

Die Antike als Vorbild für moderne Flächenheizungen

Heiko Timmer

1. Die Heizkörper der Gegenwart

Heizkörper dienen seit jeher dazu, ein Gebäude bei unangenehm niedrigen Außentemperaturen im Inneren zu erwärmen. Welche Wärmemenge ein Heizkörper abgibt, hängt neben der Bauform primär von zwei Eigenschaften ab: seiner Oberfläche und deren Temperatur. Je größer die Oberfläche des Heizkörpers ist, die von der Raumluft umströmt werden kann, und je höher die Temperatur dieser Oberfläche ist, desto mehr Wärme gibt der Heizkörper an den Raum ab. Klassische Radiatorenheizkörper besitzen eine geringe Baugröße und werden von heißem Wasser durchlaufen, so dass sich Oberflächentemperaturen zwischen 50-90 °C einstellen.

Seit einigen Jahren vollzieht sich im Baugewerbe ein Trend weg von den klassischen Radiatoren hin zu Flächenheizungen. Diese arbeiten mit deutlich niedrigeren Temperaturen zwischen 35–45 °C. Um trotz der niedrigen Temperaturen genügend Wärme an den Raum abgeben zu können, muss ihre Oberfläche viel größer sein als die von Radiatoren. Der wohl bekannteste Vertreter von Flächen-

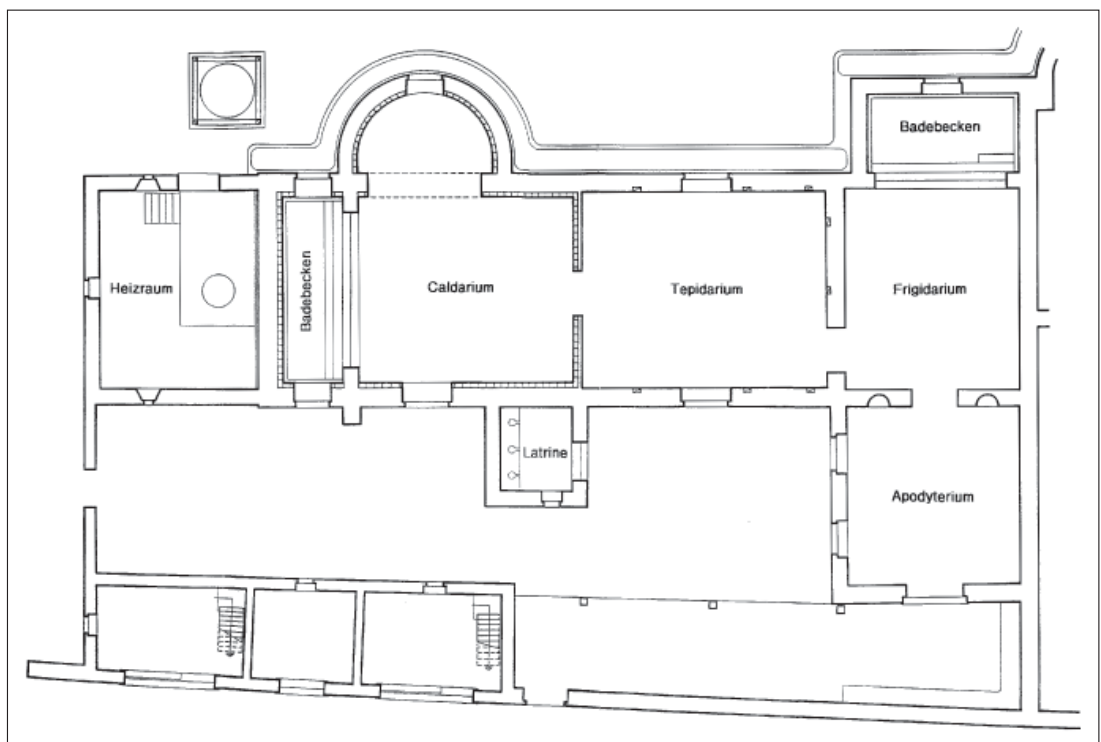
heizungen ist die Fußbodenheizung, die auch in privat genutzten Bauten häufig Anwendung findet. Es können aber durchaus auch Decken und Wände zu Heizzwecken verwendet werden. Flächenheizungen erzielen einen viel höheren Komfort als herkömmliche Heizradiatoren, da sie nicht nur konvektiv die Luft, sondern über ihre Strahlungswirkung direkt die Raumumschließungsflächen und den menschlichen Körper erwärmen.

