier wurde ein zylinderförmiger Kessel aus Kupfer auf das Präfurnium (Kamin) gestellt. Die Anordnung der Stützbalken des Hypokaustum ist nicht regelmäßig, wobei auch Form und Maße der Stützbalken variieren. Um die Analyse zu erleichtern, nahm man eine ordnungsmäßige Anordnung der Stützbalken an. Außerdem wurde für die Form aller Stützbalken das Rechteck vorgesehen und das Computerprogramm dementsprechend vorbereitet.

Bei der erneuten Berechnung der Maße des Grundstockwerks von Tepidarium, Caldarium und Sudatorium und ihrer Stützbalken versuchte man, den realen Werten möglichst treu zu bleiben.

Vermutlich befand sich ein Becken im engeren Teil des Caldariums.

Die Beheizung des Kleinen Bades von Phaselis wird durch die Konstruktion von Zwischenräumen gewährleistet. Dieser Zwischenraum beträgt im Sudatorium 20cm. Die 20cm. starken Wandplatten wurden ebenfalls im Sudatorium gemessen.

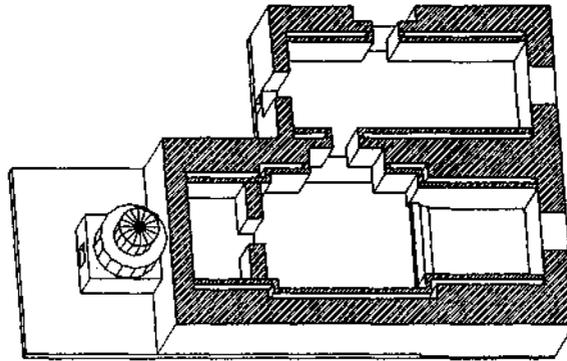


Abb. 2: Ein Querschnitt durch das kleine Bad in Phaseolis

In der Südwestecke des Tepidariums Nr. IV ist eine Abzugsöffnung erkennbar. Im Caldarium ist keine derartige Öffnung feststellbar. Doch der Abzug im Tepidarium allein würde die Zufuhr von warmen Gasen in den nördlichen Teil des Caldariums erschweren. Aus diesem Grunde befindet sich eine Verbindung von diesem Raum in das angrenzende Tepidarium (III). Die Schornsteingase, die in das Tepidarium gelangen, bewegen sich durch diesen Raum und durch die Durchgänge bis ins Tepidarium Nr. IV. Dieser Raum (IV) wurde bei den Berechnungen nicht berücksichtigt.

DIE THERMISCHE ANALYSE DES KLEINEN BADES VON PHASELIS

1. Festlegung der Temperaturangaben:

In vielen Arbeiten wurden für die verschiedenen Räume des Bades auch verschiedene Temperaturangaben gemacht: Kretzschmer benutzte den Durchschnittswert von 21 C [2]. Hüser maß bei seinen Arbeiten an demselben Ort als Durchschnittswert 18 C [3]. Kretzschmer gab bei einer anderen Untersuchung [8] für das Caldarium 55 C und für das Tepidarium ungefähr 25 C an. Rook [6] hingegen gab für die Temperatur im Caldarium 70 C und für die im Tepidarium 55 C an. In Jorjas [5] Berechnungen beträgt die Temperatur im Caldarium 35 C und im Tepidarium 30 C. Hingegen setzte Thatcher [4] in seinen Berechnungen 100 F für die maximale Durchschnittstemperatur des Bodens ein. Brödner [9] gab für das Sudatorium 37 C, für das Caldarium 32-33 C und für das Tepidarium 23-25 C an. Auf Tabelle 2 in ASHAE 1953, S. 247, wird für das Sudatorium 120 F (48.9 C) und für das Caldarium 110 F (43.3 C) angegeben. In der

vorliegenden Arbeit wurden diese Werte (43.3 C und 48.9 C) und für das Tepidarium 28 C eingesetzt.

