

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | |
|------------------------------|---|-------------------|-----------------|---|
| Az | 08289 | Referat | 45 | Fördersumme |
| Antragstitel | „Altes Rentamt“ in Worbis/Thüringen Modellhafter Einsatz von Lehm zur Wärmedämmung im Fachwerkbau und Optimierung des energetischen Konzepts | | | |
| Stichworte | Fachwerkgebäude, Denkmalsanierung, Wärmedämmung, Lüftung, Leichtlehm, Wandheizung | | | |
| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) | |
| 2000-2005 | 25.05.2000 | 30.06.2005 | | |
| Zwischenberichte | halbjährlich | | | |
| Bewilligungsempfänger | Stadt Leinefelde-Worbis (ehemals Stadt Worbis) Triftstraße 2-4 37327 Leinefelde-Worbis | | | Tel 03605/2000 Fax 03605/200199 |
| | | | | Projektleitung Bürgermeister Reinhardt |
| | | | | Bearbeiter Frau Schlotterose |
| Kooperationspartner | Bauphysik und Denkmalpflege, Braunschweig, Herr Rademacher BAUKLIMA Ingenieurbüro, Potsdam, Herr Eckermann AIG Beraten und Planen, Leinefelde Ingenieurgemeinschaft Bau+Energie+Umwelt, Springe, Herr Simons | | | |

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Fachwerkgebäude gehören mit ihrer landschaftsprägenden Architektur zu den schützenswerten Bestandteilen unserer Kultur. Eine Nutzung bei heute üblichen Wohnansprüchen und unter dem Aspekt des effizienten Heizenergieeinsatzes erfordert individuelle Lösungen, die gleichermaßen den Prämissen des Klima- und Ressourcenschutzes wie auch der Denkmal- und Landschaftspflege verpflichtet sind.

Erfahrungen aus den letzten Jahren haben gezeigt, dass prinzipiell auch in historischen Fachwerkgebäuden ehrgeizige Ziele zur Heizenergieeinsparung zu realisieren sind. Die dabei vom Neubau übertragenen komplizierten Schichtenaufbauten erfordern jedoch aufwendige Techniken und viel Detailarbeit. Eine Vorfertigung und Elementierung ist nur bedingt möglich. Die Vielzahl von Durchdringungen und Anschlüssen im historischen Fachwerkhaus erschweren die handwerkliche Umsetzung und erhöhen langfristig die Gefahr von Bauschäden. In Kenntnis dieser Zusammenhänge soll am Beispiel des Rathauses der Stadt Leinefelde-Worbis eine modellhafte Optimierung des energetischen Gesamtkonzeptes demonstriert werden. Dazu war es notwendig, einen Kompromiss aus den Anforderungen der Nutzungsfunktionalität, des sparsamen Energieeinsatzes sowie des Erhalts der Denkmalsubstanz zu finden. Ein Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Entwicklung und Ausführung einer Dämmschale aus mineralischem Leichtlehm mit integrierter Wandheizung, die auf der Innenseite des Fachwerks liegt. Es soll der Nachweis erbracht werden, dass die verfügbaren Rohstoffe aus regionalen Quellen auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten für den zeitgemäßen Lehm-bau anwendbar sind.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

- Einsatz von Lehm als bauwerksverträglichen und wärmedämmenden Baustoff
- Entwicklung, Realisierung und Prüfung eines bedarfsangepaßten Energiekonzeptes
- Integration der denkmalpflegerischen Belange in jedem Planungsschritt
- interdisziplinäre Zusammenarbeit von Handwerkern und Fachplanern
- Informations- und Schulungsveranstaltungen zur Qualitätssicherung auf der Baustelle
- Messtechnische Prüfungen zu Bewertung des Projekterfolges
- Ergebnisverbreitung durch Fachseminare und Informationsmedien (z.B. Arbeitsblätter)

Ergebnisse und Diskussion

Gebrauchstauglichkeit

Es gelang, den verwaltungstechnischen Anforderungen des Bauherren an das Raumprogramm und den Innenausbau zu entsprechen, bei weitgehender Wahrung der traditionellen Gebäudekonstruktion. Die fachwerktypische und historisch belegte Raumstruktur des Baudenkmals konnte erhalten werden. Den wärmetechnischen Anforderungen einer modernen Nutzung wurde durch einen an die Substanz angepassten, gleichmäßigen Wärmeschutz entsprochen. Die moderate Dämmstärke und der kompakte Schichtenaufbau mindern die Gefahr von Wärmebrücken und Ausführungsfehlern. Beeinträchtigungen des Feuchteverhaltens der Wand sind, im Gegensatz zu Innendämmungen mit Plattenbaustoffen, nicht zu erwarten. Die Konstruktion ist jederzeit zugänglich und reparaturfähig.

Nutzerzufriedenheit

Das Gebäude wird von den Nutzern angenommen. Während einer Befragung von Mitarbeitern der Stadtverwaltung zeigte sich, dass die bautechnischen „Modellösungen“, also die Lehmschale mit der Wandheizung und die raumweise Abluffführung von der Mehrheit deutlich positiv aufgenommen werden. Die Strahlungswärme der Wandheizung wird als angenehm empfunden, die individuell gewünschten Raumtemperaturen werden problemlos erreicht.

Dauerhaftigkeit

Vier Jahre nach Beginn der Bauarbeiten und Einbau der Leichtlehmdämmung zeigt das Gebäude ein unproblematisches Feuchteverhalten. Die anfangs, aufgrund der Baufeuchte, hohen Holzfeuchtwerte sind durchgehend auf ein Niveau deutlich unter 20 Masseprozent getrocknet. Während der winterlichen Heizperiode war keine Auffeuchtung durch Kondensation nachweisbar. Die Wandheizung hat einen positiven Einfluss auf das Feuchteverhalten. Mittlerweile sind die Heizungs- bzw. Lüftungsanlagen auf das Bedienverhalten der Nutzer abgestimmt und einreguliert. Die messtechnischen Untersuchungen bestätigen insgesamt die Qualität und Stabilität der ausgeführten Lösungen. Der Heizenergiebedarf sollte nach der Sanierung weniger als 100 kWh/(m²a) betragen. Dieser Zielwert wird in der Heizperiode 2004/2005 erstmalig erreicht.

Praktikabilität Lehmbau

Das Projekt zeigt, dass zeitgemäße Lehmbautechniken durchaus in konventioneller Weise auszuführen sind. Die bei den Handwerkern oft vorherrschende Unsicherheit im Umgang mit dem Baustoff Lehm konnte im Projekt durch konkrete Vorgaben für Konstruktion, Lehmaufbereitung und –verarbeitung von vornherein ausgeräumt werden. Die ausführenden Handwerker - Maurer und Bauwerker - wurden am Objekt in zwei bis dreistündigen Kurzseminaren zunächst mit dem Baustoff Lehm, den Lehmbautechniken und Abschnittsweise mit den Arbeitsschritten vertraut gemacht. Mehr Aufwand war im Vorfeld notwendig, um die mit Planung und Ausschreibung am Projekt Beteiligten von der Machbarkeit des Vorhabens zu überzeugen. Die einfache Handhabung des eingesetzten Rohlehms (Ziegellehm), der ohne weitere Vorbereitung und Bearbeitung für die Mörtelmischungen eingesetzt werden konnte, hat ebenso zum Erfolg beigetragen, wie die unkomplizierte Mischtechnik, mit der alle ausgeführten Lehmmischungen (Mineralleichtlehm, Lehmdämmputz, Lehmputz) hergestellt werden konnten.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Zur Weitergabe der Ergebnisse des Projektes sowohl an Fachleute wie auch an interessierte Bauherren wurden verschiedene Seminare vorbereitet und erfolgreich realisiert. Auf Grundlage der Fachberichte sind im Projekt fünf jeweils sechsseitige Arbeitsblätter entstanden.

Fazit

Im Sinne einer schadens- und nutzungstoleranten Lösung, wie sie für ein öffentliches Gebäude erforderlich ist, sind sowohl die Einheit von Lehmschale und Wandheizung als auch die kombinierte Fugen-Grundlüftung mit manueller bzw. mechanischer Bedarfslüftung eine angemessene Entscheidung. Eine abschließende Aussage zur Dauerhaftigkeit der gewählten Lösungen ist erst nach einem Zeitraum von 5 bis 10 Jahren der Bewährung unter Nutzungsbedingungen möglich.

In einem Gutachten für die „Ökologische Bewertung“ wird konstatiert: „...das Vorhaben hat wertvolle Erkenntnisse für die Restaurierung historischer Bausubstanzen unter ökologischen Aspekten geliefert.“ Insgesamt war sowohl für den Bauherrn als auch für die Unternehmer der betrachteten Gewerke ein auskömmliches Wirtschaften möglich. Da auch die Gebrauchstauglichkeit und die technische Funktionalität insgesamt gegeben sind, kann generell von einer Lösung mit Modellcharakter gesprochen werden. Eine Übertragbarkeit der Vorgehensweise setzt voraus, dass in künftigen Bauvorhaben der konzeptionelle Vorlauf und die baubegleitende Beratung deutlich reduziert werden, um ohne anteilige Fördergelder wirtschaftlich zu sanieren.

Schlussbericht

Rentamt Worbis

DBU: Az.08289

Modellhafter Einsatz von Lehm zur Wärmedämmung im Fachwerkbau
und Optimierung des energetischen Konzeptes

Konzeptentwicklung, Prüfung und Bewertung



Gefördert durch:
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Berichtsverfasser
BAUKLIMA Ingenieurbüro
Dipl.-Ing. Wulf Eckermann

Potsdam
September 2005

Gliederung

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 1 | Das DBU Projekt | 5 |
| 1.1 | Idee und Zielsetzung | 5 |
| 1.2 | Entwicklung und Anpassung | 7 |
| 2 | Das Bauvorhaben..... | 8 |
| 2.1 | Baugeschichte..... | 8 |
| 2.2 | Instandsetzung und Sanierung..... | 9 |
| 3 | Konzept, Planung und Ausführung..... | 10 |
| 3.1 | Lehmbau | 11 |
| 3.1.1 | Konzept..... | 11 |
| 3.1.2 | Planung und Ausführung..... | 16 |
| 3.2 | Wandheizung | 23 |
| 3.2.1 | Konzept..... | 23 |
| 3.2.2 | Planung und Ausführung..... | 24 |
| 3.3 | Lüftung | 27 |
| 3.3.1 | Konzept..... | 27 |
| 3.3.2 | Planung und Ausführung..... | 33 |
| 4 | Prüfung und Bewertung..... | 35 |
| 4.1 | Bauphysikalischer Nachweis..... | 35 |
| 4.2 | Langzeitmessung im Musterraum | 39 |
| 4.2.1 | Raumklima | 41 |
| 4.2.2 | Beheizte Wand..... | 43 |
| 4.2.3 | Einfluss der Solarstrahlung | 45 |
| 4.3 | Holzfeuchte | 47 |
| 4.3.1 | Messverfahren | 47 |
| 4.3.2 | Lage der Messstellen | 49 |
| 4.3.3 | Übersicht der Ergebnisse..... | 51 |
| 4.3.4 | Bewertung | 52 |
| 4.4 | Wandheizung | 57 |
| 4.4.1 | Untersuchung mit IR Kamera..... | 57 |
| 4.4.2 | Heizwärmeverbrauch | 61 |
| 4.5 | Lüftung | 64 |
| 4.5.1 | Luftdichtheit..... | 64 |
| 4.5.2 | Lüftungsanlage..... | 67 |
| 4.5.3 | Fensterlüftung | 68 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5 | Fazit..... | 78 |
| 5.1 | Ökologische Bewertung | 78 |
| 5.1.1 | Planungs- und Bauaufgabe..... | 78 |
| 5.1.2 | Ausgeführte Lösung..... | 79 |
| 5.1.3 | Alternative Lösungsmöglichkeiten..... | 82 |
| 5.1.4 | Diskussion der ausgeführten Lösung..... | 83 |
| 5.1.5 | Zusammenfassung und Folgerungen für zukünftige Aufgaben | 87 |
| 5.2 | Ökonomische Bewertung | 88 |
| 5.2.1 | Verwendung von baustellengemischten, lokalen Lehmen | 88 |
| 5.2.2 | Hüllflächentemperiersystem..... | 95 |
| 5.3 | Fazit zur bauphysikalisch-energetischen Gesamtlösung | 98 |
| 5.3.1 | Lösungsfindung..... | 98 |
| 5.3.2 | Funktionalität..... | 99 |
| 5.3.3 | Dauerhaftigkeit..... | 100 |
| 5.3.4 | Modellwirkung | 102 |
| 6 | Weitergabe der Ergebnisse | 103 |
| 6.1 | Seminare | 103 |
| 6.2 | Arbeitsblätter und Wandmodell | 105 |
| 6.3 | Preisverleihung..... | 105 |

Beiträge:

Kapitel 3.1

Bernhard Gaul, Fulda

Kapitel 2.1, 2.2, 5.2 sowie Mitarbeit Kapitel 3.

Hinrich Rademacher, Braunschweig

Kapitel 5.1

Prof. Dr. Detlef Glücklich, Weimar

Anlagen

- Anlage 1 Arbeitsblätter
Bernhard Gaul, Fulda-Künzell
Wulf Eckermann, Potsdam
- Anlage 2 Lehmbericht
Bernhard Gaul, Fulda-Künzell
- Anlage 3 Restaurierung des Rentamtes Worbis unter ökologischen Aspekten
Gutachten von Prof. Dr. Detlef Glücklich, Bauhaus Universität Weimar
- Anlage 4 Bewertung der eingesetzten Verfahren unter wirtschaftlichen Aspekten
Hinrich Rademacher, Braunschweig

1 Das DBU Projekt

1.1 Idee und Zielsetzung

Fachwerkgebäude gehören mit ihrer landschaftsprägenden Architektur zu den schützenswerten Bestandteilen unserer Kultur. Eine Nutzung bei heute üblichen Wohnansprüchen und unter dem Aspekt des effizienten Heizenergieeinsatzes erfordert individuelle Lösungen, die gleichermaßen den Prämissen des Klima- und Ressourcenschutzes wie auch der Denkmal- und Landschaftspflege verpflichtet sind.

Erfahrungen aus den letzten Jahren haben gezeigt, dass prinzipiell auch in historischen Fachwerkgebäuden ehrgeizige Ziele zur Heizenergieeinsparung zu realisieren sind. Die dabei vom Neubau übertragenen komplizierten Schichtenaufbauten erfordern jedoch aufwendige Techniken und viel Detailarbeit. Eine Vorfertigung und Elementierung ist nur bedingt möglich. So erschwert etwa die Vielzahl von Durchdringungen und Anschlüssen im historischen Fachwerkhaus die sichere Ausbildung einer luftdichten Ebene mit den üblichen Klebetechniken. Dadurch wird die handwerkliche Umsetzung erschwert und langfristig die Gefahr von Bauschäden erhöht.

Ohne Zweifel haben moderne Techniken zur Reduzierung des Heizenergieeinsatzes - wie etwa hochwirksame Wärmedämmstoffe, Folien und Baupappen zur Luftdichtung, Zentralheizungen mit komplexer Regeltechnik, Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung - im Neubau ihre Berechtigung. Im Altbau und in besonderer Weise am Fachwerkhaus führt das einseitige Forcieren der heizenergetischen Aspekte jedoch zu Defiziten im historisch gewachsenen Gesamtgefüge. Aus ökologischer und bauhygienischer Sicht und in Bezug auf den langfristigen Erhalt der Bausubstanz ist hier ein neubauorientiertes Sanierungsschema kritisch zu hinterfragen, auch wenn der Anspruch an einen geringen Heizenergiebedarf erhalten bleibt.

Das Projekt soll eine Alternative zum derzeit üblichen Vorgehen bei der energetischen Sanierung von Fachwerkgebäuden aufzeigen. Ziel ist ein ökologisches Gesamtkonzept, das dem Anspruch einer nachhaltigen Entwicklung gerecht wird.

Gegen die Wirkungen von Wärme und Feuchte schützen bei der alten „massiven“ Bausubstanz vielfältige „Selbstregelleffekte“, wie etwa die Speicherung von Solareinstrahlung oder die Abpufferung von Feuchtespitzen in den sorptionsfähigen Oberflächen. Bei Neubauten werden diese Funktionen auf technische Systeme übertragen, wodurch Nutzereinflüsse sowie die Regelung und Wartung von Anlagen ein hohes Gewicht erlangen.

In Kenntnis dieser Zusammenhänge soll am Beispiel des Rathauses der Stadt Leinefelde-Worbis eine modellhafte Optimierung des energetischen Gesamtkonzeptes demonstriert werden. Dazu war es notwendig, einen Kompromiss aus den Anforderungen der Nutzungsfunktionalität, des sparsamen Energieeinsatzes sowie des Erhalts der Denkmalsubstanz zu finden. Ein Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Entwicklung und Ausführung einer Dämmschale aus mineralischem Leichtlehm mit integrierter Wandheizung, die auf der Innenseite des Fachwerks liegt.

Der Heizenergiebedarf sollte nach der Sanierung weniger als 100 kWh/(m²a) betragen.

Lehmbautechniken werden derzeit kaum im konventionellen Baugeschehen eingesetzt. Bislang fehlt es an standardisierten Bautechniken bei denen Lehm auch als ökonomische Alternative zu den konventionellen Baumaterialien eingesetzt werden kann. Über dies fehlt das handwerkliche Selbstverständnis zum Umgang mit Lehm als Baustoff. Die Nachfrage nach Bauteilen aus Lehm besteht von Seiten der Bauherren ebenso wie von Seiten der Planer. Einige, mittlerweile erfahrene Lehmbauer, produzieren Lehmprodukte und vermarkten diese, wie auch sonst bei Baustoffen üblich. Die Handwerker vor Ort, verarbeiten diese in der gleichen Weise, wie sie es vom Umgang mit sonst üblichen Baustoffen gewohnt sind. Die geringe Auslastung der vorhandenen Produktionskapazitäten und die oft sehr langen Anfahrtswege begründen Preise von Lehmbaustoffen die meist deutlich über den Preisen von sonst gebräuchlichen Baustoffen liegen. Dies begründet aus verständlichen ökonomischen Gründen die derzeit mangelnde Akzeptanz der Bauinvestoren gegenüber dem Baustoff Lehm.

Es soll deshalb im Projekt der Nachweis erbracht werden, dass die verfügbaren Rohstoffe aus regionalen Quellen auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten für den zeitgemäßen Lehmbau anwendbar sind.

Das „Alte Rentamt“ in Worbis bietet durch seine historische Fachwerkkonstruktion die Möglichkeit, sowohl in den Außen- und Innenwänden als auch für Decken und Fußböden Lehmbaustoffe zu verwenden. Die geplante Nutzung als zukünftiges Rathaus mit verschiedenen Amts- und Büroräumen, einem größeren Sitzungs- und Trauungssaal und verschiedenen Nebenräumen erfordert jeweils angepasste Temperaturverhältnisse. Bisher wurden die schlechte Wärmedämmung und die geringe Behaglichkeit durch ein überdimensioniertes Heizsystem ausgeglichen.

Ziel des Vorhabens sind Lösungen für den Normalfall, für Sanierung und Energieeinsparung in den vielen unscheinbaren Fachwerkhäusern die nicht im Zentrum öffentlichen Interesses stehen, mit den Handwerkern von nebenan und dem Wissen vor Ort. Die Qualifizierung von Handwerkern im arbeitsintensiven traditionellen und modernen Lehmbau hat unmittelbare sozioökonomische Effekte. Damit ergeben sich gute Marktchancen in einer Fachwerkregion wie dem Eichsfeld. Erwerbslose Handwerker können durch die Aneignung von neuen Fähigkeiten eine attraktive Perspektive finden.

Kernthemen des Vorhabens sind:

- Einsatz von Lehm als bauwerksverträglichen und wärmedämmenden Baustoff
- Entwicklung, Realisierung und Prüfung eines bedarfsangepassten Energiekonzeptes
- Integration der denkmalpflegerischen Belange in jedem Planungsschritt
- interdisziplinäre Zusammenarbeit von Handwerkern und Fachplanern
- Informations- und Schulungsveranstaltungen zur Qualitätssicherung auf der Baustelle
- Messtechnische Prüfungen zu Bewertung des Projekterfolges
- Ergebnisverbreitung durch Fachseminare und Informationsmedien (z.B. Arbeitsblätter)

1.2 Entwicklung und Anpassung

Die Projektidee und der Förderantrag an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt wurden von der Stadt Worbis (jetzt Stadt Leinefelde–Worbis) und dem Deutschen Zentrum für Handwerk und Denkmalpflege (ZHD) in den Jahren 1999 und 2000 gemeinsam entwickelt. Mit Bewilligungsschreiben der DBU an die Stadt Worbis vom 25.05.2000 startet das Projekt.

Von Anfang an bewährte sich eine Zweiteilung des Vorhabens; in das Bauprojekt und das Modellprojekt. Das Bauprojekt umfasst alle Baumaßnahmen am Objekt und die Fachplanung nach HOAI. Das Modellprojekt umfasst den Mehraufwand für die Konzeptentwicklung, die Fachberatung, die Untersuchungen und Messungen sowie die reproduzierbare Ergebnisbewertung und Weitergabe. Zwischen der Stadt Worbis als Bewilligungsempfänger und dem ZHD wurde ein Vertrag zur Geschäftsbesorgung abgeschlossen. Danach übernahm das ZHD alle zur ordnungsgemäßen Abwicklung des Projektes erforderlichen Aufgaben des Bewilligungsempfängers (Erstellung Mittelabrufplan, Veranlassung der Mittelabrufe durch die Stadt Worbis, Ablaufsteuerung, fortlaufende Dokumentation, Erarbeitung der Zwischen- und Abschlußberichte etc.

Die Insolvenz des ZHD zum Jahresende 2001 machte eine Neuordnung des Projektes erforderlich. Die ehemaligen Projektbearbeiter im ZHD Fulda, Herr Gaul und Herr Eckermann, konnten auf freiberuflicher Basis für eine Weiterarbeit gebunden werden. Die inhaltliche Kontinuität in der Fortführung des Projektes ermöglichte die weitgehende Wahrung der Projektziele. Allerdings entstanden durch die Insolvenz des ZHD Verzögerungen in der Bearbeitung, die zu einer kostenneutralen Projektverlängerung durch die DBU führten. Nach dem Wegfall der Fortbildungskapazitäten des ZHD Fulda kam es zu einer Verlagerung der geplanten Praxis- und Theorieseminare hin zu regionalen Anbietern (z.B. Handlungsmühle Büschleb in Worbis) oder überregionalen Fortbildungseinrichtungen (z.B. Deutsches Fachwerkzentrum in Quedlinburg).

Die Leitung des Bauprojektes wurde durch die Stadt Worbis an den Projektsteuerer Herrn Rademacher vom Büro „Bauphysik und Denkmalpflege“ in Braunschweig übertragen. Die Koordinierung und weitgehende Durchführung des Modellprojektes oblag Herrn Eckermann vom BAUKLIMA Ingenieurbüro in Potsdam. Herr Gaul, Sanierung und Denkmalpflege Fulda-Künzell, übernahm Verantwortung für die Materialuntersuchung, Planung und Bauanleitung zu den Lehmbauarbeiten.

Als verantwortliches Büro für die HOAI Architektenleistungen sowie Fachingenieurleistungen in den Bereichen Lüftung, Sanitär und Elektro wurde die AIG Beraten und Planen aus Leinefelde gebunden.

Der Verlauf des Modellvorhabens war geprägt durch regelmäßige Arbeitsberatungen und intensive Diskussionen der Projektgruppe, bestehend aus der Stadt Worbis, dem Projektsteuerer, den Architekten und Fachplanern und zeitweise eingebundenen Fachgutachtern. Ein Schwerpunkt der Diskussion lag auf der Planung der Heizung mit dem System der Hüllflächentemperierung. Anfängliche Unsicherheiten des Bauherren und der Fachplaner konnten durch Einbeziehung externer Berater ausgeräumt werden.

Ein Kernziel des Projektes besteht im Nachweis des praktikablen Einsatzes von regional vorkommenden Rohstoffen in Form von Lehm und Zuschlägen zur Wärmedämmung. Die Leistungen in diesem Fachbereich erstrecken sich von der Recherche und Probennahme regionaler Lehmvorkommen, der Laboranalyse bis zur Entwicklung konkreter Rezepturen für die Baustelle.

2 Das Bauvorhaben

2.1 Baugeschichte

Das Rentamt liegt an der Nordecke des historischen Stadtkerns an der Stelle der mittelalterlichen Wasserburg. Der Bau begann um 1530, wohl nachdem die Burg im Bauernkrieg 1525 zerstört worden war, mit der Errichtung eines großen, dreigeschossigen Fachwerkbaus mit steilem Satteldach. Zwei Zwerchhäuser erlaubten, zusätzlich auch einen Teil des Dachgeschosses für Wohnzwecke zu nutzen. Jedes Stockwerk krägt jeweils um ca. 0,25 m über das darunter liegende aus. Die Ostfassade schmückte ein großer, wohl polygonaler Erker, der bis in das Dachgeschoss hinauf reichte. Im Gebäudeinneren sind Reste von mindestens sechs Türen mit kielbogenförmig geschnitzten Rahmen erhalten.

1608 wurde unter Wiederverwendung mittelalterlicher Grundmauern der im rechten Winkel dazu stehende zweigeschossige Westflügel angebaut, der mit Ausnahme der Hoffassade des Obergeschosses aus Bruchsteinmauerwerk besteht. Er diente wohl als Sitz der Gerichtsbarkeit und als Gefängnis; noch im frühen 19. Jh. wurden im Gewölbekeller die Folterinstrumente aufbewahrt. Das Fachwerk dieser Bauphase unterscheidet sich durch geschnitzte Verzierungen vom älteren Bestand des Nordflügels. Am Nordflügel kann ein Umbau des Erkers dieser Bauphase zugeordnet werden.

Das Rentamt war bis zu den napoleonischen Kriegen Sitz der landesherrlichen Kommunal-, Steuer- und Justizverwaltung, in der anschließenden preußischen Zeit diente es zunächst als Gericht und Gefängnis.

Ein in Fachwerk errichteter Südflügel, der die Anlage zu einem U schloss, wurde 1863 wegen Baufälligkeit abgerissen. Seine heutige Gestalt erhielt das Gebäude im Wesentlichen 1881-86, als es nach dem Brand des barocken Rathauses zum Landratsamt und Rathaus umgebaut wurde. 1998 – 2004 wurde es noch einmal saniert und dient seither als Rathaus und Sitz des Bürgermeisters der 2004 neu gebildeten Stadt Leinefelde-Worbis.

Das Rentamt ist nicht nur das älteste erhaltene Gebäude in der Stadt Worbis, die in 2005 das 750-jährige Jubiläum ihrer ersten Erwähnung als Stadt feiert. Seine früheren und heutigen Funktionen, seine Größe und seine Lage im Stadtraum haben ihm immer schon eine herausgehobene Rolle im Gefüge der Stadt verschafft. Die zumindest in den Bauhüllen weitgehend unversehrt überkommene bauzeitliche Substanz macht es außerdem zu einem Baudenkmal von mindestens regionaler Bedeutung.



Abbildung 1 und 2 Ansichten des Rentamtes nach der Sanierung

2.2 Instandsetzung und Sanierung

Nach einem statischen Gutachten zum Zustand der Dachkonstruktion wurde das Gebäude 1996 geräumt und statisch gesichert. 1998 / 99 wurde zunächst die Dachkonstruktion gesichert und instand gesetzt, das Dach neu gedeckt und anschließend das Fachwerk der Bauhülle saniert. 2000 begann die eigentliche Sanierung mit der Instandsetzung der Grundmauern und dem Einbau einer Drainage für den quer zum Grundwasserstrom stehenden Nordflügel.

Anfängliche Pläne für einen Anbau und den Ausbau des Dachgeschosses wurden aus denkmalpflegerischen Gründen aufgegeben, und statt dessen die zusätzlich erforderlichen Flächen in einem nahe gelegenen Gebäude aus dem frühen 20. Jh., dem sogenannten Kaufeck, geschaffen, dessen Sanierung als integraler Bestandteil in die Baumaßnahme aufgenommen wurde. Allerdings führte diese Entscheidung zu Verzögerungen im Gesamtvorhaben, da sich der Nutzer des Kaufecks trotz langfristiger Kündigung des Pachtvertrages zunächst weigerte, das Gebäude zu räumen.

Mit Vorliegen der Baugenehmigung begannen 2001 die Sanierung des Innenfachwerks und die für die neue Nutzung erforderlichen Umbauten. Die historischen Wände blieben dabei fast vollständig erhalten. Wo geschädigtes Holz ersetzt werden musste (so einige Schwellen im Erdgeschoss), erfolgte dies mit altem Holz in den historischen Techniken. Grundsätzlich wurde aber versucht, vorhandene Bauteile nur zu ertüchtigen, z.B. durch zusätzliche Unter- oder Überzüge. Neue Wände wurden überwiegend in Fachwerk mit Lehmausfachung, nur in begründeten Ausnahmefällen in Trockenbauweise, erstellt.

Bei der Abnahme der zu erneuernden Innenputze wurden in einem Raum ornamentale Wandfassungen, in einem anderen Raum eine praktisch vollständig erhaltene Deckenfassung, beide wohl aus dem späten 16. Jh. aufgefunden. Diese und weitere Befunde (z.B. Reste der Kielbogentüren) konnten durch mehrmalige Überarbeitung der Grundrisse noch während der laufenden Baumaßarbeiten erhalten und künftig würdig der Öffentlichkeit präsentiert werden.

Noch 2001 konnten die Ausbauarbeiten mit dem Einbau der Leichtlehmschale als Wärmedämmung, der Erneuerung Fenster und den Elektro-, Heizungs-, Sanitär- und Lüftungsinstallationen begonnen werden. Es folgten 2003 der Einbau der Innenputze aus Lehm, der Dielung und der Innenanstriche. Die Sanierung der Natursteinfassaden musste angesichts des frühen Wintereinbruchs wegen der frostempfindlichen Kalkputze unterbrochen werden und wurde im Frühjahr 2004 abgeschlossen.

Der eigentlich für den Spätherbst 2003 vorgesehene Abschluss der Bauarbeiten verzögerte sich durch den Zusammenschluss der Stadt Worbis mit der Stadt Leinefelde und mehreren kleineren Gemeinden zum 15.03.2004 neu gegründeten Stadt Leinefelde-Worbis. Der größere Teil der durch den Zusammenschluss erheblich angewachsenen Stadtverwaltung bezog im Frühsommer 2004 die neuen Räume im Rentamt und im ehem. Kaufeck. Das Rentamt ist seither Sitz des Bürgermeisters, des Standesamtes und des Hauptamtes der Stadt Leinefelde-Worbis. Die Sanierung des Rentamtes wurde 2004 mit dem Thüringischen Denkmalschutzpreis ausgezeichnet.

3 Konzept, Planung und Ausführung

Die Entwicklung und Realisierung der Projektziele erforderte eine geeignete Organisation des Bauablaufes. Das gesamte Vorhaben wurde in eine konzeptionelle Phase zur Beratung und Vorplanung sowie die üblichen Architekten- und Ingenieurleistungen nach HOAI unterteilt. Planungs- und Bauleistungen, die über den herkömmlichen Standard der Fachwerksanierung hinausgehen, werden durch die anteilige Förderung der DBU gestützt.

Das Deutsche Zentrum für Handwerk und Denkmalpflege (ZHD) legte im September 2000 ein "Grobkonzept" für die Fachleistungen des Modellprojektes vor. Diese konzeptionelle Vorplanung enthält wesentliche Grundaussagen zu den Bereichen Lehmschale, Wandtemperierung, Luftdichtheit sowie Lüftung und lieferte damit Entscheidungshilfen und Rahmenbedingungen für die weitere Planung. Die in dieser frühen Projektphase zunächst skizzierten Ansätze zur Heizung, zum Lüftungskonzept einschließlich der Fenster und vor allem zur wärmedämmenden Leichtlehmschale konnten bis zur Ausschreibung und Auftragsvergabe konkretisiert werden.

Die Auswahl von Konstruktion und Materialien der nicht förderfähigen Gewerke soll in folgenden Stichworten zusammengefasst werden: Im Dach wird mit der Sanierung des Dachstuhls eine 12 cm Wärmedämmung aus Mineralwolle auf die Deckenkonstruktion aufgebracht. Der Fußboden im Erdgeschoss liegt teilweise auf Beton und teilweise auf Holzbalken mit Lehmwickeln. Der Unterbau besteht aus 6 cm Mineralfaser- bzw. Polystyrolämmung mit Zementestrich oder Holzfaserdämmplatte als Balkenaufgabe. Wände und Decken erhalten einen Anstrich aus Kalk-Kasein-Farbe auf Lehmputz, der Holzdielenfußboden und die Treppen sind gewachst, sichtbare Holzbalkendecken geölt. Die Felder der Fachwerkaußenfassade erhalten einen Mineralfarbanstrich auf Kalkputz, die Holzkonstruktion einen Farbanstrich aus Acrylharzfarbe.

3.1 Lehmbau

3.1.1 Konzept

Die Beschaffung und Untersuchung sowie die Rezepterstellung und Planung erfolgten durch Herrn Bernhard Gaul, Maurermeister und Restaurator im Handwerk, aus Künzell bei Fulda. Das gewählte Vorgehen und die Ergebnisse sind im Bericht Lehmbau ausführlich dargestellt, aus dem hier abschnittsweise zitiert wird.¹

Die am Objekt „Altes Rentamt“ in Worbis und an den Gebäuden im Umfeld ausgeführten Bautechniken - vor allem im Zusammenhang mit Fachwerk - zeigen, dass in den verschiedenen Bauepochen Lehm verwendet wurde. Neben den weit verbreiteten Strohlehm auf Stakung - Ausfachungen und Lehmwickeldeckenfüllungen, wurde Lehm bei Lessteinausfachungen als Mauermörtel verwendet. Auch zum Verputz der Fachwerkwände wurde Lehm seinerzeit eingesetzt, der bis heute erhalten ist. Die überkommenen Lehme weisen gute Materialeigenschaften auf. Die ehemaligen Bezugsquellen für die eingesetzten Baulehme sind heute nicht mehr bekannt. Mineralogische- und geologische Analysen der eingesetzten Lehme und der örtlichen Lehmvorkommen sind nicht durchgeführt worden.

Lehm ist ein Lockersediment aus Ton mit Sandanteil. Die Definition der DIN 18952 lautet: "Baulehme sind tonhaltige Erden. Sie sind Gemische von Ton mit feinkörnigen bis steinigen Bestandteilen, dem Mineralgerüst. Im trockenen Zustand erreichen sie Festigkeiten, die sie für Bauzwecke geeignet machen".

Lehmbeschaffung und Lehmverarbeitung haben sich in den letzten Jahrzehnten grundsätzlich gewandelt. Während in der Vergangenheit der Lehm vor Ort gewonnen und verarbeitet wurde, ist es heute üblich, die Lehmprodukte als Trockenware auf die Baustellen zu bringen. Eine Übersicht über die verschiedenen Arten der Beschaffung von Baulehm gibt die folgende Tabelle.

¹ Gaul, Bernhard: Bericht Lehmbau, Fulda / Potsdam, März 2005

| Traditionell | Konventionell | Alternativ |
|--|--|---|
| <p>Lehm wurde in den kommunalen oder lokalen Lehmgruben (Kuhlen) vor dem einsetzenden Winter abgegraben und zur Verwendung mit den verfügbaren Transportmitteln auf die Baustelle geschafft.</p> | <p>Lehmprodukte wie Lehmsteine, Lehm Trockenmörtel, Leichtlehmplatten und -elemente werden von Herstellern vorgefertigt und von Fachhändlern vertrieben.</p> | <p>Lehm der als Abraum- und Aushubmaterial deponiert würde, kann von den Erdbauunternehmen direkt zur Baustelle transportiert werden.</p> |
| <p>Es kamen ausschließlich plastische Lehme zum Einsatz, die zu vorgefertigten Produkten, wie Lehmsteine oder Strohlehmwickeln verarbeitet wurden.</p> | <p>Die Produkte werden über weite Wege von der Produktionsstätte bis zur Baustelle transportiert.</p> | <p>Der Lehm kann wie traditionell im Winter ausfrieren oder mit einem geringfügig höheren maschinellen Aufwand verarbeitet werden.</p> |
| <p>Der für Ausfachung und Putz vorgesehene Lehm wurde auf Mieten geschüttet, in denen er durch den Frost-Tauwechsel zermürbt wurde.</p> | <p>Die Materialien sind wie andere konventionelle Baustoffe handwerksüblich mit dem gleichen Equipment zu verarbeiten.</p> | <p>Die Einsatzbereiche liegen vor allem bei den Nassmörteltechniken.</p> |
| <p>Der Lehm wurde mit lokal verfügbaren Zuschlägen von Hand vermengt und ebenso eingebaut. Kosten für das Material sind nicht entstanden.</p> | <p>Die Kosten für die Lehm Baustoffe und den Transport liegen oft bei dem Mehrfachen von dem Preis für konventionelle Baustoffe.</p> | <p>Die Lehm Trockenelemente-Herstellung ist zu aufwendig. Diese Lehme sind kostenlos „frei Baustelle“ erhältlich.</p> |

Tabelle 1 Lehm beschaffung im Wandel der Zeit

Dämmung mit Leichtlehm

Durch die Zugabe poröser Zuschlagsstoffe wird die Rohdichte von Lehm herabgesetzt und damit die Wärmedämmwirkung erhöht. Als Leichtzuschläge können Pflanzenteile wie Stroh- und Heidekraut, Holz, Kork oder Schilf und mineralische Leichtzuschläge wie Blähton, Blähschiefer, Blähperlite oder -glas eingesetzt werden.

Bei Leichtlehm (Lehm mit Leichtzuschlägen nach DIN 18951) handelt es sich um trockene Lehm Masse mit einem Raumgewicht von weniger als 1.200 kg/m³. Dieser wird den verwendeten Zuschlagsstoffen entsprechend unterteilt. So haben sich die Begriffe Strohleichtlehm, Holzleichtlehm und mineralischer Leichtlehm etabliert. Leichtlehme werden in Form von vorgefertigten und getrockneten Elementen oder in der Nasslehmtechnik als Mauer- und Putzmörtel angewendet.

Am Rentamt ist Leichtlehm sowohl für den Einsatz für die innere Wandschale vor den bestehenden Massiv- und Fachwerkwänden geeignet, als auch für Leichtlehmputze, um die Wärmedämmung der Außenwände zu verbessern. Die nach Zuschlagsstoffen unterteilten Leichtlehme unterscheiden sich in ihren bauphysikalischen und baupraktischen Eigenschaften. So weist z. B. Strohleichtlehm eine geringe Formstabilität auf und benötigt relativ lange Austrocknungszeiten. Lehm mit einem hohen Anteil an Pflanzenfasern neigt zur Schimmelpilzbildung und Verrottung.

Mit der Anwendung rein **mineralischer Leichtlehme** werden die daraus resultierenden Gefährdungen für die Baukonstruktion minimiert. Bei der Auswahl der Kornart und der Korngrößen kann die Trocknungszeit im Vergleich zu Leichtlehm mit Pflanzenfasern, erheblich verringert und das Trockenschwindmaß bis gegen 0 % reduziert werden. Der Diffusionswiderstand der mineralischen Leichtlehme ist etwas höher als bei vergleichbaren Strohleichtlehm. Darüber hinaus wirkt sich die Dichtheit des Materials positiv auf die Winddichtung des Bauteils und dessen Wasserdampfdiffusionswiderstand aus und trägt somit zur Senkung von Heizenergieverlusten ebenso bei, wie zur Vermeidung von Wasserdampfkondensation in der Wand.

Die Verarbeitung von mineralischen Leichtlehm erfolgt mit konventionellen Handwerkstechniken. Mineralische Leichtlehme bestehen aus fettem Lehm, dem mineralische, poröse Zuschlagsstoffe mit geringer Dichte beigemischt werden. Besonders bewährt haben sich Zuschläge mit geschlossenporigen Oberflächen wie Blähton und Blähglas. Deren nicht-kapillare Struktur gewährleistet eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit, relativ konstante Gleichgewichtsfeuchte, Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeit und Frost sowie minimale Austrocknungszeiten.

Es kommen unterschiedliche Korngrößen zur Anwendung, die nach Norm klassifiziert sind (2, 4, 8, 16 mm). Die Lehmmischungen können in konventionellen Zwangs- oder Freifallmischern auf der Baustelle aufbereitet werden. In Abhängigkeit von der gewünschten Rohdichte und der damit verbundenen, geforderten Wärmeleitfähigkeit können die verschiedenen Korngruppen miteinander vermischt werden. Ziel der Mischung ist in jedem Fall eine vollkommene Umhüllung der einzelnen Körner mit Lehm, um die Lehmschichten auf den Oberflächen der Körner miteinander zu verkleben.

Je nach Kornzugabe liegt die Rohdichte der Mischungen zwischen 600 - 900 kg/m³. Höhere Rohdichten lassen sich unter Verwendung kleiner Korngrößen und Zugabe von dichten Zuschlagsstoffen erzielen, indem man z. B. den Lehm mit Grobsand abmagert. Die Lehmschalen werden in Schalungen geschüttet bzw. gepumpt und durch Stampfen verdichtet. Die Wärmedämmwirkung der mineralischen Leichtlehme ist vergleichbar mit derjenigen der von Volhard 1983 untersuchten Strohleichtlehme.

| Rohdichte [kg/m ³] | Wärmeleitzahl λ [W/(mK)] |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 700 | 0,21 |
| 800 | 0,25 |
| 900 | 0,30 |
| 1000 | 0,35 |

| Rohdichte [kg/m ³] | Wärmeleitzahl λ [W/(mK)] |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1.100 | 0,41 |
| 1.200 | 0,47 |
| 1.300 | 0,53 |
| 1.400 | 0,59 |
| 1.500 | 0,65 |

Tabelle 2 Leichtlehme, Rohdichte und Wärmeleitzahl

Tabelle 3 Wärmedämmende Lehmputze, Rohdichte und Wärmeleitzahl

Bei ähnlichen Mischungsverhältnissen von Lehm und Zuschlag können wärmedämmende Lehmputze in Dimensionen von bis zu 50 mm eingesetzt werden. Die nach DIN 18555 geltende Abhängigkeit der Korngröße von der Putzstärke (Größtkorn des Zuschlags max. 1/3 der Putzdicke) ist auch hier zu berücksichtigen. Die Putze sind nur dann handwerklich verarbeitbar, wenn die Hohlräume zwischen den einzelnen Körnern mit Lehm gefüllt sind.

Daraus resultiert zum einen eine höhere Rohdichte, zum anderen ein Schwindverhalten des Putzes, das bis zur Rissbildung führen kann. Die Rohdichten der einzusetzenden Putze sind sowohl von der verwendeten Körnung als auch von den Mischungsverhältnissen abhängig. Es werden Putze mit den Rohdichten von 1.000 - 1.500 kg/m³ eingesetzt.

Analyse der geologischen Kartierung

Die natürlichen, lokalen oder regionalen Lehmvorkommen stehen derzeit nicht zur Ausbeutung zur Verfügung. Zur Kenntnis der regionalen geologischen Formationen wurde eine geologische Analyse der Lehmvorkommen in der Umgebung von Worbis (Eichsfeld, Lesch, Thüringen) beauftragt. Auf der Grundlage der geologischen Kartierung in Thüringen (Geologische Messtischblätter, Maßstab 1:25000), wurde durch das Büro Steußloff UmweltConsulting Sondershausen², eine Kartografie der Regionen Berlingerode, Worbis und Niederorschel erstellt. Dabei wurden nach geologischen Definitionen „Tonsteine des mittleren Bundsandsteines“ in lokale Kartenwerke eingetragen. Die Ergebnisse der Recherchen gliedern sich in geeignete und in vermutlich noch teilweise geeignete Bereiche. Das Kartenwerk beinhaltet ebenso die Standorte der Ziegeleien, in denen die natürlichen Lehmvorkommen zur Ziegelherstellung ausgebeutet wurden und werden.

Materialbeschaffung aus der Region Worbis

Lehm

Um die regional verfügbaren Lehme abzugreifen wurden die in der geologischen Kartierung favorisierten Gebiete im November 2000 durch den Verfasser und einen ortskundigen Mitarbeiter des am Rentamt beauftragten Ingenieurbüros angefahren, um die im Rahmen von Erdbauarbeiten anfallenden Aushubmaterialien auf ihren Lehmgehalt hin zu prüfen. Vier Proben aus unterschiedlichen Baugruben und drei Proben aus den regionalen Ziegeleien, bzw. aus der Tonhalde einer ehemaligen Ziegelei wurden genommen und für weitere Untersuchungen auf Qualität und Verwendungsmöglichkeit nach Fulda gebracht. Die unterschiedlichen Lehme wurden mit L1 bis L6 bezeichnet. Diese Bezeichnungen wurden für die weiteren Untersuchungen und Rezeptentwicklungen verwendet.

Zuschläge Sand, Blähton und Blähglas

Bei den lokalen Baustoffhändlern wurden die regional verfügbaren (handelsüblichen) Sande als Zuschläge bezogen und zur Analyse ins Labor nach Fulda gebracht. Bei den lokalen Baustoffhändlern wurden die Möglichkeiten zur Beschaffung von mineralischen Leichtzuschlägen angefragt.

² Steußloff, Isabell: Verwendung einheimischer, ortnah verfügbarer Rohstoffe in der Denkmalpflege – Lehmvorkommen in der Umgebung von Worbis, Sondershausen, Oktober 2000

Untersuchung der verfügbaren Lehme

Die Lehme wurden im Labor in Fulda auf ihre Verwendbarkeit als Baulehm untersucht. Dabei wurden die in den zurückgezogenen Lehmnormen aufgezeigten Prüfverfahren angewendet. Untersucht wurden: die Bindekraft, das trocknungsbedingte Schwinden (nach DIN 18 952 „Prüfung von Baulehm“) und der Kalkgehalt. (siehe Lehmbbericht)

Für die weitere Verarbeitung wurden die untersuchten Lehme selektiert. Ausschlaggebend waren neben den Qualitätsmerkmalen vor allem die Verfügbarkeit des Lehms für die weitere Verwendung als Baulehm und die Bezugsmöglichkeit für einen ausführenden Handwerker in der anberaumten Ausführungszeit.

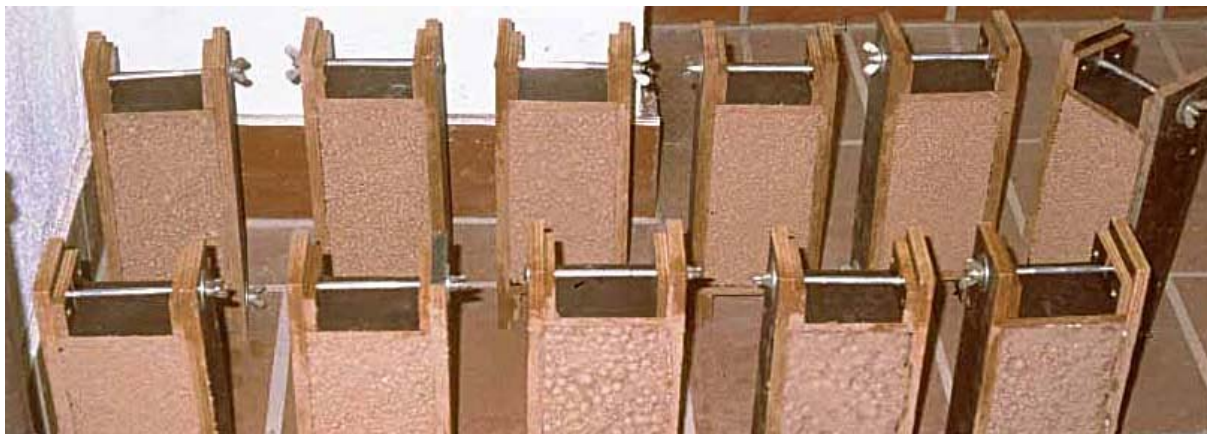


Abbildung 3 Probekörper der verschiedenen Mineralleichtlehm-mischungen

Rezeptentwicklung und Planung der Ausführung

Mit dem favorisierten Lehm und den in der Region verfügbaren Zuschlägen wurden Rezepte entwickelt, die je nach Einsatz des Baustoffes optimiert wurden. Die fertig gestellten Rezepte sind Bestandteil der „Empfehlung zur Aufbereitung und Verarbeitung“³, die vom ZHD an den ausführenden Handwerker weitergegeben wurden.

Mineralleichtlehm

Als Vorgaben zur Entwicklung des Materials standen die planerischen Grundlagen zur Ausführung einer Mineralleichtlehm-schale innenseitig an den Natursteinmauerwerks- und Fachwerkwänden des alten Rentamtes in Worbis. Die Dicke der Schale sollte 15 bis 20 cm und mehr betragen und raumseitig mit einem 40 bis 50 mm dicken, relativ schweren, mehrlagigen Lehmputz beschichtet werden, der auch Bestandteil des Temperiersystemes sein sollte.

Es sollten Leichtlehm-massen eingesetzt werden, die Trockenrohdichten von 600 bis 800 kg/m³ aufweisen und über Wärmeleit-zahlen λ [W/(mK)] von 0,18 bis 0,25 verfügen. Die Leichtlehm-schalen haben darüber hinaus die Winddichtigkeit, vor allem der Fachwerkwände zu gewährleisten und als dampfbrem-sende Schicht die Wasserdampfdiffusion in die Außenwände zu reduzieren.