Ein faszinierender Blick zurück in die Antike zeigt, dass bereits die Römer um die Vorteile von Flächenheizungen wussten und sie mit einfachsten Mitteln und geschickter Baukunst realisierten. Dieser Beitrag untersucht die Herbergstherme in Xanten unter winterlichen Bedingungen.

2. Architektur der Herbergstherme in Xanten

Im archäologischen Park von Xanten findet sich ein realitätsgetreuer und technisch voll funktionsfähiger Nachbau

Bild 1. Grundriss.



Dr.-Ing. Dipl.-Kfm.
Heiko Timmer, Inge-
nieurbüro Timmer
Reichel GmbH, Oh-
ligser Straße 37,
42781 Haan.

der einstigen, zur Herberge gehörenden Therme. Durch die Umkleide, das Apodyterium, erreicht man das kühle Frigidarium, in dem sich ein Badebecken mit kaltem Wasser befindet. Es schließt sich das Tepidarium, ein Ruheraum mittlerer Temperatur, an, durch den man in das Caldarium, den wärmsten Raum der Therme, gelangt. Hier befindet sich ein warmes Badebecken (*Bild 1*). Caldarium und Tepidarium werden im Gegensatz zum Frigidarium beheizt.

Zur Beheizung wird im außen liegenden Heizraum Holz oder Holzkohle verbrannt. Die heißen Verbrennungsgase erhitzen zunächst den über der Feuerstelle liegenden Warmwasserspeicher und das Badebecken im Caldarium, bevor sie in den Doppelboden, das sog. Hypocaustum (*Bild 2*), gelangen. Pfeiler im Hypocaustum tragen den Boden des darüber liegenden Caldariums und Tepidariums. Es gibt Pfeiler mit rechteckigen und kreisrunden Querschnitten. Der geringere Strömungswiderstandsbeiwert von runden Pfeilern kann sich wegen der geringen Rauchgasgeschwindigkeiten aber nicht signifikant auf den Strömungswiderstand auswirken.

Vom Hypocaustum strömen die Verbrennungsgase durch Schächte in den Wänden des Caldariums, die sog. Tubuli (*Bild 1*), und wenige Abzüge in den Wänden des Tepidariums in die Schornsteine auf dem Dach der Therme, von wo aus sie ins Freie strömen. Die Tubuli sind dabei großflächig angelegt, damit das Rauchgas die Wände des Caldariums erwärmt, und zu den Räumen hin verputzt. Der Verputz ist aus Sicht der Wärmeübertragung eher hinderlich, da er einen weiteren Wärmeleitwiderstand bedingt. Er dient offensichtlich nur der Abdichtung gegen die Verbrennungsgase, insbesondere Kohlenmonoxid und -dioxid. Durch Temperaturgradienten in den tubulierten Außenwänden wird die Rissbildung im Putz begünstigt.

Welche Anzahl von Tubuli in welchem Abstand idealerweise vorzusehen sind, ist pauschal nicht zu beantworten. Zur Erzielung einer homogenen Oberflächentemperatur sollten die Tubuli möglichst zahlreich und nah beieinander platziert werden. Dabei entsteht jedoch ein großer Abzugsquerschnitt, der einen Druckabgleich der Tubuli, der für eine gleichmäßige Durchströmung erforderlich ist, verhindert. Eine solch enge Anordnung wäre auch in Hinsicht auf die Nutzung der Brennstoffenergie unsin-

nig, da viel mehr Holz verfeuert werden müsste und die Rauchgase zu heiß, also mit zuviel Restenergie die Tubuli verlassen würden. Es ist also sinnvoll, beide Ziele, d.h. die gleichmäßige Oberflächentemperatur und die weitmögliche Abkühlung der Rauchgase zu optimieren. Das so entstehende Optimierungsproblem ähnelt der Optimierung einer Wärme abgebenden Rippe, die von zahlreichen Randbedingungen abhängt. Hierzu zählen insbesondere die Materialeigenschaften, die Strömungsgeschwindigkeiten und die Temperaturen.