Für die Schornsteingaswärme im Hypokaustum wurden in verschiedenen Arbeiten wiederum verschiedene Werte festgelegt. Kretzschmer ermittelte bei seinen Berechnungen die durchschnittliche Schornsteingaswärme von 61 C. Nach Kretzschmer beträgt die Schornsteingaswärme an der Öffnung des Präfurniums ungefähr 150 C. Hüser stellt in seiner Arbeit verschiedene Temperaturangaben am Kaminausgang fest, die je nach der Zufuhr von Holzkohle oder Holz variieren. Rooks Berechnungen zufolge beträgt die Temperatur unterhalb des Caldariums 220 C und unterhalb des Tepidariums 89 C. In der vorliegenden Arbeit wurde in Anlehnung an die Arbeiten von Kretzschmer und Hüser für die Schornsteingaswärme am Ausgang des Präfurnium (Kamin) der Wert von 125 C zur Kenntnis genommen.

2. Berechnung des Wärmeverlusts:

Das Caldarium und das Tepidarium Nr. III verlieren durch das gewölbte Dach und den zur Straße blickenden Nordwänden an Wärme. Das Sudatorium verliert an der Dachfläche und der Südwand an Wärme. Auch das Hypokaustum erleidet hier Wärmeverlust. Ferner verlieren auch das Caldarium und das Sudatorium an ihren nach außen blickenden Südwänden an Wärme. Der Wärmeverlust des Sudatoriums an das Caldarium und der des Caldariums an das Tepidarium ist nicht von Belang. Die Wärmezufuhr, die zur Erhitzung des Wassers über dem Kamin benötigt wird, wurde hier auch berücksichtigt.

Mit Hilfe von Wärmeübertragungsgleichungen wurde der Gesamtwärmeverlust des Bades auf 27941.9W berechnet. Die Steigerungsfaktoren für den Wärmeverlust wie Himmelsrichtung, Raumhöhe und Kaminbeheizung sollten noch zu diesem Wert hinzugefügt werden. Infolge der hier festgelegten Steigerungsrate von 34% beträgt der Wärmeverlust 37442.1W. Fügt man noch den Gesamtwärmeverlust von Kamin und Kessel im Wert von 6899.4W hinzu, so ergibt sich ein Gesamtwert von 44341.5W. Der Brennverlust, der thermische Verlust der Kamininnenseite, der Betriebsverlust und der sensitive Wärmeverlust der Schornsteingase sind die vier Hauptgruppen der thermischen Verluste des Kamins. Mit Berücksichtigung dieser Verluste wurde ein 50-prozentiger thermischer Wirkungsgrad angenommen. Somit beträgt der allgemeine Gesamt-wärmebedarf 66512.3W.

3. Gasanalyse:

Angenommen, im Präfurnium (Kamin) wird eine Sorte Holz mit dem

thermischen Wert von 3600-3800kcal/kg verbrannt [10]. Dann ergibt sich infolge des molaren Gemisches die folgende chemische Formel für das Holz: $\text{CH}_{1,368}\text{N}_{0,0223}\text{O}_{0,645}$. Die Berechnungen, die sich daran orientieren, ergeben für die Verbrennung von 1kg Holz einen Bedarf von 5.8884kg Luft.

4. Berechnung des Massenstroms:

Berechnet man den thermischen Wert des Holzes auf 3700kcal/kg (15492kJ/kg) und den Gesamtwärmebedarf des Raumes auf 65512.3W, so ergibt sich ein Bedarf von 15.456kg Holzverbrauch pro Stunde. Demnach ergibt sich für den Massenstrom der Schornsteingase der Wert von 0.0296kg/s.

5. Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten:

Bei der Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten für die unteren und oberen Flächen des Grundstockwerks von Sudatorium, Caldarium und Tepidarium Nr. III und den Innen- und Außenflächen der beheizten Wände wurden verschiedene Korrelationen berücksichtigt. Für die Bodenoberflächen und die Innenseiten der Wände wurde das natürliche Durchgangsverhältnis berechnet [11]. Um die Durchgangskoeffizienten im Hypokaustum zu berechnen, wurde das Verhältnis des erschwerten Durchgangs eingesetzt [12]. Die Durchgangskoeffizienten für die Wandzwischenräume wurden gesondert ermittelt [13].

6. Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten:

Die Böden, Wände und Stützbalken bestehen aus unterschiedlichem Material. Die Wärmeübergangskoeffizienten dieser Materialien wurden mit der Hot-Wire-Methode ermittelt. Die Wärmeübergangskoeffizienten von Marmor, Glas, Kupfer und Kalkstein wurden dem Rechenbrett [14] entnommen. Anhand dieser Daten und den ermittelten Maßen konnten die Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Räume berechnet werden.