³ Anlage zur Ausschreibung Los 24 Lehm-bauarbeiten, Empfehlung zur Aufbereitung und Verarbeitung, ZHD Deutsches Zentrum für Handwerk und Denkmalpflege Fulda, 2001

Die Kriterien, die bei der Entwicklung der Rezeptur Berücksichtigung fanden, waren:

- geringe Rohdichte, damit verbunden geringe Wärmeleitfähigkeit
- minimales Trockenschwinden zur Gewährleistung von Rissefreiheit
- hohe Festigkeit vor allem gegen mechanische Beanspruchung
- minimaler Aufwand bei der Aufbereitung
- optimale Verarbeitbarkeit beim Einbau
- günstigste Bedingungen bei der Materialbeschaffung und beim Preis

Nach Bewertung der untersuchten Mischungen im Labor wurde jeweils die Mischung mit den „günstigsten“ Eigenschaften favorisiert und entsprechend den Anforderungen des Baufortschrittes mit einer „Empfehlung zur Aufbereitung und Verarbeitung“ an den ausführenden Handwerker weitergegeben. Gemäß den Bedingungen im Leistungsverzeichnis, erhielt das ausführende Unternehmen damit die Vorgaben für die Qualität des einzusetzenden Materials.

Für detaillierte Angaben zur Untersuchung und Rezeptentwicklung der Leichtlehmdämmputze sowie der Lehmunter- bzw. Lehmoberputz kann auf den Lehmbericht verwiesen werden.

3.1.2 Planung und Ausführung

Konstruktion der Lehminnenschale

Der folgende Konstruktionsaufbau an den Fachwerk- und Naturstein- Außenwandinnenseiten wurde vorgegeben: Zur Entkopplung der Leichtlehmschale von den Fachwerkhölzern sind die Innenoberflächen der Hölzer in ihrer vollen Breite mit Wellpappe so abzudecken, dass es keinen Verbund zwischen Holz und Leichtlehmschale gibt. Dadurch wird gewährleistet, dass die hygrysch bedingten Bewegungen der Hölzer keine Rissbildung in der relativ massiven Lehmschale verursachen.

Auf einer versetzt angeordneten Konterlattung wird die **Schalung** in Form von sägerauen Schalbrettern waagrecht mit einem lichten Abstand von ca. 25 mm angeschraubt. Die Schalung kann im ersten Arbeitsgang maximal bis zur halben Wandhöhe montiert werden. Nachdem der Leichtlehm eingefüllt ist, kann, bei entsprechend trockenen Mischungen, die Schalung sofort nach dem Einfüllen wieder demontiert werden.

Die Schalung wird am oberen Abschluss im obersten Geschoss um ca. 30 cm ausgespart, um das Einfüllen des Leichtlehms mittels Kelle zu ermöglichen. Abweichend von der Empfehlung wurde die Lattenkonstruktion vom ausführenden Unternehmen in der folgenden Weise montiert: Auf der Wandfläche wurden **Traglatten** 3/5 cm senkrecht im Abstand von 60 cm mittels verzinkter Schrauben 6x100 mm 2 Stk/m befestigt. Mit dieser Lattenebene wurden die Unebenheiten der bestehenden Wand nicht ausgeglichen.

An den Traglatten wurden **Distanzlatten** 3/5 cm waagrecht rechtwinklig zur Wandfläche mittels verzinkter Schrauben 5x70 mm montiert. An den Distanzlatten wurden wiederum Traglatten 3/5 cm senkrecht, zum Ausgleich der Wandunebenheiten lot- und fluchtrecht

mittels verzinkter Schrauben 5x70 mm befestigt. Dabei wurden diese Latten gegenüber der ersten Traglatte nicht versetzt. Zur Begründung siehe auch Kapitel 3.2.2 bei Aufbereitung und Verarbeitung.

Der Wandaufbau gliedert sich wie folgt:

- 1 bestehende Fachwerkwand
- 2 Lattenkonstruktion
- 3 Mineralleichtlehm (15 bis 20 cm)
- 4 Lehmunterputz mit Wandheizung
- 5 Lehmoberputz mit Kalkoberfläche

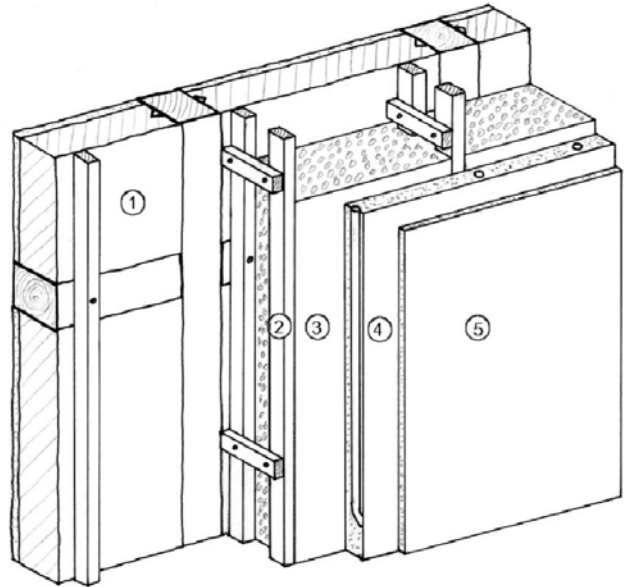


Abbildung 4 Prinzipieller Aufbau der Wandkonstruktion

Leichtlehmaufbereitung und Verarbeitung

Die eingesetzte Leichtlehmischung wurde durch ein in der Region tätiges Bauunternehmen, nach den Vorgaben entsprechend der „Empfehlung zur Aufbereitung und Verarbeitung des Mineralleichtlehms“ hergestellt. Der Auftraggeber hat sich vorwiegend aus Kostengründen für den Blähtonleichtlehm, gegen den Blähglasleichtlehm entschieden. Eingesetzt wurde der gekollerte Lehm von der Ziegelei Bernhard aus Teistungen. Die genaue Vorgehensweise ist dem Lehmbericht zu entnehmen.

Konstruktionsdetails der Anschlussausbildungen

Die Anschlüsse zu den benachbarten und einbindenden Bauteilen sind aus bauphysikalischer Sicht problematisch, da in diesen Zonen zum einen die Wärmedämmung, zum anderen die dampfbremsende und winddichtende Wirkung der Innenschale unterbrochen wird. Es besteht die Gefahr der Kondensatbildung auf den Bauteiloberflächen oder im Wandquerschnitt auf Grund von Konvektion. Für die folgenden Anschlüsse wurden Detaillösungen ausgearbeitet, die bei der Ausführung der Leichtlehmschale besonders zu berücksichtigen waren.

Fenster in den Fachwerkwänden

Die Lehmschale wurde mittels je einem Kasten aus Brettschalung an die bestehenden Fensteröffnungen angeschlossen. Der Kasten ist als verlorene Schalung ausgeführt und dient als Laibung für die neuen Kastenfenster, die hier dicht anzuschließen waren.

Fensterlaibungen in den Massivwänden

Es wurden neue Kastenfenster eingesetzt. Die Kastentiefe entspricht etwa der Dicke der

Gewände. Zur Reduktion des Wärmedurchgangs, vor allem in den fensternahen Bereichen in denen der effektive Wandquerschnitt nur wenige cm beträgt, wurden die Laibungen mit einem bis zu 10 cm dicken Leichtlehmdämmputz beschichtet.

Fachwerkwischenwände

An den an die Fachwerkaußenwände einbindenden Fachwerkwischenwände wurde mindestens der Wandputz abgenommen, um die Leichtlehmschale möglichst am Bundständer der Außenwand anzuschließen.

Massivzwischenwände

Zur Überbrückung der Fehlstellen in der Wärmedämmenden Schale, im Bereich der Zwischenwandanschlüsse an die massiven Wände wurde vorgeschlagen, die Leichtlehmschale mind. 50 cm weit an der Zwischenwand entlang zu führen. Ausgeführt wurden, abweichend von den skizzierten Vorschlägen, Kehlen mit einem inneren Radius von 35 cm. (Abbildung 5)

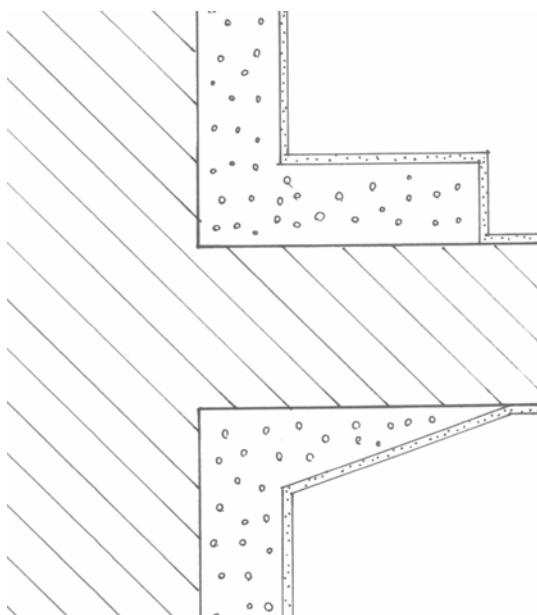


Abbildung 5 Anschluss Zwischenwand im Massivteil (Detailplanung)

Abbildung 6 Anschluss Zwischenwand im Massivteil (Ausführung)

Geschossdecken

Die Leichtlehmschale an der Außenwand ist so über den Deckenquerschnitt zu führen, dass der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen den Geschossen keine Differenzen aufweist. Dazu wurde die Leichtlehmschale in ihrer vollen Dimension auch in den Bereichen der horizontalen Versprünge geführt. Sie wirkt dabei in den Deckenbereichen als Deckenfüllung. (Abbildung 7)

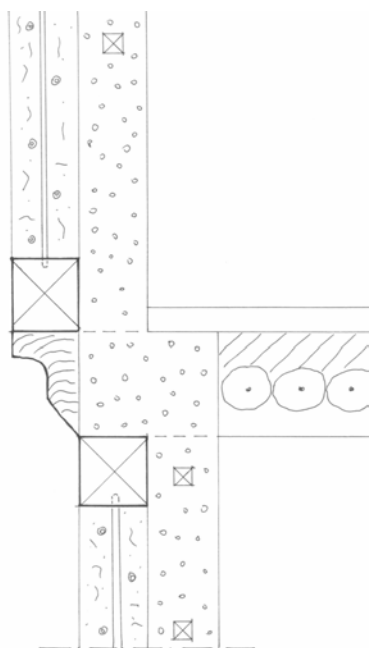


Abbildung 7 Anschluss der Geschosdecke (Detailplanung)



Abbildung 8 Anschluss der Geschosdecke (Ausführung)

Die Überlegungen, die Anschlüsse zwischen Leichtlehmschale und Deckenbalkenaufleger zusätzlich durch Profilierungen an den Balkenköpfen konstruktiv abzudichten, wurden aufgrund des statischen Eingriffes und wegen der handwerklich schwierigen Ausführung zurückgestellt.

Für detaillierte Angaben zur Planung und Ausführung der Leichtlehmdämmputze sowie der Lehmunter- bzw. Lehmoberputz kann auf den Lehmbbericht verwiesen werden.

Probleme des Systems und Anpassungen

Lehmanalyse und Rezeptentwicklung

Die Analysen der Lehme beschränkten sich ausschließlich auf die lokal zur Verfügung stehenden. Nicht zuletzt um im Sinne des Projektes den „Baustofftourismus“ zu vermeiden, wurden die durchaus bekannten und im Lehmbebau etablierten, auf dem Baustoffmarkt zur Verfügung stehenden Produkte hier nicht mit in die Untersuchungen mit einbezogen. Die Voruntersuchungen, also die Lehmanalysen waren so vorgesehen, dass vorzugsweise Aushubmaterial aus lokalen Baumaßnahmen am Objekt Verwendung finden sollte.

Zum einen sind die regionalen Lehmvorkommen auf relativ geringe Flächen beschränkt, so dass der Boden innerhalb eines Baugebietes offensichtlich aus unterschiedlichen geologischen Formationen besteht; zum anderen verfügt die Bauwirtschaft in der Region nicht über die in anderen Gebieten üblichen, auf die Erdarbeiten spezialisierten Bauunternehmen, die sowohl über die Kenntnis der geologischen Formationen als auch über den potenziellen Auftragsumfang verfügen, um das Aushubmaterial weiterzugeben.

Die entnommenen und untersuchten Aushub-Lehme waren mit Ausnahme von L 5 in einer Struktur und Konsistenz, dass sie weiterer intensiver Aufbereitung bedurft hätten.

Somit hat sich die Entwicklung der Rezepte ausschließlich auf den zu jederzeit und in dem erforderlichen Umfang zu beziehenden Ziegeleilehm konzentriert, obwohl dieser entgegen den Zielvorstellungen nur gegen Zahlung einer Gebühr vom Hersteller abgegeben wurde.

Die vorgeschlagenen Rezepte wurden durch das ausführende Unternehmen weitestgehend unverändert angewendet. Das Rezept für den Blähton-Leichtlehm wurde, nachdem der Unternehmer aus Kostengründen einen anderen als den untersuchten Leichtzuschlag beschafft hatte, überprüft und korrigiert.

Aufbereitung und Verarbeitung

Die Ausführung der Lattenkonstruktion, abweichend von den Empfehlungen hatte die folgenden Gründe: Mit der Montage der Distanzlatte war der Ausgleich der Wandunebenheiten mit wesentlich geringerem handwerklichem Aufwand zu erzielen als mit der vorgeschlagenen Variante. Zudem gestaltete sich das Einfüllen und Verdichten der Leichtlehmischung wesentlich einfacher.

Bei der empfohlenen Lattung staute sich das Material beim Einschütten auf der Konterlatte. Zusätzlich versperrte die Konterlatte den Weg beim Verdichten, so dass dies zu Lunkern und Fehlstellen unterhalb der waagerechten Latte führte. Die Auswirkungen, der relativ geringen Leichtlehmdimension im Bereich der Traglatten und der Distanzlatte über die gesamte Dimension der Leichtlehmschale, auf das bauphysikalische Verhalten, kann derzeit noch nicht abgeschätzt werden.

Vor allem bei der Aufbereitung der Putzmörtel hat sich gezeigt, dass die Qualität der nach Rezeptvorgaben aufbereiteten Mörtel, wesentlich von der Einhaltung der Vorgaben abhängt. So beeinflusst nicht nur das Mischungsverhältnis das Ergebnis.

Die zuerst ausgeführten Unterputzflächen wiesen nach anfänglicher Abtrocknung erhebliche Schwindrisse auf. Bei der Analyse der angetragenen Putzmörtel und nach Recherche der Aufbereitung und Verarbeitung stellte sich heraus, dass die Lehm Masse die dem Zuschlag zugegeben wurde vorher nicht in ausreichendem Umfang mit Wasser vermischt wurde. Dadurch gelangte trotz Einhaltung des Mischungsverhältnisses eine wesentlich größere Menge des Lehms in den Mörtel. Zudem wurde der Lehm im Mischvorgang nicht gleichmäßig im Korngefüge verteilt. Es entstanden Bindemittelanreicherungen, die in der Trocknungsphase erhebliche Wassermengen abgaben und so die Schwindrissbildung verursacht haben. Nachdem die Ursache für die Rissbildung festgestellt war und die Aufbereitung des Lehms entsprechend den Empfehlungen ausgeführt wurde, sind keine weiteren, materialbedingten Risse mehr entstanden.

Rissbildung über dem Lattengerüst

Nach Auftragen des Kalkspachtels wurden senkrechte Haarrisse in regelmäßigem Abstand erkennbar. Sie traten sowohl in Bereichen auf, in denen die Leichtlehmschale vor einer Fachwerkwand eingebaut worden war, als auch vor Bruchsteinmauerwerk. Sie konnten also nicht auf Bewegungen im Fachwerk zurückgeführt werden. Versuchsweise Öffnungen des Putzes zeigten, dass die Risse jeweils über den senkrechten Latten des Lattengerüsts lagen.

Zwei Mechanismen sind als Ursachen der Risse denkbar:

- Die Latten unterlagen mit dem Austrocknen der eingebauten Lehme dem üblichen Schwinden des Holzes und die Lehmputze konnten trotz ihrer Stärke von 4 ... 5 cm diese Bewegungen nicht aufnehmen.
- Die Kupferrohre des Hüllflächentemperiersystems wurden mit Aluminiumstreifen auf die Latten geschraubt, bevor sie eingeputzt wurden. Um thermische Dehnungen in den Kupferrohren zu kompensieren, wurden sie an ihren Wendestellen jeweils mit einem Schaumstoffstrumpf überzogen. Es ist jedoch denkbar, dass die Art der Befestigung thermische Dehnungen in den Kupferrohren nicht zulässt, ohne dass sie auf die Latten übertragen werden.

Beide Mechanismen lassen sich vermeiden, indem die Latten mit der Schalung ausgebaut werden. Hierzu ist lediglich eine etwas andere Anordnung der Querlatten erforderlich. Eine Befestigung der Heizungsrohre auf dem (ausgetrockneten) Leichtlehm ist problemlos möglich. Versuche haben gezeigt, dass normale Spax-Schrauben ohne Dübel in den Leichtlehm geschraubt werden können und dort ähnliche Belastbarkeiten erreichen wie Schrauben mit Dübeln in Ziegelmauerwerk. Die Befestigung der Rohre ist ohnehin nur als Montagehilfe erforderlich, da sie allein schon durch das Einputzen fixiert werden.

Einfluss bauschädlicher Salze

Die Leichtlehmschale wurde auch an der Nordwand des dreigeschossigen Fachwerkbaus eingebaut, die im Erdgeschoss wohl im 17. oder frühen 18. Jh. durch eine massive Bruchsteinmauer ersetzt worden war. Nachdem im Sommer die Leichtlehmdämmung eingebaut worden war, konnte zu Beginn des Winters bereits die Heizung in Betrieb genommen werden, so dass die Putzarbeiten im Winter erfolgen konnten. Nach Ende der Heizperiode traten in einem Raum feuchte Flecken an der Putzoberfläche auf, die zunächst auf Undichtigkeiten in den Heizungsrohren zurückgeführt wurden. Nach dem Freilegen der Rohre erwiesen sich diese jedoch als dicht. Als die Heizung versuchsweise im Sommer wieder in Betrieb genommen wurde, verschwanden die feuchten Flecken, sie kehrten mit dem Ende der Beheizung jedoch wieder. Eine chemische Untersuchung ergab ungewöhnlich hohe Gehalte an leichtlöslichen, hygroskopischen Salzen, wie sie in alter Bausubstanz häufig vorkommen. Die Fassade zeigte im fraglichen Bereich in der Tat das für eine solche Salzbelastung typische Erscheinungsbild.

Offenbar hat das mit dem Einbau der Leichtlehmschale eingetragene Wasser die im Mauerwerk enthaltenen Salze in Lösung gebracht. Beim Austrocknen des Leichtlehms wurden sie kapillar an die Putzoberfläche transportiert. Während der Beheizung lagen die relativen Luftfeuchten an der Putzoberfläche so niedrig, dass die Salze kristallisierten. Ohne Beheizung stiegen die relativen Luftfeuchten und die Salze nahmen hygroskopisch soviel Wasser aus der Luft auf, dass sie in Lösung gingen und als feuchte Flecken in Erscheinung traten.

In den betreffenden Bereichen wurden die Putze und der Leichtlehm ausgebaut und entsorgt. Um einen erneuten Salzeintrag zu verhindern, wurden die Fugenmörtel des Bruchsteinmauerwerks ausgebaut und durch einen Saniermörtel nach WTA ersetzt. Wahrscheinlich wurde ohnehin durch den beschriebenen Effekt ein großer Teil der Salzbelastung des Mauerwerks in die Lehmschichten verlagert und durch den Ausbau des belasteten Leichtlehms

entfernt. Nachdem der Wandaufbau wieder hergestellt worden war, sind die feuchten Flecken in den folgenden zwei Jahren nicht wieder aufgetreten.



Abbildung 9 Lattung und Schalung, Wellpappe zur Trennung von Holz und Lehmshale

Abbildung 10 Schalung wandert je nach Bauhöhe der Lehmwand

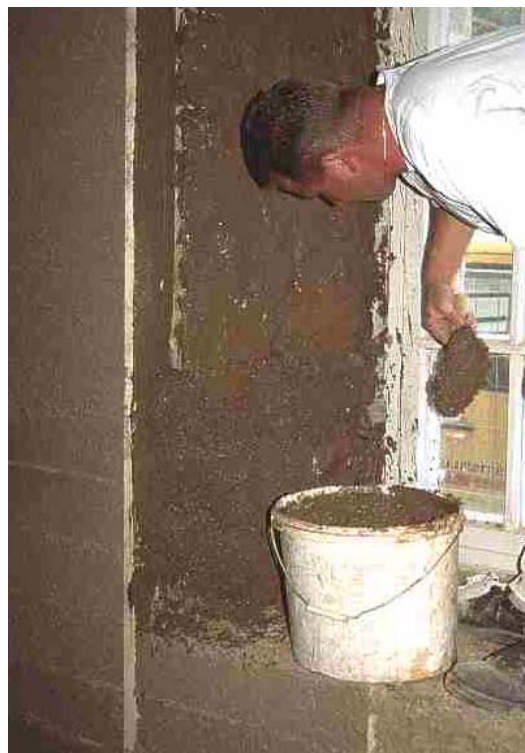


Abbildung 11 Abstimmung auf der Baustelle zwischen Unternehmer und Fachberater

Abbildung 12 Antragen des Dämmputzes in der Fensterlaibung

3.2 Wandheizung

3.2.1 Konzept

Während der konzeptionellen Vorplanung wurde der Einsatz verschiedener Heizsysteme mit unterschiedlichen Wirkungsweisen diskutiert. Letztlich fiel die Wahl auf ein Wandheizsystem, wobei die ohnehin notwendige Erneuerung der Innenschale mit einer Verbesserung der Dämmwirkung und der Integration der Heizfunktion kombiniert wird. Bauherr und Heizungsplaner standen der Wandheizung anfangs durchaus skeptisch gegenüber. Die positiven Einflüsse auf Raumklima und Feuchteschutz der Fachwerkwand wurden zwar anerkannt, demgegenüber aber Zweifel an der ausreichenden Heizwirkung und der Regelungsfähigkeit der Anlage geäußert.

Um diese Bedenken zu mindern, wurde zunächst - gleichrangig zur „reinen“ Wandheizung - das Konzept eines kombinierten Systems aus abschnittsweiser Wandheizung und lokal ergänzenden Heizkörpern als Alternativlösung bearbeitet. Die Funktionalität und technische Klarheit einer „Lösung im System“ überzeugten jedoch im weiteren Planungsverlauf alle Beteiligten, so dass auf zusätzliche Heizkörper verzichtet werden konnte. Um Vorbehalte und Unsicherheiten beim beauftragten Fachplanungsbüro entgegenzuwirken, erhielt in der Konzeptphase ein in der Planung von Wandheizungen (im Folgenden auch „Hüllflächen-Temperierung“ genannt) versiertes Ingenieurbüro einen Auftrag zur Beratung und Vorbemessung. Das Ingenieurbüro Leipoldt aus Wuppertal erarbeitete eine konzeptionelle Vorplanung⁴, deren Umsetzung in der Folgezeit mit dem Fachplaner Herrn Rittmeier vom Ingenieurbüro für Energietechnik abgestimmt und detailliert wurde.

Hüllflächen-Temperierung

Die Hüllflächen-Temperierung ist ein Heizsystem, das den Aufenthaltsbereich der Personen überwiegend durch Wärmestrahlung der beheizten Flächen aufheizt. Das Heizrohr wird in der Außenwand verlegt. Durch die Einbindung von Wärme in kalten Bauteilen werden die Wärmeverluste des Menschen durch Strahlung zum Bauteil gemindert. Je kleiner der Wärmeverlust des Menschen ist, umso behaglicher empfindet der Mensch den Raumzustand. Kalten Flächen, wie z.B. Fenstern, werden warme Zonen zugeordnet. Der Strahlungsaustausch des Menschen mit den kälteren Raumumfassungsflächen wird positiv beeinflusst.

Die Erfahrungen mit der Hüllflächen-Temperierung zeigen, dass bei gleicher Behaglichkeit die mittleren Raumtemperaturen niedriger sein können. Durch den geringen konvektiven Wärmeübergang - Wandoberfläche/Raumluft – im Falle niedriger Heiztemperaturen ist die thermische Luftbewegung im Raum sehr gering. Durch die geringen Auftriebskräfte ist die Staubfracht im Verhältnis zu statischen Heizflächen weniger ausgeprägt. Durch die Montage von Heizrohren auf den Außenwänden ist es möglich, Taupunktunterschreitungen an den erwärmten Oberflächen zu verhindern. An Außenbauteilen ist auf eine ausreichende Dämmschicht hinter der Heizebene zu achten.

⁴ Icking, G.: Ingenieurbüro Dietmar Leipoldt, Abschnitt Heizung im ZHD-Grobkonzept, Fulda 2000

Messungen der relativen Feuchtigkeit in anderen Gebäuden ergaben im Winter, dass aufgrund der geringeren Lufttemperatur die mittlere Luftfeuchtigkeit im Raum höher ist. Die Erfahrungen in mehreren Baumaßnahmen zeigten, dass bei Raumtemperaturen von + 19° C keine Einschränkung der Behaglichkeit auftritt.

Systemaufbau

Grundlage des Systemaufbaus sind die im Kapitel 3.1.1 erläuterten Wandkonstruktionen mit einer Innendämmung aus Leichtlehm und Lehmputz. Die Hüllflächen-Temperierung arbeitet bei Einbinden des Heizrohres in den Leichtlehm nicht optimal. Zur optimierten Leistungsabgabe des Systems wurde vorgeschlagen, im Bereich des Leichtlehms an der Rauminnenseite extra Heiztaschen auszubilden. In diese Taschen wird die Rohrleitung eingebaut. Die Heiztaschen werden mit dem Aufbringen des Innenputzes vollständig mit dem Lehmputz geschlossen. Durch die hohe Dichte, die gute Wärmeleitung und die damit verbundene spezifische Wärmekapazität ist ein optimaler Wärmespeicher vorhanden.

Alternativlösung: Statische Heizflächen

Bei Einsatz von statischen Heizflächen, zur Beheizung des Gebäudes, können die oben genannten Vorteile der niedrigeren Raumtemperaturen, der kleinen Temperaturspreizung und der höheren relativen Feuchte nicht genutzt werden. Die punktuelle Installation von Heizflächen lässt keine flächige Temperierung von Problemzonen zu. Ein weiterer Vorteil der Hüllflächen-Temperierung ist, dass die Räume ihren ursprünglichen Charakter behalten. Übliche Heizflächen sind sichtbar vorzugsweise unterhalb der Fenster an den Außenwänden montiert. Bei der Hüllflächen-Temperierung bleiben die Wände frei. Die freie Möblierung des Raumes ist durch das Freihalten der beheizten Wandfläche allerdings eingeschränkt.

3.2.2 Planung und Ausführung

Die heiztechnische Versorgung des Gebäudes erfolgt über eine Fernwärme-Anschlußstation. Energieträger der Fernwärmeerzeugung ist Erdgas. Die Fernwärmeübergabestation befindet sich im Kellergeschoss des Hauptgebäudes. Sie verfügt abnehmerseitig über vier voneinander unabhängige Heizkreise. Die Hausanschlussstation besitzt folgende Eingangsparameter. Spreizung max.: VL / RL = 95 / 70 °C, Leistung max.: 70 kW

Die Raumheizung erfolgt mit einer Warmwasserheizung, die als Wandflächenheizung mit unter Putz verlegten WICU-Rohrleitungen (Kupfer mit Kunststoffmantel) ausgebildet ist. Zur nutzerabhängigen Beeinflussung sind in jedem Heizkreis Thermostatventile (Unibox) angeordnet. Über diese voreinstellbaren Ventile wird gleichzeitig der hydraulische Abgleich sichergestellt. Daneben verfügen diese Reglereinheiten noch über eine Automatik-Entlüftung.

Im Gegensatz zum so genannten „Temperiersystem“ im direkten Kontakt mit der Wandkonstruktion, dessen Wirkungsweise stark umstritten ist⁵, handelt es sich im Rentamt um eine Wandheizung mit Dämmschicht zur Verminderung der Transmissionsverluste.

⁵ siehe auch: Arbeitsgruppe TEGEBAU, Projektübergreifender Bericht, Leipzig / Potsdam, Mai 2005

Zur Erarbeitung der Ausschreibungsunterlagen waren diverse Abstimmungen zwischen dem beauftragten Fachingenieurbüro, dem beratenden Ingenieur sowie dem Fachmann für den Lehmputz erforderlich. Die konzeptionelle Vorplanung durch den beratenden Ingenieur beinhaltete Vorgaben zur generellen Ausführung und Anordnung der Wandheizung sowie zur Auslegung und Dimensionierung des Systems. Auf Grundlage der Wärmebedarfsberechnung nach DIN 4701 sowie eigener praktischer Erfahrungen erfolgte die Vorbemessung der Hüllflächen-Temperierung (Leitungslänge und Durchfluss) unter Berücksichtigung von individuellen Korrekturfaktoren.

Durch den Fachplaner wurde mit Verweis auf eine Dimensionierung nach den „anerkannten Regeln der Technik“ eine größere Heizleistung und damit Rohrlänge je Raum vorgesehen als im Konzept empfohlen. Durch die größere Anzahl von Heizrohren auf der Wand war die Ausführung von speziellen Heiztaschen im Lehmputz nicht mehr sinnvoll. Der die Heizrohre umschließende Lehmputz hat eine relativ hohe Dichte und eine gute Wärmeleitung. Durch die damit verbundene große spezifische Wärmekapazität verläuft die Wärmespeicherung effektiv.

Zur Beheizung des Gebäudes wurden Heizkreise angelegt. Tabelle 4 zeigt die Daten der einzelnen Heizkreise. Im Ratssaal wird zusätzlich die Frischluft vorgewärmt.

| | Heizkreis 1 | Heizkreis 2 | Heizkreis 3 | Heizkreis 4 |
|--------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|
| Bezeichnung | Büro | WC/ Nebenbereiche | Ratssaal | Lüftung |
| Leistung | 41 KW | 11 KW | 9,5 kW | 8 kW |
| Spreizung | 70 / 55 °C | 70 / 60 °C | 70 / 55 °C | 70 / 55 °C |

Tabelle 4 Technische Angaben zu den Heizkreisen

Zur Befestigung der Rohre auf der Lattung dienen aufgeschraubte Alublech-Streifen. An den Wendepunkten wurden die Rohre zusätzlich zu ihrem Kunststoffmantel mit Schaumstoffschläuchen ummantelt, um thermische Dehnungen ohne Zwängungen zuzulassen. Es ist nicht auszuschließen, dass durch die kraftschlüssige Befestigung die thermischen Dehnungen der Rohre auf die Lattung übertragen werden (siehe Kapitel 3.2.2)

Regelung

Die Grundregelung der Heizungs-Vorlauftemperatur erfolgt witterungsgeführt in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Weitere Grundfunktionen der übergeordneten Regelung sind die Wochenend- und Nachtabsenkungen und die Abschaltung der Heizkreise bei bestimmten Außentemperaturen. Zur nutzerabhängigen Beeinflussung sind in jedem Heizkreis Thermostatventile (Unibox) angeordnet. Über diese voreinstellbaren Ventile wird gleichzeitig der hydraulische Abgleich sichergestellt. Daneben verfügen diese Reglereinheiten noch über eine Automatik-Entlüftung.



Abbildung 13 Beispiel für Rohrverlegung auf der Wand, Raum 0.4



Abbildung 14 Heizrohre im Sockel- und Brüstungsbereich sowie Fensterumfahrung



Abbildung 15 Detail der Rohrinstallation am Wandmodell

Die Befestigung vor Ort erfolgte mit Aluminiumblechstreifen anstatt der hier sichtbaren Rohrschelle.

3.3 Lüftung

3.3.1 Konzept

Ventilation und Infiltration

Bei Gebäuden erfolgt der gezielte Luftaustausch (Ventilation) über:

- bewusste Fensterlüftung
- mechanische Lüftung

Der unkontrollierte Luftaustausch (Infiltration) erfolgt über Undichtheiten der Bauhülle:

- Undichtheiten von Flächenbauteilen
- Undichte Anschlüsse bei Bauteil- oder Schichtwechsel
- Undichtheiten an beweglichen Elementen (Türen, Fenster etc.)

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) regelt die Anforderungen an die Dichtheit von Gebäuden generell sowie außen liegender Fenster im speziellen. Die Definition von Grenzwerten nach EnEV / DIN 12207 für die zulässige Fugendurchlässigkeit erfolgt mit dem Ziel der Begrenzung der Lüftungswärmeverluste. Eine zu große Fugenlüftung führt zu einem unwirtschaftlichen Heizbetrieb. Unabhängig von dieser ökonomischen und umweltpolitischen Zielsetzung ist auf die Sicherung einer hygienisch und bautenschutztechnisch erforderlichen Grundlüftung des Raumes zu achten. Die Grundlüftung eines Raumes dient zur Gewährleistung des Wohlbefindens der Bewohner / Nutzer und zur Sicherung des Feuchteschutzes der Bausubstanz. Die DIN 1946 Teil 2 nennt Werte für den personenbezogenen Mindestluftstrom. Für Büroräume sind 40 m³/h pro Person anzusetzen.

Der Raumlüftung kommt eine wesentliche Funktion zur Sicherung der beabsichtigten Nutzung zu. Das gilt in besonderem Maße in einem öffentlich genutzten Gebäude. Erfahrungsgemäß besteht hier ein hohes Maß an Sensibilität gegenüber raumklimatischen Belastungen. Die Sicherung eines behaglichen Raumklimas sowie der Feuchteschutz der Fachwerkkonstruktion erfordern eine Lüftungskonzeption, die mit der Ausführung der Bauhülle und der Art der Heizung abgestimmt ist.

Ähnlich dem Vorgehen in der konzeptionellen Heizungsplanung entschieden sich die Projektleiter zur Einbindung eines Spezialisten für Beratung und Konzeptplanung. Die Ingenieurgemeinschaft Bau+Energie+Umwelt aus Springe-Eldagsen erhielt einen Auftrag zur Entwicklung alternativer Lüftungsstrategien für das Bürogebäude sowie zur planungsbegleitenden Beratung.

Im der konzeptionellen Vorplanung wurden verschiedene zentrale und dezentrale Lüftungssysteme für das Gebäude untersucht. Ein zentrales Zu- oder Abluftsystem mit horizontalem Kanalverzug wäre aufgrund der Fachwerkstruktur mit quer liegenden Deckenbalken technisch und formal nicht befriedigend lösbar. Letztlich wurde auf eine Kombination einer natürlichen Grundlüftung mit einer durch dezentrale Abluftventile unterstützten Bedarfslüftung orientiert.

Das im Förderantrag benannte Prinzip der Kopplung von einfachen gebäudeintegrierten Lösungen für die Grundlast mit einer nutzungsabhängigen raumweisen Feinregelung wurde im Fall der Lüftung konsequent umgesetzt. Die nutzer- und technikenabhängige Grundlüftung des Gebäudes erfolgt über die Bauteilfugen der Bauhülle. Die individuelle Lüftung der Büroräume erfolgt über die dezentralen Abluftventile sowie durch manuelle Fensterlüftung. Zur Abfuhr der Feuchte- und Geruchslasten aus den Sanitärbereichen dient eine Permanentlüftung in zwei Schaltstufen.

In das Lüftungskonzept des Rentamtes ist eine „Bautenschutzfunktion“ integriert. Um einen konvektiv bedingten Feuchteeintrag in die innengedämmten Fachwerkwände sowie in die Balkenköpfe der Decke zu vermeiden, wird Wert auf eine relativ luftdichte Wandkonstruktion gelegt. Eine völlige Dichtheit der Bauhülle wird im Sinne der geforderten Grundlüftung über Infiltration durch Bauteilfugen jedoch nicht angestrebt. Eine dezentrale Abluftanlage erzeugt Unterdruck in den Arbeitsräumen. Damit können der konvektive Feuchteeintrag in das Fachwerk und damit die Gefahr von Tauwasser reduziert werden. Der größte Teil der Frischluft soll über die Undichtheit der Fensterfugen einströmen.

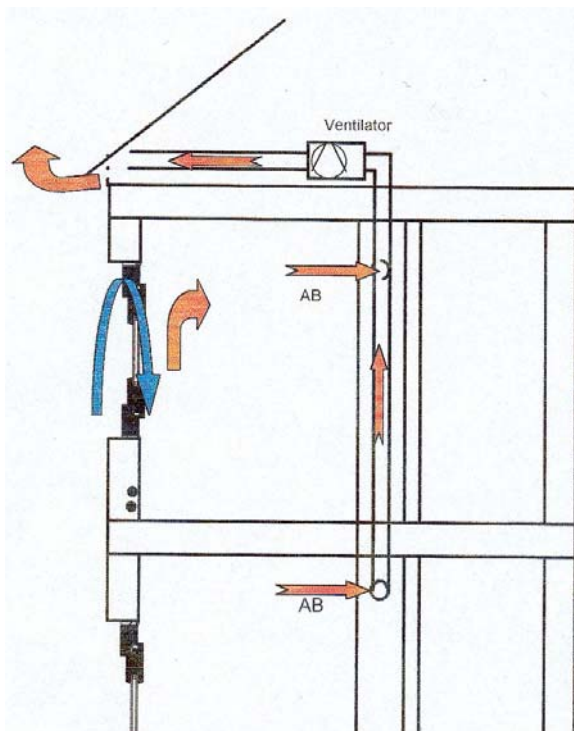


Abbildung 16 Prinzipskizze Lüftung

Prinzipskizze zur Lüftung der Büroräume, entgegen der Darstellung wird die Abluft nicht über die Traufe ausgeblasen, sondern über Ablufthauben in der Dachfläche gezielt nach außen gebracht.

Das Lüftungsprinzip eines beispielhaften Raumes ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Zuluft (auf der Darstellung blau) strömt über die Fenster ins Gebäude. Die Abluft (auf der Darstellung orange) wird in den Büroräumen abgesaugt und über Schächte abgeführt. Diese Schächte befinden sich in der Regel an den Standorten der ehemals im Gebäude vorhandenen Schornsteine. Bereits bestehende Durchbrüche in den Decken konnten genutzt werden.

Da der Lufteintritt an den Fenstern gegenüber den Abluftventilen an den Innenwänden zum Flur erfolgt, kann sich eine Querlüftung der Räume mit hoher Lüftungseffektivität ausbilden. Die Regelung der Luftmenge (an/aus, Grundlüftung, Nachtlüftung etc.) kann weitgehend zentral über die Abluftventilatoren erfolgen. Die Eingriffsmöglichkeiten der Nutzer sollen möglichst gering sein. Natürlich ist jederzeit das manuelle Fensteröffnen möglich.

Im Sommer ist bei Bedarf durch gezielte Nachtlüftung eine Auskühlung des Gebäudes möglich.

Einen Sonderfall stellt der Ratssaal dar: Hier wird wegen des Lüftungsbedarfs und Feuchteanfalls während der Nutzung auf eine kontrollierte Be- und Entlüftung über Rohrführung orientiert. Damit ist eine gezielte Luftführung möglich. Aufgrund des höheren Luftwechsels ist eine Erwärmung der Zuluft erforderlich.

Aufgrund des gewählten dezentralen Lüftungskonzeptes ist eine technische Wärmerückgewinnung in den Büroräumen nicht möglich. Auch im Ratssaal mit kontrollierter Be- und Entlüftung kann aufgrund der Infiltration über die Bauhülle eine technisch aufwändige Wärmerückgewinnung nicht wirtschaftlich betrieben werden.

Fensterlüftung (Zuluftfenster)

Während die Abluftführung mit den Ventilatoren geregelt und gezielt eingestellt werden kann, wird die Zuluft weitgehend über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle zugeführt.

Eine technische Alternative besteht im Einbau von regelbaren Einströmventilen in der Außenwand. Eine Realisierung im Rentamt scheitert allerdings sowohl an dem konstruktiven und gestalterischen Eingriff in die Fachwerkfassade wie auch an der schwierigen Integration der Zuluftöffnungen in die Büroräume, zumal keine Heizkörper zum „Kaschieren“ der Öffnungen existieren. Die Luftführung über lokale Einströmventile führt gegenüber der großflächig verteilten Infiltration über Fensterfugen nicht selten zu Behaglichkeitsproblemen durch Luftzug.

Zur Luftführung über die Fenster sind verschiedene Lösungen möglich. Das äußere Fenster bleibt dabei in allen Varianten gleich; daher ein einfachverglastes Fenster ohne Dichtung in historisierenden Formen. Die Lüftung nach innen erfolgt dann jeweils über den mit Außenluft gut durchströmten Fensterkasten. Alternativen zur Lüftung über den Fensterfalz bestehen in der Anordnung von Lüftungsschlitzen im Flügel- oder Blendrahmen bzw. in der Wahl eines Beschlages mit Lüftungsstellung. Die Vor- und Nachteile der Varianten sind in Tabelle 5 dargestellt.

Nach intensiver Diskussion der Arbeitsgruppe fiel die Entscheidung zugunsten der Belüftung des Raumes über die natürlichen Fugen im Fensterfalz. Damit verbunden war die Frage nach der Ausführung der Falzfuge und dem geeigneten Dichtungsmaterial.




| | A Lüftung über Fensterfalz | B Lüftungsschlitz | C Lüftung über Beschlag |
|--------------------|---|--|---|
| |  |  |  |
| Erläuterung | <ul style="list-style-type: none"> ▪ zur Sicherung der Zuluftfunktion wäre der Verzicht auf Dichtungen in beiden Fensterebenen konsequent ▪ dann jedoch Gefahr von Zugluft bei Wind, Schallbelastung und erheblicher Kondensatausfall im Winter im Fensterkasten ▪ Einsatz spezieller, formstabiler Dichtungen und ggf. nachträgliche Herausnahme einzelner Abschnitte | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fensterfuge dicht (Dichtung) ▪ zusätzliche Lüftungsöffnung in das Fenster integrieren ▪ Öffnung in Blendrahmen einfräsen und Lüftungselement einsetzen ▪ relativ genaue Einregulierung der benötigten Luftmenge über Schieberegler oder Klappen möglich | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fensterfuge dicht (Dichtung) ▪ Dreh-Kipp-Beschlag mit Funktion „Spaltlüftung“ ▪ in dieser Mittelstellung zwischen „auf“ und „zu“ schließt der Flügel im oberen Bereich nicht völlig (leichte Kippstellung) so dass Luft eintreten kann ▪ Lufteintritt ähnlich der Variante „Lüftung über Fuge“ |
| Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorerwärmung der Zuluft im Fensterkasten ▪ gleichmäßige Zuströmung bei Nutzung der gesamten Fugenlänge ▪ geringe Eingriffsmöglichkeiten durch Nutzer ▪ traditionelle Lösung ohne optische Beeinträchtigung | <ul style="list-style-type: none"> ▪ gute Regulierung der Luftmenge ▪ während Gebrauch ist eine Feinregelung möglich ▪ recht simple handwerkliche Lösung | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fenster können durch Nutzer problemlos „dicht“ geschlossen werden (z.B. bei Schall oder Wind) ▪ optisch unauffällig |
| Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> ▪ keine „Systemlösung“, ggf. nachträgliche Handarbeit erforderlich ▪ Fenster können durch Nutzer nicht „dicht“ geschlossen werden ▪ während des Gebrauchs keine Feinregelung möglich | <ul style="list-style-type: none"> ▪ große Eingriffsmöglichkeiten durch Nutzer ▪ Blendrahmen ca. 20 mm breiter, Fensterflügel wird kleiner ▪ Gefahr von Zugluft, örtlich konzentrierten Lufteintritt | <ul style="list-style-type: none"> ▪ große Eingriffsmöglichkeiten durch Nutzer ▪ während Gebrauch keine Feinregelung möglich ▪ evtl. nachlassende Funktionalität durch mechanischen Verschleiß |

Tabelle 5 Zusammenstellung der Lüftungsvarianten

Prüfung der Fugendurchlässigkeit

Nach der Festlegung auf eine Lösungsvariante mit Zuluffführung über die Fensterfugen (Variante A) galt es, die geeignete Ausführung der Fugendichtung im Fensterfalz zu finden. Im Prüfstand der Fa. Juchheim Fensterbau in Fulda wurden am 05.10.2001 drei verschiedene Dichtungsvarianten eines Kastenfensters gemessen. Das Musterfenster bestand aus einer äußeren Einfachverglasung in historisierender Gliederung sowie einer inneren Einscheiben-Wärmeschutzverglasung. Das äußere Fenster hatte keine Dichtung, im inneren Fenster kamen verschiedene Dichtungen zwischen Fensterrahmen und Fensterflügel zum Einsatz.



Abbildung 17 Kastenfenster im Prüfstand der Firma Juchheim in Fulda



Abbildung 18 Kastenfenster mit abgeklebtem Lüftungsschlitz (Pfeil)

| Merkmal | Beschreibung |
|-------------|------------------|
| Fensterart | Kastenfenster |
| Material | Holzfenster weiß |
| Höhe | 170 cm |
| Breite | 97 cm |
| Fügelänge I | 495 cm |

Tabelle 6 Angaben zum Prüffenster

| | Variante 1 | | | Variante 2 | | | Variante 3 | | |
|---|------------------------------|------|------|------------------------------|------|------|--|------|------|
| Dichtungsart Innenfenster | schwarz geriffelt (steif) | | | weiß Lippen (weich, 5 mm) | | | weiße Lippen (weich, 5 mm) | | |
| Dichtungs- ausführung | komplett | | | komplett | | | Ausnahme eines ca. 10 cm langen Stückes im oberen Flügelholz | | |
| Lüftungsschlitz | abgeklebt | | | abgeklebt | | | abgeklebt | | |
| Druck [Pa] | 50 | 100 | 150 | 50 | 100 | 150 | 50 | 100 | 150 |
| Volmenstrom V [m ³ /h] | 11 | 17 | 24 | 3,3 | 5,8 | 7 | 8 | 13 | 16 |
| Fugendurchlässig- keit V _f [m ³ /hm] | 2,2 | 3,4 | 4,8 | 0,7 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 2,6 | 3,2 |
| Fugendurchlaß- koeffizient a | 0,75 | 0,73 | 0,78 | 0,22 | 0,25 | 0,23 | 0,54 | 0,56 | 0,52 |

Tabelle 7 Beschreibung der Varianten und Angabe der Messergebnisse

Als Vergleichswert wurde aus den Messwerten jeweils der Fugendurchlasskoeffizient (a-Wert) nach DIN18055 ermittelt. Bei einer 4. Variante mit offenem Lüftungsschlitz war eine Messung nicht möglich.

Parallel zu den Untersuchungen im Prüfstand erfolgten Berechnungen zur Dimensionierung der Fugenöffnungen an den Fenstern durchgeführt. Bei Berücksichtigung der effektiven Fugenlängen sowie der Abluft-Volumenströme entsprechend der Lüftungsplanung und bei Annahme eines Differenzdruckes von 5-10 Pa zwischen Raumluft und Außenluft ist ein mittlerer a-Wert von ca. 0,8 m³/hm Pa^{2/3} erforderlich. Dabei wird angenommen, dass alle Fenster gleichzeitig als Zuluftfenster dienen, ein Extremfall der bei natürlicher Lüftung kaum auftritt, im Falle der raumweisen Abluftführung aber durchaus real sein kann.

Allerdings ergeben sich je nach Verhältnis von Raumgröße und verfügbarer Fugenlänge recht unterschiedliche „a-Sollwerte“ für die einzelnen Räume. Die planerische Vorgabe und Ausschreibung von Fenstertypen mit raumweise differierenden Anforderungen an die Fugendurchlässigkeit ist jedoch nicht praktikabel.

Deshalb wurde auf folgendes Verfahren orientiert: Einbau relativ dichter Fenster mit üblicher Lippendichtung (Variante 2) und Anpassung an individuelle Raumsituationen nach Fertigstellung des Gebäudes. Dazu war die Prüfung des Luftwechsels in Musterräumen mit dem BlowerDoor Verfahren vorgesehen (siehe Kapitel 4.5.3). Je nach den Messergebnissen in diesen Referenzräumen können zur Sicherung der Zuluftmenge dann 10 bis 40 cm lange Teilstücke der Dichtung problemlos wieder entfernt werden.

Entgegen dem Einsatz einer „undichten“ Dichtung (Variante 1, Tabelle 7) bleibt durch dieses Vorgehen ein flexibles Reagieren auf die schwer vorhersagbaren Lüftungsverhältnisse im alten Fachwerkhaus möglich.

3.3.2 Planung und Ausführung

Lüftungsanlage

Das Haus besitzt eine Abluftanlage, die in sechs Stränge aufgeteilt ist. Die durchgängige Luftführung in vertikaler Richtung, vom Erd- zum Dachgeschoss, erfolgt mit Lüftungselementen aus Wickelfalzrohr. Im ungenutzten Dachraum befinden sich schallgedämmte Radial-Rohrventilatoren, welche die Luft über optisch angepasste Dachlüfterhauben nach außen befördern.

Die Abluft wird über einstellbare Ventilatoren in den Sanitarräumen sowie in den Büroräumen im Fachwerkteil abgesaugt. In die Abluftventile sind Volumenstrombegrenzer entsprechend den raumbezogenen Planungsvorgaben installiert. Die Beeinflussung der voreingestellten Luftmengen im Kanalnetz durch individuelle Einstellungen an den Abluftventilen wird dadurch gemindert. Die Zuluft gelangt ungerichtet über die Außenfassade über die Luftdurchlässigkeit der Fenster und über konstruktiv gegebene Undichtheiten in die Räume. Eine Fensterlüftung ist bei Bedarf möglich. Lediglich im Ratssaal erfolgt eine kontrollierte Zu- und Ablufführung über ein Rohrsystem mit Zuluftvorwärmung.



Abbildung 19 Zusammenschluss von Kanälen an einem Knotenpunkt



Abbildung 20 Verkleidete Lüftungsrohre mit Abluftventil

Die Deckendurchführung erfolgte mit Brandschutzklappe im Rohr und Brandschutzkasten aus Promatwerkstoff.