Über mehrere Wochen wurde der Heizraum mit Buchenholz befeuert und die Temperaturen der Raumluft, der inneren Raumflächen und des Rauchgases mit Thermoelementen aufgenommen. Die Messungen erfolgten zum Großteil im Caldarium und einige im Tepidarium. Die Strömungsgeschwindigkeiten der Rauchgase wurden nicht erfasst.

3. Raumlufttemperaturen im Winter

Während der Messungen in den Monaten Januar und Februar betrug die mittlere Außenlufttemperatur 5°C (*Bild 3*). Jeden Tag mussten im Schnitt 115 kg Holz verfeuert werden, um im Caldarium eine durchschnittliche Lufttemperatur von 28°C und im Tepidarium von 19°C zu gewährleisten. Am 1. Februar wurde 1 m³ Frischwasser in den Heizkessel eingefüllt und mit aufgeheizt. Daher ist die Lufttemperatur an diesem und dem darauffolgenden Tag trotz der hohen Heizleistung leicht rückläufig. Hierfür wurden in 24 Stunden zusätzlich 1,85 kW Heizleistung benötigt, die bei den folgenden energetischen Berechnungen unberücksichtigt bleiben.

4. Wärmebedarf

4.1 Transmissionswärmeverluste

Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik fließt Wärme ausschließlich in die Richtung eines Temperaturgefälles, d.h. vom Warmen zum Kalten, aber niemals umgekehrt. Da es im Winter außen kalt ist, verliert die Therme über ihre Umschließungsflächen, also Wände, Boden und Dach, Wärme an die Umgebung. Man spricht in diesem Zusammenhang von „Transmissionswärmeverlusten“, da Energie durch Bauteile abgeleitet, also transmittiert wird. Aus dem Aufbau und der Materialbeschaffenheit der Umschließungsflächen kann der Wärmedurchgangskoeffizient U bestimmt werden, der benötigt wird, um den Transmissionswärmeverlust für jede Umschließungsfläche zu berechnen¹.

Man kann davon ausgehen, dass die Wärmedurchgangskoeffizienten je nach betrachteter Fläche Werte

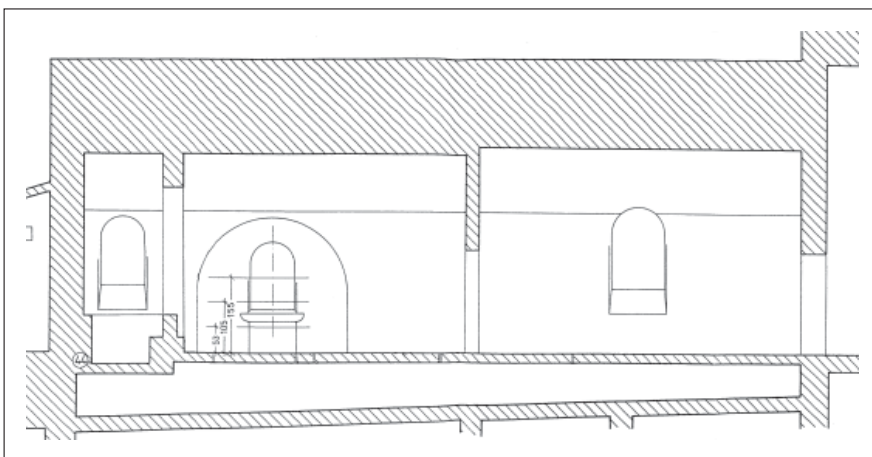


Bild 2. Schnitt durch das Caldarium und Tepidarium mit Hypocaustum.