DAS COMPUTERPROGRAMM

Um eine algorithmische Einfachheit zu gewährleisten, wurden Sudatorium, Caldarium und Tepidarium in zwei symmetrische Teile zerlegt. Der untersuchte Teil wies entlang des Hypokaustum geometrische Differenzen auf. Dennoch wurde die gleiche Methode angewandt. Die einzigen Unterschiede bestehen in der Anzahl der Stützbalken und in deren Maßen.

Die thermische Analyse der Wärmedispersion im kleinen Bad von Phaselis

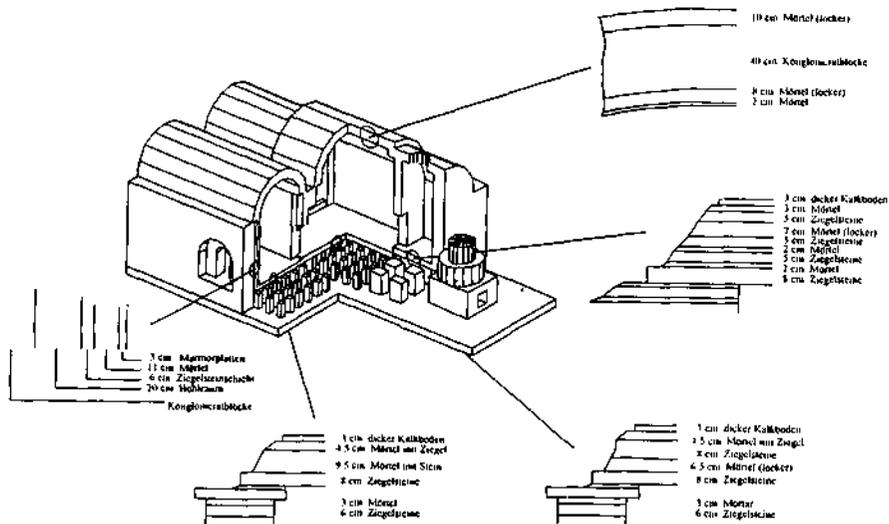


Abb. 3: Material und dessen Stärke an verschiedenen Teilen des Bades

Die Berechnungen für jedes Grundstockwerk aus Stützbalken wurden einzeln durchgenommen, wobei ihr gegenseitiger Einfluß an den Berührungspunkten berücksichtigt wurde. Mit dem iteratischen Ansatz wird der Rechenvorgang zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizientenwertes für die Oberfläche solange fortgesetzt, bis zwischen den letzterhaltenen Werten und den früheren Werten eine Differenz von weniger als 1% zurückbleibt. Somit wird die Wärmeausbreitung ermittelt. Nach der Ermittlung der Wärmeausbreitung an der Oberfläche wird ein neuer Wärmedurchgangskoeffizient berechnet. Auf diese Weise wird der iteratische Ansatz solange angewandt, bis zwischen zwei Werten eine Differenz von kleiner als 0.1 festgestellt wird. Aufgrund dieser wird die Gesamtwärmeübertragungsmenge berechnet. Dieser Wert muß dem Schornsteingas im Hypokaustum entsprechen. Dadurch wird die Wärme beim Ausgang aus der Hälfte der ersten Stützbalkengruppe ermittelt. Dieser Wert entspricht gleichzeitig der Eingangswärme in die andere Hälfte der ersten Stützbalkengruppe. Währenddessen werden die Wärmewerte am Querschnitt, der die Stützbalkengruppe in zwei teilt, auf die andere Hälfte der Stützbalken übertragen. Auf diese Weise werden die Berechnungen für jeweils beide Hälften der Stützbalkengruppen fortgeführt.