Regelung

Abluftanlage Bürobereich

- Winterbetrieb: durchgängig während der Betriebszeiten (ca. 7 bis 17 Uhr)
- Sommerbetrieb: durchgängiger auf die Nachstunden begrenzter Betrieb, Zwangsweiser Intervallbetrieb über den restlichen Tagesgang

Abluftanlage WC-Bereich

- Schaltung analog zu den Anlagen im Bürobereich
- Zusätzlich Überlagerung durch Türkontakt und Bewegungsmelder

Nachlauf-Intervallschalter nehmen die Lüftung in eingestellten Zeitintervallen automatisch in Betrieb, wenn innerhalb dieser Zeitphase keine Lüftung durch manuelles Einschalten erfolgt. Bei manueller Betätigung (z.B. über Lichtschalter) ist der Nachlauf einstellbar. (3, 6, 9 oder 12 min).

Ausführung der Fenster

Auf Grundlage der in Kapitel 3.3.1 erläuterten technischen Prüfungen wurde die von der AIG zunächst vorgelegte Ausschreibung in einigen Punkten modifiziert. Dabei war zwischen Räumen mit Abluftanlage (Fachwerkteil) und Räumen ohne Abluftanlage (Massivteil) zu unterscheiden. Im ersten Fall bestand zwischen der Vorgabe zum Einbau einer Dichtung in das innere Fenster (Isolierverglasung) und dem Zielwert für die Fugendurchlässigkeit a ($\geq 0,8$) ein Widerspruch. Eine sauber eingebaute Fensterdichtung ergibt weit geringere a -Werte. Recherchen nach „porösen“ Dichtungsprofilen im Fensterfalz, durch die ein „Infiltrieren“ von Frischluft in den Raum erfolgt, waren nicht erfolgreich.

Deshalb wurde auf das bereits erläuterte zweistufige Vorgehen zur praktischen Realisierung der notwendigen Dichtheit/Undichtheit orientiert (Kapitel 3.1.1). In Räumen ohne Abluftanlage (massiver Gebäudeteil) sollte der a -Wert der inneren Fensterebene geringer als bei den Zuluftfenstern ausfallen, um die Kondensatbildung im Fensterkasten zu reduzieren.

Weiterhin wurde empfohlen, die Zielwertvorgabe für den U-Wert des Gesamtsystems der Zuluftfenster von ehemals $1,1 - 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $U = 1,4 - 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zu ändern. Geringere U-Werte sind für ein Zuluftfenster energetisch wenig sinnvoll. Dazu bestehen größere Freiheiten bei der Glasauswahl, der Lichtdurchgang wird verbessert und ggf. Kosten reduziert.

4 Prüfung und Bewertung

4.1 Bauphysikalischer Nachweis



Abbildung 21 zeigt ein Modell des Wandaufbaus im Fachwerkteil, das im Eingangsbereich des Hauses steht. Der Wandaufbau erreicht als Mittelwert zwischen Holz- und Gefachenteil einen U-Wert von ca. $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (40 % Holz, 60 % Ausfachung).

Die Anforderungen der Energie-Einsparverordnung mit einem zulässigen U_{max} von $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für den nachträglichen Einbau von Dämmschichten gemäß dem Bauteilverfahren werden zwar nicht erreicht, jedoch ein für historische Fachwerkgebäude durchaus beachtlicher Dämmwert erzielt.

Eine Vergleichsmessung des tatsächlich erzielten U-Wertes vor Ort ergab mit ca. $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ im untersuchten Wandabschnitt eine deutliche Unterbietung des Rechenwertes.

Abbildung 21 Modell des Wandaufbaus

Zur Prüfung der Feuchtebelastung im Wandquerschnitt erfolgten Berechnungen zum thermohygrischen Bauteilverhalten mit dem Programm COND, Version 1.4.1 der TU Dresden. Diesem Programm liegt ein Berechnungsverfahren zugrunde, welches den Wasserdampf- und den Flüssigwassertransport durch kapillare Stoffe betrachtet. Demgegenüber berücksichtigt das Glaserverfahren, welches nach DIN 4108-3 üblicherweise für Tauwasserberechnungen verwendet wird, lediglich den Wasserdampftransport und rechnet somit weniger genau. Zur Bewertung dient die Kondensatmenge am Ende der Kondensationsperiode, die unter $1 \text{ kg}/\text{m}^2$ (für Holzbauteile eher unter $0,5 \text{ kg}/\text{m}^2$) liegen sollte.

Die folgenden Berechnungen zeigen die feuchtetechnische Funktionsfähigkeit des Wandaufbaus im Regelquerschnitt sowohl im Fachwerkteil wie auch im Massivteil.

Die Wandheizung findet in den Berechnungen keine Berücksichtigung, da ein dauerhafter Betrieb nicht vorausgesetzt werden kann. Tendenziell führt die Wandheizung zu einer positiven Beeinflussung der Feuchtebilanz, wie auch die Ergebnisse der Untersuchungen zur Holzfeuchteentwicklung belegen (siehe Kapitel 4.3).

Konstruktionsaufbau und Materialparameter

| | Material | d [mm] | λ [W/mK] | μ [---] | w_{hyg} [m ³ /m ³] | w_{sat} [m ³ /m ³] | A_w [kg/m ² s ^{0,5}] |
|---|------------------------|--------|------------------|-------------|--|--|---|
| 1 | Lehmputz | 15 | 0,8000 | 15,0 | 0,024 | 0,320 | 0,0450 |
| 2 | Leichtlehm mineralisch | 200 | 0,2100 | 20,0 | 0,014 | 0,300 | 0,0170 |
| 3 | Eiche | 180 | 0,1200 | 80,0 | 0,083 | 0,650 | 0,0040 |

Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion (feuchteabhängig)

U = 0,379 W/(m²K)

Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion (trocken)

U = 0,379 W/(m²K)

Es entsteht kein Kondensat!

Temperatur und Feuchteprofil

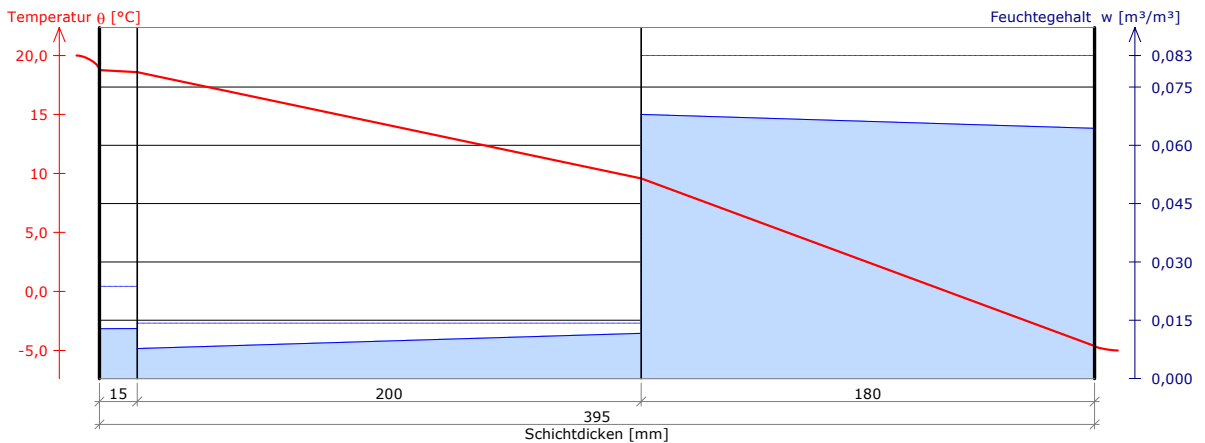


Abbildung 22 Fachwerk-Holz: Berechnung des U-Wertes und des Feuchteprofils

Konstruktionsaufbau und Materialparameter

| | Material | d [mm] | λ [W/mK] | μ [---] | w_{hyg} [m³/m³] | w_{sat} [m³/m³] | A_w [kg/m²s ^{0,5}] |
|---|------------------------|--------|------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 1 | Lehmputz | 15 | 0,8000 | 15,0 | 0,024 | 0,320 | 0,0450 |
| 2 | Leichtlehm mineralisch | 200 | 0,2100 | 20,0 | 0,014 | 0,300 | 0,0170 |
| 3 | Lehmstein / Feldstein | 170 | 1,0000 | 120 | 0,009 | 0,200 | 0,2140 |

Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

| | | | |
|---|--------------------|-------|---------|
| Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion (feuchteabhängig) | U = | 0,763 | W/(m²K) |
| Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion (trocken) | U = | 0,763 | W/(m²K) |
| Kondensatmasse am Ende der Kondensationsperiode (nach COND) | M_c = | 0,127 | kg/m² |
| Hyroskopische Einstellzeit | t_{hyg} = | 21,45 | d |
| Überhyroskopische Einstellzeit | t_c = | 2,13 | a |
| Trocknungszeit | t_{ev} = | 28,14 | d |

Temperatur und Feuchteprofil

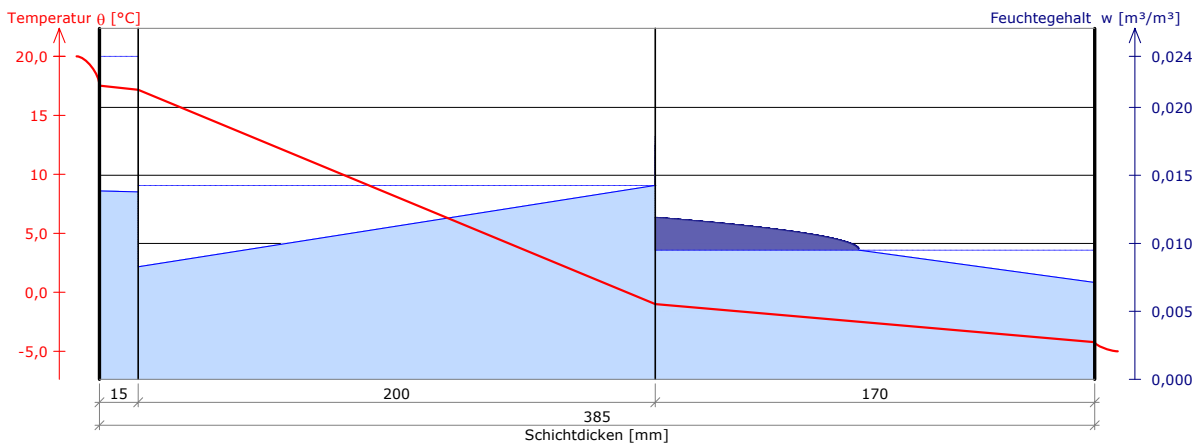


Abbildung 23 Fachwerk-Ausfachung: Berechnung des U-Wertes und Feuchteprofils

Konstruktionsaufbau und Materialparameter

| | Material | d [mm] | λ [W/mK] | μ [---] | w_{hyg} [m ³ /m ³] | w_{sat} [m ³ /m ³] | A_w [kg/m ² s ^{0,5}] |
|---|------------------------|--------|------------------|-------------|--|--|---|
| 1 | Lehmputz | 15 | 0,8000 | 15,0 | 0,024 | 0,320 | 0,0450 |
| 2 | Leichtlehm mineralisch | 150 | 0,2100 | 20,0 | 0,014 | 0,300 | 0,0170 |
| 3 | Bruchstein | 850 | 2,0000 | 200 | 0,009 | 0,200 | 0,2140 |

Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

| | | | |
|---|--------------------|-------|----------------------|
| Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion (feuchteabhängig) | U = | 0,753 | W/(m ² K) |
| Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion (trocken) | U = | 0,753 | W/(m ² K) |
| Kondensatmasse am Ende der Kondensationsperiode (nach COND) | M_c = | 0,058 | kg/m ² |
| Hygroskopische Einstellzeit | t_{hyg} = | 57,57 | d |
| Überhygroskopische Einstellzeit | t_c = | 26,45 | a |
| Trocknungszeit | t_{ev} = | 11,48 | d |

Temperatur und Feuchteprofil

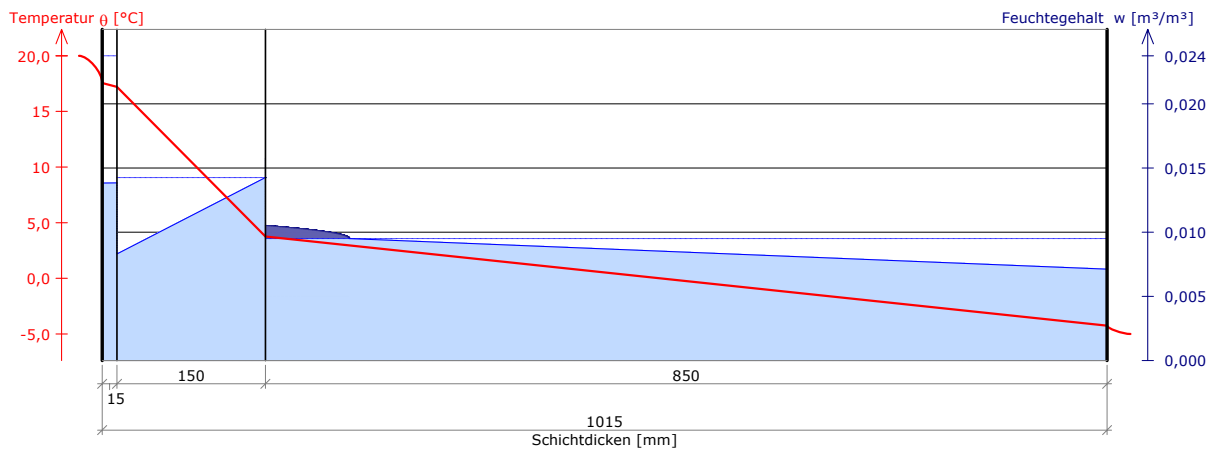


Abbildung 24 Massivteil: Berechnung des U-Wertes und Feuchteprofils

4.2 Langzeitmessung im Musterraum

Zur Bewertung der energetischen Effizienz des eingesetzten Wandheizsystems sowie zum raumklimatischen Verhalten dienten Messungen des Heizenergieverbrauches sowie weitere bauphysikalische Untersuchungen in einem ausgewählten Wandabschnitt. Um Rückschlüsse auf den Wärmeverlust der beheizten Außenwände zu erhalten, wurden vor Fertigstellung der Innenoberflächen in der Wand Temperatursensoren installiert. Zusammen mit den Resultaten von örtlichen Wärmestrommessungen können Aussagen zur Wärmeabgabe nach außen (Transmissionsverlust) sowie zur Wärmeabgabe in den Raum (Heizleistung) getroffen werden. Um ein aussagekräftiges Temperaturprofil zu erhalten, wurden die punktwisen Temperaturmessungen auf der Oberfläche durch Messbilder einer Infrarotkamera ergänzt.

Lage der Räume

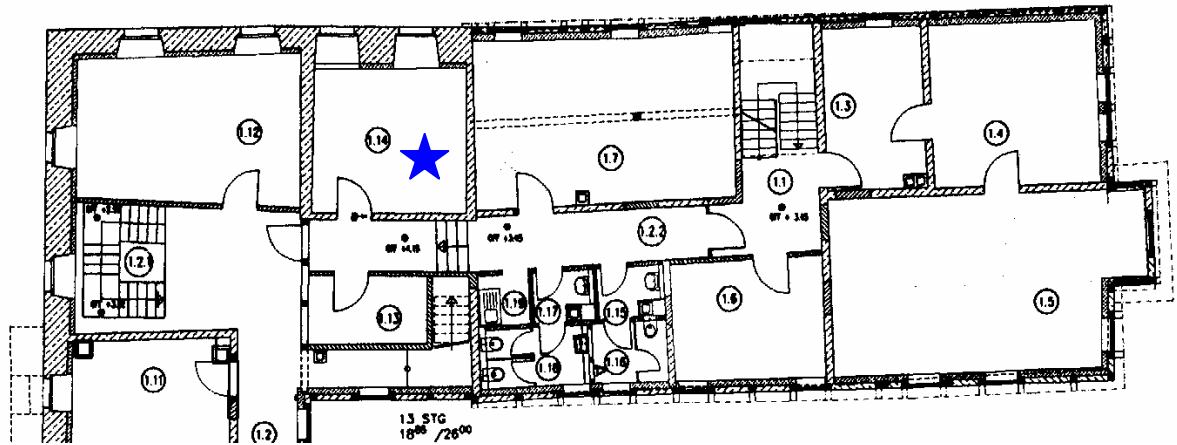


Abbildung 25 Grundriss 1.Obergeschoss

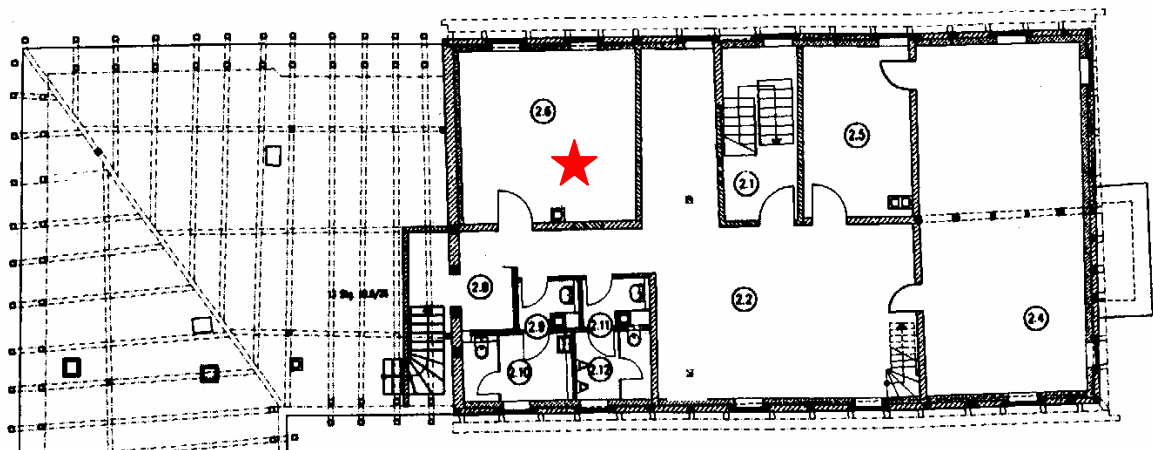


Abbildung 26 Grundriss 2.Obergeschoss

Die Langzeitmessung erfolgte im Raum 2.6 im 2. Obergeschoss (Abbildung 26), eine vergleichende Messung fand im Raum 1.14 statt (Abbildung 25). In den Grundrissen sind die Räume mit einem Stern gekennzeichnet.

Messtechnik

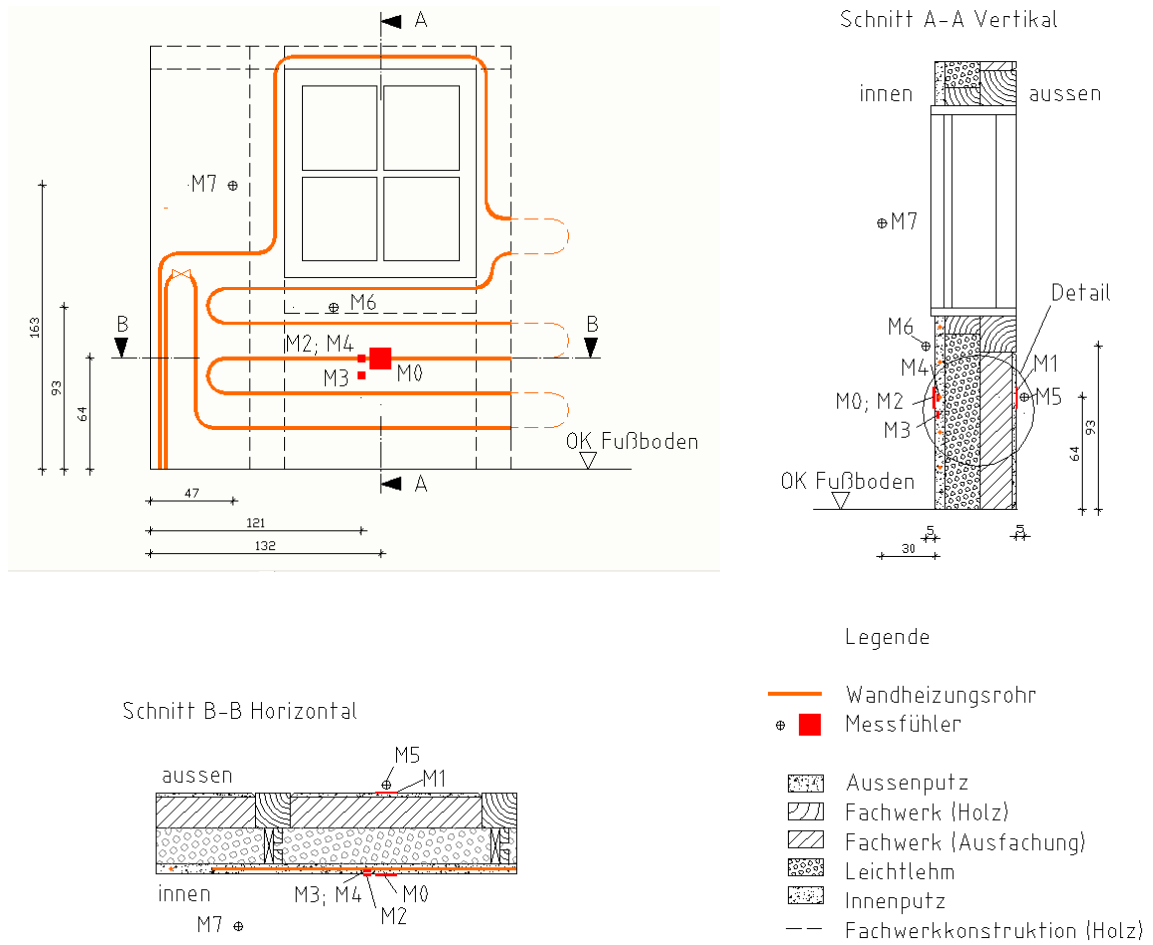


Abbildung 27 Übersicht der im Raum 2.6 installierten Messtechnik

| Bezeichnung | Kurzzeichen | Lage der Messstelle |
|-------------|-------------|-------------------------------------|
| M0 | q(1) | innen Wandoberfläche |
| M1 | q(a) | außen Wandoberfläche |
| M2 | t(i,o) | innen Wandoberfläche |
| M3 | t(wand) | in der Wand zwischen den Heizrohren |
| M4 | t(heiz) | in der Wand auf dem Heizrohr |
| M5 | t(a) | Außenfühler |
| M6 | t(i) | Raumfühler |
| M7 | t(i), rF(i) | Raumfühler auf dem Schrank |

Abbildung 28 Bezeichnung und Lage der Messstellen im Raum 2.6

Für zwei Monate wurde ein weiteres Messgerät im Raum 1.14 installiert. Hier wurden in einem genutzten Büroraum die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte gemessen.

4.2.1 Raumklima

Nutzerverhalten und Behaglichkeit

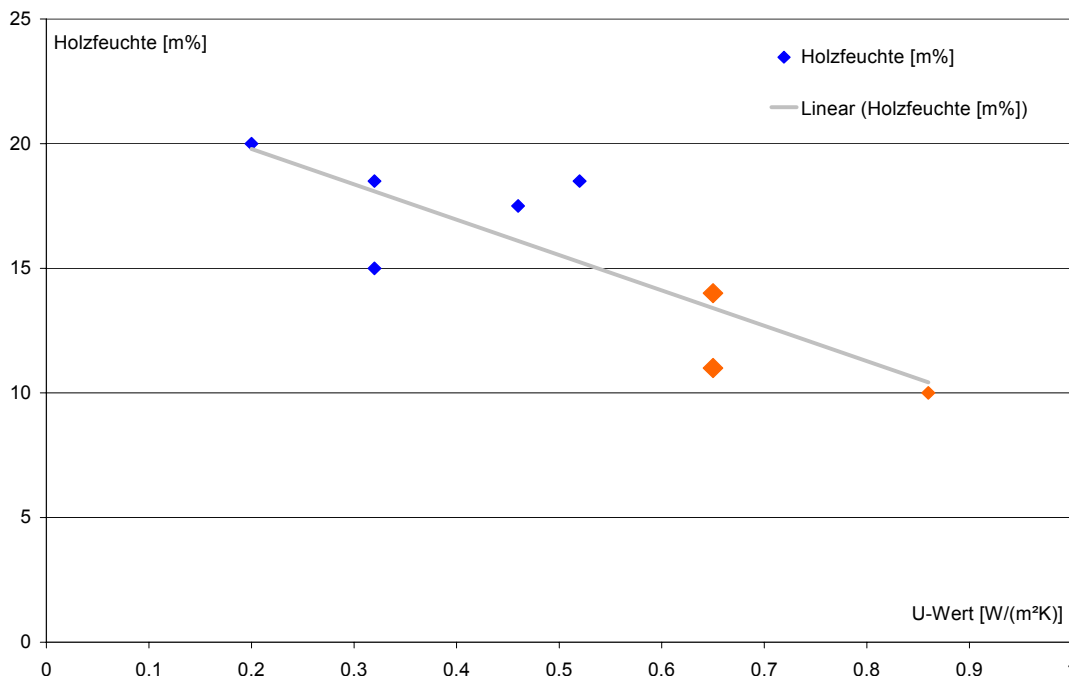


Abbildung 29 Lufttemperaturen und relative Feuchten in den beiden Büroräumen

Ein Vergleich der Büroräume 2.6 und 1.14 zeigt, dass die Innentemperaturen sich kaum unterscheiden. Die relativen Feuchten schwanken im Raum 1.14 (gelb) stärker als im Raum 2.6 (rot). Dafür verantwortlich ist die intensivere Nutzung und Lüftung des Raumes 1.14. Der Raum 2.6 wurde zeitweise nicht genutzt und daher nicht so stark gelüftet. Die Mittelwerte für die Lufttemperatur und die relative Feuchte beider Räume liegen sehr dicht beieinander.

Das deutlich erkennbare Lüften vor und nach Feierabend im Raum 1.14 führt im April je nach Wetterlage zu einem Absinken oder Ansteigen der Raumluftfeuchte.

| Mittelwerte April 2005 | Raum 1.14 | Raum 2.6 |
|------------------------|-----------|----------|
| Lufttemperatur | 21,5 °C | 21,3 °C |
| Relative Feuchte | 36,1 % | 36,6 % |

Abbildung 30 Mittelwerte für den Zeitraum 06.04.2005 bis 29.04.2005

Die Sicherung der geforderten Raumtemperaturen ist mit der Wandheizung unproblematisch, wie auch die Raumtemperaturen während einer kalten Februarwoche in Abbildung 33 zeigen. Anfangs vorhandene Vorbehalte bei Bauherren und Fachplanern hinsichtlich der Leistungsfähigkeit dieser Heizmethode haben sich nicht bestätigt.

Die Behaglichkeit des Raumklimas ist maßgeblich von den Parametern der Luft- und Oberflächentemperatur sowie der relativen Feuchte abhängig. Aus der Fachliteratur wurden geeignete Darstellungen zur Veranschaulichung der Zusammenhänge übernommen und die konkreten Situationen in den Referenzräumen dargestellt.

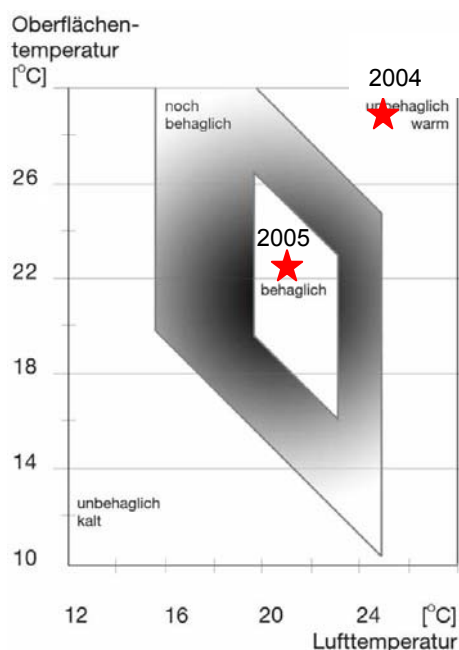


Abbildung 31 Behaglichkeitsfeld für Lufttemperatur und Oberflächentemperatur

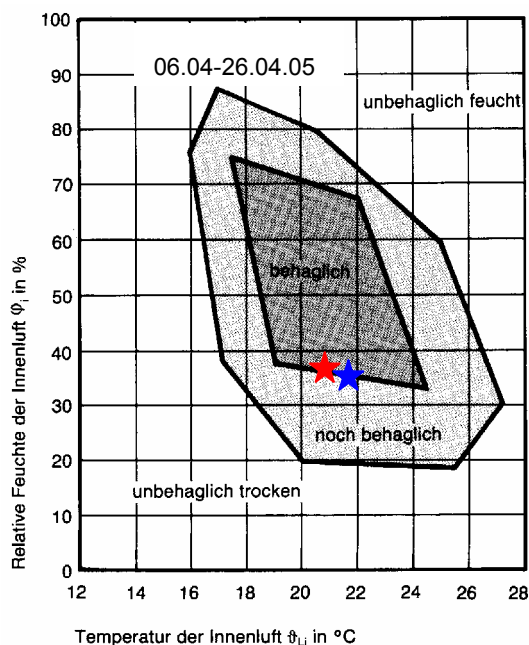


Abbildung 32 Behaglichkeitsfeld für Lufttemperatur und relative Luftfeuchte

| Zeitraum | Mittelwerte | Raum 1.14 | Raum 2.6 |
|-----------------|--------------------------------------|-----------|----------|
| 06.04.-26.04.05 | Lufttemperatur | 21,5 °C | 21,3 °C |
| | Relative Feuchte | 36,1 % | 36,6 % |
| | Mittlere Wandtemperatur (Oberfläche) | | 22,7 |
| 18.02.-29.02.04 | Lufttemperatur | | 25,4 °C |
| | Mittlere Wandtemperatur (Oberfläche) | | 30,0 °C |
| | Empfundene Temperatur | | 27,7°C |
| | Darstellung in den Diagrammen | ★ | ★ |

Abbildung 33 Klima-Mittelwerte für charakteristische Zeiträume

Die sogenannte „empfundene Temperatur“ als Maß für die thermische Behaglichkeit setzt sich zu gleichen Teilen aus der Luft- und der Oberflächentemperatur zusammen. Während der Büronutzung im Jahre 2004 liegt sie in beiden Räumen auf einem recht hohen Wert von ca. 23° C. Dementsprechend liegt die relative Luftfeuchtigkeit auf einem, für zentralbeheizte Räume typischen, Niveau von 30 – 40 %. Als angenehm wird im Winter eine relative Luftfeuchtigkeit von 40-50% empfunden. Eine leichte Absenkung der Raumtemperatur würde eine Erhöhung der relativen Raumluftfeuchte bewirken. Die in Kapitel 3.2.1 vermutete Behaglichkeit bei geringen Raumtemperaturen wird in der Büronutzung noch nicht erzielt.

4.2.2 Beheizte Wand



Abbildung 34 Ansicht Außenwand im Raum 2.6

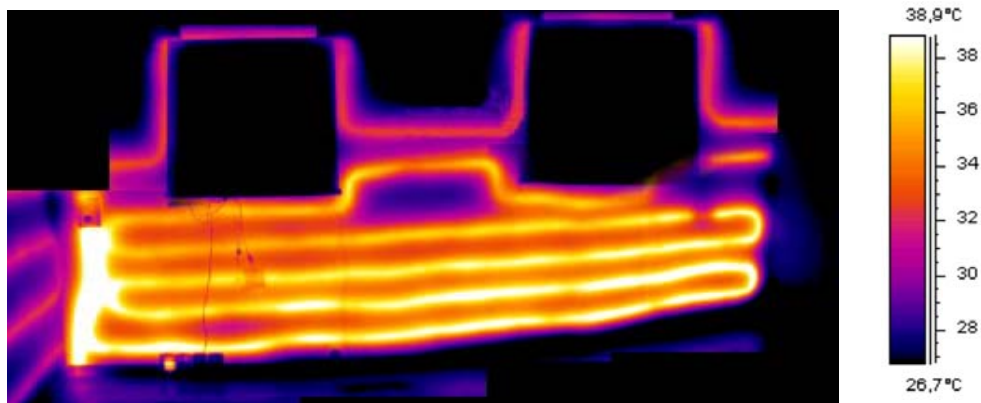
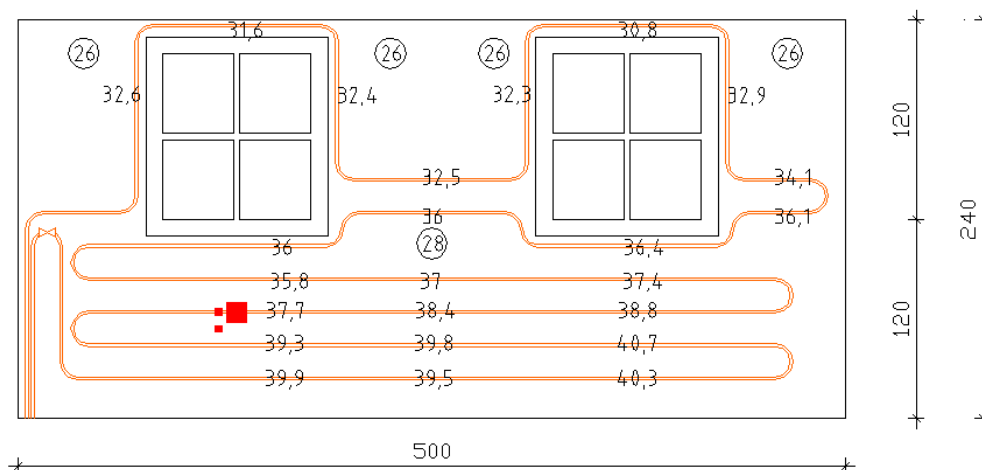


Abbildung 35 IR-Aufnahme der Außenwand (Montage aus mehreren Aufnahmen)



- Legende
- 32,6 Wandtemperatur über dem Heizrohr (gemäß IR-Thermografie)
 - (26) mittlere Wandtemperatur

Abbildung 36 Verlauf der Wandheizungsrohre und Wandtemperaturen

| Nr. | Bezeichnung | Höhe | Länge | Fläche | Mittlere Temperatur | Wärmestrom | Leistung |
|-----|-----------------|--------|--------|----------------------|---------------------|---------------------|----------|
| 1 | Wandheizung | 1,20 m | 5,00 m | 6,00 m ² | 35 °C | 70 W/m ² | 420 W |
| 2 | Zwischenbereich | 0,40 m | 5,00 m | 2,00 m ² | 29 °C | 35 W/m ² | 70 W |
| 3 | unbeheizt | 0,80 m | 5,00 m | 4,00 m ² | 23 °C | 0 W/m ² | 0 W |
| | SUMME | 2,40 m | | 12,00 m ² | 30 °C | | 490 W |

Abbildung 37 Wärmeabgabe der untersuchten Wandfläche

- Die Temperaturbereiche wurden durch die Auswertung von IR -Aufnahmen bestimmt. Bei der IR Aufnahme handelt es sich um eine typische Temperaturverteilung im Heizfall.
- Die Temperaturen der IR Aufnahme wurden um 3°K abgemindert (IR-Messung: 37,7 °C und Messung Temperaturfühler 34,2°C → 37,7°C – 34,2°C = 3,5 °K)
- Der Wärmestrom im Bereich 1 (Wandheizung) wurde messtechnisch ermittelt.
- Die Wärmeströme für die Bereiche 2 + 3 wurden mithilfe der IR-Aufnahmen geschätzt.
- Die mittlere Temperatur in der Wandfläche beträgt 30°C.

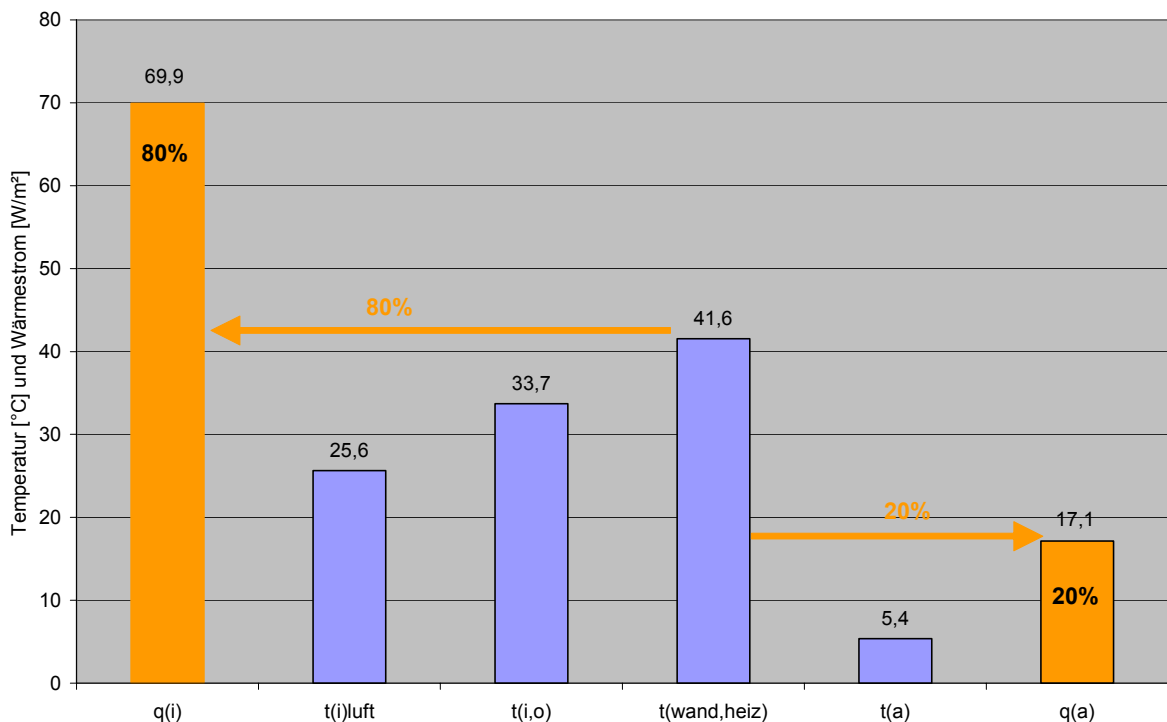


Abbildung 38 Wärmeleistung und Wärmeverlust der Wandheizung

Die für einen Zeitraum von vier Wochen (23.01.2004 – 19.02.2004) gemittelten Werte der Wärmeströme nach innen und außen (q_i und q_a) kennzeichnen das Verhältnis der Wärmeleistung der Wandheizung zum Wärmeverlust durch Transmission nach außen. 80 Prozent der von den Heizrohren in der Wand bereitgestellten Wärme kommt dem Raum zugute, 20 Prozent gehen durch die Außenwand verloren. Bei einer Erhöhung der Wärmedämmung der Außenwand auf das Niveau der EnEV würde sich das Verhältnis auf etwa 85 % zu 15 % verbessern.

4.2.3 Einfluss der Solarstrahlung

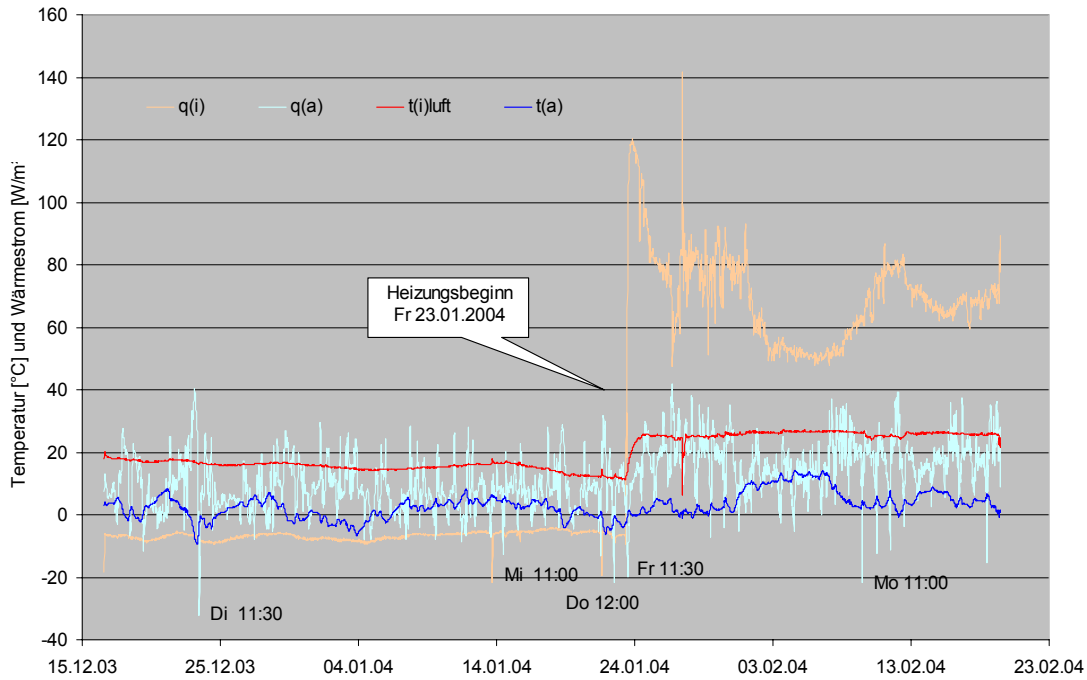


Abbildung 39 Winter 2003/2004 Temperaturen und Wärmeströme innen und außen

Der untersuchte Wandabschnitt befindet sich auf der Nordostwand des Gebäudes. Im Normalfall fließt Wärme vom Raum nach außen (ca. 20 W/m²). Jeweils um die Mittagszeit ergaben sich einzelne negative Spitzen von bis zu -20 W/m². In diesem Zeitraum floss Wärme von außen ins Gebäude. (Abbildung 39 und Abbildung 40).

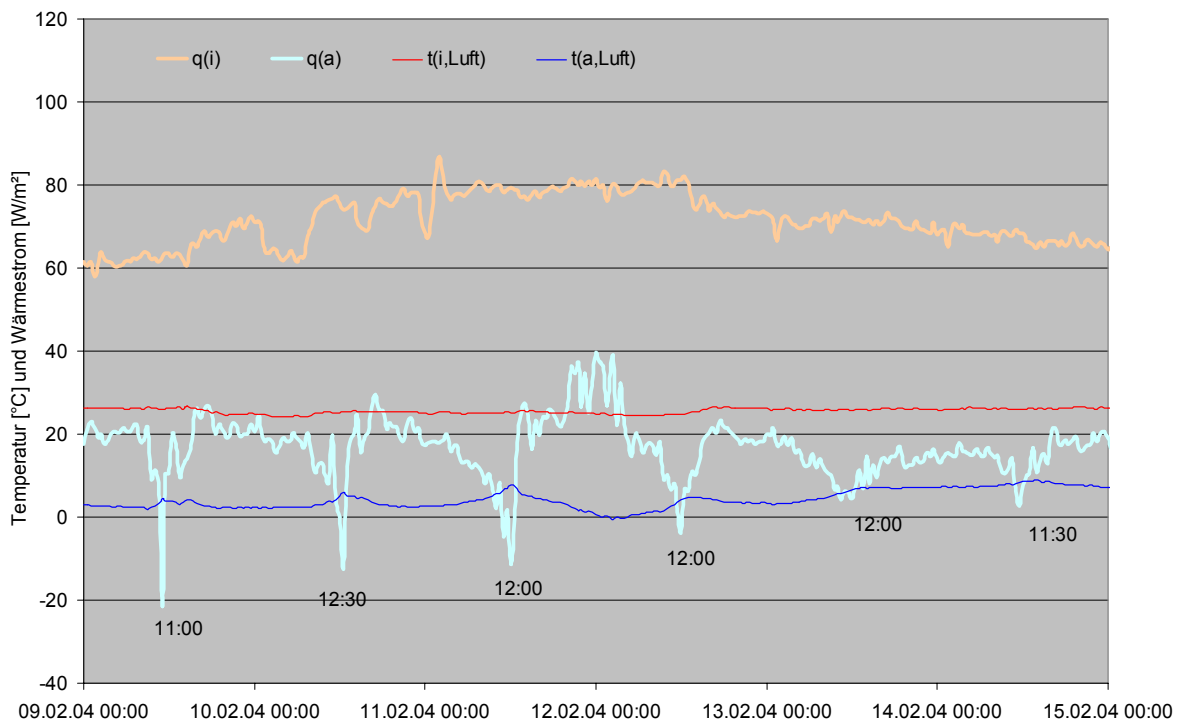
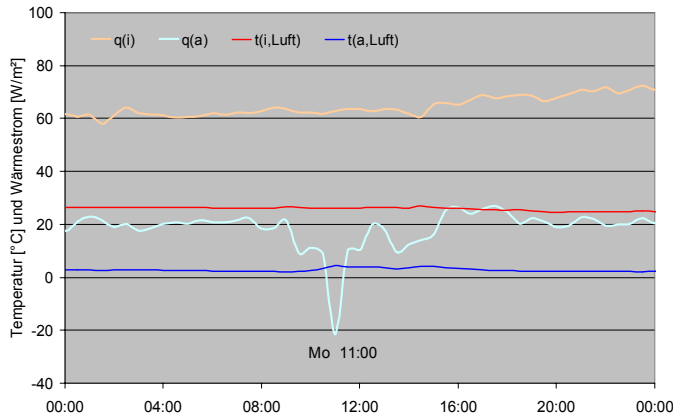


Abbildung 40 09.02. bis 15.02.04 Temperaturen und Wärmeströme innen und außen

Wärmeverlust auf besonnter Wand

Um die Wärmeverhältnisse auf einer besonnten Wand zu beurteilen, erfolgte eine beispielhafte Auswertung der Daten für den 09.02.2004. Der Wärmeabstrom liegt nachts, morgens und abends im Mittel bei ca. 20 W/m². Durch den Einfluss des Sonnenscheins auf der Fassade verringern sich die Werte. (Abbildung 41 und Abbildung 42)



| Zeitraum | Mittelwert q(a) |
|-----------|-----------------------|
| 00-04 Uhr | 20,1 W/m ² |
| 04-08 Uhr | 20,8 W/m ² |
| 08-12 Uhr | 8,5 W/m ² |
| 12-16 Uhr | 17,7 W/m ² |
| 16-20 Uhr | 23,0 W/m ² |
| 20-24 Uhr | 20,8 W/m ² |
| 00-24 Uhr | 18,5 W/m ² |

Abbildung 41 09.02.2004 Temperaturen und Wärmeströme innen und außen

Abbildung 42 09.02.2004 Mittelwerte Wärmefluss nach außen

Bei einem angenommenen Ausgangswert eines Wärmestroms von 20 W/m² nach außen beträgt die Minderung des Wärmeverlustes auf der Fassadenfläche am 09.02.2004 in der Zeit von 9:00 bis 15:00 1,28 kW (entspricht 0,21 kW/h). Inwiefern dieser theoretische Wärmegewinn auf der Fassade tatsächlich für den Raum und letztlich für die Heizanlage nutzbar ist, hängt von vielen Faktoren ab. Im Falle der Leichtlehmschale ist gegenüber herkömmlichen Plattendämmsystemen eine höhere Wärmespeicherfähigkeit gegeben und damit tendenziell eine bessere Nutzung von Wärmegewinnen möglich.

Solare Wärmegewinne durch transparente Bauteile

Für die Berechnung des Solargewinns $Q_{S,M}$ wurde angenommen, dass 80% der Tagesstrahlung eines typischen Wintertages auf der Referenzfassade in der Zeit von 9:00 bis 15:00 Uhr auftritt.

$$Q_{S,M} = \sum I_{S,M} * \sum F_F * F_S * F_C * 0,9 * g * A_W * 24h * 0,80 \quad \text{Gewählte Formel (EnEV)}$$

Annahme:

$$Q_{S,M} = 25 \frac{W}{m^2} * 0,7 * 0,9 * 1,0 * 0,9 * 0,6 * 0,64 m^2 * 24 h * 0,8 = 104 W \quad (\text{je Fenster } 9 - 15 \text{ Uhr})$$

Ergebnis:

$$2 \text{ Fenster} * 104 W = 208 W = 0,21 kW \quad (2 \text{ Fenster in der Zeit von } 9-15 \text{ Uhr})$$

In der Abbildung 43 erfolgt eine Gegenüberstellung der Wärmeaufnahme (Sonne) und Wärmeabgabe (Heizung innen). Zumindest für strahlungsreiche Tage ist der Effekt der Wärmeaufnahme über die Fassadenflächen nicht unerheblich, wobei die Heizleistung der Wandheizung dominant bleibt. Aufgrund der kleinen Fenster ist die direkte Einstrahlung gegenüber der Wärmeaufnahme der Fassade eher gering. Allerdings kommt der Wärmeeintrag über die Fenster dem Raum direkt zugute.