¹ $\dot{Q}_{\text{Transmission}} = U \cdot A \cdot (\vartheta_{\text{außen}} - \vartheta_{\text{innen}})$

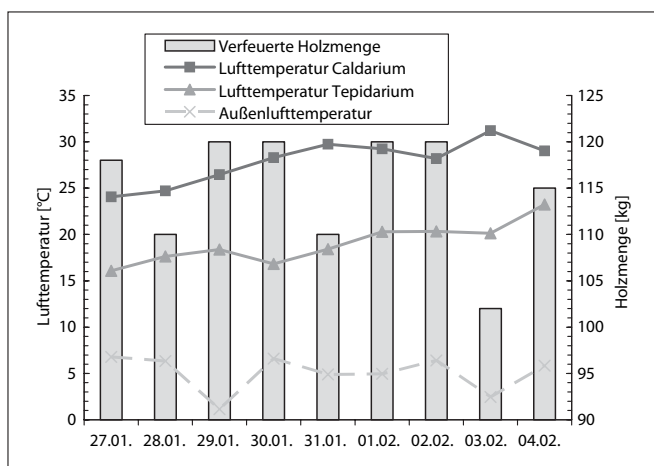


Bild 3. Lufttemperaturen und Befeuerung.

von $U=0,02...1,86 \text{ W/m}^2\text{K}$ annehmen. Wenn keine Beheizung erfolgt und keine Luft mit der Umgebung ausgetauscht wird, verliert das Caldarium dann 3,1 kW und das Tepidarium 0,9 kW.

4.2 Lüftungswärmeverluste

Zu den Transmissionswärmeverlusten kommen Wärmeverluste durch den Luftaustausch mit der Umgebung. Warme Luft entweicht aus dem Innern durch geöffnete Fenster, Türen und Undichtigkeiten, während gleichzeitig kalte Luft von außen nachströmt. Die Heizung muss also nicht nur die Transmissionswärme- sondern auch die Lüftungswärmeverluste decken, die dadurch entstehen, dass die nachströmende, kalte Außenluft auf Raumtemperatur aufgeheizt werden muss.

Um die Lüftungswärmeverluste ermitteln zu können, wird der mit der Umgebung ausgetauschte Luftvolumenstrom benötigt. Es ist unmöglich, diesen während der Heizversuche zu messen. Daher wird im Folgenden der Luftwechsel über die gemessene Feuchte der Raum- und Außenluft berechnet.

4.2.1 Feuchte der Raumluft

Die mittlere relative Luftfeuchte im Caldarium wurde zu 69% gemessen (Bild 4). Sie gibt an, welcher Anteil der maximal von der Luft aufnehmbaren Wasserdampfmenge in der Luft vorhanden ist. Bei einer relativen Feuchte von 100% ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt und kann keinen Wasserdampf mehr aufnehmen. Führt man trotzdem weiter Wasser zu, so kann dieses Wasser nur noch in Form von Tröpfchen, aber nicht mehr als Dampf in der Luft vorliegen: Es bildet sich Nebel.

Welche Wasserdampfmasse in Luft gelöst werden kann ist abhängig von der Temperatur. Die Luft kann umso mehr Wasser aufnehmen, je wärmer sie ist. Im warmen Caldarium entsprechen die 69% Luftfeuchte einer Wassermenge von 16 g pro kg trockener Luft. Die Außenluft besitzt mit 91% zwar eine höhere relative Feuchte nahe der Sättigung. Sie ist aber auch viel kälter, so dass in der Außenluft nur 5 g Wasser pro kg trockener Luft enthalten

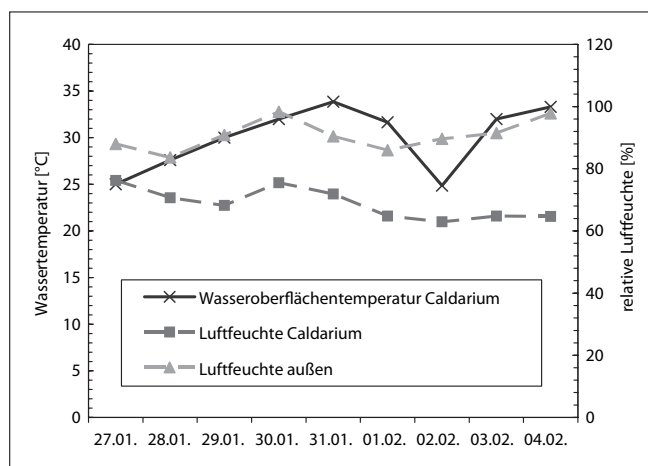


Bild 4. Wasserbecken und Luftfeuchte.

sind. Ein Kubikmeter Außenluft enthält also absolut betrachtet weniger als ein Drittel des Wassers, das in einem Kubikmeter der Luft im Caldarium vorhanden ist.