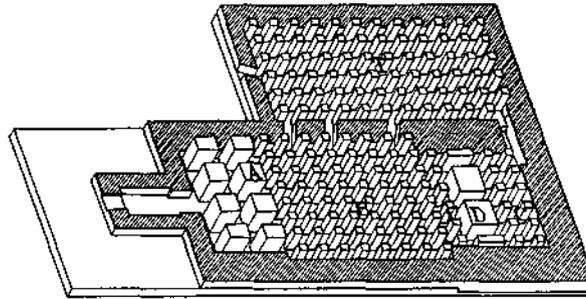


Abb. 4: Ein Querschnitt durch das Hypokaustum

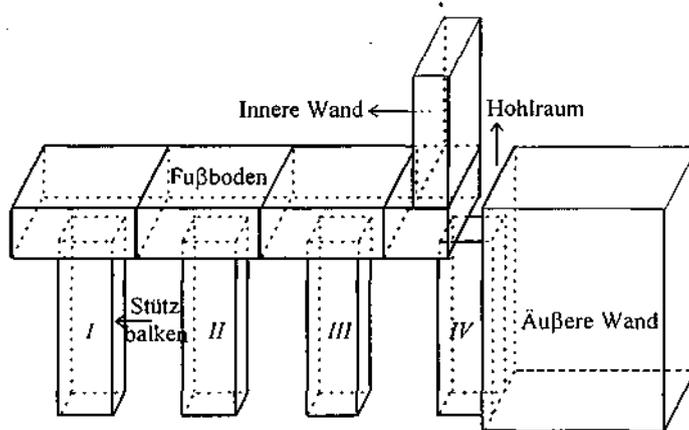


Abb. 5: Eine Stützbalkenordnung aus dem Grundstockwerk des Caldariums

NUMERISCHE ERGEBNISSE

Infolge der Bearbeitung durch die Programme wurde die Wärmeausbreitung für verschiedene Flächen erhalten. Sudatorium, Caldarium und Tepidarium wurden in zwei symmetrische Hälften zerlegt und die dreidimensionale Wärmeausbreitung für die jeweilige Hälfte gezeichnet. Ferner wurde die Wärmeübertragung aus dem Hypokaustum und den Wänden ins Bad berechnet.