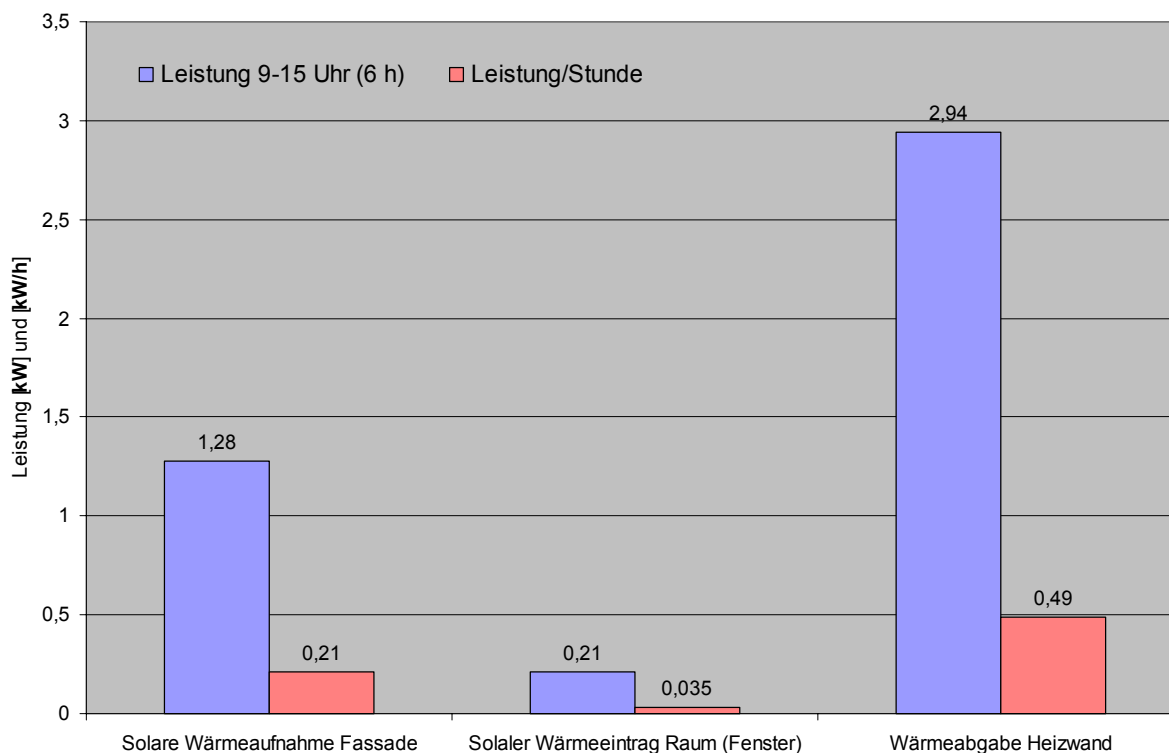


Abbildung 43 Wärmegewinne (Montag 09.02.2004 9-15 Uhr)

4.3 Holzfeuchte

4.3.1 Messverfahren

Die vorhandenen Hölzer wurden teilweise repariert und zum Teil durch neue Hölzer ersetzt. Für das alte Außenfachwerk und die Ersatzhölzer wurde fast ausschließlich Eiche, nur vereinzelt Ulme verwendet. Kritische Aufweichungen sind am ehesten in der Grenzschicht zwischen Fachwerk und Innendämmung zu erwarten, da hier die so genannte Taupunktebene liegt. Die langfristige Entwicklung der Holzfeuchte wird an über 40 Messstellen auf der dem Dämmlehm zugewandten Innenseite des Fachwerks (Kondensatebene) regelmäßig erfasst. Die Holzfeuchte wird jeweils in einer Tiefe von 3 cm ermittelt. Eine Ausnahme bilden die Schwellen, wo die Messpunkte ca. 5 bis 6 cm unter der Holzoberfläche liegen (Nähe Zapfenloch). Die Ermittlung der Holzfeuchte erfolgt durch eine elektrische Widerstandsmessung. Zur Messung der Holzfeuchte wurden 40 mm lange Edelstahlschrauben, mit einem Abstand von 30 mm zueinander, quer zur Holzfaser eingeschraubt. Die Messkabel enden in Dosen im Bereich der Sockelleiste.



Abbildung 44 Zusammenführung von Messleitungen in Aufputz-Installationsdose

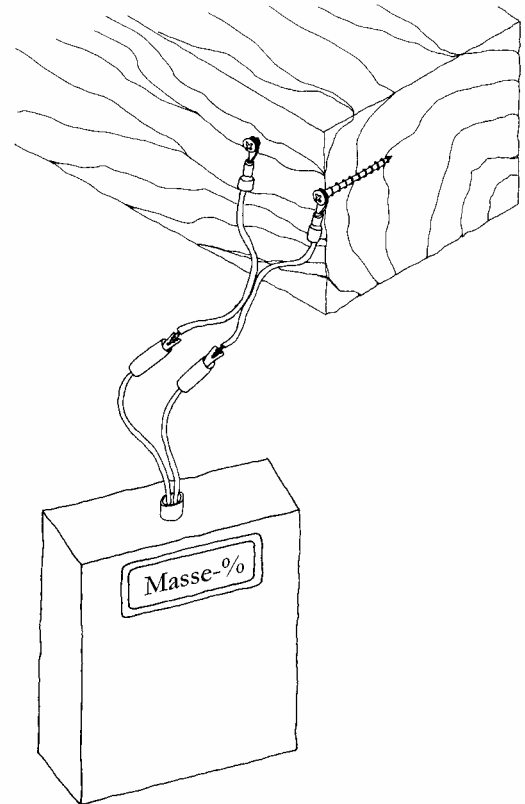


Abbildung 45 Skizze zum Messprinzip



Abbildung 46 Messstellen vor dem Verputzen (Beispielhaft Raum 0.14)



Abbildung 47 Detailansicht Messstelle 0.14/4 (Raum 0.14; Messstelle 4, Fensterstiel)

4.3.2 Lage der Messstellen

Die Messstellen befinden sich in vier vertikalen Hauptachsen, die in den Geschossen durch prägnante Situationen ergänzt werden. Die Holzfeuchte wurde an unterschiedlichen Punkten (Schwellen, Ständer, Rähm, Balkenkopf, Gebäudeecke, Außenwandfläche) gemessen. Die Anordnung der Messstellen erfolgte nach einer Regelanordnung, die jedoch nicht in allen Achsräumen komplett realisiert wurde.

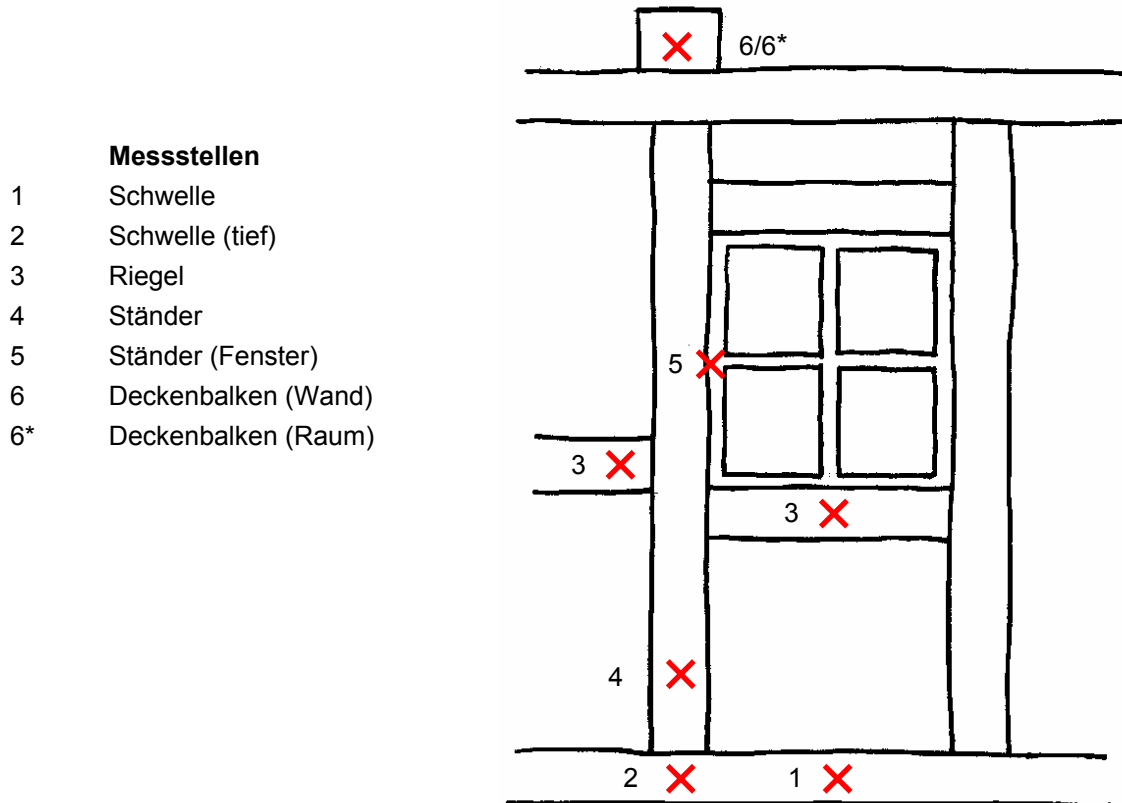


Abbildung 48 Anlage der Messstellen

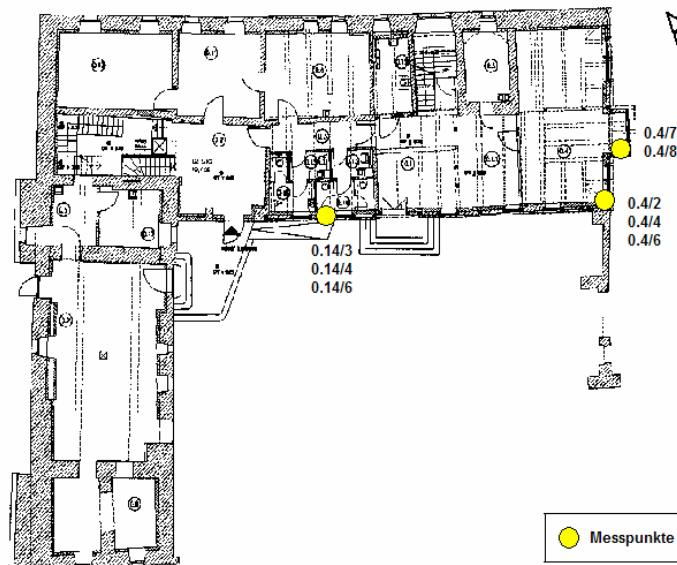


Abbildung 49 Übersicht der Messachsen im Erdgeschoss

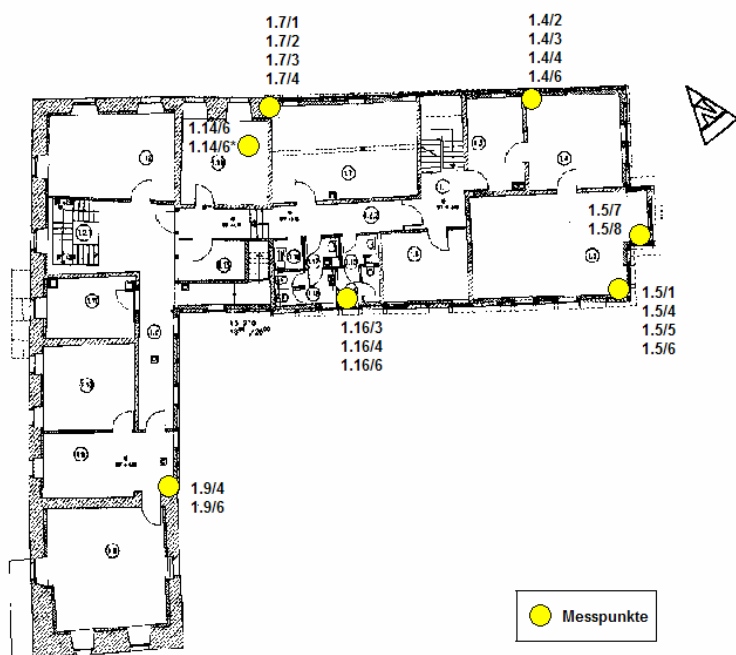


Abbildung 50 Übersicht der Messachsen im 1. Obergeschoss

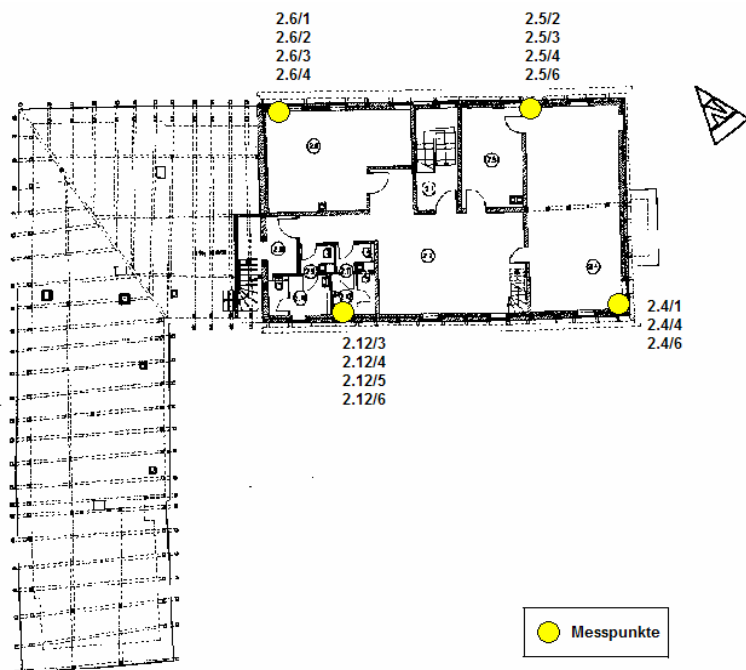


Abbildung 51 Übersicht der Messachsen im 2. Obergeschoss

4.3.3 Übersicht der Ergebnisse

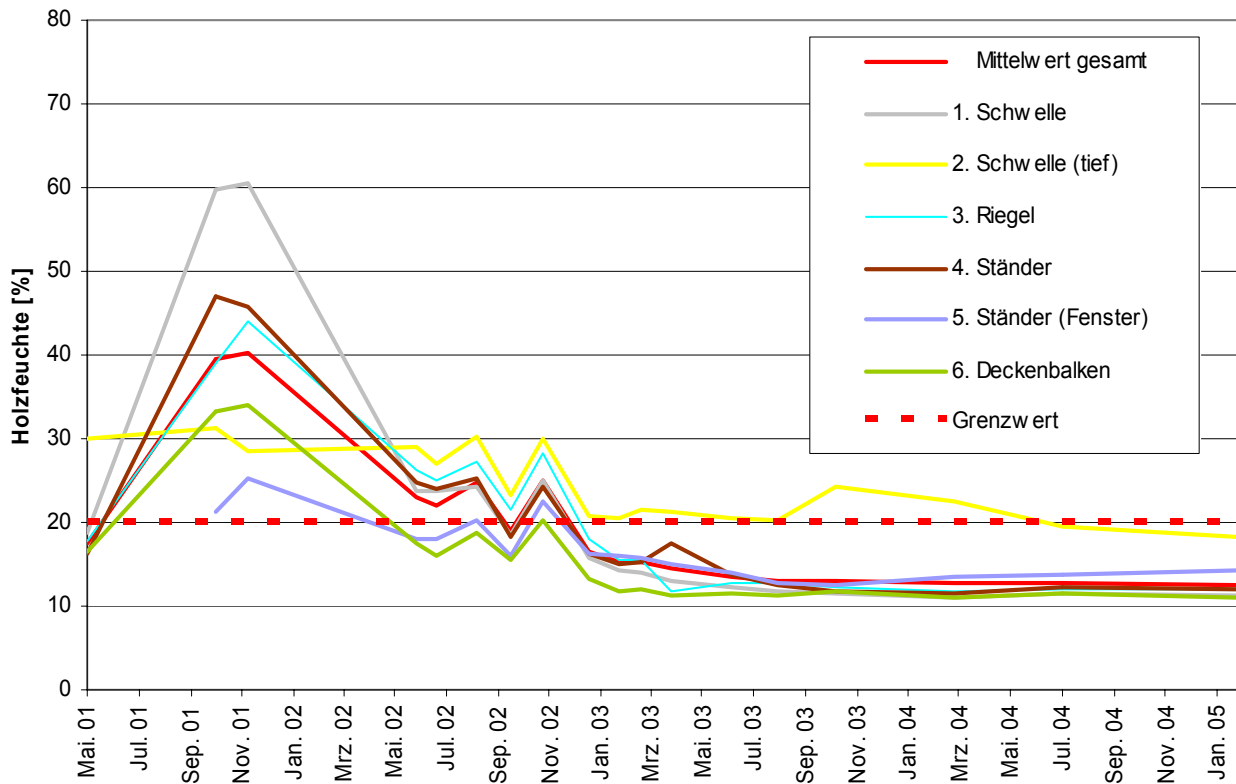


Abbildung 52 Mittelwerte der Holzfeuchte nach Lage der Messpunkte

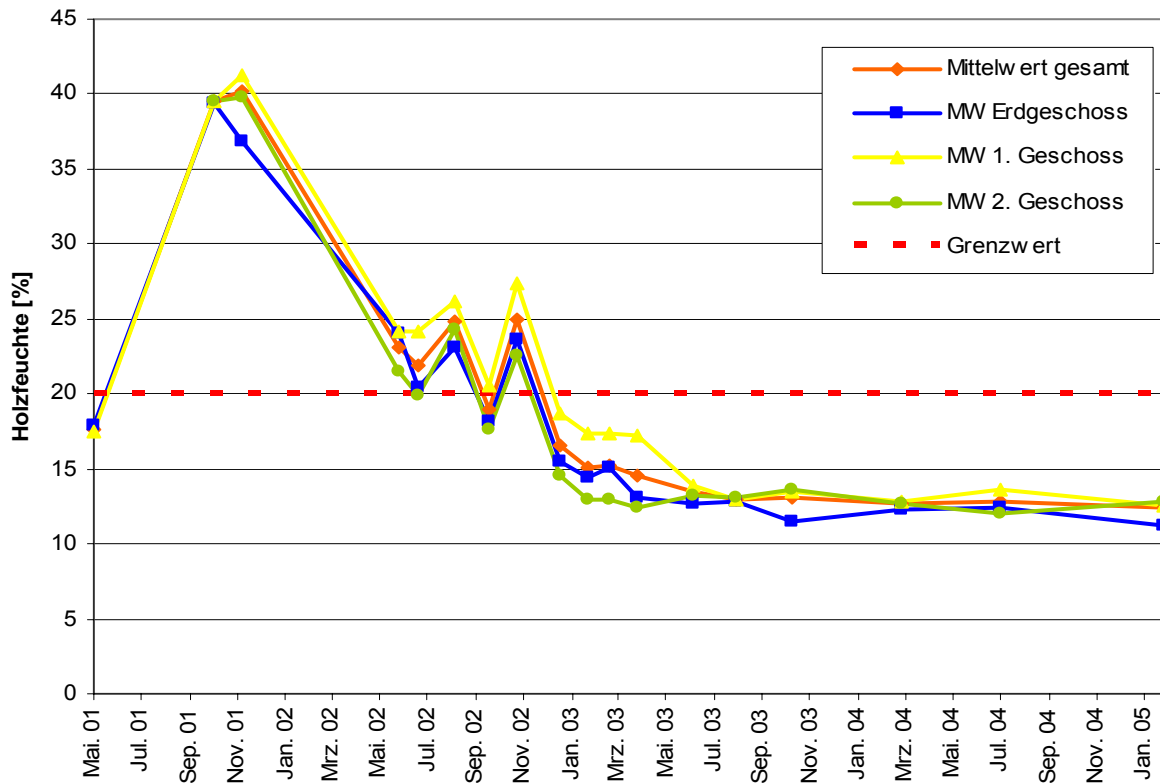


Abbildung 53 Mittelwerte der Holzfeuchte je Geschoss

Auf Darstellungen von Einzelmesswerten wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf Mittelwerte orientiert, da sich insgesamt eine typische Entwicklung für fast alle Einbausituationen zeigte. In der Abbildung 53 sind die Mittelwerte eines Geschosses zusammengeführt. Nach dem Einbau des Leichtlehms im Sommer 2001 ist ein Trocknungsprozess von Herbst 2001 (Verputzen der Wände) bis zum Sommer 2003 erkennbar, der durch den Betrieb der Heizung ab Ende 2001 unterstützt wurde. Nach der Trocknungsphase stabilisierte sich die Holzfeuchte bei ca. 13%. Die einzelnen Geschossebenen zeigen ein ähnliches Verhalten. Die zwischenzeitlichen „Bewegungen“ Ende 2002 sind auf den wechselseitigen Einsatz von Messgeräten mit verschiedenen Kalibrierkurven zurückzuführen.

In Abbildung 54 wurden die Messstellen nach ihrer Lage im Grundriss zusammengefasst. Die Südfassade zum Hof (Eingangsbereich des Gebäudes) ist im Mittel um ca. 3 M% trockener als die Nordfassade.

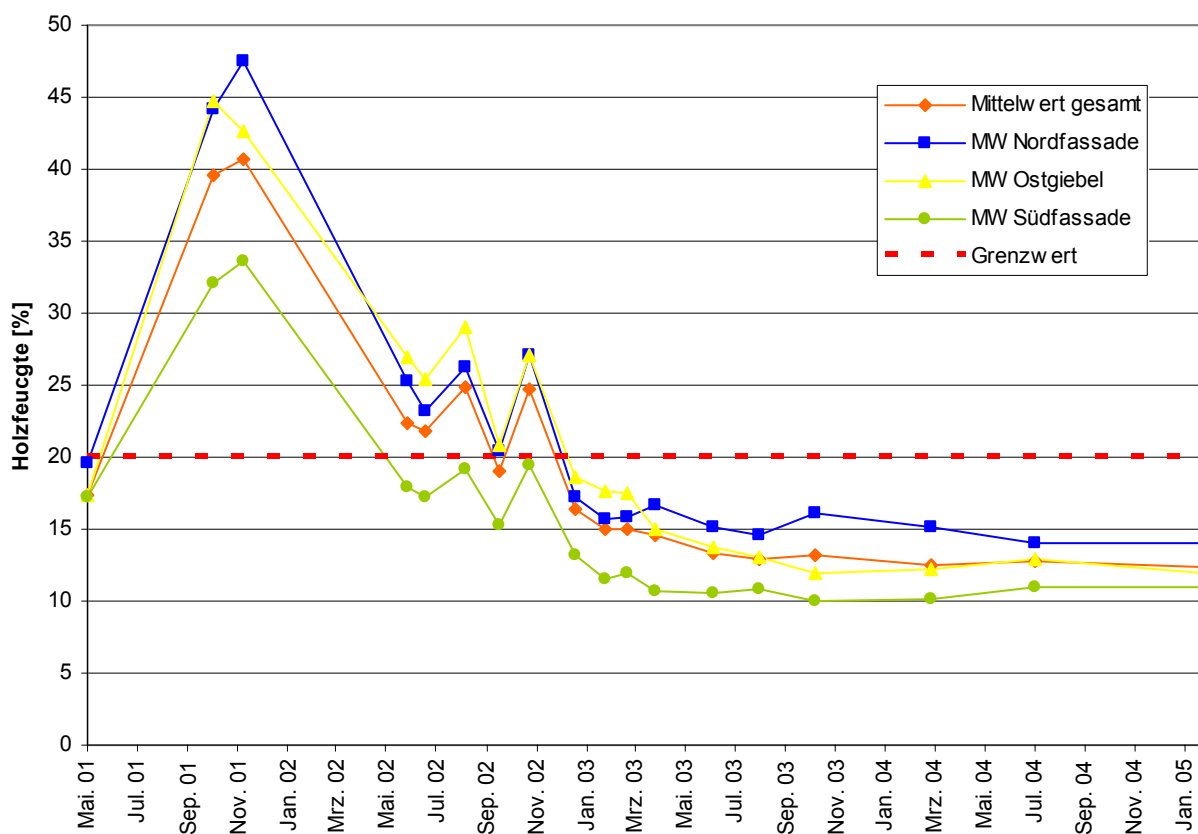


Abbildung 54 Mittelwerte der Holzfeuchte nach Fassadenseite

4.3.4 Bewertung

Gemäß DIN EN 335-1, Anhang A, 2.10 ist für die Entwicklung holzerstörender Pilze eine Holzfeuchte von mehr als 20% erforderlich. Nach DIN 4074-1 ist 20% Holzfeuchte der obere Grenzwert für den Begriff „trocken“. Die Messungen zeigen, dass sich die Holzfeuchte mittlerweile bei ca. 13% eingestellt hat. Daher ist das Holz nach DIN als „trocken“ zu bezeichnen und der Schutz vor der Entwicklung holzerstörender Pilze ist durch die dauerhafte Unterschreitung des Grenzwertes von 20% Holzfeuchte gesichert.

Ende 2003 war einzig an der Messstelle 1.4 / 2 (Schwelle, 6 cm tief) im Sekretariat des Bürgermeisters noch ein Wert über 20 Masseprozent vorhanden. Das mit ca. 40 M% im Vergleich zu den anderen Messstellen doppelt so feuchte Fachwerkholz wurde zur Klärung der Situation genauer untersucht. Dazu wurde auf der Außenseite die Fassade lokal geöffnet und die betreffende Schwelle durch einen ö. b. u. v. Sachverständigen untersucht.⁶ Die Ursache für die hohen Messwerte mit dem Widerstandsverfahren resultierte aus ungewöhnlich hohen Salzkonzentrationen im Bereich eines Altschadens, die zur Verfälschung der Messwertanzeige führten. Durch eine gravimetrische Messung wurde die real vorhandene Holzfeuchte mit weniger als 20% Holzfeuchte ermittelt, die somit in einem für das Pilzwachstum unkritischen Bereich liegt.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Wandheizung einen deutlich positiven Einfluss auf das Trocknungsverhalten von Fachwerk und Lehmschicht hat.

| | Chronologie der Bauausführung |
|-----------------|--|
| 05-11.2000 | Erneuerung Grundleitungen, Einbau Dränage |
| 04.-09.2001 | Abbruch, Umbau, Fachwerksanierung, statische Ertüchtigung im Gebäude |
| ab 05.2001 | Einbau Leichtlehmdämmung |
| 10.05.2001 | Einbau Holzfeuchtemessstellen |
| 06.-08.2001 | Einbau Leichtlehmdämmung im Westflügel 1. OG, Nordflügel EG, Nordflügel 1. OG, Nordflügel 2. OG |
| 07.2001 | Einbau neue Fachwerkwände WC-Trakt |
| 08-11.2001 | Einbau Heizungsschleifen |
| 08.-11.2001 | Einbau Abluftanlage |
| 09.2001 | Einbau Leichtlehmdämmung Westflügel EG |
| 10.-11.2001 | Einbau äußere Glasebene neue Fenster |
| 11.2001 | Inbetriebnahme Heizung, im Winter zur Unterstützung des Austrocknens mit 30° C Vorlauftemperatur betrieben |
| 11.2001-03.2002 | Lehmputze auf der Leichtlehmdämmung |
| 11.2001-05.2002 | Lehmputze Innenwände und Decken |
| 12.2001 | Lehmputze auf der Leichtlehmdämmung Nordflügel EG |
| 01.-02.2002 | Einbau innere Glasebene neue Fenster |

⁶ Klopfer, Reiner: Untersuchung der Feuchteproblematik und Maßnahmeorientierung für Reparaturstellen des äußeren Fachwerkgefüges, Gleiszellen Mai 2003

| | |
|-----------------|---|
| 02.-05.2002 | Dämmputz Fensterleibungen massive Mauern |
| 06.-09.2002 | Auftragen Kalkspachtel auf alle Lehmputze |
| 10.2002-06.2003 | Anstrich Fachwerkfassaden |

Tabelle 8 Zeitliche Abfolge der feuchterelevanten Baumaßnahmen

Feuchteverhalten von Fachwerk mit Innendämmung

Das entscheidende Kriterium für den dauerhaften Erhalt einer Fachwerkwand ist eine ausgewogene Feuchtebilanz im Bereich der Fachwerkhölzer. Das eindringende Wasser, sei es Schlagregen- oder Spritzwasser, Kondensat im Bauteil oder Baufeuchte muss schnell abtrocknen können, damit die Holzfeuchte der Fachwerkhölzer auf Dauer unter einen Wert von 20% bleibt.

Besondere Bedeutung kommt dabei der Schlagregenbelastung zu. Schlagregen bewirkt einen hohen Feuchteeintrag in die zahlreichen Fugen zwischen den Fachwerkhölzern und den Gefachen. Eine Schlagregenbelastung von 140 l/m² Fassadenfläche/Jahr gilt als Grenzwert für eine Beanspruchung, die von einer historischen Fachwerkkonstruktion noch verkraftet werden kann. Die Schlagregelmessungen am Rentamt geben keine Hinweise auf eine erhöhte Schlagregenbelastung. An der Nordfassade wurden keine Regenmengen erfasst, wobei die relativ geschützte Lage des Messkastens im 2. OG in der Nähe des Dachüberstandes zu beachten ist. An der Ostseite (Fachwerkgiebel) liegt eine mittlere Schlagregenbelastung vor.

Bei Fachwerkgebäuden wird das eindringende Schlagregenwasser durch kapillaren Wassertransport größtenteils von den mineralischen, porösen Ausfachungsmaterialien und zu einem kleinen Teil von den Fachwerkhölzern aufgenommen. Anschließend setzt die Verteilung und Abtrocknung der Feuchte durch Wasserdampfdiffusion, sowohl nach außen wie nach innen, ein.

Innendämmungen - wie sie bei äußerer Fachwerksichtigkeit notwendig sind – können zu feuchtetechnischen Problemen führen. Schäden im Fachwerkgefüge wären die Folge. Dem Fachwerk angemessene Konstruktionen, Materialien und Dämmstärken müssen gewählt werden. Durch die Anordnung der Dämmebene im Innenraum verschiebt sich im Winter die Taupunktebene nach innen. Weiterhin wird die Rücktrocknungsmöglichkeit in den Innenraum durch diffusionsdichte Dämm- und Bekleidungsschichten verringert. Es könnte dann zu einem Feuchtestau in der Wand kommen und die Holzfeuchten würden langfristig auf kritische Werte steigen. Kann sich Feuchte über längere Zeit in der Wand anreichern, droht Pilz- und Insektenbefall. Die Gefahr eines Befalls durch holzerstörende Pilze ist ab einem längerfristigen Feuchtegehalt von über 20% gegeben. [DIN EN 335-1, Anhang A].

Im Rentamt besitzt die homogene Wandschale aus Leichtlehm, aufgrund der Kapillaraktivität des Materials, ein vorteilhaftes Trocknungsverhalten. Wie die Messergebnisse zeigen, verfügen die Aufbauten über ein großes Trocknungspotential. Dieser Umstand hat einen ähnlich hohen Stellenwert, wie die Verringerung von Kondensation im Wandquerschnitt.

| Holzfeuchte u [m%] | Einsatzgebiet | Erläuterung | Quelle |
|--------------------|--|------------------------------------|--------------------------|
| 35 | Schnittholz A bis 200 cm ² | gilt als „frisch“ | DIN 4074/1 DIN 68 365 |
| 20....30 | Schnittholz A bis 200 cm ² | gilt als „halbtrocken“ | DIN 4074/1 DIN 68 365 |
| ≤ 20 | Schnittholz | gilt als „trocken“ | DIN 4074/1 DIN 68 365 |
| 18 ± 6 | Bauholz | allseitig der Witterung ausgesetzt | DIN 1052/ Teil1 |
| 15 ± 3 | Bauholz | überdeckte offene Bauwerke | DIN 1052/ Teil1 |
| 12 ± 3 | Bauholz | geschlossene Bauwerke ohne Heizung | DIN 1052/ Teil1 |
| 9 ± 3 | Bauholz | geschlossene Bauwerke mit Heizung | DIN 1052/ Teil1 |

Abbildung 55 Soll-Holzfeuchten

Vergleichswerte

Tabelle 9 zeigt eine Zusammenstellung von bauphysikalischen Kenwerten verschiedener Fachwerkgebäude, die eine Innendämmung erhalten haben.

| Gebäude | Fassade | Innendämmung | U-Wert [W / (m ² *K)] | S _d -Wert (innenliegende Bauteilschichten) | Holzfeuchte Mittelwert [%] |
|------------------------------|----------|---|-------------------------------------|---|----------------------------------|
| Rentamt Worbis | Nord | Leichtlehmschale mit Wandheizung | 0,65 | 4,2 | 14 |
| | Süd | Leichtlehmschale mit Wandheizung | 0,65 | 4,2 | 11 |
| Eschwege | Südwest | keine Innendämmung dicker Lehmputz mit Wandheizung | 0,86 | 0,8 | 10 |
| Kaufungen | Nordost | Zellulosedämmung mit Dampfbremse | 0,32 | 2,6 | 15 |
| | Nordwest | Zellulosedämmung ohne Dampfbremse | 0,32 | 0,3 | 18,5 |
| Adorf | Nord/Ost | Zellulosedämmung | 0,20 | 5,6 | 20 |
| Friedland | West/Süd | Zellulosedämmung | 0,46 | 0,7 | 17,5 |
| | West | Kokosfaserdämmung | 0,52 | 0,7 | 18,5 |
| Kindergarten Groß Lengden | | Perlite-Dämmstoff; Zellulosedämmung | 0,30 | | 18-22 |

Tabelle 9 Vergleichswerte anderer Fachwerkgebäude mit Innendämmung

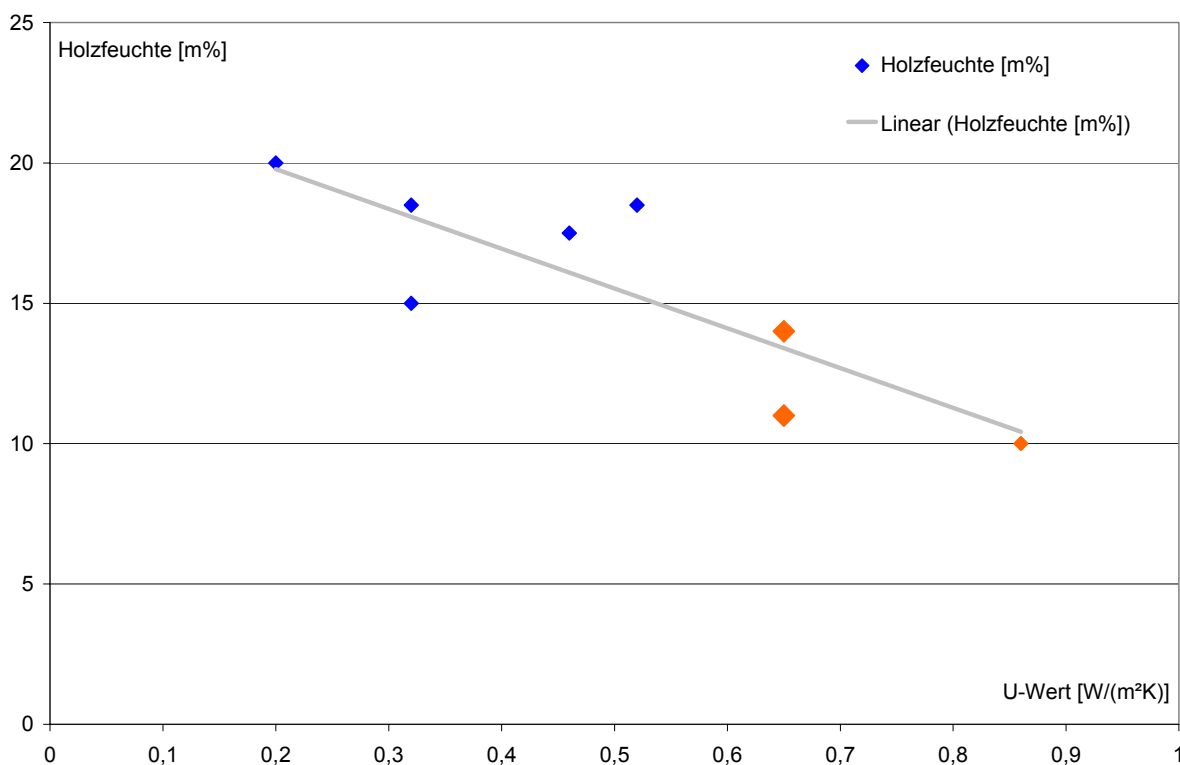


Abbildung 56 Zusammenhang zwischen U-Wert und Feuchtegehalt

Deutlich ist erkennbar, dass mit zunehmender Dämmwirkung (niedriger U-Wert), der Mittelwert der Holzfeuchte zunimmt. Allerdings wird der kritische Wert der Holzfeuchte von 20 Masseprozent in keinen Fall überschritten.

In Gebäuden in denen eine Wandheizung betrieben wird (orange), konnte die mittlere Holzfeuchte nochmals um ca. 5 Prozent gesenkt werden. Die Nordwand (14 m%) und die Südwand (10 m%) des Rentamtes sind im Diagramm hervorgehoben. Der relativ hohe Diffusionswiderstand der Innendämmung in Worbis (s_d -Wert) liegt deutlich über den WTA Empfehlungen von maximal $s_d \leq 2m$. Das dadurch geminderte Austrocknungsverhalten wird durch den Betrieb der Wandheizung ausgeglichen.

In allen dargestellten Gebäuden wurde die Entwicklung der Holzfeuchte über mehrere Jahre beobachtet. Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) der verschiedenen Wandaufbauten wurde rechnerisch nach den eingeführten Verfahren ermittelt.

4.4 Wandheizung

4.4.1 Untersuchung mit IR Kamera

Zur Bestimmung der Temperaturverteilung auf der Gebäudefassade und zur Abschätzung der Heizenergieverluste durch Transmission dienten Aufnahmen mit einer Thermografiekamera an einem kalten Wintertag.

Nordseite

Die Außenaufnahmen entstanden am 14.02.2005 gegen 7:00 Uhr kurz vor Sonnenaufgang. Die Infrarot-Thermografie Messung erfolgt mit einer IR-Kamera PM 690 der Firma FLIR.

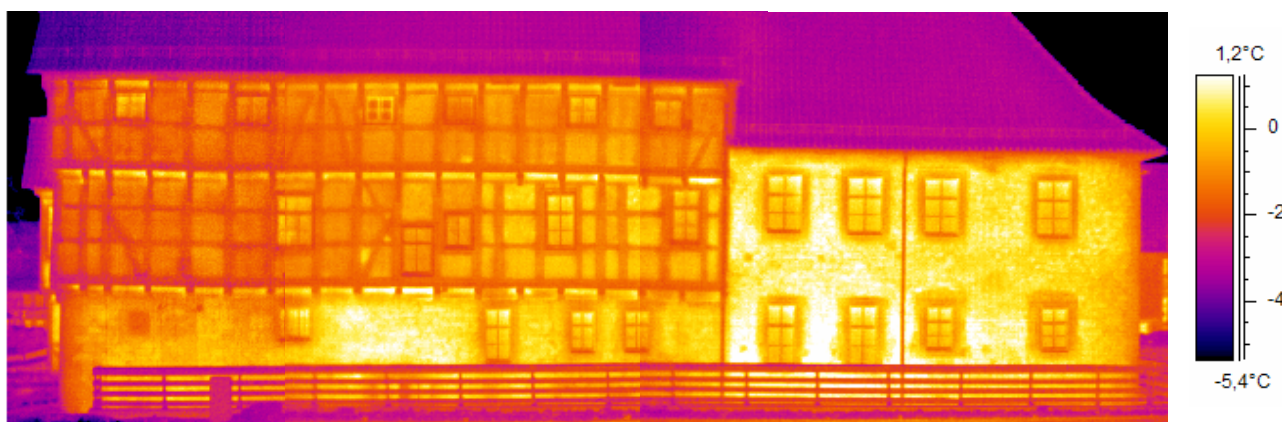


Abbildung 57 IR-Aufnahme der Nordfassade (Montage aus drei Aufnahmen)



Abbildung 58 Foto der Nordfassade

Der Fachwerkteil weist gegenüber dem Massivteil einen besseren Wärmeschutz auf. In der Mitte des Erdgeschosses des Fachwerkgebäudes ist der Serverraum erkennbar, dessen Wärmeabgabe zu erhöhten Temperaturen auf der Außenoberfläche führt.

Ostseite

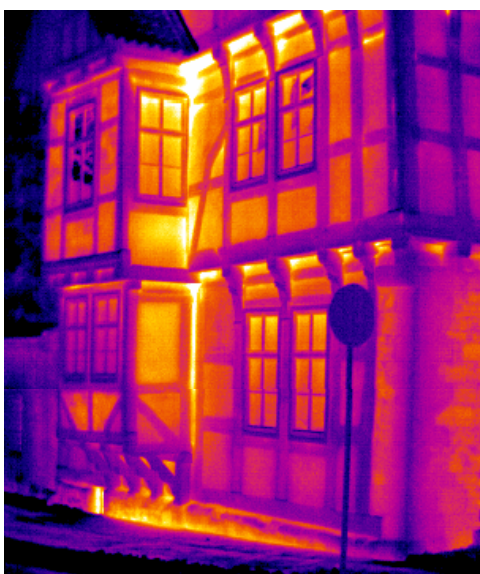


Abbildung 59 IR-Aufnahme der Ostfassade (Montage aus zwei Aufnahmen)

Abbildung 60 Foto der Ostfassade

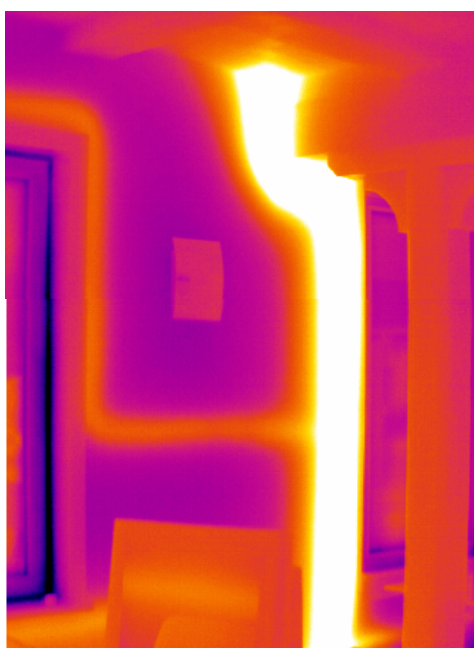


Abbildung 61 IR-Aufnahme der Innenwand Ost im Erdgeschoss (Montage)

Abbildung 62 Foto der Innenwand Ost im Erdgeschoss (Montage aus zwei Aufnahmen)

Im Anschlussbereich des Erkers zur Außenwand verläuft die Steigleitung der Warmwasserheizung. Daraus resultieren die erhöhten Temperaturen in diesen Bereich. (Abbildung 59) Deutlich zeigt sich die Lage des Heizraumes im Keller an den hohen Temperaturen der Wand im Sockelbereich.

Südseite Innenhof

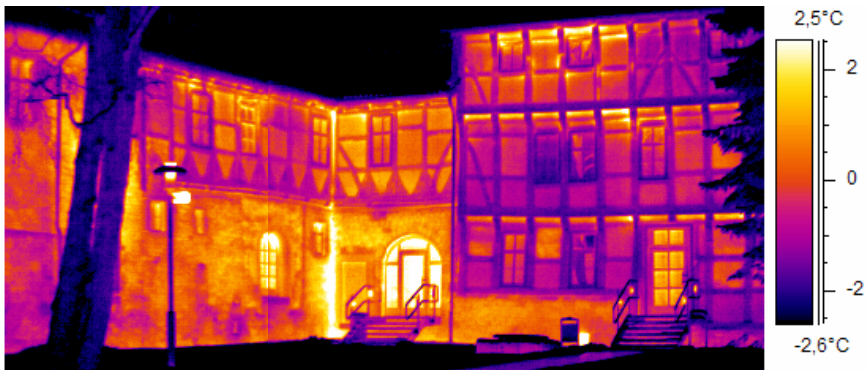


Abbildung 63 IR-Aufnahme der Südseite (Montage aus zwei Aufnahmen)



Abbildung 64 Foto der Südseite

Süd-Ost Ecke Flügelanbau

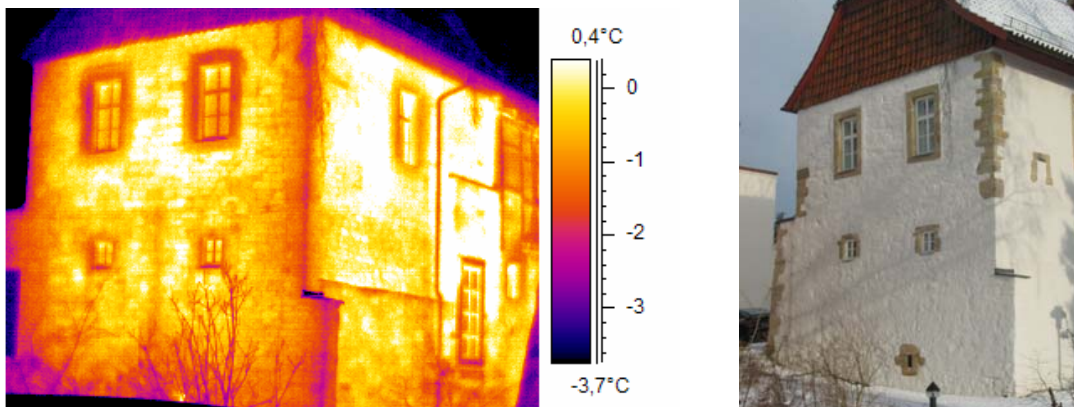


Abbildung 65 IR-Aufnahme des Flügelanbaus (Montage aus zwei Aufnahmen)

Abbildung 66 Foto der Südseite des Flügelanbaus

Westseite

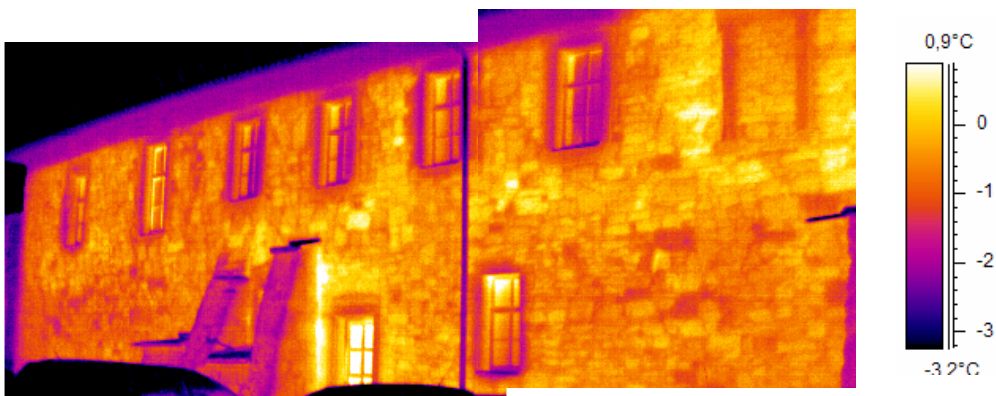


Abbildung 67 IR-Aufnahme der Westfassade (Montage aus zwei Aufnahmen)



Abbildung 68 Foto der Westfassade

Die rechnerisch ermittelten U-Werte betragen für den Fachwerkteil ca. $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und für den Massivteil ca. $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Daraus resultieren höhere Oberflächentemperaturen im Massivteil, die in den IR-Aufnahmen deutlich erkennbar sind.

Weitere Inhomogenitäten im Massivteil ergeben sich durch die Tatsache, dass aufgrund von Schiefstellungen der Wände, die Leichtlehmdämmung nicht überall die gleiche Dicke erreicht. So konnte im Ratssaal aufgrund der räumlichen Gegebenheiten die Leichtlehmdämmung nur in einer Schichtdicke von ca. 10 cm ausgeführt werden.

Die Natursteine besitzen eine höhere Wärmeleitfähigkeit als der Fugenmörtel. Auch lokale Auffeuchtungen zeigen sich aufgrund der geringeren Dämmwirkung mit höheren Temperaturen auf der Fassade.

4.4.2 Heizwärmeverbrauch

Jeder Heizkreis der Heizungsanlage verfügt über einen Wärmemengenzähler. Die monatlichen Verbrauchswerte werden regelmäßig ausgelesen. Das Gebäude hat vier Heizkreise. Tabelle 10 zeigt die einzelnen Heizkreise mit Angabe der beheizten Flächen.

| Nr. | Bezeichnung | Beheizte Fläche |
|-----|-------------------|----------------------|
| 1 | Büro | 543,9 m ² |
| 2 | WC/ Nebenbereiche | 283,3 m ² |
| 3 | Ratssaal | 89,0 m ² |
| 4 | Lüftung | |



Tabelle 10 Übersicht der Heizkreise

Abbildung 69 Heizungsverteilung im Keller

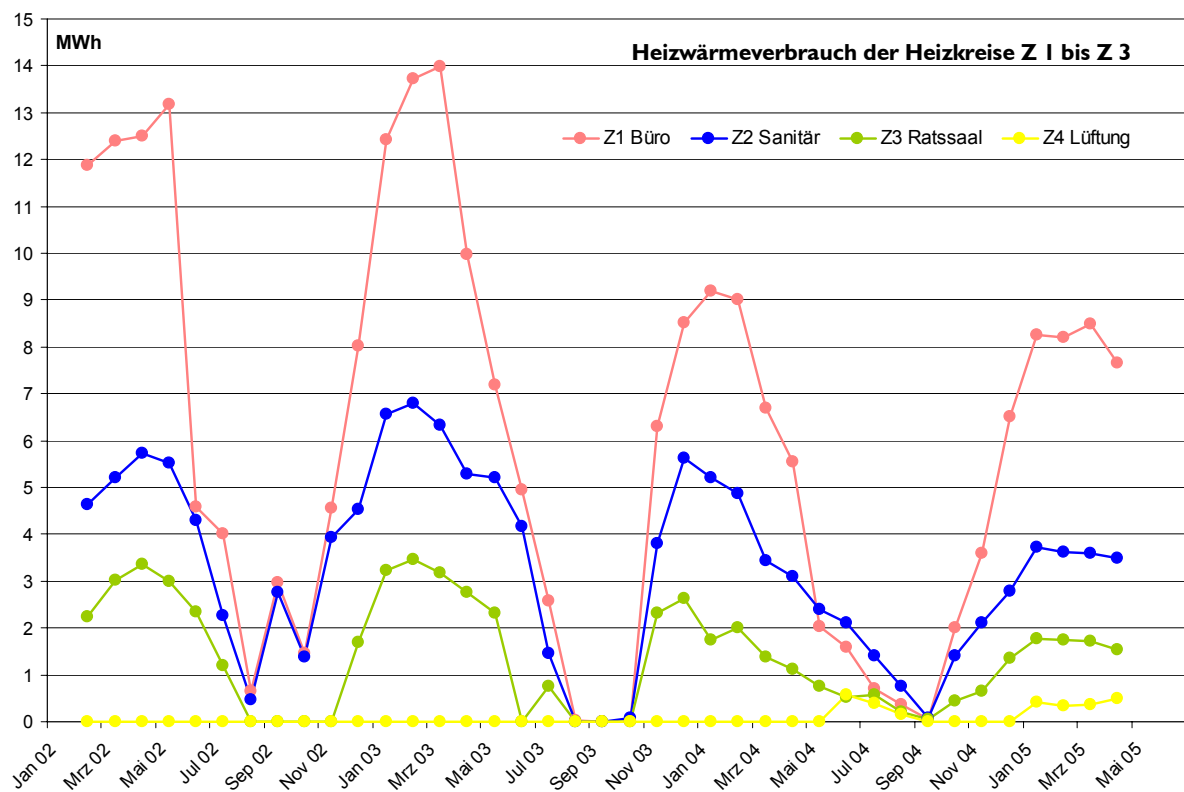


Abbildung 70 Monatlicher Wärmeverbrauch

Der monatliche Verbrauch ist in Abbildung 70 dargestellt. Die Verbrauchspitzen liegen jeweils in den Monaten Januar bis März. Es ist zu erkennen, dass der Verbrauch in den letzten zwei Jahren gesunken ist. Erwartungsgemäß hat der flächenmäßig größte Heizkreis auch den höchsten absoluten Wärmeverbrauch.