4.2.2 Wasserabgabe des warmen Badebeckens

Das Wasser im warmen Badebecken ist an der Oberfläche 30°C warm. An die etwas kühlere Raumluft im Caldarium gibt das Becken nicht nur Wärme, sondern auch Feuchtigkeit ab, die an der Wasseroberfläche verdunstet. Zur Beantwortung der Frage, welche Wassermenge aus dem Badebecken verdunstet, wurde die Luftfeuchte im Caldarium gemessen. Unter Voraussetzung einiger realistischer Berechnungsannahmen² verdunstet jede Stunde 3,4 kg Wasser aus dem warmen Badebecken³. Bei der Aufwärmung und Verdunstung des Wassers gehen ca. 2,2 kW Heizleistung verloren.

4.2.3 Luftwechsel

Wie in Kapitel 4.2.1 erläutert, müsste die Luftfeuchte durch die stetige Wasserabgabe des Badebeckens immer weiter steigen, bis sich Nebel bildet. Dass dies nicht geschieht ist ein Beweis für die Existenz eines Luftaustausches zwischen dem feuchten Caldarium und der trockenen Umgebung. Tritt Außenluft in das Caldarium ein, wird sie auf Raumlufttemperatur aufgewärmt, ihre relative Feuchte sinkt stark ab und sie kann verdunstetes Wasser aus dem warmen Badebecken aufnehmen.

Um das Wasser abzuführen, ist ein Außenluftvolumenstrom von 248 m³/h erforderlich⁴. Anschaulich bedeutet dies, dass während der Versuche etwa alle zweieinhalb Stunden das Luftvolumen des Caldariums gegen „Frisch-

² Annahmen der Berechnung: Wärmeübergangskoeffizienten an der Oberfläche des Wasserbeckens 11 W/m²K. Luft an Wasseroberfläche mit Wasserdampf gesättigt, d.h. $\phi=1$. Gültigkeit der Analogie zwischen Wärme- und Stoffaustausch.

³ $\dot{m}_{\text{Wasser}} = A_{\text{Oberfläche}} \frac{\alpha}{c_p} \frac{\xi_{\text{Oberfläche}} - \xi_{\infty}}{1 - \xi_{\text{Oberfläche}}}$

⁴ $\dot{V}_{\text{Außenluft}} = \frac{\dot{m}_{\text{Wasser}}}{x_{\text{Caldarium}} - x_{\text{außen}}}$

luft“ ausgetauscht wurde. Der Luftaustausch kann über die Fugen der Türen oder ein gekipptes Fenster erfolgen. Um die Außenluft auf Raumtemperatur aufzuwärmen, werden 4,3 kW Heizleistung benötigt. Diese Lüftungswärmeverluste des Caldariums liegen damit in der gleichen Größenordnung wie die gesamten Wärmeverluste durch Transmission. Über Lüftungswärmeverluste des Tepidariums kann keine genaue Aussage getroffen werden, da hier keine Messungen als Berechnungsgrundlage vorliegen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich etwa der gleiche Luftwechsel einstellt, also auch im Tepidarium alle zweieinhalb Stunden die Luft komplett ausgetauscht wurde. Dies entspräche aufgrund des geringeren Raumvolumens einem Luftvolumenstrom von 186 m³/h. Durch die niedrigere Temperatur im Tepidarium reicht eine geringere Wärmemenge zum Aufheizen der Außenluft auf Raumtemperatur aus, nämlich etwa 1,6 kW.

5. Gesamtenergiebilanz

Durch die Feuerung muss nach Kapitel 4 der Gesamtwärmebedarf gedeckt werden (Tab. 1):

Tabelle 1. Übersicht über den Wärmebedarf.