Die thermische Analyse der Wärmedispersion im kleinen Bad von Phaselis

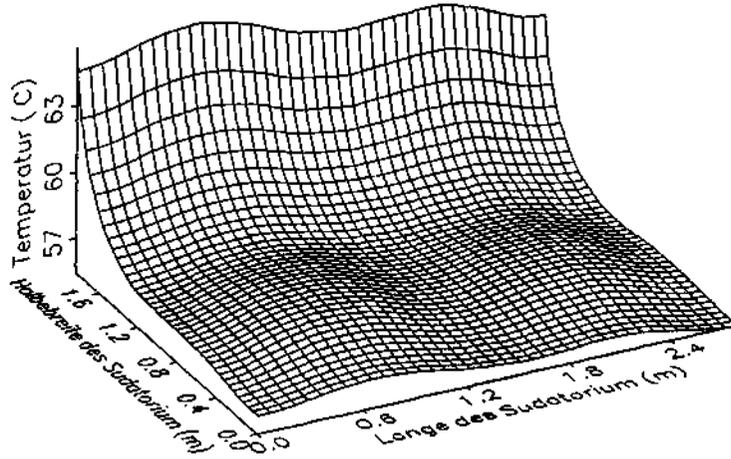


Abb. 6: Dreidimensionale Isothermen innerhalb der halben Sudatoriumsfläche

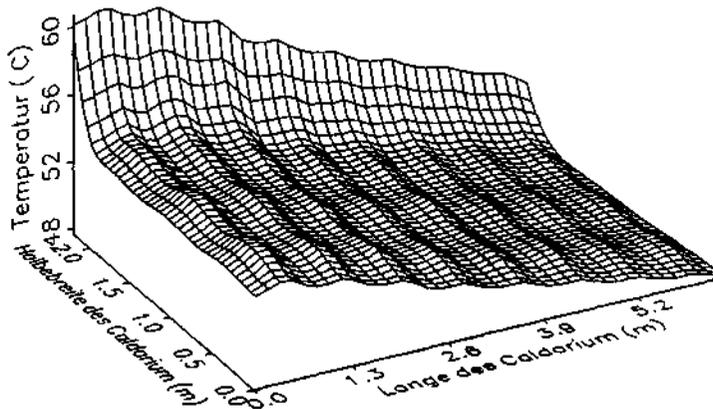


Abb. 7: Dreidimensionale Isothermen innerhalb der halben Caldariumsfläche

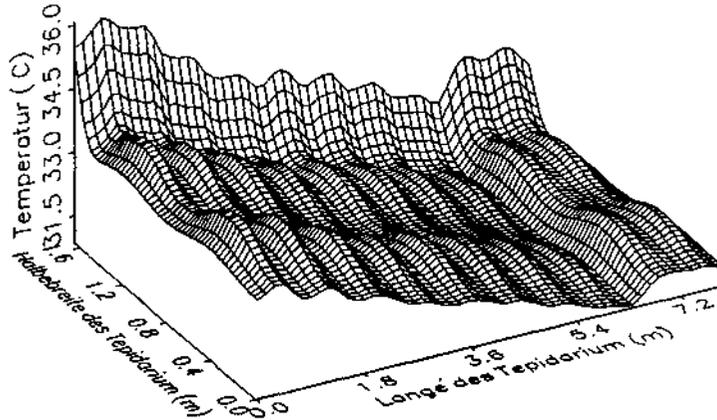


Abb. 8: Dreidimensionale Isothermen innerhalb der halben Tepidariumsfläche

Die Wärmeübertragungen aus jedem Grundstockwerk aus Stützbalken und aus deren Fortführung in den Wänden ins Bad wurden berechnet. Da diese Werte für die jeweilige Hälfte der Räume stehen, wurden sie mit zwei multipliziert. Dabei wurden auch nichtbeheizte Wände berücksichtigt.

Den Berechnungen zufolge beträgt die Gesamtwärmeübertragung aus dem Grundstockwerk 1786.1W und die Wärmeübertragung durch die Wände 1900.2W. Daraus ergibt sich ein Gesamtwärmeübertragungswert ins Bad von 3686.3W.

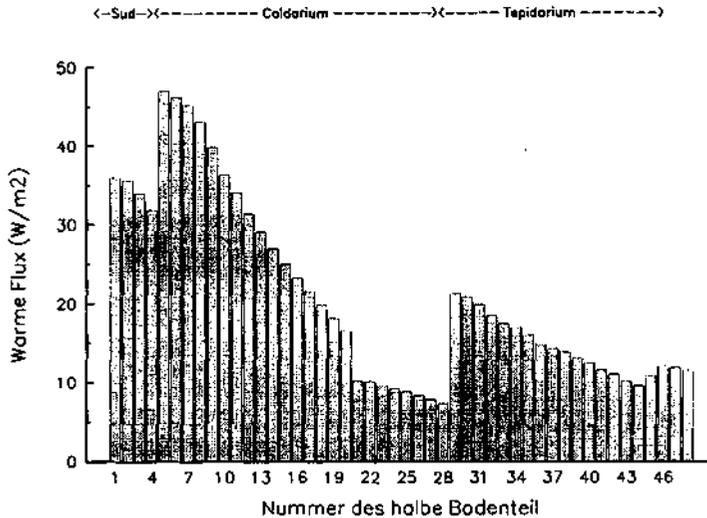


Abb. 9: Schwankungen im Wärmefluß im Grundstockwerk

Die thermische Analyse der Wärmedispersion im kleinen Bad von Phaselis

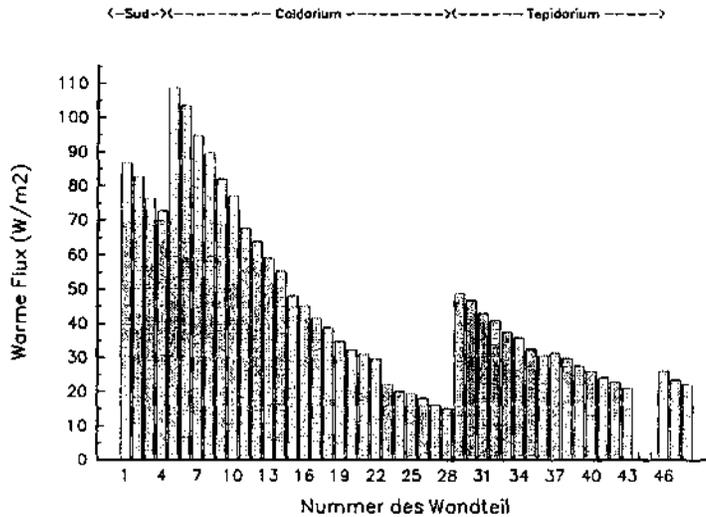


Abb. 10: Schwankungen im Wärmefluß in den Wänden

SCHLUBFOLGERUNG

Über das Kleine Bad in Phaselis, das in der vorliegenden Arbeit analysiert wurde, können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Die Wärmeübertragungsmenge aus dem Hypokaustum ins Bad beträgt weniger als der Wärmeverlust des Bades. Daher können die für das Bad erforderlichen Temperaturvoraussetzungen an kalten Wintertagen nicht erfüllt werden. Vermutlich nutzte man damals an kalten Tagen lediglich das Sudatorium.