Die hohen Werte der ersten Heizperioden sind auf die Bautrocknung sowie den hohen Luftwechsel aufgrund provisorischer Türen, ungedichteter Fenster und Baubetrieb zurückzuführen. Für die schnelle Abtrocknung der Leichtlehmschale (siehe Kapitel 4.3) war ein erheblicher, jedoch einmaliger Heizaufwand nötig. Die im Zwischenbericht vom 18.1.2003 geäußerte Vermutung, dass sich der Heizenergieverbrauch im trockenen Gebäude unter Nutzungsbedingungen deutlich verringern wird, hat sich bestätigt.

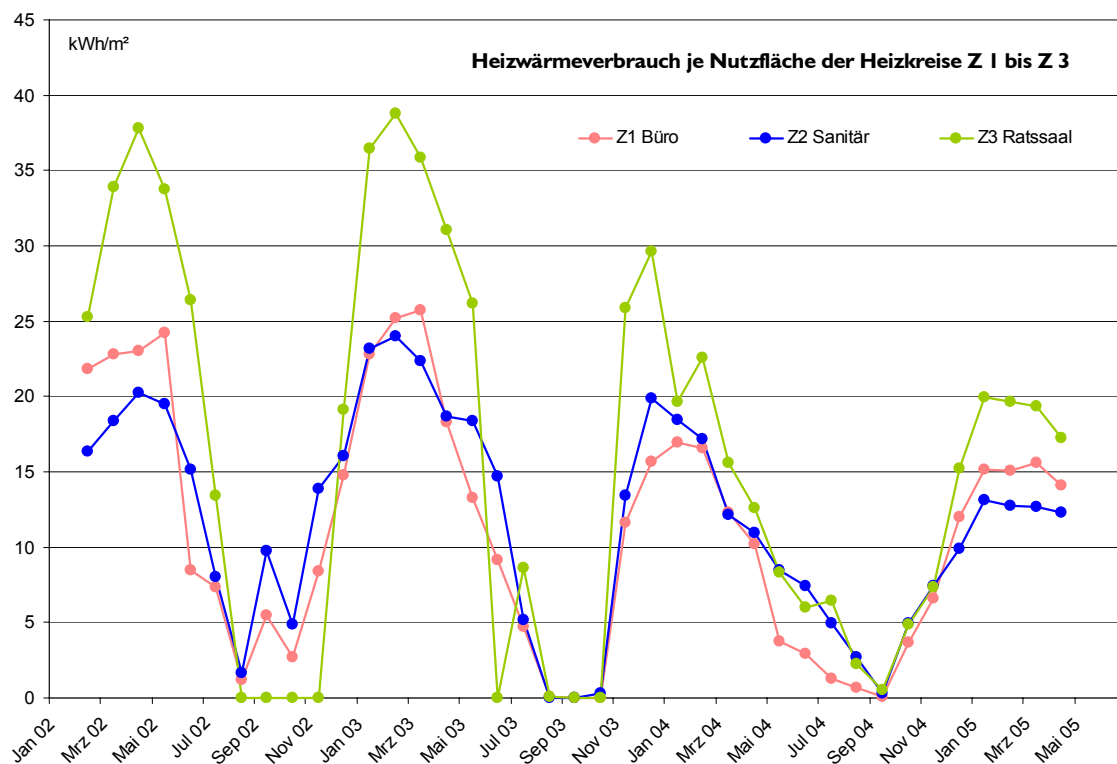


Abbildung 71 Monatlicher Wärmeverbrauch je Nutzfläche

Abbildung 71 zeigt den auf die Nutzungsfläche bezogenen Wärmeverbrauch. Die Verbrauchswerte der Heizkreise 1 (Büro) und 2 (Sanitär/ Nebenräume) verlaufen nahezu identisch. Der Ratssaal wurde in den Heizperioden nicht durchgängig beheizt (keine Heizung: 09.2002 bis 11.2002 und 09.2003 bis 11.2003). Dadurch lag der Verbrauch für diese Zeiträume bei Null.

In den Zeiträumen der Beheizung lag der Verbrauch je Fläche für den Heizkreis Ratssaal deutlich über den Werten der Heizkreise 1 und 2. Die Gründe hierfür liegen in dem höheren Anteil an Außenwänden mit relativ geringem Wärmeschutz wie auch in der heizenergetisch aufwendigen Vorwärmung der Zuluft. Auch die temporäre Beheizung führt im Vergleich zur stetigen Heizung zu einem erhöhten Verbrauch während der Nutzungszeiten.

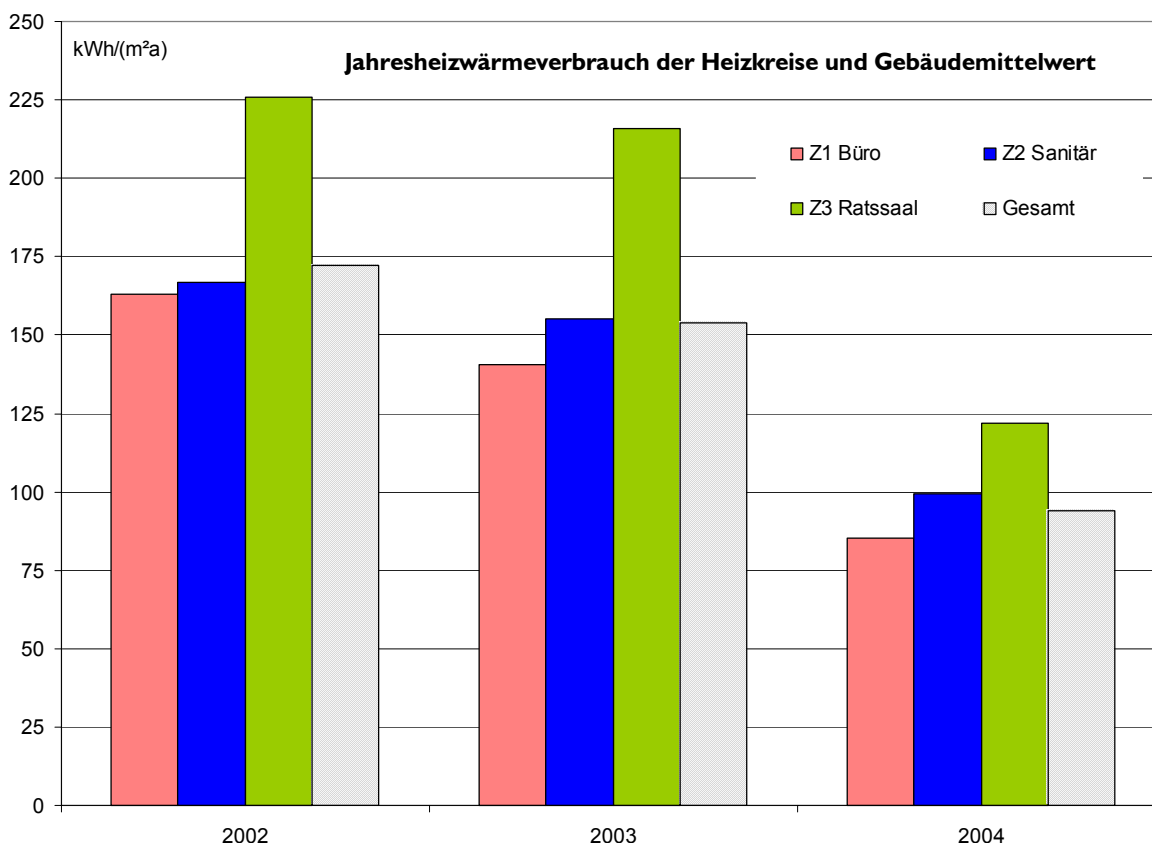


Abbildung 72 Entwicklung des spezifischen Heizwärmeverbrauches [kWh/(m²a)]

Der jährliche, auf die beheizte Nutzfläche bezogene Heizwärmeverbrauch ist in Abbildung 72 dargestellt. Deutlich ist die Reduzierung des Energieverbrauches zu erkennen. Für das Gebäude sollte nach der Sanierung ein Heizenergiebedarf von weniger als 100 kWh/(m²*a) erreicht werden (siehe Kapitel 1.1). Die Heizkreise Z1 (Büro) und Z2 (Sanitär) erfüllen im Jahr 2004 diese Anforderung. Der Heizkreis Z3 (Ratssaal) lag mit 122 kWh/(m²*a) über dem Richtwert. Für das Gesamtgebäude erfüllen die drei Heizkreise im Jahr 2004 in der Summe mit einem Wert von 94 kWh/(m²*a) die Zielvorgabe.

Der rechnerisch ermittelte Heizenergiebedarf von annähernd 90 kWh/(m²a) wird zwar noch nicht erreicht, sollte aber bei anhaltender Tendenz realisierbar sein. Der Heizwärmeverbrauch muss über mehrere Heizperioden gemessen werden, um die Interpretation zu verbessern und den Einfluss der Wandflächenheizung zu diskutieren.

Die Durchschnittstemperatur der Heizperioden 2002 bis 2004 ist Tabelle 11 zu entnehmen. Die Außen-Temperaturen der Heizperiode 2003 waren zirka 1,0°K kühler als in den Jahren 2002 und 2004. Diese Werte stammen von der benachbarten Wetterstation in Göttingen. (Entfernung zu Worbis zirka 40 km)

| Jahr | 2002 | 2003 | 2004 |
|---|--------|--------|--------|
| Durchschnittstemperatur [Jan.- April und Okt.-Dez.] | 5,0 °C | 3,9 °C | 4,8 °C |

Tabelle 11 Durchschnittstemperatur der Heizperioden (Göttingen)

4.5 Lüftung

4.5.1 Luftdichtheit

Das Lüftungskonzept im Fachwerkteil sieht eine geregelte Abluftströmung durch raumweise Abluftschächte und das freie Nachströmen der Zuluft über Fensterfugen und Bauteilfugen vor. Um einen konvektiv bedingten Feuchteintrag in die innengedämmten Fachwerkwände zu vermeiden, wurde Wert auf eine relativ luftdichte Wandkonstruktion gelegt. Unterstützend wirkt eine Abluftanlage, die einen stetigen Unterdruck im Gebäude erzeugt. Der größte Teil der Frischluft soll über die Undichtheit der Fensterfugen einströmen. Eine manuelle Fensterlüftung erfolgt nach Bedarf. Nur der Ratssaal besitzt eine kontrollierte Be- und Entlüftung über Zu- und Abluftrohre. Die Qualität der Ausführung von Bauhülle und Lüftungsanlage wurde durch mehrmalige Tests mit dem BlowerDoor Verfahren geprüft. Die zunächst unbefriedigenden Ergebnisse konnten durch Diskussion mit den Fachplanern und bauliche Nacharbeiten verbessert werden.

1. Luftdichtheitsprüfung⁷

Im Juli 2003 ermöglichte der nun erreichte Ausbauzustand eine Prüfung der Luftdichtheit des Gesamtgebäudes sowie ausgewählter Räume mit dem BlowerDoor Verfahren. Bis auf die fehlende Dielung und noch zu ergänzende Elektroinstallationen waren zu diesem Zeitpunkt die Baumaßnahmen abgeschlossen. Noch vorhandene Undichtheiten wie die provisorische Außentür sowie Öffnungen in den Kellern wurden für die Messdauer verschlossen.



Abbildung 73 BlowerDoor in der Hauseingangstür



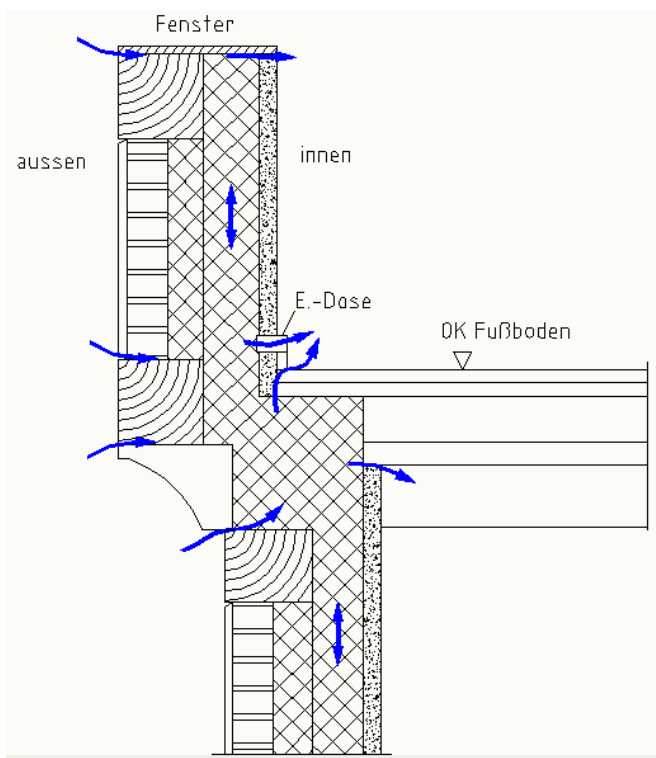
Abbildung 74 Leckagesuche mit dem Anemometer

⁷ Simons, Paul: Protokoll und Stellungnahme zur Luftdichtheitsmessung am 23. Juli 2003, Ingenieurgemeinschaft Bau+Energie+Umwelt Springe-Eldagsen

Bei dem BlowerDoor Test wurden bei Unterdruck von 50 Pascal 13.110 m³ Luft pro Stunde abgesaugt. Dies entspricht einer Luftwechselrate $n_{50} = 6,6 \text{ h}^{-1}$. Der Grenzwert für Gebäude mit Lüftungsanlage nach DIN 4108 Teil 7 von $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$ wird damit deutlich überschritten. Bei der ebenfalls durchgeführten Überdruckmessung wurde ein Volumenstrom von 17.573 m³/h ermittelt. Dies ist eine relativ große Differenz zur Unterdruckmessung. Als Ursache kommen Luftklappeneffekte bei den Leckagen in Betracht. Für die weiteren Betrachtungen wurde der Unterdruckwert mit 13.110 m³/h berücksichtigt, da in dem Gebäude eine Abluftanlage installiert ist, die Unterdruck erzeugen soll.

Der zertifizierte Prüfer für Luftdichtheit stellt im Messbericht fest, dass die Luftqualität in den Büroräumen durch das gewählte System tendenziell gegenüber einer reinen Fensterlüftung deutlich verbessert wird. Die überwiegende Menge der Frischluft wird über Bauteilleckagen in das Gebäude einströmen. Durch die Abluftanlage und den damit erzeugten Unterdruck soll auch erreicht werden, dass es zu keinen konvektiven Feuchteinträgen in die Wandkonstruktionen kommt. Der Gutachter geht davon aus, dass diese Funktion im Gesamtgebäude nicht erreicht wird, sondern nur in vereinzelten Räumen, wie z. B. Raum 2.6 in dem ein Unterdruck von 9,5 Pascal erzeugt wird und beispielsweise in Raum 0.6 mit einem Unterdruck von 3.2 Pascal.

Damit Abluftanlagen mit zielgerichteten Volumenströmen arbeiten können, ist es erforderlich, dass diese Anlagen Unterdrücke in der Größenordnung von 5 bis 10 Pascal erzeugen. Aus der Leckagekurve für das Gesamtgebäude ergibt sich, dass um einen Unterdruck von 5 Pascal zu erzeugen 3.000 m³/h abgesaugt werden müssen. Die geplante Leistung aller Abluftventile liegt bei 850 m³/h.



Der Lüftungsanteil über die Bauwerksfugen (z.B. Fachwerk und Deckenbalken) ist zu hoch. Sofern der luftdichte Putz unterbrochen wird, wirkt die leichte Lehmschale als Luftverteiler. Daher wird die geplante Bautenschutzfunktion durch das Vermeiden von Feuchtekonvektion in die Fachwerkwand nicht in allen Räumen erreicht. Die Luftverteilung verhindert andererseits die örtliche Feuchteakkumulation und verbessert die Austrocknung.

Abbildung 75 Luftwege bei Unterdruck

Als wesentliche Maßnahmen zur Verbesserungen der Luftdichtheit wurden benannt:

- Die Dichtheit der Installationsdurchbrüche durch die Decke zum DG zu verbessern.
- Alle Bodenanschlussfugen in den Geschossen eindichten.
- Die Bodentür zum Dachgeschoss im Schwellenbereich dichten.
- Die Kellerräume nach außen einzudichten.

2. Luftdichtheitsprüfung und Gebäudethermografie⁸

Auf die erstmalige Prüfung der Gebäudehülle auf Luftdichtheit im Jahr 2003 folgten bauseitige Nachbesserungsarbeiten. Zur Kontrolle der erreichten Verbesserungen, kam es im Oktober 2004 nochmals zu einer BlowerDoor-Messung, um die Luftwechselrate im verbesserten Zustand zu dokumentieren und Leckagen stichpunktartig zu orten.

Zur Leckageortung der Gebäudehülle wurde eine Innenthermografie des Gebäudes erstellt, die zum einen Wärmebrücken und zum anderen den Ausgangszustand des Gebäudes aufzeichnet. Um Luftleckagen und Lufthinterströmungen im Balkenlagenbereich und des Wandverbundes nachweisen zu können, wurde mit einer BlowerDoor Unterdruck im Gebäude erzeugt. Nach einer Laufzeit des Gebläses von ca. 10 Minuten wurde eine zweite Innenthermografie bei laufendem Gebläse durchgeführt. Hierbei zeigt sich dann das thermische Verhalten des Gebäudes unter Windeinfluss.

Abschließend wurde mit der BlowerDoor die Luftwechselrate bestimmt. Gegenüber der Messung im Juli 2003 hat sich der Wert n_{50} von $6,6 \text{ h}^{-1}$ deutlich auf $4,0 \text{ h}^{-1}$ verbessert. Nach DIN 4108-7 ist für Gebäude mit Lüftungsanlagen einzuhalten: $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$. Diese Anforderung ist nicht erfüllt.



Abbildung 76 Balkendecke im Sekretariat (Raum 1.4)

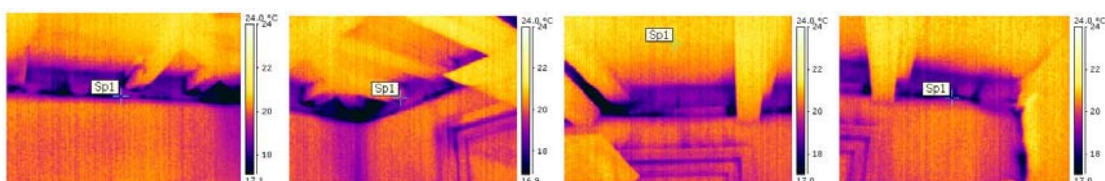


Abbildung 77 IR Aufnahme der Balkendecke im Sekretariat bei Unterdruck

Auf den Abbildungen sind die Kaltlufteintritte im Bereich der Deckenaufleger deutlich zu erkennen. Es handelt sich allerdings um keine typische Situation, da im Raum 1.4 aufgrund der Fassung aus dem 16. Jh. die Lehmschale nicht durch die Decke geführt werden konnte.

⁸ Simons, Paul: Gutachten zur Gebäudethermografie mit BlowerDoor Messung und Dichtheitsprüfung von zwei Abluftsträngen am 8. 10 2003, IG Bau+Energie+Umwelt Springe-Eldagsen

4.5.2 Lüftungsanlage

Qualitätsüberwachung der Abluftanlage⁹

Im Zuge der Qualitätsüberwachung wurden stichpunktartig mit einem speziellen Messgerät der Differenzdruck zwischen Innen- und Außenluft, sowie die Luftvolumenströme an den Abluftventilen ermittelt. Der Durchflussmesser ist ein Gerät um Luftvolumenströme an Abluftventilen von Lüftungsanlagen zu messen. Dabei wird ein Luftvolumenstrom durch eine Messblende mit bekannten Eigenschaften anhand der Druckdifferenz zwischen den beiden Blendenseiten bestimmt.



Abbildung 78 und Abbildung 79 Aufbau und Einsatz des Durchflussmessers

Dabei wurden Volumenstromdifferenzen an den einzelnen Abluftventilen festgestellt, die über den tolerierbaren Abweichungen von +/- 20 % liegen. Insgesamt muss gewährleistet werden, dass der Gesamtvolumenstrom im Mittel eingehalten wird.

Der Gutachter stellte fest: Die Planvorgaben der Lüftungsanlage hinsichtlich der Luftvolumenströme für die Büroräume werden nicht eingehalten. Der Differenzdruck zwischen innen und außen ist geringer als die avisierten 5 - 10 Pascal Unterdruck. Aufgrund des geringen Differenzdruckes ist die Schutzfunktion für das Fachwerk nicht immer gewährleistet. Der Hauptgrund für den zu geringen Differenzdruck liegt in der zu großen Gebäudeundichtheit. Ein Teilgrund liegt in den zu geringen Volumenströmen der Lüftungsanlage.

Eine durch die Fachplaner veranlasste Vergleichsmessung mit einem Anemometer (Luftgeschwindigkeitssensor) in Kanalmitte zeigte demgegenüber keine großen Abweichungen zu den Planungswerten.

⁹ Simons, Paul: Qualitätsüberwachung der Abluftanlage am 23. 03 2004, IG Bau+Energie+Umwelt Springe-Eldagsen

Dichtheitsprüfung von zwei Abluftsträngen¹⁰

Zur Klärung der Differenzen zwischen Ist- und Sollwerten bei den Volumenströmen der Lüftungsanlage wurden stichprobenartig zwei Abluftstränge auf Dichtheit in Anlehnung an pr EN 13779 geprüft. Bei dem Gebäude wurde eine Messung der Leitungsstränge der Lüftungsanlage mit einem speziellen Ventilator mit einer Druckleistung bis zu 500 Pascal²⁾. Zur Leckageortung wurde zusätzlich Nebel mit Überdruck in das Leitungssystem geblasen und beobachtet wo die Austrittsstellen sind. Zwei der sechs Lüftungskanäle wurden geprüft. Bei der Nebeluntersuchung wurden geringste Nebelaustritte im Installationsschacht im 1. OG und im Bereich des Ventilators festgestellt. Die gemessenen Undichtheiten der Kanäle erfüllen unter Berücksichtigung der Messtoleranzen die Anforderungen nach pr EN 13779.

Letztlich war es nicht möglich, eine von allen Beteiligten getragene Erklärung für die Lüftungstoleranzen zu finden. Die Planer lehnten Nachbesserungen ab, mit Verweis auf die Ergebnisse der Anemometer-Messung. Diese Messmethode ist zwar weniger genau als der Durchflussmesser, aber als Prüfmethode nach den Regeln der Technik anerkannt.

4.5.3 Fensterlüftung

Das in Kapitel 3.3.1 erläuterte Lüftungskonzept wurde nach Fertigstellung des Gebäudes in wichtigen Funktionen geprüft. Dazu wurden die Planungsparameter und die zulässigen Grenzwerte mit den in Referenzräumen ermittelten Praxiswerten verglichen. Anforderungen an den Luftwechsel bestehen einerseits aus Sicht der Nutzerbehaglichkeit und des Feuchteschutzes (unterer Grenzwert) und andererseits aus Sicht der Heizenergieeinsparung (oberer Grenzwert).

Fugendurchlässigkeit - Gesetzliche Anforderungen DIN 18 055 und DIN EN 12 207

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) regelt die Anforderungen an die Dichtheit der Gebäudehülle und den Mindestluftwechsel außen liegender Fenster. Nach Anzahl der Vollgeschosse werden die Gebäude in eine Klasse der Fugendurchlässigkeit eingeteilt. Die Definition eines Vollgeschosses erfolgt in den Bauordnungen der einzelnen Bundesländer. Nach der Argumentation der Thüringer Bauordnung (ThürBO 2004) hat das Gebäude zwei Vollgeschosse. Das 2. Obergeschoss ist nur teilweise ausgebaut und zählt daher nicht als Vollgeschoss. Die Energieeinsparverordnung fordert gemäß Tabelle 12 für ein Gebäude bis zu zwei Vollgeschossen die Klasse 2 der Fugendurchlässigkeit nach DIN EN 12 207.

| Zeile | Anzahl der Vollgeschosse des Gebäudes | Klasse der Fugendurchlässigkeit nach DIN EN 12 207 - 1 : 2000-06 |
|-------|---------------------------------------|---|
| 1 | bis zu 2 | 2 |
| 2 | mehr als 2 | 3 |

Tabelle 12 Klassen der Fugendurchlässigkeit (EnEv 2004; Anhang 4; Tabelle 1)

¹⁰ Simons, Paul: Gutachten zur Gebäudethermografie mit Blower Door Messung, Dichtheitsprüfung von zwei Abluftsträngen, Springe Eldagsen, Oktober 2004

Aus dieser Klassifizierung lassen sich wiederum Grenzwerte für die Fugendurchlässigkeit für ausgewählte Prüfdrücke ableiten (Tabelle 13). Alternativ wird an dieser Stelle auf das Verfahren der DIN 18 055: 1981-10 „Fenster ...“ zurückgegriffen, das mittlerweile durch die DIN EN 12 207 ersetzt wurde. Dieses Verfahren diente ebenso zur Bewertung der Versuche im Prüfstand während der Konzeptphase (Kapitel 3.3.1). Danach gehören Gebäude mit einer Höhe bis 20 m in die Beanspruchungsgruppe 2.

Abbildung 80 zeigt die zulässige längenbezogene Fugendurchlässigkeit nach der DIN 18055.

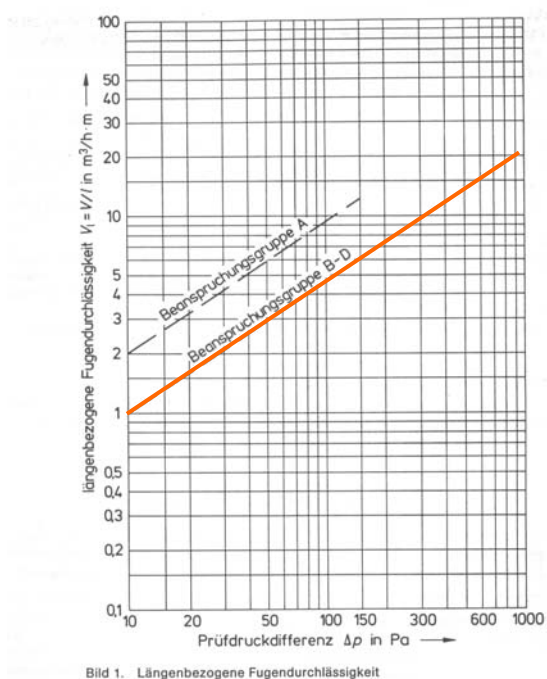


Bild 1. Längenbezogene Fugendurchlässigkeit

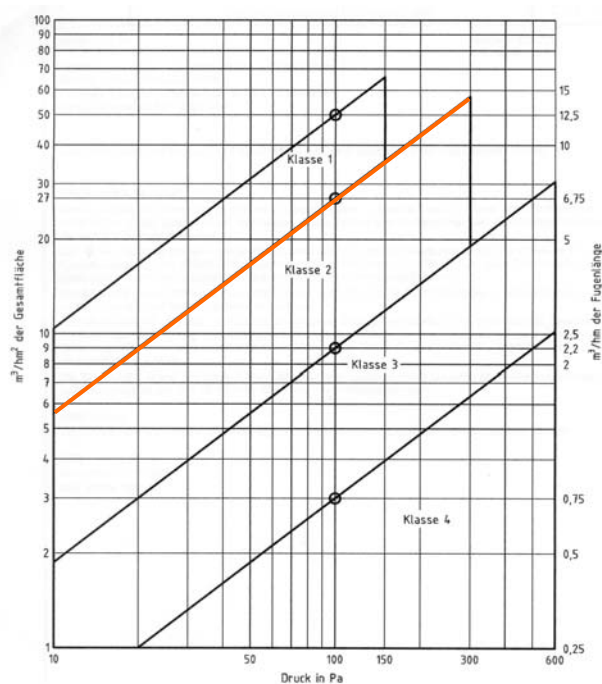


Abbildung 80 Längenbezogene Fugendurchlässigkeit nach DIN 18055

Abbildung 81 Längen- und flächenbezogene Fugendurchlässigkeit nach DIN EN 12207

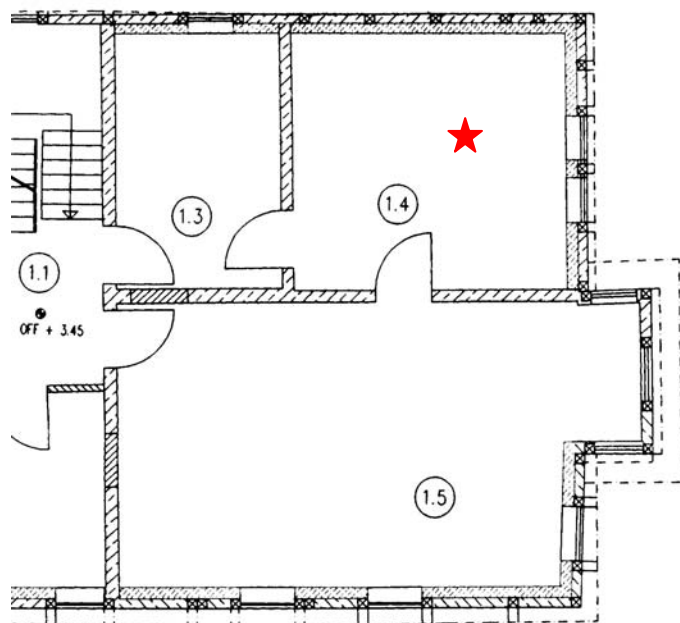
| Druck [Pa] | Fugendurchlässigkeit nach DIN 18 055 (alt) nach Länge [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$] | Fugendurchlässigkeit nach DIN 12 207 (neu) nach Länge [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$] | Fugendurchlässigkeit nach DIN 12 207 (neu) nach Fläche [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] |
|------------|--|--|---|
| 10 | 1,0 | 1,45 | 5,81 |
| 50 | 3,0 | 4,25 | 17,01 |
| 100 | 4,8 | 6,75 | 27,00 |

Tabelle 13 Vergleich DIN 18055 Klasse B und DIN EN 12207 Klasse 2

Die Tabelle 13 zeigt einen Vergleich der zulässigen Fugendurchlässigkeiten für die Beanspruchungsgruppe B im Vergleich zur Klassifizierung 2 für verschiedene Prüfdrücke.

Mit einem speziellen Messverfahren wurde in zwei Referenzräumen geprüft, ob die nach DIN zulässigen Grenzwerte einhalten werden und ob gleichzeitig die notwendige Zuluftmenge (Grundlüftung) gesichert ist.

Prüfung vor Ort - Raum 1.4¹¹



Raum

Grundfläche: 22,6 m²

Volumen: 54,6 m³

Fenster

2 Kastenfenster aus Holz

Größe: 0,85 m x 1,45 m

Abbildung 82 Ausschnitt Grundriss EG mit Raum 1.4

Äußere Fensterebene:

- Fenster zweiflügelig mit Sprossen nach historischem Vorbild
- Oberlicht Drehflügel nach historischem Vorbild, oben liegender Kämpfer
- Fenster mit Einfachverglasung 6mm, Fensterflügel ohne Dichtung

Innerer Fensterebene:

- Fenster einflügelig, Drehkipplügel
- Fensterverglasung: Zweischeiben – Isolierverglasung 4/14/4

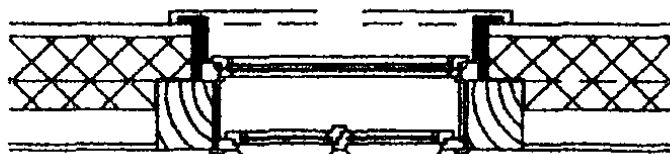


Abbildung 83 Querschnitt durch das Kastenfenster

Es handelt sich um einen Raum mit sichtbaren Deckenbalken sowie mit relativ geringer Anzahl an Fenstern je Grundfläche.

¹¹ Eckermann, Wulf: Untersuchung zur Fensterlüftung im Rentamt, Juli 2003

Mit dem Schutzdruckverfahren (Abbildung 84) ist es möglich, den Außenluftwechsel eines einzelnen Raumes zu prüfen. Durch den Einsatz von zwei BlowerDoor Geräten wird ein Druckausgleich zwischen Prüfraum und Gebäude erreicht, so dass die an der Hauseingangstür gemessene Druckdifferenz auch für den Raum gilt. Die gesamte während der Prüfdauer vom Gebläse geförderte Luft muss über die Außenwand des Raumes – entweder über die Fensterfugen oder über die Bauteilfugen – ausgetauscht werden. Die Messungen erfolgten bei Unterdruck.

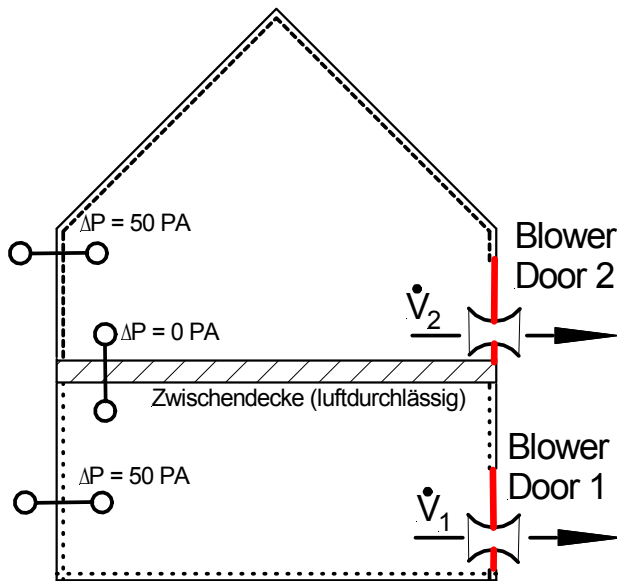


Abbildung 84 Prinzipskizze Schutzdruckverfahren

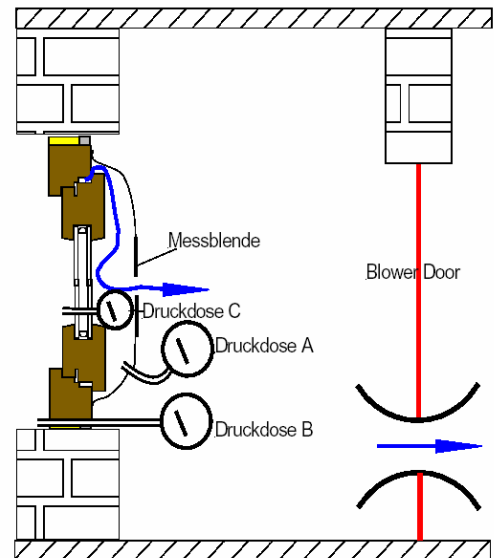


Abbildung 85 Prinzipskizze zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit des Fensters

Um Aussagen über das Lüftungsverhalten des Raumes sowie des Anteils der Fensterlüftung zu erhalten, wurde weiterhin ein modifiziertes Messverfahren mit Verwendung einer Hilfskonstruktion nach Abbildung 85 erprobt. Die Messung des Differenzdruckes über die Hilfswand erfolgte mittels einer im Fensterspalt eingelegten Kapillare



Abbildung 86 Hilfskonstruktion vor der Montage, im Hintergrund die beiden Fenster



Abbildung 87 Hilfskonstruktion vor den beiden Fenstern

| | Raum Fugenlüftung | | | | |
|---------------------------------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| Nummer der Messung | 2 | 3 | 8 | 9 | 10 |
| Volumenstrom bei 54 Pa (80%) | 368 m³/h | 357 m³/h | 462 m³/h | 412 m³/h | 376 m³/h |
| Luftdruckdifferenz Δp in [Pa] | 54 Pa | 54 Pa | 54 Pa | 54 Pa | 54 Pa |
| gesamte Fugenlänge l in [m] | 2 * 4,60 m = 9,20 m | | | | |

Berechnung nach DIN 18055

| | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Fugendurchlasskoeffizient $a = V / (l * \Delta p^{(2/3)})$ | 2,80 | 2,72 | 3,51 | 3,13 | 2,86 |
| vorhandene Fugendurchlässigkeit $V_l = 0,22 * a * \Delta p^{(2/3)}$ [m³/hm] (bei 10Pa) | 2,9 m³/hm | 2,8 m³/hm | 3,6 m³/hm | 3,2 m³/hm | 2,9 m³/hm |
| zulässige Fugendurchlässigkeit V_l nach DIN für 10 Pa Gruppe B | 1 m³/h*m | | | | |

Berechnung nach DIN 12207

| | | | | | |
|--|------------|-----|-----|-----|-----|
| Fugendurchlässigkeit bei 10 Pa Q [m³/(h*m)] | 2,9 | 2,8 | 3,6 | 3,2 | 2,9 |
| Grenzwert für Klasse 2 bei 10 Pa | 1,45 m³/hm | | | | |

Tabelle 14 Berechnung der Fugendurchlässigkeit nach DIN 18055 und DIN EN 12207

Wird die gesamte über die Außenwand inkl. Fenster ausgetauschte Luft auf die Fugenlänge der Fenster hochgerechnet, so ergibt sich eine äquivalente Fenster-Fugendurchlässigkeit. Der an Anteil an Bauteilleckagen führt bei diesem Verfahren zu „theoretischen“ Fugendurchlasskoeffizienten a die weit über den zulässigen Grenzwerten liegen. Fazit: Der Raum ist zu undicht.

| | Fenster Fugenlüftung | | | |
|---------------------------------------|----------------------|---------|---------|---------|
| Nummer der Messung | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Volumenstrom bei 54 Pa | 18 m³/h | 21 m³/h | 24 m³/h | 25 m³/h |
| Luftdruckdifferenz Δp in [Pa] | 31 Pa | 29 Pa | 23 Pa | 22 Pa |
| gesamte Fugenlänge l in [m] | 2 * 4,60 m = 9,20 m | | | |

Berechnung nach DIN 18055

| | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Fugendurchlasskoeffizient $a = V / (l * \Delta p^{(2/3)})$ | 0,20 | 0,24 | 0,32 | 0,35 |
| vorhandene Fugendurchlässigkeit $V_l = 0,22 * a * \Delta p^{(2/3)}$ [m³/hm] (bei 10Pa) | 0,2 m³/hm | 0,2 m³/hm | 0,3 m³/hm | 0,4 m³/hm |
| zulässige Fugendurchlässigkeit V_l nach DIN für 10 Pa Gruppe B | 1 m³/h*m | | | |

Berechnung nach DIN 12207

| | | | | |
|--|------------|-----------|-----------|-----------|
| Fugendurchlässigkeit bei 10 Pa Q [m³/(h*m)] | 0,2 m³/hm | 0,2 m³/hm | 0,3 m³/hm | 0,4 m³/hm |
| Grenzwert für Klasse 2 bei 10 Pa | 1,45 m³/hm | | | |

Tabelle 15 Berechnung der Fugendurchlässigkeit nach DIN 18055 und DIN EN 12207

Werden dagegen die mit dem Hilfswandverfahren ermittelten Werte der reinen Fensterlüftung über die Fuge zwischen Flügel und Blendrahmen betrachtet, so liegt diese deutlich unter den normativen Anforderungen und korrespondiert mit den im Prüfstand ermittelten Werten der Variante Lippendichtung (Kapitel 3.3.1). Fazit: Die Fenster sind zu dicht.

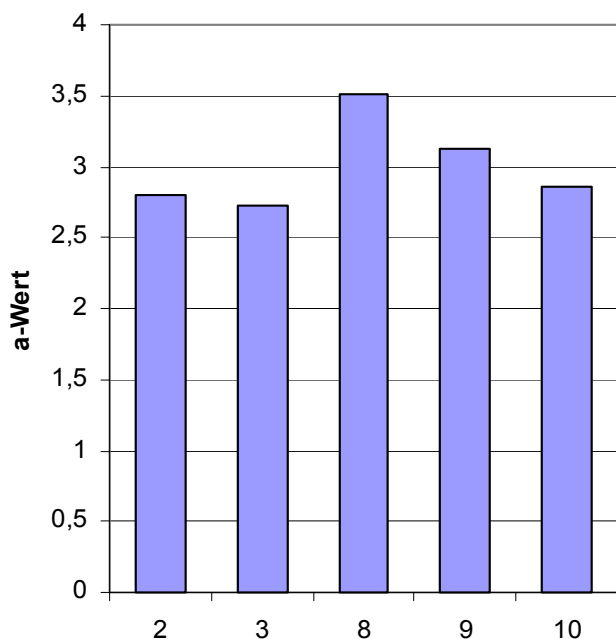


Abbildung 88 Fugendurchlasskoeffizienten (a-Wert) für Raummessung

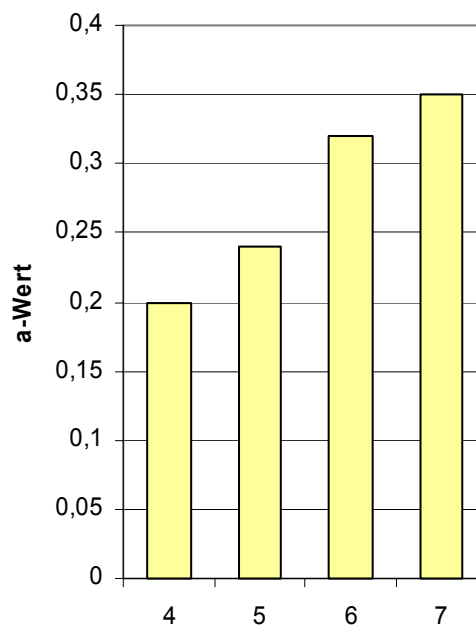


Abbildung 89 Fugendurchlasskoeffizienten (a-Wert) für Fenstermessung

Erläuterung zu Abbildung 88:

- Variante 2 Raum, normal
- Variante 3 Anschlussfugen zwischen Fenster und Mauerwerk gedichtet
- Variante 8 Lippendichtung im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 4,4 m)
zusätzlich: Außenflügel leicht geöffnet
- Variante 9 Lippendichtung im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 4,4 m)
- Variante 10 Lippendichtung teilweise im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 0,4 m)

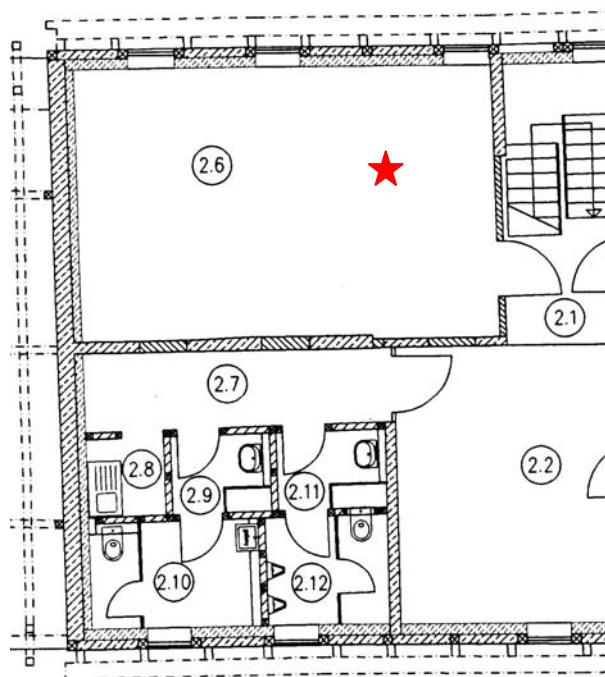
Die Variation der Fensterdichtung und –öffnung hat relativ wenig Einfluss auf den äquivalenten a-Wert, da die „Fremdlüftung“ über Bauteilfugen im Raum überwiegt. Aufgrund der im Verhältnis zur Grundfläche eher geringen Fensterfläche ergeben sich hohe äquivalente a-Werte. Insgesamt bestätigen die Raummessungen, die in Kapitel 4.5.1 getroffenen Bewertungen zur Undichtheit der Bauhülle.

Erläuterung zu Abbildung 89:

- Variante 4 Fenster, normal
- Variante 5 Lippendichtung im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 4,4 m)
- Variante 6 Lippendichtung im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 4,4 m)
zusätzlich: Innenflügel leicht geöffnet (Griff gelockert)
- Variante 7 Lippendichtung im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 4,4 m)
zusätzlich: Außenflügel leicht geöffnet

Die Variation der Fensterdichtung und –öffnung bei der Fenstermessung zeigt die erwarteten Veränderungen am a-Wert. Insgesamt sind die Einflüsse durch das Herausnehmen der Lippendichtung sowie das Öffnen einzelner Flügel aber überraschend gering. Die Messwerte korrespondieren mit den in Kapitel 3.3.1 ermittelten a-Werten im Prüfstand.

Prüfung vor Ort - Raum 2.06¹²



Raum

Grundfläche: 25 m²

Volumen: 55 m³

Fenster

3 Kastenfenster aus Holz

Größe: 0,8 x 0,81 m

bzw. 0,84 x 0,86 m

Abbildung 90 Ausschnitt Grundriss 1.OG mit Raum 2.06

Äußere Fensterebene:

- zweiflügliges Fenster nach hist. Vorbild, Drehflügel mit Sprossen nach hist. Vorbild
- Fenster mit Einfachverglasung 6mm, Fensterflügel ohne Dichtung

Innerer Fensterebene:

- Fenster einflügelig, Drehkipplügel
- Fensterverglasung: Zweischeiben – Isolierverglasung 4/14/4

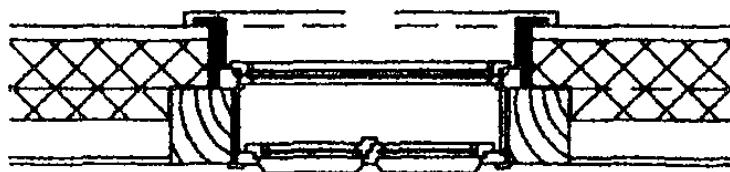


Abbildung 91 Fensterschnitt

Es handelt sich um einen Raum mit sichtbaren Deckenbalken.

¹² Eckermann, Wulf: Untersuchung zur Fensterlüftung im Rentamt, Februar 2005

Für die Messung wurde eine BlowerDoor in die Tür zum Flur eingesetzt. Die Abbildung 94 zeigt die Ergebnisse der BlowerDoor Messungen im Raum 2.06. Es wurden drei Fensterzustände gemessen (Normal, Außenflügel offen und Innenflügel offen).



Abbildung 92 BlowerDoor in der Tür des Büroraumes



Abbildung 93 Luftströmung am Fensterfutter

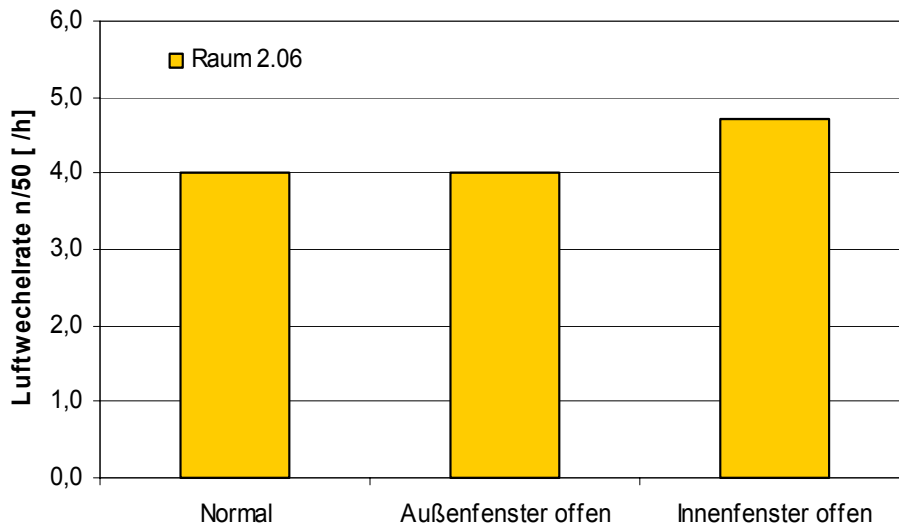


Abbildung 94 Luftwechselraten bei Prüfdruck und Variation der Fensteröffnung

Die innere Ebene des Kastenfensters besitzt eine Isolierverglasung. Das äußere Fenster ist einfachverglast. Unter der Prüfbedingung von 50 Pa Differenzdruck beträgt die Luftwechselrate für den Raum mit normal geschlossenen Fenstern $4,0 \text{ h}^{-1}$, ein allein wirkendes Innenfenster (Außenfenster offen) erreicht ebenfalls einen Wert von $4,0 \text{ h}^{-1}$. Bei geöffnetem Innenfenster wurde eine Luftwechselrate von $n_{50} = 4,7 \text{ h}^{-1}$ gemessen. Da im Gegensatz zum Raum1.4 das Schutzdruckverfahren nicht eingesetzt werden konnte, gehen in die Messwerte auch Querströmungen über Innenwände, Decke und Fußboden mit ein.