	Caldarium	Tepidarium	Summe
Transmissionswärmeverluste	3,1 kW	0,9 kW	4,0 kW
Lüftungswärmeverluste	4,3 kW	1,6 kW	5,9 kW
Wasserverdunstung Becken	2,2 kW	–	2,2 kW
Summe	9,6 kW	2,5 kW	12,1 kW

Das verwendete Buchenholz besitzt einen gemessenen Heizwert von $H_u=21\,487$ kJ/kg. Er liegt deutlich über dem Heizwert, der sich in der Literatur für Holz findet ($H_u=14\,600$ kJ/kg)⁵, was auf einen äußerst niedrigen Wassergehalt schließen lässt, der durch eine sehr gute Ablagerung erzielt wurde. Der Heizwert bestimmt die maximale Energie, die das Holz bei idealen Feuerungsbedingungen, vollständiger, stöchiometrischer Verbrennung und ohne Kondensation des entstehenden Wasserdampfes liefert. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass über die gesamte Versuchsdauer Holz von der Qualität verwendet wurde, deren Heizwert vermessen wurde, soll das arithmetische Mittel zwischen Messung und Literaturwert zur Berechnung des Primärenergiestroms herangezogen werden. Der Primärenergiestrom durch die Holzverbrennung beträgt dann 24 kW⁶.

Ideale Feuerungsbedingungen liegen natürlich bei einer offenen, atmosphärischen Verbrennung nie vor. Umso verwunderlicher ist es, dass mit der Hypocaustenheizung im Experiment ein Wirkungsgrad von gut 50% erzielt wird⁷.

⁵ Recknagel et al. (1995), S. 174.

$$^6 \dot{Q}_{\text{primär}} = \dot{m}_{\text{Holz}} \cdot H_u = 115 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot \left(\frac{21\,487 + 14\,600}{2} \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 24 \text{ kW}$$

$$^7 \frac{\dot{Q}_{\text{ges}}}{\dot{Q}_{\text{primär}}} = \frac{12,1 \text{ kW}}{24 \text{ kW}} = 50,4\%$$

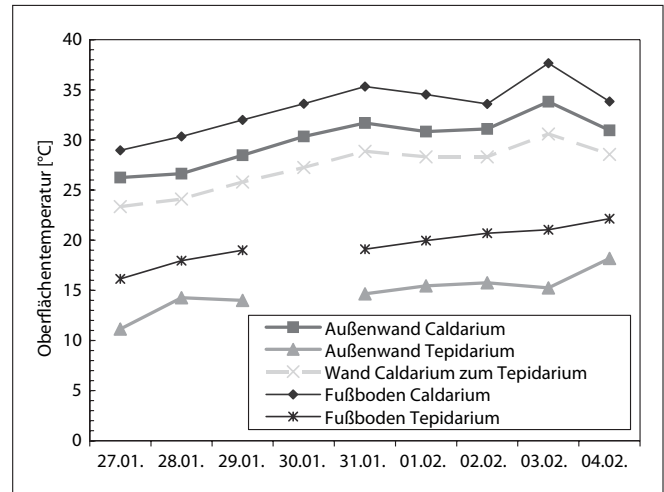


Bild 5. Oberflächentemperaturen.

In modernen Heizungsanlagen liegt der Wirkungsgrad zum Vergleich bei 70–80%⁸. Er ergibt sich als Produkt aus den Einzelwirkungsgraden des Kessels, der Wärmeverteilung und der Regelfähigkeit. Die Hypocaustenheizung der Herbergstherme muss aber eher als Zwischenschritt angesiedelt werden zwischen einer offenen Feuerung, deren Wirkungsgrad bei 20–30% liegt, und einem geschlossenen Kamin, der bei moderner Bauweise 70% des Heizwertes in Wärme umwandelt⁹.