2. Bei den Berechnungen des Wärmeverlusts wurde die Außentemperatur als eine Konstante miteinbezogen und die statische Analyse angewandt. Die gleiche Berechnung kann anhand der dynamischen Analyse für das ganze Jahr gemacht werden. Daraus folgt, daß die Badevoraussetzungen zu manchen Zeiten gewährleistet und zu anderen wiederum nicht gewährleistet werden können.

3. Ein anderer wichtiger Punkt ist die Energiespeicherkapazität der voluminösen Konglomeratblöcke. Jedoch wurde die Energiespeicherkapazität des Baus in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

4. Bei den Berechnungen wurde lediglich der Temperaturwert berücksichtigt, der von den warmen Schornsteingasen in die Räume übertragen wurde. Der Wärmegewinn durch Verdampfung, Gasstrahlung, Sonnenstrahlen und den im Bad befindlichen Besuchern wurde nicht

berücksichtigt.

5. Der Einfluß der Stützbalken, die hier gleich Schaufeln funktionieren, auf die Wärmeübertragung läßt sich leicht an den Temperaturschwankungen im Grundstockwerk ablesen. Überall dort, wo die Projektion der Stützbalken feststellbar ist, steigen die Temperaturen. Ferner steigen auch in der Nähe aller Wände unter dem Einfluß der Wandbeheizung die Temperaturen. Außerdem schwanken die Temperaturen an verschiedenen Flächen des Tepidariums Nr. III aufgrund ihrer Verbindungen zum Caldarium.

6. Im Vergleich zu dem berechneten Massenstrom sind die Durchgangskoeffizienten relativ klein. Daraus folgt, daß der Wärmedurchgang sehr gering ist. Der Schornsteingasfluß erfordert hier eine detaillierte Modellierung und eine experimentelle Untersuchung. Diese Tatsache beeinflusst auch die Ergebnisse.

7. Der viel zu hohe Holzverbrauch weist auf eine mögliche Schändung der umgebenden Wälder in der damaligen Zeit hin.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Krencker, D., *Die Trierer Kaiserthermen*, Augsburg, 1929
- [2] Kretzschmer, F., "Hypokausten", *Saalburg Jahrbuch*, 12, 8-41, 1953.
- [3] Hüser, H., "Wärmetechnische Messungen an Einer Hypokaustenheizung in der Saalburg", *Saalburg Jahrbuch*, 36, 12-30, 1979.
- [4] Thatcher, E. D., "The Open Rooms of the Terme del Foro at Ostia", *MAAR*, 26, 169-264, 1926.
- [5] Joria, A., "Sistema di Riscaldamento Nelle Antiche Terme Pompeiane", *BullCom*, 86, 167-189, 1978-79.
- [6] Rook, T., "The Development and Operation of Roman Hypokausted Baths", *Journal of Archeological Science*, 269-282, 1978.
- [7] Atila, I. A., Personal Communication, September 7, 1994.
- [8] Kretzschmer, F., *Bilddokumente römischer Technik*, Düsseldorf, 33, 1964.
- [9] Brödner, E., *Die römischen Thermen und Das antike Badewesen*, Darmstadt, 2, 1983.
- [10] Müezzinoğlu, A. *Hava Kirliliğinin ve Kontrolünün Esasları*, Izmir, 1987.
- [11] Lloyd, J. R. und W. R. Moran, "Natural Convection Adjacent to Horizontal Surfaces of Various Planforms", *ASME Paper*, 74-WA/HT-66, 1974.
- [12] Grimison, E. D., *Trans. ASME*, 59, 1937.
- [13] Shah, R. K. - London, A. L., *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*, Academic Press, New York, 1978.
- [14] Incropera, F.P. und Witt D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 2. Ed., Wiley, New York, 1985.