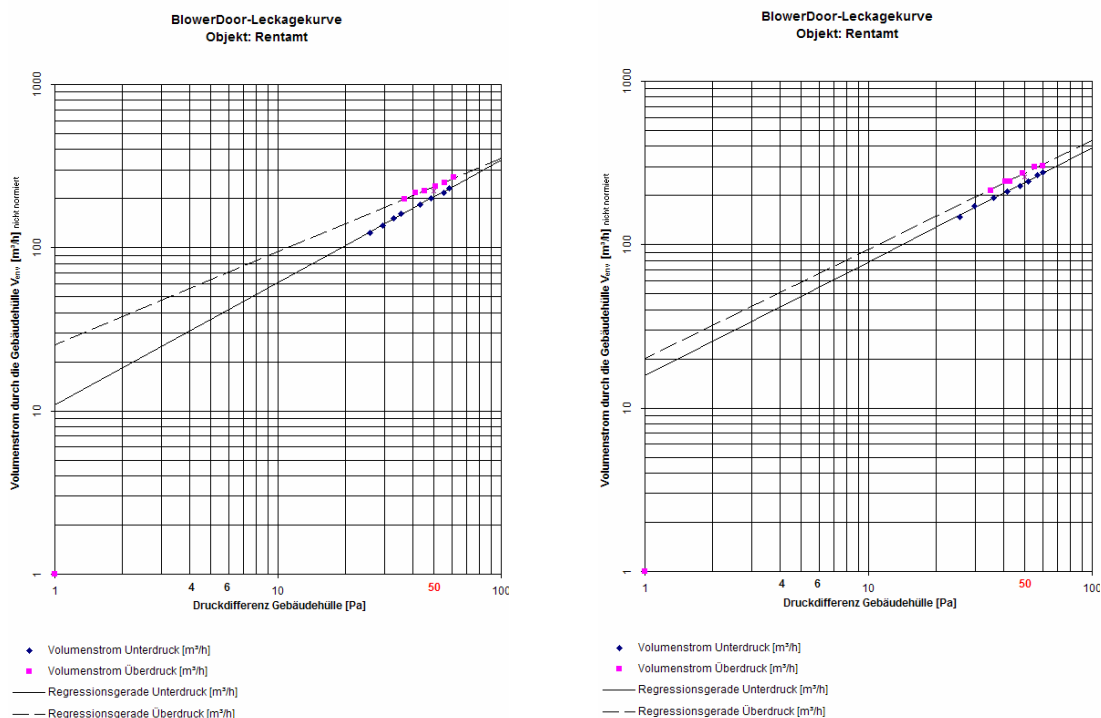


Abbildung 95 Raumkennlinie / Leckagekurve R. 2.06, alle Fensterflügel geschlossen

Abbildung 96 Raumkennlinie / Leckagekurve R 2.06, Innenflügel leicht geöffnet

Aus den Messwerten der BlowerDoor Messung unter Prüfbedingungen von 50 Pascal Differenzdruck kann nicht direkt auf den Luftwechsel unter natürlichen Strömungsbedingungen geschlossen werden. Trotzdem soll auf Grundlage der Gebäude- bzw. Raumkennlinie eine grobe Abschätzung des Luftvolumenstroms unter Nutzungsbedingungen erfolgen. Als mittlere Druckdifferenz für verschiedene Klimabereiche und Gebäudeexpositionen zwischen Innen- und Außenluft kann dabei ein Wert von ca. 2 Pa angenommen werden.

| | | |
|---|----------|----------------------------------|
| Volumenstrom bei 50 Pa (Prüfdruck) | 222 m³/h | |
| Volumenstrom bei 2 Pa (mittlere Druckdifferenz) | 27 m³/h | Luftwechsel: 0,5 h ⁻¹ |
| Volumenstrom bei 5 Pa (Abluftanlage) | 48 m³/h | Luftwechsel: 0,9 h ⁻¹ |

Gemäß der Raumkennlinie in Abbildung 95 beträgt bei einer Druckdifferenz von 2 Pa der Volumenstrom ca. 27 m³/h. Damit wird eine Luftwechselrate von 0,50 je Stunde durch die Infiltration über Bauteilfugen erreicht. Bei Annahme eines mittleren Differenzdruckes von 5 Pa bei Betrieb der Abluftanlage wird ein 0,9-facher Luftwechsel erreicht.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Grundlüftung der Prüfraume und damit die Mindestluftwechselraten nach DIN EN 12832 gesichert sind, allerdings nicht über die Fenster sondern über die Bauhülle. Die Fenster sind eher zu dicht. Werden allerdings raumäquivalente a-Werte für die Fenster gebildet, so werden die Anforderungen der DIN 12 207 bzw. der DIN 18055 an die Fugendurchlässigkeit deutlich überschritten. Das nachträgliche Herausnehmen von Dichtstreifen aus dem Fensterfalz ist deshalb nicht zu empfehlen. Eine abschließende Diskussion erfolgt in der Zusammenfassung (Kapitel 5.3).



Abbildung 97 Variante 1: Innen- und Außenflügel geschlossen

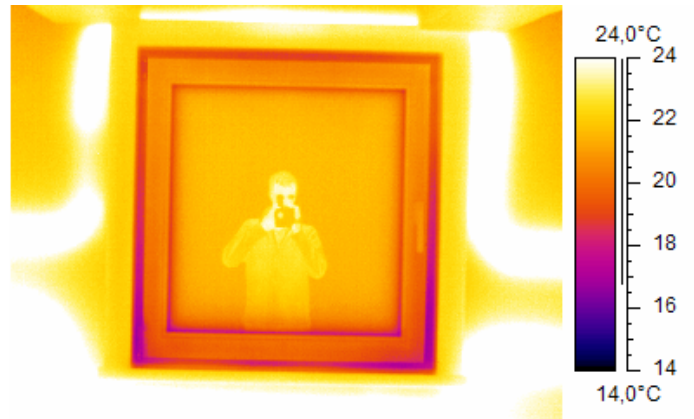


Abbildung 98 IR-Thermografie: Innen- und Außenflügel geschlossen



Abbildung 99 Variante 2: Außenflügel offen und Innenflügel geschlossen

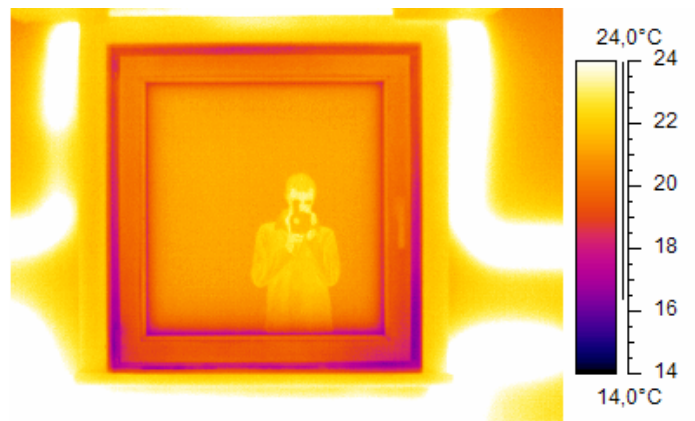


Abbildung 100 IR-Thermografie: Außenflügel offen und Innenflügel geschlossen

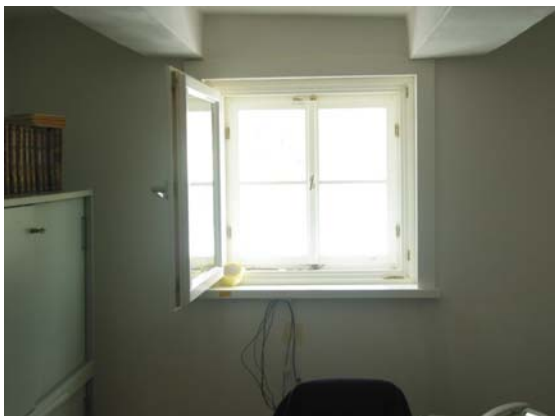


Abbildung 101 Variante 3: Außenflügel geschlossen und Innenflügel geöffnet

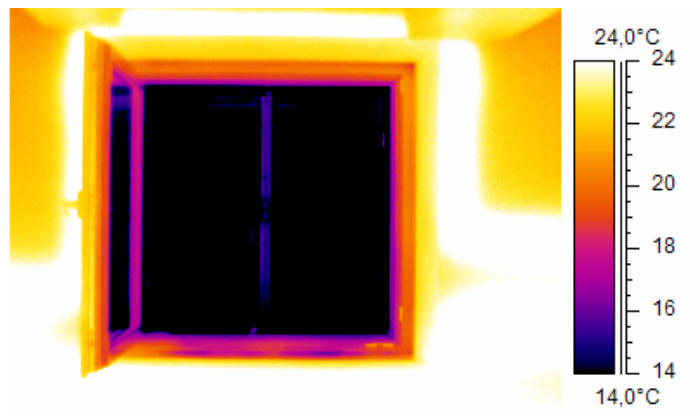


Abbildung 102 IR-Thermografie: Außenflügel geschlossen und Innenflügel geöffnet

Die Öffnung des Einfachfensters auf der Außenseite (Variante 2) führt gegenüber dem geschlossenen Zustand (Variante 1) nur zu geringen Veränderungen der raumseitigen Temperaturen. Wird dagegen die Wärmeschutzverglasung auf der Innseite geöffnet, verändert sich das Temperaturfeld in der Fensterfläche merklich. Demgegenüber sind die Einflüsse auf den Luftwechsel eher gering.

5 Fazit

5.1 Ökologische Bewertung

Dieses Kapitel wurde durch Herrn Prof. Dr. Glücklich von der Bauhaus Universität in Weimar erarbeitet. Aus dem vorgelegten Gutachten wird auszugsweise zitiert.¹³

5.1.1 Planungs- und Bauaufgabe

Ökologie und Erhalt der historischen Gebäude werden oftmals in einem Atemzug genannt. Die Motivation hierfür dürfte unterschiedlich sein. Gründe sind:

- Erhaltung der kulturellen Bausubstanz
- Erhaltung des kulturellen Umfeldes
- Einsparung von Ressourcen
- Verwendung bewährter, vermutlich unproblematischer Baustoffe

Im Bewusstsein der Menschen spielt meist die Bewahrung und Wiederherstellung der historischen Bausubstanz die wichtigste Rolle. Aus planerisch-bautechnischer Sicht werden die alten Konstruktionen oft bevorzugt, da sie bewährt und mit weniger Risiko als Mischkonstruktionen aus alter Substanz und neuen Techniken behaftet scheinen, eine ‚ehrliche‘ Konstruktion erreicht wird und das ursprüngliche Erscheinungsbild somit unproblematisch wieder hergestellt wird. Dem steht entgegen, dass Nutzung und Unterhalt der Gebäude sich ändern und für den Umgang mit alten Bautechniken nicht ausreichend erfahrene Planer und Handwerker zur Verfügung stehen. Fast jede Restaurierungsmaßnahme im gegebenen Rahmen ist deshalb in der Summe aller Maßnahmen ein Modellprojekt.

Problematisch ist stets die Frage der Nutzung der Gebäude unter den wesentlich anderen Voraussetzungen der Gegenwart - verglichen mit den ursprünglichen Erfordernissen. Mit der Festlegung der Nutzung kommen neue Anforderungen an die Raumnutzung, das Innenklima, die Installation und die Unterhaltung, also viele Fragen des Gebäudemanagements auf. Bei der Planung und Durchführung von Restaurierungsmaßnahmen muss zudem gefragt werden, ob selbst bei der Verwendung alter Konstruktionen und Materialien deren historische Funktion innerhalb des Gebäudes erreicht wird, da das Zusammenspiel der Einflüsse sich verändert hat. Dies betrifft z. B. Fragen der Raumtemperatur und –feuchte, der Gebäudedichtheit, das Zusammenspiel von Fenstern und Türen mit der sonstigen Baukonstruktion, die Installation, die Oberflächen und Beläge im Raum und das Zusammenspiel der Gebäudeumfassungsflächen mit der Baukonstruktion sowohl innerhalb eines Bauteils als auch in deren Zusammenwirkung.

Bei Jahrhunderte alter historischer Bausubstanz der vorgegebenen Art steht die Erhaltung im Vordergrund. Das Zusammenspiel von Material und Konstruktion in der Nutzung und unter den Witterungseinflüssen sollte möglichst wenig verändert werden, um die bewährten

¹³ Glücklich, Detlef: Restaurierung des Rentamtes Worbis unter ökologischen Aspekten, Weimar, März 2004

Eigenschaften zu nutzen und durch Veränderungen keine Schäden wie z. B. unter Feuchteinwirkung vorzuprogrammieren. Mögliche Nachteile wie z. B. ein erhöhter Heizwärmeverbrauch und die unzureichende Luftdichtigkeit können dabei zwar begrenzt, aber oft nicht vermieden werden.

In Gebäuden wie dem vorliegenden Fall sind in der Regel keine Altlasten zu befürchten, wenn sie nicht in neuerer Zeit verursacht wurden. Die traditionellen Baustoffe sind meist in Bezug auf die Schadstofffrage in den Innenräumen vorteilhaft.

5.1.2 Ausgeführte Lösung

Nutzung, Konstruktion, Denkmalpflege

Zielstellung der Planung war der weitgehende Erhalt des Gebäudes unter den Gesichtspunkten des Denkmalschutzes bei gleichzeitiger günstiger zukünftiger Nutzung. Dies setzt die Erhaltung der Außenhüllen in Ihrer Erscheinung und damit auch in ihrer Konstruktion voraus. Die unterschiedlichen Anforderungen an das Innenklima bezüglich des Wärmeschutzes, der Energieeinsparung und der Hygiene erfordern aber gleichzeitig Veränderungen. Die neuen energetischen Ansprüche vom Energieverbrauch und der Behaglichkeit der Arbeits- und Aufenthaltsräume her wurde mit den folgenden Maßnahmen angegangen:

- Entfernung von neueren Veränderungen durch Umbauten und Einbauten: Da an dem Gebäude schon während der gesamten Lebenszeit gebaut und verändert wurde, ist vom denkmalpflegerischen Gesichtspunkt, von der Nutzung und der verwertbaren Bausubstanz her nicht immer eine eindeutige Entscheidung möglich.
- Reparatur, Austausch und Erhaltung der Bausubstanz
- Ergänzung der Konstruktion insbesondere entsprechend den Erfordernissen der Behaglichkeit und des Witterungsschutzes
- Einbau neuer Installationen
- Berücksichtigung der Erfordernisse des Brandschutzes

Ökologischer Ansatz

Bereits weiter oben wurden wichtige Gesichtspunkte im Zusammenhang mit der Restaurierung historisch wertvoller Gebäude genannt. Zwar gibt es vielfältige Ansätze und Lösungen in der Art und nach dem Inhalt des Ökologischen Bauens. Grundlage des Ökologischen Bauens muss jedoch immer ein Gesamtkonzept über alle wesentlichen Gesichtspunkte sein mit klar definierten Zielsetzungen, das dann allerdings in der Ausarbeitung entsprechend den örtlichen Möglichkeiten und Erfordernissen punktuell

erfolgen kann. Solche Gesamtansätze und deren Ausformung werden im Zusammenhang mit dem vorliegenden Bauvorhaben nicht weiter verfolgt, da sie zwar wünschenswert, aber nicht Inhalt der vorliegenden Bauaufgabe waren.

Mit der Erhaltung des Gebäudes, seinem Rückbau auf die bewährte Konstruktion und mit der Nutzung für öffentliche Verwaltungs- und Gemeinschaftsaufgaben im leicht erreichbaren Zentrum von Worbis sind bereits wichtige ökologische Weichenstellungen bezüglich der Gesichtspunkte erfüllt:

- Kulturelle und soziale Einbindung: hier Erhalt und Nutzung wertvoller Bausubstanz
- Nachhaltige Mobilität: hier günstige Verkehrsanbindung
- Wertvolle Architektur: hier durch Erhalt
- Langlebigkeit: hier durch Erhalt und Sicherung bewährter Bausubstanz
- Ressourcenschonung und Kreislaufführung: hier durch Verwendung vorhandener Materialien und Konstruktionen
- Schadstoffvermeidung einschließlich guter Innenraumluftqualität: hier durch Verwendung unproblematischer Baustoffe

Keine besonderen Ansätze sind für den Außenraum und seine Einbindung in einen Biotopverbund einschließlich der Retention von Regenwasser und insbesondere für die Nutzungsphase für Wasser- und Nährstoffkreislaufführung, für die sonstigen Stoffkreisläufe (Abfall) sowie für die Wartung und Reinigung (Schadstoffeintrag) vorhanden. Die ökologische Zielsetzungen der Baumaßnahme waren offensichtlich vorwiegend auf die Teilkonzepte Energie, Material und Schadstoffe einschließlich Innenraumhygiene ausgerichtet.

Die Materialwahl orientierte sich an historischen Vorbildern mit

- Holz, im Fassadenbereich Eiche für die Tragkonstruktionen und Böden
- Leichtlehm
- Lehmputz mit Kalkkaseinfarben in den Innenräumen
- Kalkputz und Mineralfarben an den Fassaden
- Wachs und Leinöl (ohne Lösemittel) für die Holzoberflächen
- Naturstein für die Böden

Sie sind allesamt unter den ökologischen Gesichtspunkten Ressourcen, Kreislaufführung, Schadstoffe, Innenraumluftqualität und Energieinhalt vorteilhaft.

Die anderen wichtigen Materialien:

- Fliesen, Blähton, Holzspanplatten (mit Phenolharz gebunden) und Holzfaserverplatten haben die günstigen Eigenschaften bis auf den Energieinhalt wegen des Brenn- bzw. Trocknungsvorgangs in der Herstellung, wenn sie zielgerichtet ausgewählt wurden.

- Mineralwolle

für die Wärme- und Trittschalldämmung hat entsprechend der Dichte einen mittleren Energieinhalt, ist langlebig, wird heute noch nicht recycelt und kann Allergien hervorrufen, was hier im Nutzungsfall nicht zum Tragen kommt wegen dem unterbundenen Zugang zu den Innenräumen.

- Polystyrol, Installationsmaterial in Verbindung mit PVC (z. B. Ummantelung)

werden energieaufwändig hergestellt und sind bei der thermischen Verwertung nach dem Ausbau und im Brandfall von den Emissionen her problematisch.

Der ökologische Ansatz beruht auf der Verwendung von traditionellen Materialien in der Verbindung mit ökologischen Anforderungen. In Einzelfällen wird davon Abstand genommen. Der Gesichtspunkt Energie wird weiter unten diskutiert, hier nur einige Größenordnungen zum Primärenergieinhalt der Materialien. Wegen der diskussionswürdigen Zahlenangaben im Einzelfall wird auf scheinbar genauere Angaben verzichtet, Zudem wird gezeigt werden, dass der Gesichtspunkt des Primärenergieinhaltes zumindest beim vorliegenden Gebäude nicht von Bedeutung ist.

| | | | |
|--------------------------|-----------------------------|-------|-------------------------------|
| Lehm, Sand, Kies | | 50 | jeweils in kWh/m ³ |
| Blähton | | 1.000 | |
| Mineral. Leichtlehm | | 600 | |
| Holz, künstl. Getrocknet | | 300 | |
| Holzwerkstoffplatten | | 800 | |
| KMF auf Glasbasis | 20 kg/m ³ (Filz) | 200 | |
| | 50 kg/m ³ | 500 | |
| Polystyrol | 15 kg/m ³ | 700 | |
| | 30 kg/m ³ | 1.400 | |
| Gipsfaser/-karton | | 800 | |
| Porenbeton | | 500 | |

Dokumentation im Gebäudepass

Umweltpässe, Gebäudepässe, Zertifizierungen, Ökobilanzen, und ähnliche Mittel zur Qualifizierung von Gebäuden werden vielfach angegangen. Allen gemeinsam ist die Suche nach höherem Standard auf Einzelgebieten. So können auf diese Weise die allgemeinen technischen Standards - meist auf der Grundlage der Normen - beschrieben werden, eigentlich eine Selbstverständlichkeit, aber darüber hinaus auch besondere Qualitäten des Gebäudes.

Die Gebäude bestehen aus einer Vielzahl von verschiedenen Teilen, die von unterschiedlichen Büros geplant und von verschiedenen Firmen errichtet werden. Jedes Gebäude ist ein Solitär, kaum eines gleicht dem anderen. Anders als z. B. in der Autoindustrie gibt es keine fortlaufenden und zusammenhängenden Untersuchungen seiner Eigenschaften und eine entsprechenden Qualitätskontrolle, sowohl in der Planung und Bauausführung als auch im Betrieb. Hier muss zunächst eine zusammenhängende Beschreibung der Eigenschaften erfolgen.

Neben den standardisierten Eigenschaften sollen vor allem besondere Qualitäten des

Gebäudes ausgezeichnet werden. Neben der Gebrauchsqualität wird vor allem die Umweltqualität nachgefragt. Durch eine Ökobilanz sollen alle Umwelteinflüsse untersucht und zusammengefasst werden. Über den Ressourcenverbrauch oder CO₂-Äquivalente wird versucht, ein Maß für die Nachhaltigkeit eines Gebäudes zu finden. Die Bemühungen führen zu interessanten Teilerkenntnissen, eine zusammenhängende objektive Beurteilung wird jedoch kaum gelingen. Zu unterschiedlich sind die Basis für das Zahlenmaterial und die nachgefragten Eigenschaften. Was für den Energieverbrauch eines Kühlschranks möglich ist, gelingt schwerlich für die Vielzahl der Anforderungen an ein Gebäude.

Der Gebäudepass der Arbeitsgemeinschaft Gebäudepass e. V. vermeidet eine Addition ganz unterschiedlicher Eigenschaften, weil sie den Blick für die Gesamtheit verwischt und vielfach Manipulationen zulässt. Aufgrund der transparenten Deklaration können jedoch ganz unterschiedliche Qualitätsgesichtspunkte im Zusammenhang diskutiert und beurteilt werden. Planer, Bauherren, Käufer, Makler und Finanzierer können den Gebäudepass für eine zusammenhängende „Nabel-Schau“ vorteilhaft nutzen. Der Gebäudepass wird sich in Zukunft weiter entwickeln und unterschiedlichen Anforderungen angepasst werden. Das einheitliche Grundraster wird allen Beteiligten zu einer gemeinsamen Sprache verhelfen und damit die integrative Betrachtung von Gebäuden wesentlich voran bringen.

Der Gebäudepass beschreibt nach einem gegliederten Raster die Eigenschaften eines Gebäudes. Im Teil A fasst er die wesentlichen technischen Merkmale zusammen und gibt Auskünfte über vorhandene Unterlagen. Im Teil B werden besondere Eigenschaften beschrieben und auch nach bestimmten Rechen- oder Messmethoden untersucht (Heizwärmebedarf, Luftdichtigkeit und andere). In ihm werden vielfältige Angaben über die umweltrelevanten Eigenschaften gemacht wie z. B.: Heizwärmebedarf, Lüftungskonzept, Wassersparmaßnahmen, Baustoffeigenschaften und Schadstoffgesichtspunkte.

Teil A und B sind Teile eines gemeinsamen Rasters. So können allgemeine bautechnische Eigenschaften zusammen mit besonderen Eigenschaften einheitlich beschrieben werden. Transparenz wird hergestellt. Der Gebäudepass macht die Gebäudeeigenschaften transparent, sie können im Zusammenhang gesehen und verglichen werden. Er ist ein geordnetes Auskunftsraster.

5.1.3 Alternative Lösungsmöglichkeiten

Die Restaurierung des Amtshauses erfolgt unter den engen Randbedingungen des Denkmalschutzes und unter festen Nutzungsvorgaben, weshalb unter den vielen denkbaren Lösungsmöglichkeiten letztendlich nur wenige bleiben. Der gesamte Innenausbau hätte mit anderen Materialien und Konstruktionen erfolgen können. Die Heizung und Lüftung weichen zudem von den herkömmlichen Lösungen ganz wesentlich ab. Um die ausgeführte Lösung hinterfragen und diskutieren zu können, soll Bezug zu einigen Alternativen genommen werdend

Herkömmliche Alternativen

Zur Verbesserung des Innenraumklimas wird man in der Regel eine Schale aus Gipswerkstoffplatten auf einer Tragkonstruktion mit einer KMF-Dämmung und Dampfsperre

an der Innenseite der Dämmung vor die Außenwand setzen. Der Luftzwischenraum kann belüftet oder unbelüftet sein. Beide Fälle haben Vor- und Nachteile.

Auch eine Schale aus Porenbetonmauerwerk ist denkbar, wiederum mit Luftzwischenraum. Eine Verfüllung des Luftzwischenraums mit Leichtbeton ist denkbar. In der Regel wird man zur Rissüberbrückung die Räume tapezieren. Möglich ist auch eine Kombination beider Konstruktionen jeweils für das Bruchsteinmauerwerk und die Fachwerkwände. Die Schalendicken beider Lösungen entsprechen in etwa denen der Leichtlehmschale. Die schadhafte Fachwerkwand kann durch Porenbetonausmauerungen ersetzt werden.

Für die Fußböden und Wandoberflächen werden hier keine Alternativen gemacht. Die Beschichtungen werden i. d. R. nicht schadstofffrei ausgeführt.

Herkömmlich wird ein solches Gebäude mit einer Warmwasserheizung ausgestattet, die die Wärme über Plattenheizkörper bzw. Konvektoren an die Räume abgibt. Die Lüftung wird in der Regel über die Fenster erfolgen.

Ökologische Alternativen

Grundsätzlich ist im Bereich der Fachwerkwand der Strohlehmstein eine günstige Alternative zum mineralischen Lehm. Im Dachbereich sind Zelluloseflocken, im Fußboden über Beton die teurere Schaumglasdämmung möglich. Die Putzflächen können mit einer Kalksilikatdispersion anstelle der Kalkaseinfarbe gestrichen werden.

Grundsätzlich sind die Alternativen für die Wandkonstruktionen aus dem vorherigen Kapitel bedingt ökologisch akzeptabel mit dem Nachteil der fehlenden Kreislaufführung der Materialien. Ihre bautechnischen Nachteile werden unten diskutiert.

Als Heizung ist eine Fußleistenheizung zur zumindest teilweisen Beheizung der Räume vorstellbar, ergänzt wo notwendig durch Plattenheizkörper. Für fast alle Installationsmaterialien gibt es Alternativen ohne PVC-Anteil, die oftmals insbesondere bei der Elektroinstallation teurer sind.

5.1.4 Diskussion der ausgeführten Lösung

Diskussion des Planungsansatzes

Die eingesetzte mineralische Leichtschale erfüllt die bautechnischen und ökologischen Erfordernisse in idealer Weise mit zwei Nachteilen: Die Aufbereitung und Verarbeitung des Materials erfordern besondere Kenntnisse. Die Schale kann vollflächig mit günstigen Wand- und Deckenanschlüssen hergestellt werden. Durch den Stockwerksversatz an den Deckenauflegern können unterschiedliche Bewegungen stockwerksweise ausgeglichen werden, frei von Rissen wird sie allerdings nicht herstellbar sein, da sie durch das zusätzliche Gewicht neue Belastungen in die Konstruktion einbringt. Die Leichtlehmschale bildet bauphysikalisch mit der Ständerkonstruktion eine Art diffusionsoffene Massivwand, in der die Wärme- und Feuchteströme vorteilhaft fließen.

Dach- und Boden/Keller/Erdreichausbildung sind ebenfalls gängige und gleichzeitig sinnvolle Lösungen. Die Fensterausbildung unter den denkmalpflegerischen Vorgaben stellt eine übliche und sinnvolle Lösung dar. Die schlechte natürliche Beleuchtung der Räume lässt sich durch die festen Gestaltungsvorgaben nicht vermeiden.

Die Oberflächenbehandlung der Wand- und Deckenflächen mit mineralischen Beschichtungen ist besonders vorteilhaft. Auch wenn mögliche und wahrscheinliche Risse durch Tapeten vorteilhaft vermindert und überbrückt werden können, sollte auf eine solche Lösung aus gestalterischen und hygienischen Gründen vermieden werden. Mit dem Lehmputz und der Kalkspachtelung mit Kalkkaseinfarbanstrich wird eine besonders gute ‚atmungsfähige‘ Wandoberfläche geschaffen, allerdings mit einem organischen Anteil.

Die Lüftung von Gebäuden, die gegenüber früheren Konstruktionen relativ dicht sind, ist aus bauphysikalischen Gründen und wegen der Raumlufthygiene besonders wichtig. Deshalb ist die Entscheidung für eine kontrollierte Be- und Entlüftung richtig und notwendig. Hierdurch werden der Feuchtigkeitsanfall während der Heizsaison ganz beträchtlich reduziert und eine Verstetigung der hygienische Raumlufqualität erreicht. Auch die Luftzuführung über die Fassade und die Abführung nach einer Raumquerlüftung ist vorteilhaft und wahrscheinlich die einzige sinnvolle Lösung, weil eine Rohrführung in der historischen Bausubstanz kaum möglich und zudem teuer ist. Zudem wird in Fluren und Sanitärräumen ‚gebrauchte‘ vorgeheizte Luft genutzt und damit die Lüftung energetisch besonders vorteilhaft. Schwierig sind die Steuerung der Luftführung im Gebäude und der Fremdlufteinfluss, der durch konstruktiv bedingte Undichtigkeiten und in der Nutzung z. B. durch offene Türen entstehen. Das Gebäude mit seinen vielen Bauveränderungen während seiner Geschichte, den unterschiedlichen Treppenhäusern, dem Dachaufgang und Kellerabgang, den durch die historische Konstruktion bedingten Undichtigkeiten insbesondere im Bereich der sichtbaren Balken und der Balkendurchstoßpunkte an der Fassade und den Fensterleibungen ist unter dem Gesichtspunkt der kontrollierten Lüftungsführung besonders schwierig.

Das gewählte Prinzip der Lüftung ist insgesamt richtig und besonders sinnvoll, da bei Bedarf auch die Fensterlüftung weiterhin angesetzt wird.

Durch die Verwendung der Wandflächenheizung für die Heizwärmeverteilung wird eine angenehm hohe Temperatur der Umfassungsfläche mit hohem Strahlungsanteil erreicht und gleichzeitig Feuchtigkeit aus der Konstruktion ausgeheizt – zumindest an den davon betroffenen Flächen. Gegenüber üblichen ein- bzw. mehrlagigen Plattenheizkörpern hat sie den Vorteil des höheren Strahlungsanteils und dem Fehlen von störenden Heizkörpern. Allerdings ist der Austausch schwierig, da der Putz dann zumindest teilweise entfernt werden muss. Die Nutzer müssen zudem wissen, dass keine Nägel in diese Wandteile eingeschlagen werden dürfen. Fußleistenheizungen haben ähnliche, aber geringere Aufheizeffekte für die Wand, wodurch weniger Wärme nach außen abgegeben wird.

Inwieweit die übliche und auch im vorliegenden Fall angestrebte zeitliche Steuerung der Heizung hier sinnvoll und notwendig ist, muss im Betrieb geprüft werden. Die zusätzliche Gebäudemasse durch die Leichtlehmschale ist im vorhandenen Umfang zum sommerlichen Wärmeschutz, zur besseren Nutzung der Solarenergie und zur Verstetigung des

Heizwärmeangebotes nicht notwendig, da die Glasflächen sehr klein sind (8 bis 15 % der zugehörigen Fassadenflächen) und moderne Heizungen sich bedarfsgerecht regeln lassen. Es besteht eher die Gefahr, dass sie zu träge auf das Klima reagiert.

Das Gebäude wird mit Fernwärme aus Erdgas beheizt und damit von der Brennstoffwahl her sinnvoll. Für die Erzeugungs- und Transportverluste liegen keine Zahlen vor. Regenerative Energieträger werden nicht eingesetzt. Energiesparlampen werden eingesetzt. Über den Stromverbrauch der Ventilatoren und Umwälzpumpen liegen keine Zahlen vor.

Ökologische Gesichtspunkte der Material- und Konstruktionswahl im Überblick am Beispiel der Außenwand

Die ökologischen Vor- und Nachteile verschiedener Materialien und Konstruktionen wurden bereits oben diskutiert. Sie sollen in einem Überblick für die Außenwand im Vergleich zwischen Leichtlehm, Gipswerkstoffplatten mit Holzständern und künstlicher Mineralfaser und Porenbetonmauerwerk grob bewertet werden, obwohl eine solche Bewertung insgesamt wegen der unterschiedlichen Aspekte schwierig ist und immer ein Anteil an persönlicher Einschätzung mit einfließt.

Der Primärenergieinhalt (PEI) der Baustoffe wird oftmals als wichtig innerhalb der Diskussionen über den Treibhauseffekt angesehen. Er ist - wie in den meisten Fällen, bei denen schon vorab eine gewisse Auswahl der Baumaterialien nach ökologischen Gesichtspunkten erfolgte - meist von untergeordneter Bedeutung. Dies soll an einem einfachen Beispiel für die Außenwand gezeigt werden:

Das Gebäude hat pro Quadratmeter beheizte Fläche etwa 3 m² Hüllfläche, Bei Vernachlässigung der Anstriche ist der PEI-Anteil pro m² Wandfläche der 15 cm dicken Leichtlehmschale 90 und der des Lehmputzes 3 kWh, also insgesamt etwa 300 kWh für 3 m². Dies entspricht bei 50 Jahren Nutzungsdauer ein Einsatz von 6 kWh pro m² beheizte Fläche, bei 100 Jahren 3 kWh und so weiter, also einem marginalen Wert absolut gesehen und erst recht in den Unterschieden zwischen verschiedenen Material- und Konstruktionswahlen. Da sich alle anderen Bauteile auch mit alternativen Konstruktionen im PEI nicht so wesentlich unterscheiden, dass der Einfluss sich entscheidend erhöht, braucht die PEI-Diskussion zumindest für die langlebigen Bauteile nicht weiter verfolgt werden.

Insgesamt ist der Planungsansatz schlüssig und nachvollziehbar. Er zeigt eine intelligente neue Lösung von hohem Nutzungswert mit großen ökologischen Vorteilen auf.

| Konstruktion | Aufbau Worbis Leichtlehm- schale | Variante I Holzständerwand mit Gipswerkstoffplatte und Mineralfaser | Variante II Porenbeton- mauerwerk |
|--|--|--|---|
| Gesichtspunkte | | | |
| Konstruktive Einpassung | + | - | o |
| Feuchteausgleich (Raum und Konstruktion) | + | - | o |
| Schallschutz | + | o | o |
| Konvektionsdichte ohne Folienschicht | + | - | o |
| Wärmedämmung | - | + | +/o |
| | | | |
| Materialressourcen | + | o | o |
| Kreislaufführung | + | - | - |
| Langlebigkeit | + | o | + |
| Holzschutz | + | - | - |
| Baufeuchte | - | + | o |
| Herstellungsaufwand | - | + | o |

Tabelle 16 Variantenvergleich der baupraktischen und ökologischen Qualität

+ günstig

- ungünstig

o zwischen + und -

Baudurchführung und Begleitmessungen

Die Bauausführung dieses Modellvorhabens mit vielen unwägbareren Einflüssen insbesondere in der handwerklichen Ausführung ist nach den vorliegenden Informationen erstaunlicherweise ohne größere Probleme erfolgt, die ausführende Firma konnte offensichtlich mit dem Baustoff Lehm gut umgehen bzw. auftretende Schwierigkeiten meistern. Die oftmals schwierige gleichmäßige Materialzusammensetzung unter Baustellenbedingungen war offensichtlich zu erreichen.

Die Luftdichtigkeitmessung ergab mit Luftwechsell von zunächst ca. 6 pro Stunde fallen erwartungsgemäß ungünstige Werte im Vergleich zu Neubauten. Durch Nachbesserungen konnte die Luftwechselzahl 4 pro Stunde erreicht werden. Bei dem Gebäude sind bei starkem Wind Energieverluste über die Außenhaut prinzipiell nicht mit sinnvollem Aufwand zu vermeiden, zumal da auch durch die Nutzung der Türen und Fenster insbesondere bei öffentlichem Besucherverkehr zusätzliche beträchtliche Lüftungsverluste auftreten. Deshalb wird man die Luftdichtigkeit solcher Gebäude in Zukunft zwar verbessern können, aber nicht auf ein wünschenswertes Niveau der Luftwechselrate von 1 bis 2 pro Stunde. Die kontrollierte Lüftung dient deshalb lediglich als eine Grundlüftung, die durch Fensterlüftung

ergänzt werden muss. Sie sollte im Normalbetrieb Tag und Nacht auf einem niedrigen Niveau eingestellt sein, um Energie einzusparen bei gleichzeitiger hygienischen Raumluftverbesserung. Die Höhe ist noch zu diskutieren, könnte aber bei normaler Arbeitraumbelastung 0,3 pro Stunde sein. In der WSWO-Berechnung wurde ein Luftwechsel von 0,8 pro Stunde angesetzt.

5.1.5 Zusammenfassung und Folgerungen für zukünftige Aufgaben

Das Rentamt in Worbis wird ähnlich wie in der Vergangenheit für die öffentliche Verwaltung sowie soziale und kulturelle Angelegenheit genutzt. Es wurde nach einem Planungskonzept restauriert, das sowohl die besonderen Ansprüche des Denkmalschutzes als auch mit besonderem Schwerpunkt zukünftige ökologische Erfordernisse berücksichtigt. Es gelang dabei, weitgehend auf alte Baumaterialien zurückzugreifen und die Konstruktion und Beheizung so zu verändern, dass die heutigen Ansprüche an ein solches Gebäude erfüllt werden.

Der Klimaschutz der Außenwände wurde dabei mit einer direkt an die vorhandenen Wände angeschütteten mineralischen Leichtlehmwand erfüllt, in deren innerer Putzschicht eine Wandflächenheizung integriert ist, die für das Raumklima und den Feuchtehaushalt der Wandkonstruktion und damit den Holzschutz gleichermaßen günstig ist. Die Leichtlehmwand konnte günstig an die Decken mit Lehmwickeln und die Zwischenwände angeschlossen werden. Durch eine kontrollierte Entlüftung werden Schadstoffe und Raumfeuchte ständig abgeführt. Die gesamte Konstruktion ist diffusionsoffen.

Die Restaurierung kommt trotz der modernen Nutzungsansprüche weitgehend mit den traditionellen Materialien Holz und Holzwerkstoffen, Lehm und Naturstein aus. Wachs, Öl und Kalkkasein- und Mineralfarben dienen der Oberflächenbehandlung und -beschichtung.

Den Arbeiten gingen neben der Bestandsaufnahme breite Voruntersuchungen insbesondere über die Art und Zusammensetzung des einzusetzenden Lehms, das bauphysikalische und energetische Verhalten des Gebäudes und die Durchbildung der Heizung und Lüftung voraus. Durch Messungen der Holzfeuchte, der Luftdichtigkeit und des Heizwärmeverbrauchs wurde die technische Funktionsfähigkeit des Konzepts bestätigt.

Für zukünftige Arbeiten sollten der Wärmeschutz gesteigert und die Details insbesondere am Anschluss der Lehmschale an die Fensterleibungen und Decken sollten bezüglich der Luftdichtigkeit weiter entwickelt werden. Die Zuluftöffnungen in der Fassade sollten einen kontrollierten Lufteinlass ermöglichen und die Anforderungen des Denkmalschutzes gleichermaßen erfüllen. Varianten zur Ausführung der Flächenheizung und der Herstellung und Ausbildung der Lehmschale sollten zukünftig für andere Vorhaben erprobt zur Verfügung stehen.

Das Vorhaben hat wertvolle Erkenntnisse für die Restaurierung historischer Bausubstanzen unter ökologischen Aspekten geliefert.

5.2 Ökonomische Bewertung

Dieses Kapitel wurde durch Herrn Rademacher vom Büro Bauphysik und Denkmalpflege in Braunschweig erarbeitet.¹⁴

5.2.1 Verwendung von baustellengemischten, lokalen Lehmen

Preisermittlung

Als Wärmedämmung der Außenwände des Rentamtes wurde ein auf der Baustelle gemischter mineralischer Leichtlehm verwendet, der in eine Schalung auf Lattengerüst eingestampft wurde. Auf der Leichtlehmschale wurden die Heizrohre des Hüllflächentemperiersystems befestigt und mit Lehm eingeputzt. Die Herstellung der Leichtlehmschale und der Lehmunter- und Feinputze wurde in einem Los zusammengefasst. Im Leistungsverzeichnis wurden Zusammensetzung und Einbauverfahren des Leichtlehms vorgegeben. Mögliche Bezugsquellen für die Rohstoffe einschließlich des Lehms wurden benannt, den Auftragnehmern aber die Verwendung anderer Materialien freigestellt, wenn sie deren Eignung nachwiesen. Das Auftragen eines Kalkspachtels und der Kalk-Kasein-Anstriche waren Bestandteil anderer Lose.

Die Arbeiten wurden nach Beschränkter Ausschreibung mit öffentlichem Teilnahmewettbewerb nach § 3 Nr. 3 (2) VOB/A vergeben, die in den Lokalausgaben für die Landkreise Eichsfeld, Unstrut-Hainich und Nordhausen der Thüringer Allgemeinen und der Thüringischen Landeszeitung angekündigt wurde. Als Qualifikationsnachweis wurde neben den allgemein üblichen Nachweisen der Fachkunde, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit nach § 8 Nr. 3 (1) VOB/A der Nachweis der Qualifikation auf dem Gebiet der Denkmalpflege und die Benennung von Referenzobjekten gefordert. Es gingen 17 Bewerbungen ein, von denen 13 die geforderten Qualifikationen nachweisen konnten. Zur Submission lagen 10 Angebote vor.



¹⁴ Rademacher, Hinrich: Bewertung der eingesetzten Verfahren unter wirtschaftlichen Aspekten, Braunschweig, Juni 2005

Die Angebotspreise reichten von 78.900 bis 229.200 EUR brutto, der Mittelwert lag bei 158.500 EUR. Derart große Spannbreiten in den angebotenen Preisen sind bei Arbeiten in der Denkmalpflege nicht ungewöhnlich; bei den Zimmererarbeiten etwa waren sie ähnlich groß. Insbesondere wenn es sich um wenig standardisierte Leistungen mit hohem Arbeitsanteil und niedrigen Materialkosten handelt, hängt die Kalkulation wesentlich von den Zeitanätzen ab, die je nach Erfahrung und Einschätzung des Anbieters stark variieren können. Der preisgünstigste Anbieter konnte glaubhaft machen, dass seine Preise auskömmlich im Sinne des § 25 VOB/A waren, so dass einer Beauftragung nichts entgegenstand.

Bei dem beauftragten Bauunternehmen Gerhard Kurze handelt es sich um einen kleinen Betrieb mit weniger als zehn Mitarbeitern, dessen Inhaber Qualifikationen als Maurermeister und Restaurator im Maurerhandwerk erworben hatte und historischen Lehm- und Ziegelbau als einen Tätigkeitsschwerpunkt angab.

Aus eigener Beobachtung wissen wir, dass die Arbeiten von einheimischen, legalen Arbeitskräften ausgeführt wurden. Unter den vier am Rentamt eingesetzten Arbeitskräften war ein Auszubildender, der bei einem unangekündigten Pressetermin erläutern konnte, woran er gerade arbeitete, worauf er dabei achten musste und welche Folgen Fehlstellen hätten. Nach Abschluss der Arbeiten versicherte der Auftragnehmer auf mündliche Anfrage mehrmals, dass der Auftrag kostendeckend abgewickelt werden konnte.¹⁵

Die durch die Ausschreibung ermittelten Preise können also als marktgerecht betrachtet werden.

Durchschnittliche Preise

Für den Regelwandaufbau, der keine weiteren Vor- und Nebenarbeiten erfordert, wurden die folgenden Preise erzielt:

| Regelwandaufbau, Preise ohne Vor- und Nebenarbeiten | günstigstes (= beauftragtes) Angebot | Mittelwert aller Angebote |
|--|---|----------------------------------|
| Lattung und Schalung | 6,54 EUR/m ² | 15,14 EUR/m ² |
| Leichtlehmschale aus Blähton, 15,5 cm stark | 25,36 EUR/m ² | 56,72 EUR/m ² |
| Lehmunterputz 2-lagig | 14,11 EUR/m ² | 28,46 EUR/m ² |
| Lehmoberputz als Feinputz | 13,75 EUR/m ² | 14,31 EUR/m ² |
| Kalkspachtel | 8,55 EUR/m ² | 11,64 EUR/m ² |
| Kalk-Kasein-Anstrich | 1,62 EUR/m ² | 1,74 EUR/m ² |
| Gesamtpreis | 69,94 EUR/m ² | 127,00 EUR/m ² |

Zusätzlich sind etliche Vor- und Nebenarbeiten erforderlich: Um die Lasten der Leichtlehmschale abtragen zu können, musste sie auf dem Fachwerk bzw. Sockelmauerwerk des jeweils darunter liegenden Geschosses aufstehen. Es musste also zunächst auf entsprechender Breite die Dielung aufgeschnitten werden.¹⁶ Für die Fenster und Türen

¹⁵ Die erbetene Nachkalkulation konnte er nicht mehr vorlegen, da er in Folge eines Autounfalls verstarb.

¹⁶ Ein vollständiger Ausbau der Dielung kam zu diesem Zeitpunkt noch nicht in Frage, da dann die Lehmweller

mussten Zargen in die Schalung eingebaut werden. Die Anschlüsse an Wände und Decken erforderten zusätzliche Maßnahmen usw. Bei Mauern aus Naturstein wurden die Fenster- und Türleibungen mittels Lehmputzen mit Blähglaszuschlägen gedämmt.

Durchschnittspreise incl. Vor- und Nebenarbeiten

| | |
|---|--------------------------|
| Leichtlehmschale | 43,33 EUR/m ² |
| Lehmputz (zweilagiger Unterputz und Feinputz) | 30,96 EUR/m ² |
| Kalkspachtel | 9,75 EUR/m ² |
| Kalk-Kasein-Anstrich | 4,89 EUR/m ² |
| | 88,93 EUR/m ² |

Wie für Fachwerkbauten bis zum 18. Jh. typisch, kragen an den Fassaden des Rentamtes die Obergeschosse etwas über das jeweils darunter liegende Geschoss vor. Die Lasten der Leichtlehmschale sind mit ca. 200 kg/m² nicht unerheblich und müssen abgetragen werden. Die Vorkragungen erlauben die direkte Lastabtragung auf das Fachwerk des darunter liegenden Stockwerks. Während die Deckenbalken von historischen Fachwerkgebäuden nach heutigem Verständnis in der Regel unterdimensioniert sind, sind die Stiele bis zur Mitte des 18. Jhs. meistens eher überdimensioniert, so dass in den meisten Fällen diese zusätzlichen Lasten ohne Verstärkungen aufgenommen werden können.

Auch schon im Mittelalter wurden jedoch Wände zu Nachbargebäuden lotrecht ausgeführt. Ab dem 18. Jh., als sich die Gestaltung des Fachwerkbaus am Steinbau orientierte, galt dies auch für die Fassaden. In diesem Fall müssen die Lasten der Leichtlehmschale abgefangen werden. Am Rentamt war dies nur am Giebel des dreigeschossigen Gebäudeteils zum zweigeschossigen Anbau der Fall. Als Auflager der Leichtlehmschale wurden hier BSH-Träger auf die Stiele des Fachwerks geschraubt. Die Kosten beliefen sich auf 85,18 EUR/lfd.m, d.s. in diesem Fall 35,50 EUR/m² Wandfläche.

In dieser Kalkulation sind die Kosten der Auswahl der Rohmaterialien und der Rezeptentwicklung für die Leichtlehme nicht berücksichtigt, da sie von Fall zu Fall sehr unterschiedlich sein und eventuell sogar ganz entfallen können.

Preise anderer Konstruktionen

Zum Vergleich werden nachfolgend statistische Mittelpreise für andere Wärmedämmverfahren aufgeführt.¹⁷ Alle Kosten verstehen sich jeweils einschl. der erforderlichen Vor- und Nebenarbeiten, auch soweit nicht ausdrücklich angegeben.

der Decken belastet worden wären.

¹⁷ Nach Heinz Schmidt, Edgar Krings, Ulrich J. Dahlhaus, Ulli Meisel, Baukosten 2000. Band I Instandsetzung, Sanierung, Modernisierung, Umbau. Verlag für Wirtschaft und Verwaltung Hubert Wingen, Essen. 14. Aufl. 1999.

| Innendämmung | von | bis | Mittelpreis |
|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Vorsatzschale aus Gipswerkstoffplatten mit Dämmung und Trockenputz | 55,22 EUR/m ² | 69,54 EUR/m ² | 63,91 EUR/m ² |
| Leichtlehm-Vorsatzschale D=10 cm mit Schalung | 77,72 EUR/m ² | 91,01 EUR/m ² | 84,36 EUR/m ² |
| Leichtlehm-Vorsatzschale D=10 cm im Spritzverfahren | 53,69 EUR/m ² | 73,11 EUR/m ² | 63,91 EUR/m ² |
| Gasbeton-Vorsatzschale | 54,71 EUR/m ² | 68,00 EUR/m ² | 61,36 EUR/m ² |
| Dämmung im Gefach | | | |
| Ausfachungen ersetzen durch Mineralleichtlehm in Schalung, D = ca. 15 cm, incl. Ausbau der vorhandenen Ausfachung und Schuttabfuhr | 174,86 EUR/m ² | 209,63 EUR/m ² | 194,29 EUR/m ² |
| Ausfachungen ersetzen durch Leichtlehm im Spritzverfahren, D = ca. 15 cm, incl. Ausbau der vorhandenen Ausfachung und Schuttabfuhr | 108,39 EUR/m ² | 130,38 EUR/m ² | 120,15 EUR/m ² |
| Außendämmung | | | |
| Bekleidung aus kleinformatischen Faserzement-Platten in einfacher Deckung | 76,69 EUR/m ² | 93,57 EUR/m ² | 86,92 EUR/m ² |
| Bekleidung aus großformatigen, farbigen Faserzement-Platten | 103,28 EUR/m ² | 164,12 EUR/m ² | 132,94 EUR/m ² |
| Bekleidung aus Holzschindeln in Doppeldeckung | 154,92 EUR/m ² | 260,76 EUR/m ² | 199,40 EUR/m ² |
| Brettschalung mit Anstrich / offenporiger Lasur | 85,90 EUR/m ² | 120,66 EUR/m ² | 104,81 EUR/m ² |
| Wärmedämmverbundsystem aus Polystyrol-Hartschaum mit armiertem Kunstharzputz | 71,58 EUR/m ² | 86,92 EUR/m ² | 76,69 EUR/m ² |
| Wärmedämmverbundsystem aus Mineralfaserplatten mit Mineralputz | 92,03 EUR/m ² | 109,93 EUR/m ² | 102,26 EUR/m ² |

Die reinen Gestehungskosten des am Rentamt eingesetzten Verfahrens liegen um etwa 40 % über denen einer Vorsatzschale im Trockenbau, aus Gasbeton oder aus gespritztem Leichtlehm, sind aber unter Berücksichtigung der größeren Stärke durchaus vergleichbar mit denen einer Leichtlehmschale mit Schalung. Die Verwendung lokaler Lehme im Gegensatz zur Verwendung industrieller Fertigprodukte war demnach nicht kostenrelevant.