6. Oberflächentemperaturen

Die Temperaturen der Umschließungsflächen des Caldariums liegen höher als die Raumlufttemperatur. Der Boden und die Wände geben also Wärme an die Raumluft ab. Das Caldarium wird hauptsächlich vom Fußboden (33,3°C) aber auch von den Wänden geheizt. Die Außenwände sind im Mittel wärmer (30°C) als die Wand zum Tepidarium (27,2°C), obwohl sie Wärme an die kalte Außenluft verlieren. Dies kann nicht allein mit dem schmaleren Mauerwerk zwischen Caldarium und Tepidarium begründet werden. Es ist vielmehr davon auszugehen, dass ein geringerer und zudem bereits abgekühlter Rauchgasvolumenstrom die Tubuli dieser Wand passiert. Dies deckt sich mit den Temperaturen im Hypocaustum, die vom Caldarium zum Tepidarium hin abnehmen (Bild 5).

7. Wärmeverteilung

Ein Teil der Rauchgase, die auf ihrem Weg durch das Hypocaustum bereits Wärme an das Caldarium abgegeben haben, erreicht den Bereich des Hypocaustums unter dem Tepidarium. Der Wärmehalt der Gase ist hier viel geringer als unter dem Caldarium (Bild 6) und der Querschnitt der Kaminzüge in den Wänden des Tepidariums ist um ein Vielfaches kleiner als der der Tubuli im Caldarium

⁸ Dubbel (2000), S. M88.

⁹ Recknagel et al. (1999), S. 437 f.

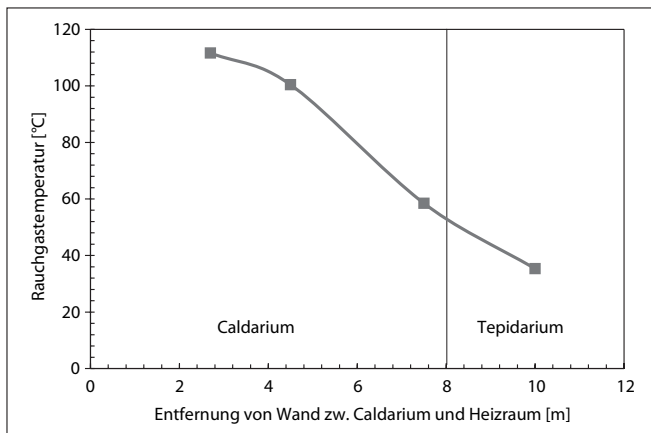


Bild 6. Rauchgastemperaturen im Hypocaustum.

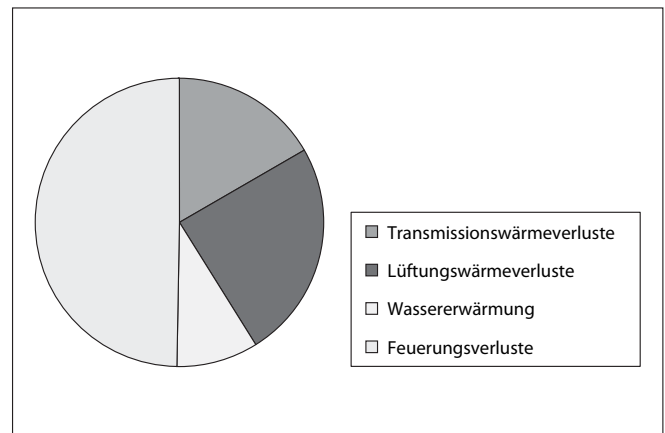


Bild 7. Energiefluss.

(Bild 1). Im Tepidarium ist der Fußboden (19,5°C) daher nur leicht wärmer als die Raumluft (19°C), die Außenwände sind aufgrund der Wärmeverluste nach außen sogar kälter (14,8°C). Weiterhin fließt dem Tepidarium die Wärme zu, die das Caldarium über die gemeinsame Trennwand transmittiert.

Die Oberflächen- und Rauchgastemperaturen erlauben eine Erklärung des in Kapitel 5 berechneten hohen Wirkungsgrades der Hypocaustenheizung. Die heißen Rauchgase erwärmen wie bereits erwähnt zunächst das Badewasser und dann über den Fußboden das Caldarium. Bis zum Eintritt in die Tubuli ist ihre Temperatur bereits gesunken. Sie nimmt im Strömungsverlauf durch die Wände weiter ab, da das Rauchgas zur einen Seite Wärme an das Caldarium und zur anderen Seite an die Außenluft abgibt. Um die Wärmeabgabe an das Caldarium zu bevorzugen, liegen die Tubuli auf der Innenseite der Wände. Hierdurch ergibt sich freilich der Nachteil, dass Rauchgase bei Undichtigkeiten in die Atemluft gelangen. Ab einer bestimmten Höhe ist das Rauchgas bis auf Raumtemperatur abgekühlt. Ab diesem Punkt kann sich ein Temperaturgefälle von der Raumluft bis zur Außenluft ausbilden: Der Raum verliert Wärme an die Umgebung. Dieser Verlust wird aber durch die Rauchgase stark abgefangen, da diese zwar kälter sind als die Raumluft, aber noch immer deutlich wärmer als die Außenluft. Das Rauchgas fungiert ab einer gewissen Höhe in den Wänden also als Isolator. Diese Isolationswirkung verringert den Wärmebedarf des Gebäudes, der ja für den Fall der nicht betriebenen Feuerung ermittelt wurde. Bei einer Außendämmung des Gebäudes mit Mineralwolle, die damals selbstverständlich nicht verfügbar war, würde der Wirkungsgrad der Heizung sinken.

Der hohe Wirkungsgrad ist also die Folge zweier zentraler Effekte:

1. Die große Fläche zur Wärmeabgabe, die den schlechten Wärmeübergang zwischen einem Rauchgas und einer Oberfläche kompensiert.
2. Die Isolationswirkung der Rauchgase in den Außenwänden.

Energetisch optimal wäre eine Beschickung der Feuerung in der Art, dass die Rauchgase am Austritt aus den

Tubuli möglichst weit abgekühlt sind. Dies gelingt natürlich nur dann, wenn die Wärmeabgabe an den Raum zur Erzielung der geforderten Raumlufttemperaturen ausreicht.

Mit den mittleren Oberflächentemperaturen und den Wärmeübergangskoeffizienten auf den Innenseiten der Umschließungsfläche $\alpha=6...11 \text{ W/m}^2\text{K}$ lässt sich der in den Raum abgegebene Wärmestrom berechnen¹⁰. 3,3 kW fließen demnach ins Caldarium und 0,3 kW ins Tepidarium. Hiermit müssen die Lüftungswärmeverluste und die Wärmeverluste durch Wasserverdunstung kompensiert werden, die aber zu $5,9 + 2,2 = 8,1 \text{ kW}$ berechnet wurden. Offensichtlich stimmen die Rechnungen hier nicht überein. Die Abweichungen begründen sich in den Annahmen der Rechnung: Die Oberflächentemperaturen wurden nur an einigen Stellen der Wände gemessen, insbesondere nicht an der Wand zwischen Caldarium und Heizraum. Gerade diese Wand wird wärmer sein als die von der Feuerung weiter entfernten, da die Rauchgase, welche die hiesigen Tubuli durchströmen, heißer sind. Es wird also vermutlich mehr Wärme in den Raum eingebracht als mit den gemittelten, gemessenen Oberflächentemperaturen berechnet. Die Werte in Tab. 1 sind daher verlässlicher als die in diesem Kapitel ermittelten.

8. Zusammenfassung

Von der Primärenergie des Holzes, das zur Beheizung der Therme verfeuert wird, decken im Versuchszeitraum bei 5°C Außentemperatur etwa 17% die Wärmeverluste durch Transmission, 25% die durch Luftaustausch mit der Umgebung und 9% die Erwärmung des Badewassers ab. Die übrigen 49% der Primärenergie gehen als Feuerungs- und Abwärmeverluste verloren. Dies ist für eine atmosphärische, offene Feuerung ein hervorragender Wert. Zudem stellen sich in der Raumluft und an den Umschließungsflächen behagliche Temperaturen ein.

Es zeigt sich, dass mit dem antiken Heizungssystem ein angenehmes Raumklima mit für damalige Verhältnisse beachtlicher Effizienz erzielt wird.

¹⁰ $\dot{Q}_{\text{innen}} = \alpha \cdot A \cdot (\vartheta_{\text{Wand}} - \vartheta_{\text{innen}})$