Dies gilt allerdings nur, wenn die Lasten der Leichtlehmschale ohne weitere Maßnahmen von der vorhandenen Konstruktion abgetragen werden können. Wenn dafür das Tragwerk ergänzt oder ertüchtigt werden muss, sind die Kosten für die Leichtlehmdämmung erheblich höher als die leichter Systeme, die an der Wand befestigt werden können.

Die erheblich niedrigeren Kosten einer Innendämmung sind ein weiterer Grund gegen den gerade von denkmalpflegerischen Laien häufig favorisierten Austausch der Gefache gegen wärmedämmende Materialien. Wichtig ist auch der Hinweis, dass die Innendämmung auch mit den billigsten Verfahren der Außendämmung konkurrieren kann.

Wirtschaftlichkeit für den Bauherrn

Außer Betracht bleiben hier andere Aspekte, die für die Auswahl eines Wärmeschutzsystem mindestens ebenso bedeutend sind wie die Kosten, etwa die bauphysikalische, denkmalpflegerische und ökologische Eignung und Vertretbarkeit und die Nachhaltigkeit der Maßnahme. Der obige Vergleich zeigt aber, dass das am Rentamt eingesetzte System auch unter Kostenaspekten durchaus in Betracht kommt.

Alle Leichtlehme haben den Nachteil, dass die im Vergleich mit reinen Dämmstoffen recht hohen Wärmeleitfähigkeiten große Schichtstärken erfordern. Dies fällt insbesondere dann ins Gewicht, wenn ein historisches Gebäude ohnehin nur kleine Räume aufweist, wie es gerade bei älteren Wohngebäuden häufig der Fall ist.

| | Nutzfläche Rohbau | Nutzfläche nach Dämmung | Grundfläche Leichtlehmdämmung |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Erdgeschoss | 348,50 m ² | 331,78 m ² | 16,72 m ² |
| 1. Obergeschoss | 390,99 m ² | 370,67 m ² | 20,32 m ² |
| 2. Obergeschoss | 187,32 m ² | 177,25 m ² | 10,07 m ² |
| Summen | 926,81 m ² | 879,70 m ² | 47,11 m ² |

Beim Rentamt beansprucht die Leichtlehmdämmung etwa 5 % der Nutzfläche des Gebäudes. Beim Einsatz von konventionellen Innendämmungen mit Hochleistungsdämmstoffen und entsprechend schlankeren Wandaufbauten hätte dieser Anteil bei ca. 2 % gelegen. Entsprechend verändern sich die wirtschaftlichen Kennwerte, wie etwa die Baukosten pro Nutzfläche.

Für die Praxis sind diese Kennwerte jedoch nur von sehr eingeschränkter Aussagekraft. Auf den ersten Blick könnte der Grundflächenbedarf suggerieren, dass die Leichtlehmdämmung pro Geschoss die Fläche eines ganzen Zimmers beansprucht. Eine solche Argumentation setzt aber voraus, dass die Innenwände beliebig verschiebbar sind, wie dies bei der Planung eines Neubaus tatsächlich der Fall wäre. Da bei der Sanierung des Rentamtes sowohl aus denkmalpflegerischen als auch aus Kostengründen die Anordnung der Innenwände so wenig wie möglich verändert wurde, hätte selbst der Verzicht auf eine Wärmedämmung die Anzahl der Räume und damit die praktische Nutzbarkeit des Gebäudes nicht verändert. Gleichzeitig mit dem Rentamt wurde auch ein nahegelegenes Gebäude aus dem frühen 20. Jh. saniert, um dort Räume für die Verwaltungsteile zu schaffen, die im Rentamt nicht untergebracht werden konnten. Bei einem früheren Umbau zum Kaufhaus hatte dieses Gebäude durchgehende Betondecken mit nur je vier Stützen und ohne gliedernde Wände erhalten. Hier bestand tatsächlich die Möglichkeit, die neuen, im Trockenbau errichteten Innenwände beliebig anzuordnen. Für die Anzahl der Räume und damit für die Anzahl der unterzubringenden Arbeitsplätze maßgeblich waren aber auch hier weniger die Raumgrößen

als die Anordnung der Fenster. Sie wesentlich zu verändern, wäre einem Neubau des Gebäudes gleich gekommen.

Wirtschaftlichkeit für den Verarbeiter

Der Vergleich der Durchschnittspreise hat gezeigt, dass die Preise für eine Leichtlehm-dämmung aus lokalen Lehmvorkommen durchaus mit industriellen Fertigprodukten konkurrieren kann. Es wurde auch bereits erwähnt, dass uns der Auftragnehmer wiederholt und auch noch nach Abschluss der Bauarbeiten versichert hat, dass die vereinbarten Einheitspreise auskömmlich waren.

Da der Ausführende in der Regel keinen oder nur geringen Einfluss auf die Auswahl des Wärmedämmsystems hat, bleibt ihm im Wesentlichen die Wahl zwischen selbst gemischten Lehmprodukten aus lokalen Rohstoffen und industriell hergestellten, überregional vertriebenen Lehm-Fertigprodukten.

Bei Lehmmörteln ebenso wie bei den konventionellen Mörtelsystemen hat der Marktanteil von Werkrockenmischungen ständig zugenommen. Gegenüber den traditionellen Baustellenmischungen haben diese Systeme nicht nur den Vorteil, dass aufwendigere Rezepturen mit optimierten Eigenschaften zum Einsatz kommen können, da Mischfehler auf der Baustelle weitgehend ausgeschlossen sind. Die Hersteller liefern ein verarbeitungsfertiges Material, garantieren eine gleichbleibende Qualität¹⁸ mit definierten Eigenschaften und bieten dem Verarbeiter eine – allerdings durchaus nicht neutrale - Beratung bei der Anwendung. Die Fertigprodukte sind zwar teurer im Einkauf, nicht unbedingt besser, jedenfalls aber bequemer als selbstgemischte Systeme. Welche Vor- und Nachteile bieten nun selbst gemischte Systeme dem Verarbeiter?

Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Verarbeiter bei baustellengemischten Systemen selbst die Verantwortung für die Auswahl der Rohstoffe, ggf. für ihre Aufbereitung und für die Mischung der Rohstoffe übernimmt.

Für Kalk- und Zementmörtel liefern DIN 1053-1 und DIN 18850 mehrere Rezepte mit konkreten Mischungsverhältnissen, und definieren ein Minimum an zugehörigen Kennwerten. Für Lehmmörtel liegen solche genormten Rezepte nicht vor. Gerade bei Lehm ohne chemische Zusätze sind die zu berücksichtigenden chemischen und physikalischen Aspekte jedoch vergleichsweise übersichtlich, so dass sowohl die Entwicklung eigener Rezepturen nach dem am Rentamt demonstrierten Muster als auch die eigene Qualitätsüberwachung für einen interessierten Anwender durchaus möglich wäre. Auch die Kosten für die erforderlichen Prüfmittel sind so gering, dass sie außer Betracht bleiben können. Dennoch sind gründliche theoretische Kenntnisse und praktische Erfahrung unerlässlich.

¹⁸ Aus eigener Erfahrung ist uns bekannt, dass der vermeintliche Qualitätsvorteil durchaus mit Einschränkungen zu sehen ist. So traten bei einem Lehm-Unterputz, der als Werkrockenmörtel in einem Silo geliefert worden war, kurz nach dem Auftragen zahlreiche Risse auf, bei denen auffiel, dass sie immer quer zur Zugrichtung des Zahnpachtels verliefen. Eine Untersuchung durch den Hersteller ergab, dass es beim Nachfüllen des Silos zur Entmischung und dadurch zu Veränderungen in der Sieblinie gekommen war, was das Schwindverhalten des Mörtel erheblich verschlechterte.

Außerdem muss der Anwender die Geologie der Umgebung so gut kennen, dass er in der Lage ist, mit vertretbarem Aufwand geeignete Lehmvorkommen zu finden. Unter dieser Voraussetzung können die Einkaufskosten für den Lehm gegen Null gehen oder sogar negativ ausfallen, wenn es sich nämlich um Baustellenaushub handelt, der sonst auf einer Deponie entsorgt würde. Der Anwender muss allerdings über große Lagerkapazitäten verfügen und in der Lage sein, verschiedene Lehmarten sauber getrennt und eindeutig zugeordnet zwischenzulagern, um dem Bauablauf entsprechend die nötigen Stoffe in den erforderlichen Mengen zur Verfügung zu haben. Auch die Aufbereitung der Rohlehme erfordert in erster Linie Wissen, Platz und Zeit.

Aus ökonomischer Sicht ermöglicht der Einsatz baustellengemischter Lehmmörtel aus lokalen Rohstoffen dem Anwender, die Kosten für den Einkauf der Rohstoffe zu minimieren und den Anteil der eigenen Arbeitsleistung zu maximieren. Dies ist immer dann im Interesse des Anwenders, wenn ihm billige Arbeitskräfte zur Verfügung stehen. Diese Voraussetzung kann gegeben sein z.B. bei selbstausführenden Bauherrn, bei kleinen Handwerksfirmen mit geringem Eigenkapital, aber auch bei mittelgroßen Firmen, denen an der Beschäftigung möglichst vieler Arbeitskräfte gelegen ist, etwa um bei schlechter Auftragslage qualifiziertes Personal zu halten. Solange das Steuer- und Sozialversicherungssystem vor allem die Arbeitskosten belastet, wird dies allerdings die Ausnahme bleiben.

Bei der Sanierung des Rentamtes wurde der als Rohstoff verwendete Lehm von einer nahegelegenen Ziegelei bezogen, die selbst lokale Lehmvorkommen abbaut und aufbereitet. Ziegeleien bauen in der Regel größere Lagerstätten ab, die über einen längeren Zeitraum hinweg eine gleichbleibende Qualität liefern. Erforderlichenfalls wird die Ziegelei die eigenen Lehme durch Verschneiden mit Rohlehm aus anderen Lagerstätten optimieren. Der wesentliche Vorteil dieser Bezugsquelle bestand für den Verarbeiter darin, dass über einen langen Zeitraum ein aufbereiteter Lehm von gleichbleibender Qualität zur Verfügung stand und sich die Beschaffung des Rohmaterials einzig nach dem Baufortschritt richten konnte. Der Einkaufspreis betrug 28,12 EUR/t netto ab Ziegelei; hinzu kommen also noch die Transportkosten. Daraus ergeben sich Einkaufskosten (ohne Transport mit dem eigenen Fahrzeug) für den aufbereiteten Lehm von ca. 10,50 EUR/m³ Leichtlehm, Lehmunterputz und Lehmfeinputz und ca. 15,70 EUR/m³ Dämmputz mit Blähglaszuschlag. Der Einkaufspreis des aufbereiteten Rohlehms machte ca. 6,4 % des vereinbarten Einheitspreises für den Leichtlehm und ca. 7,1 % für die Lehmunterputze aus.

Eine gleichbleibende Qualität des aufbereiteten Lehms ermöglicht dann allerdings auch die Verwendung eines einmal erarbeiteten Rezeptes über einen längeren Zeitraum. Im Umkehrschluss kann der aufbereitete Lehm zusammen mit dem Rezept auch Anwendern zur Verfügung gestellt werden, die nicht bereit und/oder in der Lage sind, ein Rezept selbst zu entwickeln. Im Rahmen des Projektes wurde daher ein in Worbis ansässiger, kleiner und unabhängiger Baustoffhändler gewonnen, der die am Rentamt verwendeten Rohstoffe zusammen mit den dort verwendeten Rezepten anbietet, und der auch bereit war, zwei Seminare für Planer, Handwerker und interessierte Laien auszurichten, in denen die Verarbeitung erläutert wurde. Zwei Jahre später berichtet der Händler von einer zwar mäßigen, aber stetigen Nachfrage nach diesen Lehmprodukten. Bei einem solchen Modell sollte der Baustoffhändler auch die laufende Qualitätskontrolle der angebotenen Rohstoffe übernehmen. Hauptabnehmer werden kleine Handwerksfirmen aus der Region und selbstausführende Bauherren sein.

Gegenüber industriellen Fertigprodukten ist die Verarbeitung lokaler Lehme unter den folgenden Voraussetzungen ökonomisch vorteilhaft:

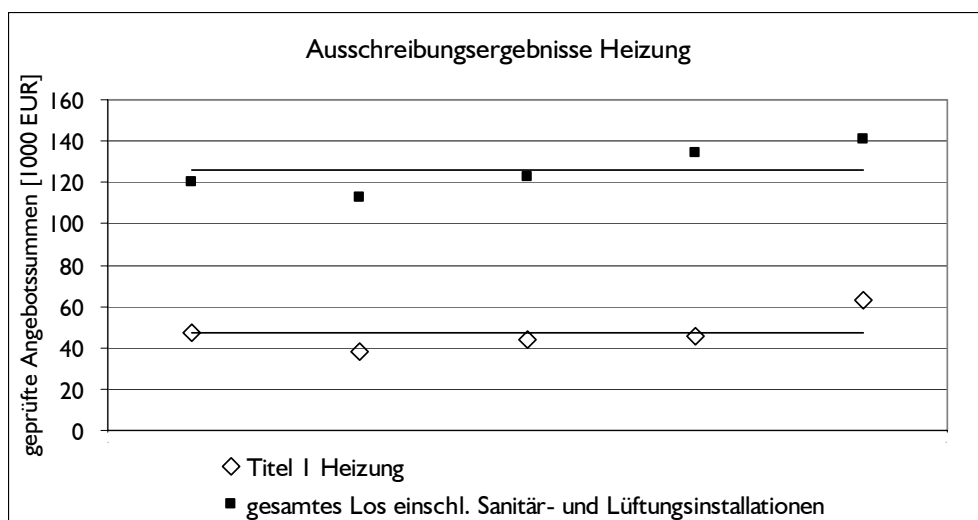
- Der Verarbeiter hat Interesse daran, den Arbeitsanteil an seinen Gestehungskosten zu maximieren und den Kapitaleinsatz zu minimieren, d.h.
- es stehen billige Rohstoffe zur Verfügung,
- es stehen billige Arbeitskräfte für die Aufbereitung und Mischung der Mörtel zur Verfügung.
- Der Anwender ist selbst in der Lage, Rezepte zu entwickeln und eine regelmäßige Qualitätsüberwachung durchzuführen.

5.2.2 Hüllflächentemperiersystem

Preisermittlung

Der Einbau des Hüllflächentemperiersystems wurde als ein Titel des Loses Heizungs-, Lüftungs- und Sanitärinstallationen ausgeschrieben. Bei der Auftragserteilung waren die Preise für die Heizung also nicht das alleinige Kriterium. Der Titel Heizung umfasste die gesamte Heizungsanlage einschl. Installationen, Armaturen, Regelung und Wärmedämmung von Anlagenteilen, jedoch ohne die Fernwärmeübergabestation. Die Warmwasserbereitung erfolgt wegen des geringen Bedarfs dezentral durch elektrische Warmwasserbereiter.

Die Arbeiten wurden im Thüringer Staatsanzeiger öffentlich ausgeschrieben. Zur Submission lagen sechs Angebote vor, von denen eines als nicht prüffähig und eines wegen begründeter Zweifel an der Fachkunde, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Anbieters ausgeschlossen werden musste.¹⁹ Die Angebotspreise für den Titel Heizung reichten von 38.400 bis 62.700 EUR brutto, der Mittelwert lag bei 48.400 EUR. Die Preise für das gesamte Los lagen zwischen 112.700 und 141.000, im Mittel bei 126.100 EUR. Den Zuschlag erhielt das niedrigste der in der Wertung verbliebenen Angebote. Der Preis für den Titel Heizung lag bei diesem Angebot nur geringfügig unter dem Mittelwert aller Angebote und ca. 18 % über dem günstigsten angebotenen Preis für diesen Titel. Bei einer separaten Vergabe hätten eventuell niedrigere Preise erzielt werden können.



¹⁹ Die Vergabestelle wurde darüber informiert und griff nicht ein.

Durchschnittliche Preise

Die Kosten für die im Rentamt eingebaute Hüllflächentemperierung einschließlich der Kosten für die Fernwärmeübergabestation betragen 64,83 EUR/m² Nutzfläche. Die Warmwasserbereitung erfolgt unabhängig von der Heizungsanlage.

Die Kosten nur für die Heizflächen, d.h. die unter Putz verlegten Kupferrohre einschließlich der Nebenarbeiten und der in jedem Raum installierten Thermostate und Entlüfter betragen 37,62 EUR/m² Nutzfläche.

Preise anderer Heizungssysteme

Zum Vergleich werden nachfolgend statistische Mittelpreise für andere Heizungssysteme aufgeführt.²⁰

Heizflächen

einschl. Vorarbeiten, Anschlüsse, Regelungen, Oberflächenbehandlung und zweimaliger Montage, Kosten pro m²

| Nutzfläche | von | bis | Mittelpreis |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Stahlradiatoren | 25,56 EUR/m ² | 32,21 EUR/m ² | 29,14 EUR/m ² |
| Gußradiatoren | 36,81 EUR/m ² | 49,08 EUR/m ² | 42,44 EUR/m ² |
| Flächenheizkörper, einfach | 23,01 EUR/m ² | 29,14 EUR/m ² | 25,56 EUR/m ² |
| Flächenheizkörper, gehoben | 29,14 EUR/m ² | 51,13 EUR/m ² | 36,81 EUR/m ² |
| Fußbodenheizung mit Estrich | 54,20 EUR/m ² | 73,11 EUR/m ² | 61,36 EUR/m ² |
| Fußbodenheizung, Trockensystem | 72,60 EUR/m ² | 108,91 EUR/m ² | 89,48 EUR/m ² |

Die Kosten der Heizflächen des Hüllflächentemperiersystems liegen etwa im Bereich gehobener Flächenheizkörper, mit denen sie in gestalterischer Hinsicht mindestens gleichwertig sind, aber deutlich über den Kosten einfacher Heizkörper. Der Vergleich ist aber nur von eingeschränkter Aussagefähigkeit, da bei den Heizkörpern zusätzliche Kosten für das Rohrleitungssystem anfallen, die beim Hüllflächentemperiersystem bereits enthalten sind.

Kennwerte für komplette Heizungssysteme einschließlich Rohrleitungen und Wärmeerzeuger stehen uns nur nach Energieträgern differenziert zur Verfügung, nicht nach Art der Heizflächen. Da Stahlheizkörper immer noch das am weitesten verbreitete System sind, dürften sie die nachfolgenden Werte vor allem bestimmen.

²⁰ Nach Heinz Schmidt, Edgar Krings, Ulrich J. Dahlhaus, Ulli Meisel, Baukosten 2000. a.a.O.

komplette Heizungsanlagen

einschl. der erforderlichen Vor- und Nebenarbeiten, Verteilungen, Leitungen, Heizflächen, Wärmeerzeuger und Regelungen, aber ohne Abgasanlage.

| Kosten pro m ² Nutzfläche | von | bis | Mittelpreis |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Gaszentralheizung | 48,57 EUR/m ² | 61,36 EUR/m ² | 56,24 EUR/m ² |
| Fernwärmeheizung incl. Übergabestation | 51,13 EUR/m ² | 73,11 EUR/m ² | 63,91 EUR/m ² |
| Ölzentralheizung mit Kellertank | 60,84 EUR/m ² | 79,76 EUR/m ² | 74,14 EUR/m ² |
| Ölzentralheizung mit Erdtank | 65,45 EUR/m ² | 86,41 EUR/m ² | 76,69 EUR/m ² |
| Kohlezentralheizung | 55,22 EUR/m ² | 74,14 EUR/m ² | 63,91 EUR/m ² |

Die Kosten der am Rentamt ausgeführten Anlage entsprechen den Mittelpreisen für andere Fernheizungsanlagen recht genau.

Die Tatsache, dass das Hüllflächentemperiersystem keine sichtbaren Heizflächen aufweist, wird oftmals als unter gestalterischen Gesichtspunkten vorteilhaft angesehen. Nachteilig sind dagegen die Einschränkungen der Möblierbarkeit der Räume, da die beheizten Wandflächen nicht zugestellt werden sollten. Dies wirkt sich insbesondere bei Eckräumen mit mehreren Außenwänden aus. Im Rentamt bereiteten diese Einschränkungen nur in einem Fall nennenswerte Schwierigkeiten. Das Vorzimmer des Bürgermeisters weist zwei Außenwände und in den beiden Innenwänden jeweils eine Tür auf. An der Hälfte einer Innenwand konnten außerdem raumhohe, 400 Jahre alte Wandfassungen freigelegt und restauriert werden, die mit Möbeln zu verstellen sich von selbst verbot.

5.3 Fazit zur bauphysikalisch-energetischen Gesamtlösung

5.3.1 Lösungsfindung

Als Ziel des Projektes wurde formuliert, einen Kompromiss aus den Anforderungen der Nutzungsfunktionalität, des sparsamen Energieeinsatzes sowie des Erhalts der Denkmalsubstanz zu finden (Kapitel 1.1). Diese Zielstellung konnte realisiert werden. Natürlich beinhaltet jede praktische Baumaßnahme letztlich eine Kompromisslösung aus den Erwartungen und Leistungen aller Projektpartner sowie der Materialität des Bauwerks. Entscheidend ist es, den Anteil der zufälligen Entscheidungen zu reduzieren zugunsten der planmäßigen und reproduzierbaren Abläufe. Für die Altbausanierung und insbesondere eine Denkmalbaustelle sind dabei in jedem Fall individuelle Fragestellungen zu klären. Ein methodisches Vorgehen hilft, Fehler in Planung und Ausführung zu reduzieren.

Der Anspruch des Modell-Vorhabens zeigt sich in einem dreistufigen Vorgehen:

1. Konzeptionelle Vorplanung und Beratung
2. Entwurfs- und Ausführungsplanung
3. Ausführung und Bauleitung sowie baubegleitende Beratung und Qualitätskontrolle

Die anteilig durch die Projektförderung finanzierten Vorleistungen der Stufe 1 ermöglichten es, Lösungen zu entwickeln, die mitunter von herkömmlichen Baustandards abweichen. Das betrifft insbesondere den Lehm- und Ziegelbau mit der Entwicklung individueller Rezepturen und der Aufbereitung örtlich verfügbarer Rohstoffe. Andererseits gab es eine Rückwirkung der praktischen Erfahrungen während der Ausführung auf den Planungsprozess im Rentamt und die übertragbaren Maßnahmeempfehlungen.

Der Projektverlauf – auch die teils kontroverse und schwierige Fachdiskussion – verdeutlichen nachdrücklich die Brisanz des eigentlichen Kernthemas: Die Planung und Realisierung einer gewerkeübergreifenden dauerhaften Sanierungslösung. Hohen Stellenwert hat dabei die Verbindung einer traditionell denkmalgerechten Sanierung mit einem innovativen Energiekonzept. Insofern ist die in Worbis praktizierte integrative Betrachtung und planerische Verknüpfung der einzelnen Gewerke wie Heizung, Lüftung und Dämmung eine Alternative zum immer noch verbreiteten isolierten Vorgehen sowie ein tatsächlicher Modellfall unter baupraktischen Bedingungen.

Dabei mussten Widersprüche in der planerischen Beurteilung, notwendige Anpassungen in der Projektumsetzung wie auch in der Interpretation messtechnischer Prüfergebnisse gelöst werden. Eine entscheidende Rolle spielt sowohl im handwerklichen als auch im ingenieurtechnischen Bereich die Qualitätssicherung, die durch Information und Sensibilisierung sowie die entsprechende fachliche Anleitung und Kontrolle der Fachdisziplinen gewährleistet wurde.

5.3.2 Funktionalität

Gebrauchstauglichkeit

Es gelang, den verwaltungstechnisch begründeten Anforderungen des Bauherrn an das Raumprogramm und den Innenausbau zu entsprechen, bei weitgehender Wahrung der traditionellen Gebäudekonstruktion. Die fachwerktypische und historische belegte Raumstruktur des Baudenkmals konnte erhalten werden, lediglich die Umlegung einer Treppe war erforderlich, um beide Gebäudeteile zu verbinden. Den wärmetechnischen Anforderungen einer modernen Nutzung wurde durch einen an die Substanz angepassten, gleichmäßigen Wärmeschutz entsprochen. Die moderate Dämmstärke und der kompakte Schichtenaufbau mindern die Gefahr von Wärmebrücken und Ausführungsfehlern. Beeinträchtigungen des Feuchteverhaltens der Wand sind, im Gegensatz zu Innendämmungen mit Plattenbaustoffen, nicht zu erwarten. Die Konstruktion ist jederzeit zugänglich und reparaturfähig.

Nutzerzufriedenheit

Das Gebäude wird von den Nutzern angenommen. Erfahrungsgemäß besteht in einem öffentlich genutzten Gebäude ein hohes Maß an Sensibilität gegenüber raumklimatischen Belastungen. Während einer Befragung von Mitarbeitern der Stadtverwaltung zeigte sich, dass die bautechnischen „Modellösungen“, also die Lehmschale mit der Wandheizung und die raumweise Ablufführung von der Mehrheit deutlich positiv bewertet werden. Die Strahlungswärme der Wandheizung wird als angenehm empfunden, die individuell gewünschten Raumtemperaturen werden problemlos erreicht. Die kleinen Fensteröffnungen in Kombination mit der speicherfähigen Lehmschale sichern einen guten sommerlichen Wärmeschutz. Einzig die nicht ausreichend flinke Regelfähigkeit der Wandheizung wird bemängelt. Ein schnelles Absenken der Temperatur ist bei Wärmegewinnen nicht möglich (z.B. tiefstehende Wintersonne). Die Putzoberflächen werden im optischen und haptischen Sinne als angenehm beurteilt. Nach dem Umzug der Stadtverwaltung in die Räume des Rentamtes gab es vereinzelte Klagen über „Augenbrennen“. Dafür werden in erster Line der durchgehend helle Anstrich der Oberflächen und des Mobiliars sowie die strahlungsstarken Leuchtmittel verantwortlich gemacht.

Praktikabilität Lehmbau

Das Projekt zeigt, dass zeitgemäße Lehmbautechniken durchaus in konventioneller Weise auszuführen sind. Die bei den Handwerkern oft vorherrschende Unsicherheit im Umgang mit dem Baustoff Lehm konnte im Projekt durch konkrete Vorgaben für Konstruktion, Lehmaufbereitung und –verarbeitung von vornherein ausgeräumt werden. Die ausführenden Handwerker - Maurer und Bauwerker - wurden am Objekt in zwei bis dreistündigen Kurzseminaren zunächst mit dem Baustoff Lehm, den Lehmbautechniken und Abschnittsweise mit den Arbeitsschritten vertraut gemacht.

Mehr Aufwand war im Vorfeld notwendig, um die mit Planung und Ausschreibung am Projekt Beteiligten von der Machbarkeit des Vorhabens zu überzeugen. Die einfache Handhabung des eingesetzten Rohlehms (Ziegellehm), der ohne weitere Vorbereitung und Bearbeitung

für die Mörtelmischungen eingesetzt werden konnte, hat ebenso zum Erfolg beigetragen, wie die unkomplizierte Mischtechnik, mit der alle ausgeführten Lehmischungen (Mineralleichtlehm, Lehmdämmputz, Lehmputz) hergestellt werden konnten.

5.3.3 Dauerhaftigkeit

Bauklimatisches Langzeit-Verhalten

Vier Jahre nach Beginn der Bauarbeiten und Einbau der Leichtlehmdämmung zeigt das Gebäude ein unproblematisches Feuchteverhalten. Die anfangs, aufgrund der Baufeuchte, hohen Holzfeuchtwerte sind durchgehend auf ein Niveau deutlich unter 20 Masseprozent getrocknet. Während der winterlichen Heizperiode war keine Auffeuchtung durch Kondensation nachweisbar. Die Wandheizung hat einen positiven Einfluss auf das Feuchteverhalten. Mittlerweile sind die Heizungs- bzw. Lüftungsanlagen auf das Bedienverhalten der Nutzer abgestimmt und einreguliert. Die messtechnischen Untersuchungen bestätigen insgesamt die Qualität und Stabilität der ausgeführten Lösungen.

Ausführlicher soll an dieser Stelle nochmals das Thema der Raumlüftung diskutiert werden, wobei die grundlegenden Erläuterungen in den Kapiteln 3.3 und 4.5 Bestand haben. In der Baupraxis bestehen weiterhin erhebliche Unsicherheiten bei Bauherren und Planern zur angemessenen Raumlüftung im Altbau. Die Diskussion um Schimmelpilzbildung in Folge von Sanierungsmaßnahmen ist aktuell. In den letzten Bauschadensberichten des BMBau (1988 und 1996) wird als häufigste Schadensursache nach Modernisierungsmaßnahmen mit etwa 13 % die Ursache „Schimmelpilz nach Fenstertausch“ benannt. Insgesamt ist zu konstatieren, dass Versuche zur Schulung der Nutzer zum „richtigen“ Lüften, um den Einbau von dichten Fenstern zu kompensieren, praktisch nicht realisierbar sind. In Gebäuden mit öffentlicher Nutzung gilt das im besonderen Maße. Somit sind eine ständig wirksame, nutzerunabhängige Grundlüftung **und** eine zeitweise Stoßlüftung (Fensteröffnen oder Abluftanlage) nötig. Dieses Konzept wurde im Rentamt konsequent umgesetzt. Die nutzer- und technikunabhängige Grundlüftung des Gebäudes erfolgt über die Bauteilfugen der Bauhülle. Die individuelle und bedarfsabhängige Lüftung der Büroräume erfolgt über die dezentralen Abluftventile sowie durch manuelle Fensterlüftung.

Im Zusammenhang mit modernen energiesparenden Bauweisen hat das Thema der „Luftdichtigkeit“ der Bauhülle eine große Bedeutung erlangt. Die Übertragung derartiger Konzepte auf die Fachwerksanierung muss gleichwohl stets hinterfragt werden. In den meisten Fällen geht es nicht darum, „dicht“ oder „undicht“ zu bauen, sondern einen angemessenen Kompromiss aus den Forderungen des Bautenschutzes, der Energieeinsparung und des Nutzungskomforts zu finden. Letztlich gibt es kein praktikables Messverfahren um die Qualität der Raumlüftung zu prüfen. Das in der EnEV benannte BlowerDoor Verfahren zur Ermittlung des Luftwechsels unter Prüfbedingungen entspricht weder in der Größe der Druckbelastung noch hinsichtlich der Raumströmung den natürlichen Verhältnissen.

Dabei ist die Luftwechselzahl, daher das in einer bestimmten Zeit ausgetauschte Raumluftvolumen, nicht das allein entscheidende Kriterium für die Qualität der Raumlüftung.

Nicht minder bedeutsam ist die Lüftungseffektivität, daher die Sicherung einer vollständigen Raumdurchströmung durch sinnvoll verteilte Zu- und Abluftöffnungen. In den Büroräumen im Rentamt kann sich aufgrund der gegenüberliegenden Fenster an den Außenwänden und der Abluftventile an den Innenwänden eine Querlüftung der Räume mit hoher Lüftungseffektivität ausbilden.

Aufgrund der differierenden Berufserfahrungen und Fachprämissen der Projektpartner in Worbis ist es durchaus verständlich, wenn die mit der BlowerDoor ermittelten Kennwerte durch die Baubeteiligten unterschiedlich interpretiert werden. Für den zertifizierten Prüfer und Luftdichtheits-Spezialisten bedeutet der im Rentamt erreichte Wert von ca. 4 je Stunde immer noch eine deutlich zu hohe Undichtheit der Bauhülle. Für den Bauklimatiker ist damit ein akzeptabler Kompromisswert für eine denkmalgerechte Fachwerksanierung erreicht. Die Leichtlehmschale besitzt aufgrund der geringen Dichte zwar eine gewisse Porosität und stellt somit keine luftdichtende Ebene dar. Andererseits gewährleistet die kapillare Leitfähigkeit ein hohes Trocknungspotential und vermeidet eine Feuchteakkumulation an kritischen Stellen.

Eine absolute Dichtheit der Gebäudehülle ist nicht sinnvoll und praktisch nicht möglich. Eine Verringerung der Lüftung über Bauteilfugen zugunsten der Lüftung über Fensterfugen ist für künftige Bauvorhaben anzustreben. Dazu sind die Detaillösungen für die problematischen Durchstoßpunkte der Balkenköpfe, den Anschluss Lehmschale-Fensterlaibung und die Unterbrechung der Lehmschale in historisch sensiblen Bereichen planerisch weiter zu entwickeln. Im Rentamt wurde für die Balkenköpfe eine solche Lösung zwar angedacht (umlaufende Nut), aber nicht ausgeführt, da der handwerkliche Aufwand zu groß gewesen wäre und statische Bedenken bestanden.

Im Sinne einer schadens- und nutzungstoleranten Lösung, wie sie für ein öffentliches Gebäude erforderlich ist, sind sowohl die Einheit von Lehmschale und Wandheizung als auch die kombinierte Fugen-Grundlüftung mit manueller bzw. mechanischer Bedarfslüftung eine angemessene Entscheidung. Eine abschließende Aussage zur Dauerhaftigkeit der gewählten Lösungen ist erst nach einem Zeitraum von 5 bis 10 Jahren der Bewährung unter Nutzungsbedingungen möglich.

Heizenergetisches Verhalten

Eine Optimierung des Energiekonzepts gelang durch die Abstimmung der wichtigsten Einflussgrößen am Gebäude: Wärmeschutz der Bauhülle, Heizung, Lüftung und Nutzung. In diesem Sinne stand von Anfang an nicht die Optimierung von Einzelkomponenten im Vordergrund sondern die Umsetzung eines effektiven Gesamtsystems. Die unerlässliche thermische Qualität des Gebäudes wird durch die innen angeordnete Leichtlehmschale erreicht. Aufgrund des historischen Erscheinungsbildes verbieten sich Änderungen an der Fassade. Die mittleren U-Werte liegen bei den Außenwänden zwischen 0,6 und 0,75, der Dachdecke zwischen 0,23 und 0,26, dem Erdgeschossfußboden zwischen 0,36 und 0,50 und den Fenstern bei 1,4 jeweils in $W/(m^2K)$. Diese Werte liegen bis auf die Außenwände nur geringfügig über dem Anforderungsniveau der EnEV. Der Heizenergiebedarf sollte nach der Sanierung weniger als 100 $kWh/(m^2a)$ betragen. Dieser Zielwert wird in der Heizperiode 2004/2005 erstmalig erreicht. Die Entwicklung des Heizenergieverbrauches sollte weiter beobachtet werden.

5.3.4 Modellwirkung

Übertragbarkeit

Der Gutachter für die „Ökologische Bewertung“ (Kapitel 5.1) konstatiert: „...das Vorhaben hat wertvolle Erkenntnisse für die Restaurierung historischer Bausubstanzen unter ökologischen Aspekten geliefert.“ Ebenso wird in Kapitel 5.2 erläutert, das sowohl für den Bauherrn als auch für die Unternehmer der betrachteten Gewerke ein auskömmliches Wirtschaften möglich war. Der Auftragnehmer versicherte nach Abschluss der Bauarbeiten wiederholt, dass die vereinbarten Einheitspreise auskömmlich waren.

Da auch die Gebrauchstauglichkeit und die technische Funktionalität insgesamt gegeben sind, kann generell von einer Lösung mit Modellcharakter gesprochen werden. Eine Übertragbarkeit der Vorgehensweise setzt voraus, dass in künftigen Bauvorhaben der konzeptionelle Vorlauf und die baubegleitende Beratung deutlich reduziert werden, um ohne anteilige Fördergelder wirtschaftlich zu sanieren.

Für die Planung und Ausführung der Wandheizung ist davon auszugehen, dass die beteiligten Unternehmen in Zukunft diese Leistung eigenständig erbringen können.

Für den Lehmabau ist eine Differenzierung nötig. Der relativ niedrige Preis erhöht die Akzeptanz von Bauherren, Planern und Handwerkern. Um den Baustoff Lehm für den Ausführenden anwendbar zu machen, bedarf es Rezepturen, die die Qualität des Materials gewährleisten und beim Lehmlieferanten abzurufen sind. Viele Ziegelhersteller verwenden auf Grund mangelnder Verfügbarkeit eigener Tonvorkommen bereits in größerem Umfang regional anfallendes Aushubmaterial für ihre Produktion. Damit wird gewährleistet, dass ökologisch wertvoller natürlicher Lehm nicht beschränkte Deponiekapazitäten beansprucht.

Nach den Erfahrungen im Rentamt wurde eine weitere Baumaßnahme im benachbarten Nordhausen, auf Grundlage der einmal entwickelten Putzmörtelrezepturen ausgeführt. Allerdings sind die Rezepturen auf die Ziegellehme anderer Ziegelwerke, ebenso wenig übertragbar, wie auf die andernorts verfügbaren Sandarten. Lehme anderer Ziegeleien oder plastischer Lehmbodenaushub, so wie die möglichen Zuschläge sind in gleicher Weise zu analysieren, aufzubereiten und für die Rezeptentwicklung einsetzbar, wie dies in diesem Projekt geschehen ist. Übertragbar ist demgegenüber die hier angewendete Vorgehensweise der Lehmanalytik nach DIN 18952 und für die Rezepturenentwicklung, auf die an anderen Standorten zur Verfügung stehenden Lehme und Sande, so wie Leichtzuschläge.

Sozioökonomische Effekte

Auf Grund des höheren Anteils manueller, handwerklicher Arbeit und des geringen Anteils industrieller, maschinenintensiver Vorfertigung wird mit dem Einsatz dieser „regionalen“ Lehmtechnik zur Entlastung des Arbeitsmarktes beitragen. Um die in den Ziegeleien zur Verfügung stehenden Lehme für den allgemeinen Lehmabau zu erschließen und für den Handwerker oder auch den Selbstbauer anwendbar zu machen, bedarf es entsprechender Analysen und Rezepte.

6 Weitergabe der Ergebnisse

6.1 Seminare

Zur Weitergabe der Ergebnisse des Projektes sowohl an Fachleute wie auch an interessierte Bauherren wurden verschiedene Seminare vorbereitet und erfolgreich realisiert. Die Resonanz auf die Veranstaltungen überzeugte hinsichtlich der Teilnehmezahlen und fachlichen Bewertung.

Planerseminare

1) Fachwerk - Heizen, Lüften und Dämmen

Eintägiges Seminar für Planer (Architekten und Fachingenieure)

Zeit: 15.04.2005

Ort: Fulda, Propstei Johannesberg

Teilnehmer: 30

2) Fachwerk - Heizen, Lüften und Dämmen

Eintägiges Seminar für Planer (Architekten und Fachingenieure)

Zeit: 29.04.2005

Ort: Quedlinburg, Deutsches Fachwerkzentrum

Teilnehmer: 23

Lehmbauseminare

1) Eintägiges Seminar für Bauherren, Handwerker, Selbstbauer und Baustoffhändler

Zeit: 08.11.2003

Ort: Worbis, Handelsmühle Büschleb

Teilnehmer: 20

2) Eintägiges Seminar für Bauherren, Handwerker, Selbstbauer und Baustoffhändler

Zeit: 13.07.2004

Ort: Worbis, Handelsmühle Büschleb

Teilnehmer: 5 (Anmeldungen 14)

Die regionale Presse berichtete mehrmals über die Lehmbauseminare in Worbis.



Abbildung 103 Lehmbauseminar in Worbis



Abbildung 104 Planerseminar in Quedlinburg

Neben den Projektseminaren konnten fachliche Erkenntnisse des Vorhabens in folgende externe Seminare und Seminarreihen einfließen:

Architekten in der Denkmalpflege

- Seminarreihe der Propstei Johannesberg gGmbH in Kooperation mit dem Landesamt für Denkmalpflege Hessen und der Architekten- und Stadtplanerkammer Hessen

Termine: 22.05.02, 10.03, 02.04,

Tragwerkplaner in der Denkmalpflege

- Seminarreihe der Propstei Johannesberg gGmbH

Termine: 10.03, 11.11.04

Restaurator im Handwerk

- Seminarreihe der Propstei Johannesberg gGmbH auf Grundlage der von den Handwerkskammern beschlossenen Prüfungsordnungen zum Restaurator im Maler- und Lackierer-, Maurer-, Tischler-, Zimmer- und Metallbauerhandwerk

Termine: 01.03, 01.04, 03.04, 02.05

Technikerausbildung

- Ferdinand Braun Schule in Fulda, Praxisanteile in den historischen Techniken und Sanierungstechniken in der Ausbildung zum Bautechniker und Farb- und Lacktechniker, Schwerpunkt Denkmalpflege

Termine: 06.02, 06.03, 07.04,

Lehmbauseminar im Denkmalhof Gernewitz gGmbH, Thüringen

Termine: 28.08.02

6.2 Arbeitsblätter und Wandmodell

Auf Grundlage der Fachberichte zum Lehm- und Mauerwerksbau sind im Projekt drei jeweils sechseckige Arbeitsblätter entstanden, die als „Handreichungen für den Praktiker“ gedacht sind.

- Beschaffung von Lehm, alternative Bezugsquellen, Analyse und Bewertung natürlich vorkommender Lehme und deren Aufbereitung
- Lehmputze, Leichtlehmputze / Lehmdämmputze, Rezepte und Empfehlung zur Aufbereitung
- Dämmung mit Leichtlehm

Weiterhin wurden zwei jeweils achtseitige Arbeitsblätter zur Konzeption und Bewährung der Heizungs- und Lüftungstechnik erstellt.

- Wandheizung – Konzept, Ausführung und Prüfung
- Lüftung – Konzept, Ausführung und Prüfung

Diese Arbeitsblätter wurden in angemessener Stückzahl gedruckt und in Zusammenhang mit den Seminaren sowie über geeignete Fortbildungseinrichtungen vertrieben. Ein Kontingent der Arbeitsblätter wurde dem Deutschen Fachwerkzentrum Quedlinburg (Bewilligungsaufgabe) sowie der Propstei Johannesberg gGmbH in Fulda zur Verfügung gestellt.

6.3 Preisverleihung

Die Stadt Leinefelde-Worbis wurde für die Sanierung des Rentamtes 2004 mit dem Thüringischen Denkmalschutzpreis ausgezeichnet.



Abbildung 105 Preisverleihung am 18.06.04 in Erfurt
v. l. n. r. amtierender Bürgermeister
Gerd Reinhardt, Landeskonservator
Dr. Stefan Winghart, Ministerin Prof.
Dr. Dagmar Schipanski,
Ortsbürgermeister Eckart Lintzel

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-------------------|--|----|
| Abbildung 1 und 2 | Ansichten des Rentamtes nach der Sanierung | 9 |
| Abbildung 3 | Probekörper der verschiedenen Mineralleichtlehm-mischungen | 15 |
| Abbildung 4 | Prinzipieller Aufbau der Wandkonstruktion | 17 |
| Abbildung 5 | Anschluss Zwischenwand im Massivteil (Detailplanung) | 18 |
| Abbildung 6 | Anschluss Zwischenwand im Massivteil (Ausführung) | 18 |
| Abbildung 7 | Anschluss der Geschosdecke (Detailplanung) | 19 |
| Abbildung 8 | Anschluss der Geschosdecke (Ausführung) | 19 |
| Abbildung 9 | Lattung und Schalung, Wellpappe zur Trennung von Holz und Lehmschale | 22 |
| Abbildung 10 | Schalung wandert je nach Bauhöhe der Lehmwand | 22 |
| Abbildung 11 | Abstimmung auf der Baustelle zwischen Unternehmer und Fachberater | 22 |
| Abbildung 12 | Antragen des Dämmputzes in der Fensterlaibung | 22 |
| Abbildung 13 | Beispiel für Rohrverlegung auf der Wand, Raum 0.4 | 26 |
| Abbildung 14 | Heizrohre im Sockel- und Brüstungsbereich sowie Fensterumfahrung | 26 |
| Abbildung 15 | Detail der Rohrinstallation am Wandmodell | 26 |
| Abbildung 16 | Prinzipskizze Lüftung | 28 |
| Abbildung 17 | Kastenfenster im Prüfstand der Firma Juchheim in Fulda | 31 |
| Abbildung 18 | Kastenfenster mit abgeklebtem Lüftungsschlitz (Pfeil) | 31 |
| Abbildung 19 | Zusammenschluss von Kanälen an einem Knotenpunkt | 33 |
| Abbildung 20 | Verkleidete Lüftungsrohre mit Abluftventil | 33 |
| Abbildung 21 | Modell des Wandaufbaus | 35 |
| Abbildung 22 | Fachwerk-Holz: Berechnung des U-Wertes und des Feuchteprofils | 36 |
| Abbildung 23 | Fachwerk-Ausfachung: Berechnung des U-Wertes und Feuchteprofils | 37 |
| Abbildung 24 | Massivteil: Berechnung des U-Wertes und Feuchteprofils | 38 |
| Abbildung 25 | Grundriss 1.Obergeschoss | 39 |
| Abbildung 26 | Grundriss 2.Obergeschoss | 39 |
| Abbildung 27 | Übersicht der im Raum 2.6 installierten Messtechnik | 40 |
| Abbildung 28 | Bezeichnung und Lage der Messstellen im Raum 2.6 | 40 |
| Abbildung 29 | Lufttemperaturen und relative Feuchten in den beiden Büroräumen | 41 |
| Abbildung 30 | Mittelwerte für den Zeitraum 06.04.2005 bis 29.04.2005 | 41 |
| Abbildung 31 | Behaglichkeitsfeld für Lufttemperatur und Oberflächentemperatur | 42 |
| Abbildung 32 | Behaglichkeitsfeld für Lufttemperatur und relative Luftfeuchte | 42 |
| Abbildung 33 | Klima-Mittelwerte für charakteristische Zeiträume | 42 |
| Abbildung 34 | Ansicht Außenwand im Raum 2.6 | 43 |
| Abbildung 35 | IR-Aufnahme der Außenwand (Montage aus mehreren Aufnahmen) | 43 |
| Abbildung 36 | Verlauf der Wandheizungsrohre und Wandtemperaturen | 43 |
| Abbildung 37 | Wärmeabgabe der untersuchten Wandfläche | 44 |
| Abbildung 38 | Wärmeleistung und Wärmeverlust der Wandheizung | 44 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Abbildung 39 | Winter 2003/2004 Temperaturen und Wärmeströme innen und außen | 45 |
| Abbildung 40 | 09.02. bis 15.02.04 Temperaturen und Wärmeströme innen und außen | 45 |
| Abbildung 41 | 09.02.2004 Temperaturen und Wärmeströme innen und außen | 46 |
| Abbildung 42 | 09.02.2004 Mittelwerte Wärmefluss nach außen | 46 |
| Abbildung 43 | Wärmegewinne (Montag 09.02.2004 9-15 Uhr) | 47 |
| Abbildung 44 | Zusammenführung von Messleitungen | 48 |
| Abbildung 45 | Skizze zum Messprinzip | 48 |
| Abbildung 46 | Messstellen vor dem Verputzen (Beispielhaft Raum 0.14)..... | 48 |
| Abbildung 47 | Detailansicht Messstelle 0.14/4 (Raum 0.14; Messstelle 4, Fensterstiel) | 48 |
| Abbildung 48 | Anlage der Messstellen | 49 |
| Abbildung 49 | Übersicht der Messachsen im Erdgeschoss | 49 |
| Abbildung 50 | Übersicht der Messachsen im 1. Obergeschoss | 50 |
| Abbildung 51 | Übersicht der Messachsen im 2. Obergeschoss | 50 |
| Abbildung 52 | Mittelwerte der Holzfeuchte nach Lage der Messpunkte..... | 51 |
| Abbildung 53 | Mittelwerte der Holzfeuchte je Geschoss | 51 |
| Abbildung 54 | Mittelwerte der Holzfeuchte nach Fassadenseite | 52 |
| Abbildung 55 | Soll-Holzfeuchten | 55 |
| Abbildung 56 | Zusammenhang zwischen U-Wert und Feuchtegehalt..... | 56 |
| Abbildung 57 | IR-Aufnahme der Nordfassade (Montage aus drei Aufnahmen) | 57 |
| Abbildung 58 | Foto der Nordfassade | 57 |
| Abbildung 59 | IR-Aufnahme der Ostfassade (Montage aus zwei Aufnahmen) | 58 |
| Abbildung 60 | Foto der Ostfassade | 58 |
| Abbildung 61 | IR-Aufnahme der Innenwand Ost im Erdgeschoss (Montage)..... | 58 |
| Abbildung 62 | Foto der Innenwand Ost im Erdgeschoss (Montage aus zwei Aufnahmen). 58 | |
| Abbildung 63 | IR-Aufnahme der Südfassade (Montage aus zwei Aufnahmen) | 59 |
| Abbildung 64 | Foto der Südfassade | 59 |
| Abbildung 65 | IR-Aufnahme des Flügelanbaus (Montage aus zwei Aufnahmen) | 59 |
| Abbildung 66 | Foto der Südseite des Flügelanbaus..... | 59 |
| Abbildung 67 | IR-Aufnahme der Westfassade (Montage aus zwei Aufnahmen)..... | 60 |
| Abbildung 68 | Foto der Westfassade | 60 |
| Abbildung 69 | Heizungsverteilung im Keller | 61 |
| Abbildung 70 | Monatlicher Wärmeverbrauch | 61 |
| Abbildung 71 | Monatlicher Wärmeverbrauch je Nutzfläche..... | 62 |
| Abbildung 72 | Entwicklung des spezifischen Heizwärmeverbrauches [kWh/(m ² a)] | 63 |
| Abbildung 73 | BlowerDoor in der Hauseingangstür..... | 64 |
| Abbildung 74 | Leckagesuche mit dem Anemometer | 64 |
| Abbildung 75 | Luftwege bei Unterdruck..... | 65 |
| Abbildung 76 | Balkendecke im Sekretariat (Raum 1.4)..... | 66 |

| | | |
|-------------------------------|--|-----|
| Abbildung 77 | IR Aufnahme der Balkendecke im Sekretariat bei Unterdruck | 66 |
| Abbildung 78 und Abbildung 79 | Aufbau und Einsatz des Durchflussmessers | 67 |
| Abbildung 80 | Längenbezogene Fugendurchlässigkeit nach DIN 18055 | 69 |
| Abbildung 81 | Längen- und flächenbezogene Fugendurchlässigkeit nach DIN EN 12207 .. | 69 |
| Abbildung 82 | Ausschnitt Grundriss EG mit Raum 1.4 | 70 |
| Abbildung 83 | Querschnitt durch das Kastenfenster | 70 |
| Abbildung 84 | Prinzipskizze Schutzdruckverfahren | 71 |
| Abbildung 85 | Prinzipskizze zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit des Fensters | 71 |
| Abbildung 86 | Hilfskonstruktion vor der Montage, im Hintergrund die beiden Fenster | 71 |
| Abbildung 87 | Hilfskonstruktion vor den beiden Fenstern | 71 |
| Abbildung 88 | Fugendurchlasskoeffizienten (a-Wert) für Raummessung | 73 |
| Abbildung 89 | Fugendurchlasskoeffizienten (a-Wert) für Fenstermessung | 73 |
| Abbildung 90 | Ausschnitt Grundriss 1.OG mit Raum 2.06 | 74 |
| Abbildung 91 | Fensterschnitt | 74 |
| Abbildung 92 | BlowerDoor in der Tür des Büroraumes | 75 |
| Abbildung 93 | Luftströmung am Fensterfutter | 75 |
| Abbildung 94 | Luftwechselraten bei Prüfdruck und Variation der Fensteröffnung | 75 |
| Abbildung 95 | Raumkennlinie / Leckagekurve R. 2.06, alle Fensterflügel geschlossen | 76 |
| Abbildung 96 | Raumkennlinie / Leckagekurve R 2.06, Innenflügel leicht geöffnet | 76 |
| Abbildung 97 | Variante 1: Innen- und Außenflügel geschlossen | 77 |
| Abbildung 98 | IR-Thermografie: Innen- und Außenflügel geschlossen | 77 |
| Abbildung 99 | Variante 2: Außenflügel offen und Innenflügel geschlossen | 77 |
| Abbildung 100 | IR-Thermografie: Außenflügel offen und Innenflügel geschlossen | 77 |
| Abbildung 101 | Variante 3: Außenflügel geschlossen und Innenflügel geöffnet | 77 |
| Abbildung 102 | IR-Thermografie: Außenflügel geschlossen und Innenflügel geöffnet | 77 |
| Abbildung 103 | Lehmbauseminar in Worbis | 104 |
| Abbildung 104 | Planerseminar in Quedlinburg | 104 |
| Abbildung 105 | Preisverleihung am 18.06.04 in Erfurt | 105 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabelle 1 | Lehmbeschaffung im Wandel der Zeit | 12 |
| Tabelle 2 | Leichtlehme, Rohdichte und Wärmeleitzahl | 13 |
| Tabelle 3 | Wärmedämmende Lehmputzte, Rohdichte und Wärmeleitzahl | 13 |
| Tabelle 4 | Technische Angaben zu den Heizkreisen | 25 |
| Tabelle 5 | Zusammenstellung der Lüftungsvarianten | 30 |
| Tabelle 6 | Angaben zum Prüffenster | 31 |
| Tabelle 7 | Beschreibung der Varianten und Angabe der Messergebnisse | 32 |
| Tabelle 8 | Zeitliche Abfolge der feuchterelevanten Baumaßnahmen | 54 |

| | | |
|------------|---|----|
| Tabelle 9 | Vergleichswerte anderer Fachwerkgebäude mit Innendämmung..... | 55 |
| Tabelle 10 | Übersicht der Heizkreise | 61 |
| Tabelle 11 | Durchschnittstemperatur der Heizperioden (Göttingen)..... | 63 |
| Tabelle 12 | Klassen der Fugendurchlässigkeit (EnEv 2004; Anhang 4; Tabelle 1) | 68 |
| Tabelle 13 | Vergleich DIN 18055 Klasse B und DIN EN 12207 Klasse 2..... | 69 |
| Tabelle 14 | Berechnung der Fugendurchlässigkeit nach DIN 18055 und DIN EN 12207 .. | 72 |
| Tabelle 15 | Berechnung der Fugendurchlässigkeit nach DIN 18055 und DIN EN 12207 .. | 72 |
| Tabelle 16 | Variantenvergleich der baupraktischen und ökologischen Qualität | 86 |

1. Beschaffung von Lehm, alternative Bezugsquellen, Analyse und Bewertung natürlich vorkommender Lehme und deren Aufbereitung *

Bernhard Gaul

Lehm als Baustoff hat eine viele Jahrtausende alte Tradition.

Er wurde für die Konstruktion von Wänden als Stampflehm, Lehmweller, Lehmsteinen oder zum Ausfachen von Holzständern und Fachwerken eingesetzt.

Zur Erstellung von Deckenfüllungen wurde Lehm in Verbindung mit Holz und Pflanzenfasern verwendet.

Mit diversen Pflanzenfasern oder Tierhaaren ausgestattet, wurde Lehm mit Sand vermengt und zum Verputzen von Wänden und Decken aus verschiedenen Baumaterialien eingesetzt.

Das Bauen mit Lehm ging im fortschreitenden 20. Jahrhundert weitgehend zurück.

Die zunehmende Anwendung von industriell gefertigten und vorkonfektionierten Baustoffen sowie der Umgang mit Zement als vorrangiges Bindemittel verdrängten den Baustoff Lehm.

Gleichermaßen ging das handwerkliche Selbstverständnis im Umgang mit Lehm als Baustoff verloren. Mit dem Rückgang des Bedarfs vererbten auch die bis dahin in ausreichendem Umfang vorhandenen Lehmgruben.

Lehm ist ein Verwitterungsprodukt aus magmatischen Gesteinen und aus Sedimentgesteinen. Er entsteht durch Erosion und Korrosion, dabei werden die ursprünglichen Bestandteile Feldspat, Quarz und Glimmer zerlegt in die Bestandteile des Lehms: Ton, Sand und Schluff.

Die Mineralien werden in unterschiedlichen Zusammensetzungen abgelagert. Die landläufigen Bezeichnungen wie Hang-, Auen- und Geschiebelehm lassen keine Rückschlüsse auf die mineralische Zusammensetzung zu.

Ton ist das Bindemittel des Lehms. Die Tonminerale bestehen aus Aluminium- Silizium- Hydroxid.

Die drei am häufigsten vorkommenden Tonminerale **Kaolinit**, **Illit** und **Montmorillonit** sind unterschiedlich groß und verfügen somit über unterschiedlich große spezifische Oberflächen, die maßgeblich für die zu erzielenden Festigkeiten ist.

Die Tonminerale bilden sehr kleine Kristallplättchen (10(-6) – 10(-5)) mm.

Die Kohäsionskräfte zwischen den Tonplättchen (Gravitation) und die Adhäsionskräfte zwischen den Tonplättchen und dem eingelagerten Wasser bestimmen dabei wesentlich die Festigkeitseigenschaften des Lehms.

Gleichermaßen bestimmt der Anteil der Tonminerale und die Tonmineralart die Menge des Wassers, das aufgenommen werden kann.

Eine Bestimmung der Tonminerale erfordert eine mineralogische Analyse.

Die im Lehm enthaltenen Quarzminerale werden nach ihrer Größe unterschieden,

danach werden die Bestandteile mit einer Korngröße von kleiner als 0,06 mm als Schluff bezeichnet, während Korngrößen von 0,06 bis 2 mm als Sand bezeichnet werden.

Ausschlaggebend für die Qualität des Lehms für die Anwendung als Baulehm sind die Eigenschaften des Materials, die von seiner mineralogischen Zusammensetzung abhängen.

So werden nicht die mineralischen Bestandteile analysiert um daraus auf die Materialeigenschaften zurück zu schließen, sondern die Materialeigenschaften selbst werden bestimmt.

Die noch Anfang des 20. Jahrhunderts weit verbreitete Kultur der für jedermann frei nutzbaren, dorfnahen Lehmgruben ist vollständig erloschen. Die Bergung von Baulehm in unmittelbarer Nähe zum geplanten Bauvorhaben ist damit wesentlich erschwert.

In den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts, in denen das Bauen mit Lehm zur Behandlung des Gebäudebestandes einerseits und als moderner, biologisch und ökologisch einwandfreier Baustoff für den Neubau andererseits wieder in Mode kam, entwickelten kleinere Unternehmen Lehmabbaustoffe und vermarkten diese.

* Dieses Arbeitsblatt ist ein Ergebnis des DBU-Projektes „Altes Rentamt“ in Worbis / Eichsfeld. Die erläuterten Rezepturen und Verfahren gelten für die konkreten Bedingungen in diesem Bauvorhaben und sind deshalb nicht generell auf andere Situationen und Materialien übertragbar.

Auf Grund der Vertriebsstrukturen mit weiten Transportwegen zwischen Erzeuger und Kunde und der bis heute relativ geringen Mengen sind diese Produkte, wenn auch qualitativ einwandfrei und hochwertig, relativ teuer.

Der hohe Preis der vorgefertigten Produkte und die mangelnde Kenntnis über Materialeigenschaften und Verarbeitung bei Planern und Handwerkern begründen die derzeit noch geringe Akzeptanz für den Baustoff Lehm.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten den **regional vorkommenden Lehm** dennoch zu nutzen.

Im Rahmen von Hoch- und Tiefbaumaßnahmen fallen oft große Mengen an **Aushubmaterial** an, das an anderer Stelle deponiert oder verfüllt wird.

Je nach geologischer Formation des Geländes handelt es sich bei dem Erdreich um Lehm.

Die regional agierenden Erdbauunternehmen kennen die Erdformationen in der Region relativ gut und können entsprechend Auskunft geben.

Das Aushubmaterial kann in der Regel kostenfrei bezogen werden, da dem Unternehmen die sonst anfallenden Deponiegebühren somit erspart bleiben.

Der natürlich vorkommende Lehmboden ist häufig inhomogen und verklumpt und muss vor der Verarbeitung zum Lehm Baustoff entsprechend aufbereitet werden.



Abb. 1 Steinige Erde muss zuvor aufbereitet werden.

Die Erde kann auf Mieten von max. 50 cm Höhe geschüttet über den Winter ausfrieren. Dabei werden die groberen Bestandteile durch den Frost-Kristallisationsdruck des beinhaltenen Wassers zermürbt. Der Lehm wird mit einem Zwangsmischer oder Quirl unter Zugabe von Wasser verrührt, so dass eine homogene Schlämme entsteht.

Der für die Produktion von Mauer- und Dachziegel eingesetzte **Ziegeleilehm** kann ebenfalls als Baulehm verwendet werden.

Diese vom Ziegler als Tonerde bezeichneten Lehme werden für die Ziegelproduktion in Brechern und Kollergängen krümelig, homogen aufbereitet, so dass in der Regel ein „fast fetter bis fetter Lehm“ mit einem Größtkorn von 0,3 bis 0,4 mm entsteht.



Abb.2 krümeliger Ziegeleilehm

Die Ziegeleilehme werde nach dem Kollern entnommen und mit ca. 200 bis 400 l Wasser / m³ Lehm vermengt und mit einem Zwangsmischer oder Quirl verrührt, so dass eine homogene Schlämme entsteht. Diese homogenisierte Lehmschlämme kann für die Baulehmanwendungen individuell mit Zuschlägen und Zusätzen vermengt werden.

Die Lehmschlämme ist unbegrenzt haltbar und auch in unverschlossenen Gebinden zu lagern. Eintrockneter Lehm kann durch die Zugabe von Wasser wieder aufbereitet werden.



Abb.3 Mit Wasser wird der Lehm verrührt.

Die Eignung der so beschafften Lehme ist jedenfalls im Einzelfall zu prüfen. Um aus dem rohen Lehm Baustoffe herzustellen, sollten die im Folgenden beschriebenen Materialeigenschaften untersucht und bestimmt werden.

Lehmbeschaffung im Wandel der Zeit

Traditionell

Lehm wurde in den kommunalen oder lokalen Lehmgruben (Kuhlen) vor dem einsetzenden Winter abgegraben und zur Verwendung mit den verfügbaren Transportmitteln auf die Baustelle geschafft.

Es kamen ausschließlich plastische Lehme zum Einsatz, die auch zu vorgefertigten Produkten, wie Lehmsteinen oder Strohlehmwickeln verarbeitet wurden.

Der für Ausfachung und Putz vorgesehene Lehm wurde auf Mieten geschüttet in denen er durch den Frost-Tauwechsel zermürbt wurde.

Der Lehm wurde mit lokal verfügbaren Zuschlägen von Hand vermengt und ebenso eingebaut. Kosten für das Material sind nicht entstanden.

Konventionell

Lehmprodukte, wie Lehmsteine, Lehm trockenmörtel, Leichtlehmplatten und -Elemente werden von den Herstellern vorgefertigt und von Fachhändlern vertrieben. Die Produkte werden über weite Wege von der Produktionsstätte bis zur Baustelle transportiert. Die Materialien sind wie andere konventionelle Baustoffe handwerksüblich mit dem gleichen Equipment zu verarbeiten.

Die Kosten für die Lehmbaustoffe und den Transport liegen oft bei einem Vielfachen des Preises für andere konventionelle Baustoffe.

Alternativ

Lehm, der als Abraum- und Aushubmaterial deponiert würde, kann von den Erdbauunternehmen direkt zur Baustelle transportiert werden.

Der Lehm kann wie traditionell im Winter ausfrieren oder mit einem geringfügig höheren maschinellen Aufwand auf der Baustelle verarbeitet werden.

Die Einsatzbereiche liegen vor allem bei den Nassmörteltechniken. Die Lehm trockenenelemente-Herstellung ist zu aufwendig. Die Lehme sind kostenlos „frei Baustelle“ erhältlich.

Als **Bindkraft** wird der Widerstand bezeichnet, den der Lehm bei einer bestimmten Konsistenz im Zerreißversuch leistet.

Die richtige, als „Normsteife“ bezeichnete Konsistenz wird derart gewährleistet:

200g Lehm werden mehrfach geknetet und auf einer festen Platte aufgeschlagen und anschließend von Hand zu einer Kugel geformt.



Abb. 4 200 g Lehm werden zu einer Kugel geformt.

Die Kugel wird aus einer Höhe von 2,00 m auf einen glatten, festen Untergrund fallen gelassen. Der Lehm hat dann „Normsteife“, wenn die durch den Aufprall entstandene Abplattung einen Durchmesser von 50 mm aufweist.



Abb. 5 Normsteifer Lehm nach der Kugelfallprobe

Aus diesem Lehm wird ein Probekörper, ein so genannter Achterling hergestellt, der sofort nach Anfertigung im „Zugfestigkeitsprüfer“ bis zum Zerreißen belastet wird.



Abb. 6 Form für zur Bindekraftprüfung

Der Berechnungsquerschnitt des Probekörpers beträgt 5 cm^2 .

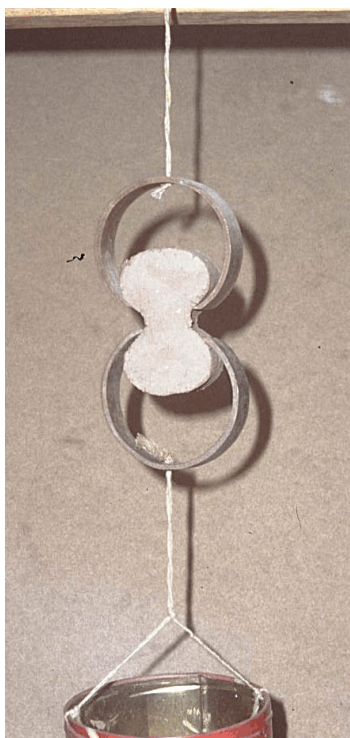


Abb.7 Probe beim Zerreißttest

Alternativ kann zur überschlägigen Ermittlung der Bindekraft aus dem normsteifen Lehm ein anderer Probekörper geformt werden, wie z.B. eine „Wurst“ mit einem Ø von 2 cm, die zwischen den Händen gerollt und bis zum Zerreißen aus den Händen herabhängt. Die Bindekraft wird in g/cm^2 angegeben.

Einteilung der Baulehme nach Bindekraft (DIN 18952)

| Bindekraft g/cm^2 | Benennung |
|----------------------------|------------------|
| 50 - 110 | magerer Lehm |
| 111 - 200 | fast fetter Lehm |
| 201 - 280 | fetter Lehm |
| über 280 | sehr fetter Lehm |

Lehm mit einer geringeren Bindekraft als 50 g/cm^2 ist unbrauchbar.

Als **Trockenschwindung** wird die durch den Feuchtigkeitsverlust bedingte Formänderung des Lehms bezeichnet.

Die Lehmproben werden dazu in folgender Weise aufbereitet:

Aus den normsteifen Lehmen werden Probekörper von $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}$ hergestellt. An den Stirnseiten der frischen Probekörper werden Marken eingesetzt, deren Abstand maßlich erfasst wird. Nach Trocknung der Probekörper in Raumklima - $20/\text{C}$ - $50\% \text{ rF}$, bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte, wird der jeweilige Abstand der Marken wieder gemessen.



Abb. 8 Form zur Erstellung der Probekörper für die Schwindprüfung

Alternativ werden Probekörper von $20 \times 4 \times 4 \text{ cm}$ hergestellt, die mit einem exakten Maß von 16 cm an einer Seite eingeritzt werden.

Die ermittelte Maßdifferenz ergibt die Trockenschwindung des Probekörpers, die in Längenschwindung wird in [mm] und [%] angegeben wird.

Die Schwindmaße brauchbarer Baulehme liegen dabei zwischen 5 und 20 mm.

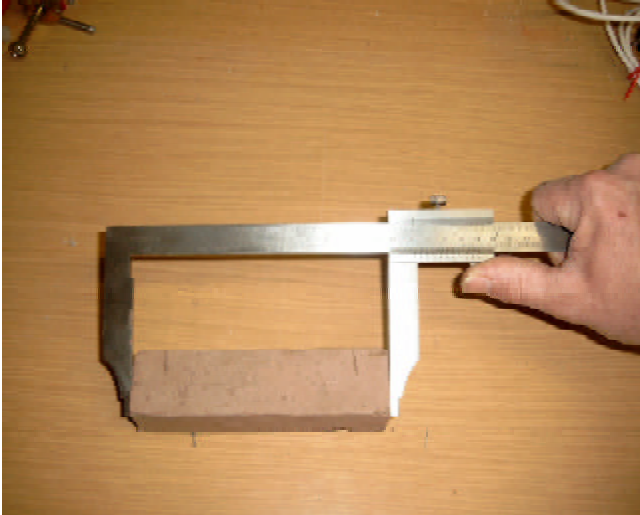


Abb. 9 Trockenschwundmessung an getrockneter Probe

Anwendung gilt: je geringer der Anteil der groben Kornfraktionen ist, um so mehr Sand muss dem Lehm zugesetzt werden.



Abb. 10 Lehm im Glas mit Wasser...

Der **Kalkgehalt** im Lehm reduziert die Festigkeitseigenschaften. Er sollte daher möglichst gering sein. Die Lehmproben werden dazu in folgender Weise untersucht:

Aus dem erdfeuchten Lehm wird eine Pfanne Ø 5cm Wandungsdicke ca. 1cm geformt, in die einige Tropfen 30%iger Salzsäure gegossen wurde. Eine heftige Reaktion der Säure weist auf einen hohen Kalkgehalt hin. Es verbleiben auf der benetzten Oberfläche porenartige Hohlräume.

Der **Feuchtegehalt** im Lehm ist abhängig von der „Inneren Oberfläche“ die auf Kornverteilung und Struktur der Tonminerale schließen lässt.

Die gravimetrisch ermittelte Massedifferenz zwischen feuchtem und trockenem Zustand, dividiert durch das Trockengewicht ergibt den Feuchtegehalt der in M.-% angegeben wird.

In der Erweiterung der Messung wird die **Ausgleichsfeuchte** festgestellt. Dazu wird der Probekörper in Raumklima - 20/C - 50% rF, bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte gelagert. Wie beim Feuchtegehalt wird die gravimetrisch ermittelte Massendifferenz errechnet und in M.-% angegeben.

Die **Kornverteilung** ist maßgeblich für das Schwinden und damit für die Rissbildung im Lehm verantwortlich. Mit dem Absetzversuch wird der Anteil der per Augenschein erkennbaren „größeren“ Kornfraktionen bestimmt. Erkennbar sind die Korngrößen von mehr als 0,1 mm.

Eine Differenzierung des feineren Korns in Ton bzw. Schluff ist nicht möglich.

Für die anschließende „Abmagerung“ der Lehm Masse zur



Abb. 11 ...nach einem Tag wird im Absetzversuch die Kornverteilung sichtbar

Quellen und weiterführende Literatur:

- DIN 18951: Lehmbauten Vorschriften für die Ausführung
- DIN 18952 Blatt 1: Baulehm Begriffe Arten
- DIN 18952 Blatt 2: Prüfung von Baulehm
- DIN 18953 Blatt 1: Baulehm Lehmbauteile Verwendung von Baulehm
- DIN 18953 Blatt 2: Baulehm Lehmbauteile Gestampfte Lehmwände
- DIN 18954: Ausführung von Lehmbauten Richtlinien
- Lehmbau Regeln: Dachverband Lehm e.V.
- Lehmbau 2001: Dahlhaus, Kortlepel, Aachen 2001
- DIN 4108: Wärmeschutz im Hochbau DIN V 4108-4 02.02
- Lehmbau – Handbuch: Minke G. Staufen 1994
- Leichtlehmbau: Vohlhard, F, Karlsruhe 1983
- Der Lehmbau: Niemeyer, R., Hamburg 1946, Grebenstein 1982

3. Dämmung mit Leichtlehm *

Bernhard Gaul

Im Zusammenhang mit dem Baustoff Holz hat Lehm einen konservierenden Einfluss.

Daher eignen sich Leichtlehme insbesondere zur energetischen Sanierung von Fachwerkobjekten.

Leichtlehm findet im Rahmen von Sanierungen, Ergänzungen und Rekonstruktionen als Ausfachungsmaterial ebenso Verwendung, wie beim Füllen von Holzbalkendecken von Dächern und bei Fußbodenkonstruktionen. Als statisch nachzuweisender, tragender Baustoff ist Leichtlehm derzeit nicht zugelassen.

Durch die Zugabe poröser Zuschlagsstoffe wird die Rohdichte von Lehm herabgesetzt und damit die Wärmedämmwirkung erhöht.

Als Leichtzuschläge können Pflanzenteile wie Stroh und Heidekraut, Holz, Kork oder Schilf und mineralische Leichtzuschläge wie Blähton, -schiefer, -perlite oder -glas eingesetzt werden.



Abb. 1 Blähtonleichtlehm und Blähglasleichtlehm

Bei Leichtlehm (Lehm mit Leichtzuschlägen nach DIN 18951) handelt es sich um Lehmmasse mit einem trockenen Raumgewicht von weniger als 1.200 kg/m^3 . Dieser wird entsprechend den verwendeten Zuschlagstoffen unterteilt. So haben sich Begriffe wie Strohleichtlehm, Holzleichtlehm und mineralischer Leichtlehm etabliert.

Leichtlehme werden in Form von vorgefertigten und getrockneten Elementen oder in der Nasslehmtechnik angewendet.

Die nach Zuschlagstoffen unterteilten Leichtlehme unterscheiden sich in ihren bauphysikalischen und baupraktischen Eigenschaften. So weist z.B. Strohleichtlehm eine geringe Formstabilität auf und benötigt relativ lange Austrocknungszeiten. Lehm mit einem hohen Anteil an Pflanzenfasern neigt zur Verrottung und Schimmelpilzbildung.

Mit der Anwendung rein mineralischer Leichtlehme werden die daraus resultierenden Gefährdungen für die Baukonstruktion minimiert. Bei der Auswahl der Kornart und der Korngrößen kann die Trocknungszeit im Vergleich zu Leichtlehm mit Pflanzenfasern, erheblich verringert und das Trockenschwindmaß bis auf 0 % reduziert werden.

Die Verarbeitung von mineralischen Leichtlehmern erfolgt mit konventionellen Handwerkstechniken. Mineralische Leichtlehme bestehen aus fettem Lehm, dem mineralische, poröse Zuschlagstoffe mit geringer Dichte beigemischt werden. Besonders bewährt haben sich Zuschläge mit geschlossenporigen Oberflächen wie Blähton und Blähglas. Deren nicht-kapillare Struktur gewährleistet eine geringe Wasseraufnahme, relativ konstante Gleichgewichtsfeuchte, Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeit und Frost sowie minimale Austrocknungszeiten.

Es kommen unterschiedliche Korngrößen zur Anwendung, die nach Norm klassifiziert sind (2, 4, 8 und 16 mm). Die Lehmischungen können in konventionellen Zwangs- oder Freifallmischern auf der Baustelle aufbereitet werden. In Abhängigkeit von der gewählten Rohdichte und der daraus resultierenden Wärmeleitfähigkeit können die verschiedenen Korngruppen miteinander vermischt werden.

Das Ziel des Mischens ist in jedem Fall eine vollkommene Umhüllung der einzelnen Körner mit Lehm, um die Oberflächen der Körner mit der Lehmschicht miteinander zu verkleben.

* Dieses Arbeitsblatt ist ein Ergebnis des DBU-Projektes „Altes Rentamt“ in Worbis / Eichsfeld. Die erläuterten Rezepturen und Verfahren gelten für die konkreten Bedingungen in diesem Bauvorhaben und sind deshalb nicht generell auf andere Situationen und Materialien übertragbar.

DBU Modellprojekt Altes Rentamt Worbis

Modellhafter Einsatz von Lehm zur Wärmedämmung im Fachwerkbau und Optimierung des energetischen Konzeptes

Die Lehmschalen werden in Schalungen die an Hilfskonstruktionen befestigt sind geschüttet bzw. gepumpt und durch Stampfen verdichtet. Die Wärmedämmwirkung der mineralischen Leichtlehme ist vergleichbar mit denen der von Volhard 1983 untersuchten Strohleichtlehme, es werden demnach Wärmeleitahlen λ [W/(m·K)] von:

- 0,17 bei 600 kg/m³
- 0,21 bei 700 kg/m³
- 0,25 bei 800 kg/m³
- 0,30 bei 900 kg/m³
- 0,35 bei 1000 kg/m³ erreicht.

Mineralleichtlehm

Die Dicke der Leichtlehm-Schale sollte 10 bis 20 cm, evtl. mehr betragen und raumseitig mit einem Lehmputz beschichtet werden.

Die Leichtlehmschale hat neben der Wärmedämmung die Winddichtigkeit vor allem bei Fachwerkwänden zu gewährleisten und als dampfbremsende Schicht die Wasserdampfdiffusion in die Außenwände zu reduzieren. Im Sinne einer erfolgreichen Anwendung sind die folgenden Kriterien für die Wahl des Mineralleichtlehms zu beachten:

- geringe Rohdichte, damit verbunden geringe Wärmeleitfähigkeit
- minimales Trockenschwinden zur Gewährleistung von Rissfreiheit
- hohe Festigkeit vor allem gegen mechanische Beanspruchung
- minimaler Aufwand bei der Aufbereitung
- optimale Verarbeitbarkeit beim Einbau
- günstige Bedingungen bei der Materialbeschaffung und dem Preis

Konstruktion der Lehminnenschale

Lattung und Schalung

Bei Fachwerkkonstruktionen werden zur Entkopplung der Leichtlehmschale von den Hölzern die Innenoberflächen der Hölzer in ihrer vollen Breite mit Wellpappe abgedeckt. Dadurch wird gewährleistet, dass die hygrysch bedingten Bewegungen der Hölzer keine Rissbildung in der relativ massiven Lehmschale verursachen können.

Auf der Wandfläche sind **Traglatten** ca. 3/5 cm senkrecht im Abstand von ca. 60 cm mittels verzinkter Schrauben 6x100 mm mind. 2 Stk/m zu befestigen. Mit dieser lot- und fluchtrecht herzustellenden Lattenebene sind die Unebenheiten der bestehenden Wand auszugleichen.

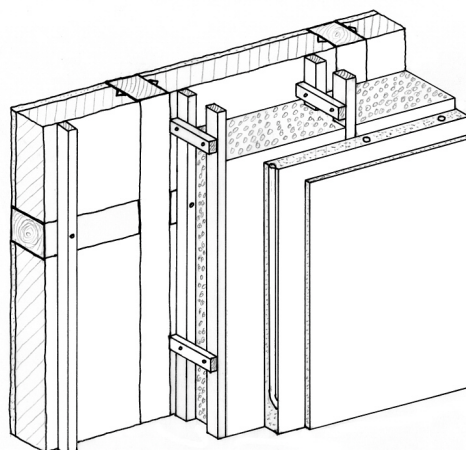
An den Traglatten sind **Konterlatten** 3/5 cm waagrecht, parallel zur Wandfläche, mittels verzinkter Schrauben

6x100 mm zu montieren.

An den Konterlatten sind wiederum **Traglatten** 3/5 cm senkrecht im Abstand von 60 cm mittels verzinkter Schrauben 6x100 mm zu befestigen. Dabei werden diese Latten um mind. 15 cm gegenüber der ersten Traglatte versetzt.

Alternativ werden Distanzlatten rechtwinklig zur Wandfläche an den nicht ausgerichteten Traglatten seitlich angeschraubt, die dann lot- und fluchtrecht abgeschnitten werden.

Die zweiten Traglatten werden mittels Schrauben im Hirnholz der Distanzlatten befestigt.



Skizze 1 Traglattenkonstruktion

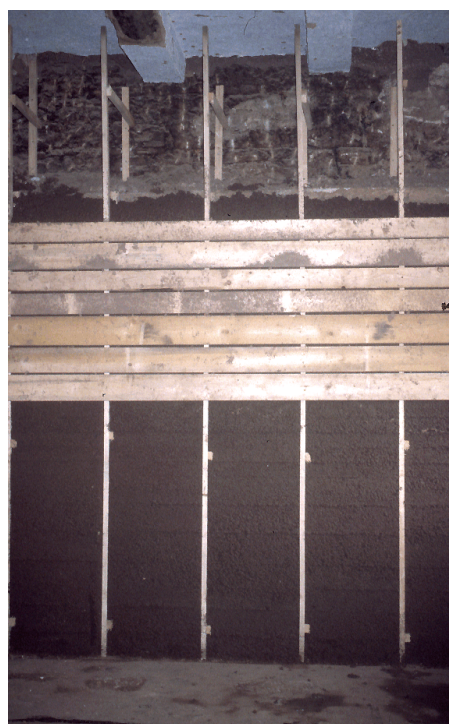


Abb 2 Mineralleichtlehmschale mit Lattung und Schalung

An den zuletzt montierten Latten wird die **Schalung** in Form von sägerauen Schalbrettern 2,4/10 –15 cm waagrecht mit einem lichten Abstand von ca. 25 mm angeschraubt.

Die Schalung kann im ersten Arbeitsgang bis zur halben Wandhöhe montiert werden. Nachdem der Leichtlehm eingefüllt ist, kann bei entsprechend trockenen Mischungen, die Schalung sofort nach dem Einfüllen wieder demontiert werden. Bei flüssigeren Lehmmassen kann die Feuchtigkeit über die Spalten zwischen den Schalbrettern abtrocknen. In dem Fall wird die Schalung erst nach wenigen Tagen entfernt.

Bei Verwendung großflächiger Schalelemente, wie Schaltafeln, kann das Material nur im ausgeschalteten Zustand abtrocknen. Die raumseitige Traglatte kann mit der Schalung abgenommen werden, der verbleibende Raum wird anschließend mit der Leichtlehm Masse aufgefüllt und wandflächig abgezogen.

Die im unteren Wandabschnitt abgenommenen Schalbretter können an den darüber liegenden Flächen direkt wieder montiert werden. Die Leichtlehmschale wird über die Geschosshöhen hinaus durch die Holzbalkendecke hindurchgeführt, so dass auch das Verfüllen der oberen Wandpartien von oben in die Schalung ausgeführt wird.

Die Schalung wird am oberen Abschluss im obersten Geschoss um ca. 30 cm ausgespart, um das Einfüllen des Leichtlehms mittels Kelle zu ermöglichen.



Abb. 3 Leichtlehmschale wird durch die Decke geführt



Abb. 4 Im oberen Anschluss wird das Material mit der Kelle eingefüllt.

Aufbereitung des Lehms

Es sollten Lehme mit einer Bindekraft von mind. 150 g/cm² angewendet werden.

Der Lehm ist in Behältern z.B. Mörtelkübeln so mit Wasser zu vermengen, dass eine Lehmbrühe entsteht. Die Tunke hat dann die richtige Konsistenz, wenn 200 ml der Masse auf einen geraden, glatten Untergrund gegossen, eine kreisrunde Fläche von ca. 15 cm bedeckt. Die Rohdichte der Lehmschlämme beträgt ca. 1700 kg/m³. Die Rohdichte des krümeligen, erdfeuchten Lehms beträgt ca. 1300 kg/m³. Daraus ergibt sich ein Rohlehmbedarf für die Lehmschlämme von 1300 kg/m³.

Die erforderliche Konsistenz wird erreicht, in dem der erdfeuchte Lehm mit ca. 400 l Wasser/m³ vermengt wird. Nach einer Lagerzeit von mind. 24 Std (Mauken) wird das Gemenge mit einem schnelllaufenden Rührgerät (Quirl) verrührt, so dass ein weicher homogener Brei entsteht. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Klumpen verbleiben.

Alternativ kann ein klumpiger Lehm brei durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 1-2 mm gegossen werden.



Abb.5 Mineralische Leichtzuschläge verschiedener Kornfraktion

DBU Modellprojekt Altes Rentamt Worbis

Modellhafter Einsatz von Lehm zur Wärmedämmung im Fachwerkbau und Optimierung des energetischen Konzeptes

Herstellung der Mineralleichtlehmischung

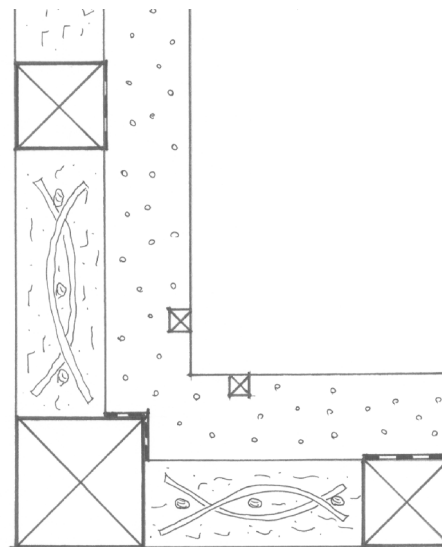
Die Zuschläge und der Lehm werden in den angegebenen Verhältnissen (in Raum-Teilen) miteinander vermengt.

Der Blähton sowie das Blähglas weisen ausreichende Festigkeit auf, so dass die Masse im Freifallmischer oder im Zwangsmischer gemischt werden kann. Um die Mischfähigkeit im Freifallmischer zu gewährleisten kann zusätzlich Wasser zugesetzt werden.



Abb. 6 Blähton und Lehmschlämme

Trocknungszeit, je nach Witterung, von ca. 1 Woche kann der darüber liegende Abschnitt in gleicher Weise bearbeitet werden.



Skizze 2 Schnitt Fachwerkwand-Ecke mit Leichtlehmsschale

Rezepturen für je 1 m³ Leichtlehmsschale:

| | |
|---------------------------|-------------------------------------|
| <i>Blähton Leichtlehm</i> | Rohdichte ca. 750 kg/m ³ |
| Aufbereiteter Lehm | 286 Liter |
| Blähton | 8 – 16 mm 476 Liter |
| | 4 – 8 mm 238 Liter |
| | 2 – 4 mm 238 Liter |
| | 0 – 2 mm 238 Liter |

| | |
|----------------------------|-------------------------------------|
| <i>Blähglas Leichtlehm</i> | Rohdichte ca. 400 kg/m ³ |
| Aufbereiteter Lehm | 230 Liter |
| Blähglas | 8 – 16 mm 455 Liter |
| | 4 – 8 mm 227 Liter |
| | 2 – 4 mm 227 Liter |
| | 0 – 2 mm 227 Liter |

Einbau des Mineralleichtlehms

Die Leichtlehmsschale wird in Lagen von ca. 25 cm eingeschüttet und durch Stampfen und Stochern verdichtet. Der Leichtlehm wird in die 1,0 bis 1,5 m hohe Schalung in einem Arbeitsschritt eingebaut. Nach dem Einbau werden die Schalbretter mit Ausnahme des oberen Schalbrettes abgenommen und für den nächsten Arbeitsschritt an der Lattenkonstruktion des darüber liegenden Abschnitts befestigt. Nach einer



Abb 7 Anmischen des Mineralleichtlehms

DBU Modellprojekt Altes Rentamt Worbis

Modellhafter Einsatz von Lehm zur Wärmedämmung im Fachwerkbau und Optimierung des energetischen Konzeptes

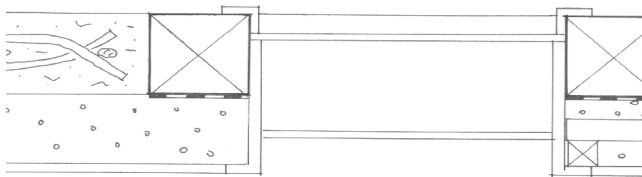
Konstruktionsdetails der Anschlusausbildungen

Die Anschlüsse zu den benachbarten und einbindenden Bauteilen sind aus bauphysikalischer Sicht oft problematisch, da in diesen Zonen zum einen die Wärmedämmung, zum anderen die dampfbremsende und winddichtende Wirkung der Innenschale unterbrochen wird oder endet. Es besteht die Gefahr der Kondensatbildung auf den Bauteiloberflächen oder im Wandquerschnitt auf Grund von Konvektion.

Darüber hinaus entstehen in diesen Bereichen erhöhte Wärmeverluste.

Fenster in den Fachwerkwänden

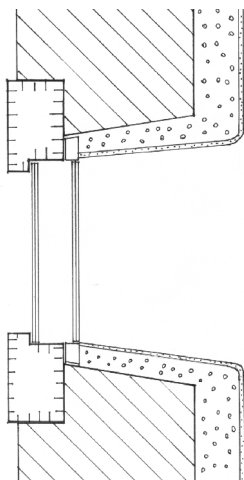
Die Lehmschale wird an den Kasten des Fensters mit einem Rahmen aus Brettschalung angeschlossen. Der Rahmen wird als verlorene Schalung ausgeführt. (Skizze 3)



Skizze 3 Fenster in Fachwerkwand

Fensterlaibungen in den Massivwänden

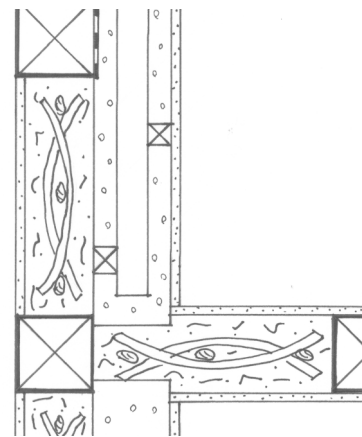
Zur Reduktion des Wärmedurchgangs, vor allem in den fensternahen Bereichen, in denen der effektive Wandquerschnitt nur wenige cm beträgt, werden die Laibungen mit einem bis zu 10 cm dicken Leichtlehmdämmputz beschichtet. (Skizze 4)



Skizze 4 Fenster in Massivwand

Fachwerkwandzwischenwände

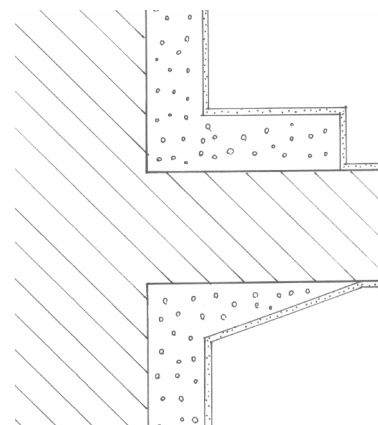
An den an die Fachwerkaußenwände einbindenden Fachwerkwandzwischenwänden wird die Leichtlehmschale möglichst am Anschlussständer angeschlossen. (Skizze 5)



Skizze 5 Anschluss Fachwerk
Zwischenwand

Massivzwischenwände

Zur Überbrückung der Fehlstellen in der wärmedämmenden Schale, im Bereich der Zwischenwandanschlüsse an die massiven Wände, wird die Leichtlehmschale mindestens 50 cm weit an der Zwischenwand entlang geführt. Dabei entsteht in der Ecke eine Kehle oder Voute. (Skizze 6)



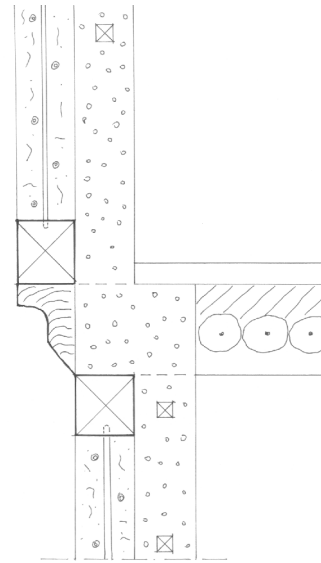
Skizze 6 Anschluss
Massivzwischenwand



Abb. 8 Anschluss an die Zwischenwand

Geschossdecken

Die Leichtlehmschale an der Außenwand ist so über den Deckenquerschnitt zu führen, dass der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen den Geschossen keine Differenzen aufweist. Dazu wurde die Leichtlehmschale in ihrer vollen Dimension auch in den Bereichen der horizontalen Versprünge geführt. Sie wirkt dabei in den Deckenbereichen als Deckenfüllung.



Skizze 7 Anschluss
Geschossdecke

2. Lehmputze, Leichtlehmputze / Lehmdämmputze Rezepte und Empfehlung zur Aufbereitung *

Bernhard Gaul

Aufbereitung des Lehms

Es sollten Lehme mit einer Bindekraft von mindestens 150 g/cm^2 angewendet werden.

Der Lehm ist in Behältern z.B. Mörtelkübeln so mit Wasser zu vermengen, dass eine Lehmbrühe entsteht. Die Tunke hat dann die richtige Konsistenz, wenn 200 ml der Masse, auf einen ebenen und glatten Untergrund gegossen, eine kreisrunde Fläche von ca. 15 cm bedeckt. Die Rohdichte der Lehmschlämme beträgt ca. 1700 kg/m^3 . Die Rohdichte des krümeligen, erdfeuchten Lehms beträgt ca. 1300 kg/m^3 . Daraus ergibt sich ein Rohlehmbedarf für die Lehmschlämme von 1300 kg/m^3 .



Abb. 1 Für die richtige Konsistenz wird der gemaukte Lehm mit Wasser verrührt.

Die erforderliche Konsistenz wird erreicht, in dem der erdfeuchte Lehm mit ca. 400 l Wasser/m^3 vermischt wird. Nach einer Lagerzeit von mind. 24 Std (Mauken) wird das Gemenge mit einem schnelllaufenden Rührgerät (Quirl) verrührt, so dass ein weicher homogener Brei entsteht. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Klumpen verbleiben. Alternativ kann ein klumpiger Lehmbrei durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 1 mm gegossen werden.

Leichtlehmdämmputz

Der Einsatz mineralischen Leichtlehmdämmputzes ist für Bereiche vorgesehen, in denen auf Grund des geringen Raumangebotes andere Lehm-Dämmungen, wie z.B.

Mineralleichtlehmschalen nicht in ausreichender Dimension eingesetzt werden können.

In Kombination mit dickeren Lehm-Dämmungen können vor allem in den Anschlussbereichen der Fenster, den Laibungen Leichtlehmdämmputze in wesentlich dünneren Schichten ausgeführt werden, um auch hier die Wärmedämmung zu optimieren und somit die Gefahr der Kondensatbildung auf den Wandoberflächen zu minimieren. Dazu werden die einzelnen Kornfraktionen von Blähglas und/oder Blähton in unterschiedlichen Verhältnissen miteinander vermischt um einen möglichst homogenen Mörtel zu erzielen.

Dabei gilt es, neben der guten Verarbeitbarkeit auch eine geringe Trockenrohichte und ein hohe Haftzugfestigkeit zu erzielen.

Der Anteil des Lehms in der entsprechenden Konsistenz wird hierfür so ausgewählt, dass sämtliche Körner vollkommen mit dem Bindemittelleim umhüllt sind und der Mörtel keine Hohlräume aufweist.

Bezugsmöglichkeiten Mineralischer Leichtzuschläge:

| | |
|-------------------|--|
| Blähglas | Poraver aus D-96130 Schlüsselfeld Liaver aus D-98693 Ilmenau |
| Blähton | Liapor aus D-91352 Hallerndorf-Pautzfeld Fibo Exclay aus D-21769 Lamstedt |
| Blähschiefer | Ulopor aus D-07330 Unterloqitz |
| Bimssteingranulat | Raab aus D-03441 Luckenau |



Abb.2 Mineralische Leichtzuschläge unterschiedlicher Kornfraktion

* Dieses Arbeitsblatt ist ein Ergebnis des DBU-Projektes „Altes Rentamt“ in Worbis / Eichsfeld. Die erläuterten Rezepturen und Verfahren gelten für die konkreten Bedingungen in diesem Bauvorhaben und sind deshalb nicht generell auf andere Situationen und Materialien übertragbar.

Herstellung der Leichtlehm-Putzmischung

Die Zuschläge und der Lehm werden in den angegebenen Verhältnissen in Raum-Teilen miteinander vermengt. Die angegebenen Mischungsverhältnisse gewährleisten durch die dabei entstehende Konsistenz eine gute Mischfähigkeit, auch im Freifallmischer.



Abb. 3 Die Leichtzuschläge werden mit der Lehmschlämme verrührt.



Abb. 3.1 Mineralleichtlehm-Putzmörtel

Rezepturen für je 1m³ Dämmputz:

Blähglas/Blähton-Dämmputz Rohdichte ca. 640 kg/m³
Für Auftragsstärken von 2 bis 5 cm

| | | |
|--------------------|----------|-----------|
| Aufbereiteter Lehm | | 440 Liter |
| Blähglas/ Blähton | 2 – 4 mm | 675 Liter |
| Blähglas/ Blähton | 0 – 2 mm | 335 Liter |
| Wasser | | 180 Liter |

Blähglas/Blähton-Dämmputz Rohdichte ca. 590 kg/m³
Für Auftragsstärken von 4 bis 8 cm

| | | |
|--------------------|----------|-----------|
| Aufbereiteter Lehm | | 430 Liter |
| Blähglas/ Blähton | 4 – 8 mm | 340 Liter |
| Blähglas/ Blähton | 2 – 4 mm | 430 Liter |
| Blähglas/ Blähton | 0 – 2 mm | 160 Liter |
| Wasser | | 250 Liter |

Verarbeitung des Dämmputzes

Die Wandoberflächen sind so zu reinigen, dass tragfähiges Mauerwerk oder feste Putzflächen vorhanden sind, die mit Lehmschlämme grundiert werden. Der Dämmputz wird durch Anwerfen mit der Kelle auf den abgetrockneten Untergrund in Lagen von 20 bis 30 mm aufgetragen. Bei größeren Putzdicken sollte die zuvor angetragene Putzschicht, je nach Witterung mindestens drei Tage antrocknen, bevor im nächsten Arbeitsgang der Putzmörtel in der erforderlichen Dicke aufgetragen wird. Die Oberfläche der zuletzt angetragenen Putzschicht wird mit dem Brett oder der Putzkartätsche abgeglichen.



Abb. 4 Abgleichen des Putzes

Vor dem Auftragen des Oberputzes muss die Dämmputzschicht in ihrer ganzen Dicke durchgetrocknet sein. Eventuell entstandene Schwundrisse in den Anschlüssen zu angrenzenden Bauteilen, sind mit dem Dämmputz nach zu behandeln und zu verschließen.

Es wird empfohlen, die Kanten der Fensterlaibungen und Außenecken rund oder gefast auszuführen, weil aufgrund der relativ geringen „Kantenfestigkeit“ des Dämmputzes die Gefahr besteht, dass durch Anstoßen Ausbrüche entstehen.

Die so erstellte, ebene Fläche ist uneben und rau, sie wird nach dem die Dämmputzschicht vollkommen durchgetrocknet ist mit einem Lehmoberputz beschichtet.

DBU Modellprojekt Altes Rentamt Worbis

Modellhafter Einsatz von Lehm zur Wärmedämmung im Fachwerkbau und Optimierung des energetischen Konzeptes

Lehm-Unterputze

Lehmputz kann zur Beschichtung von massiven wie leichten Wandkonstruktionen angewendet werden. Die Putzdicke beträgt mind. 20 mm bis zu mehreren cm. Sie besteht aus einer Unterputzschicht, auf die 5 bis 10 mm Oberputz aufgetragen werden.

Der Putz muss eine ausreichende Haftzugfestigkeit aufweisen, da er ohne jeglichen Putzträger oder Putzarmierung ausgeführt werden kann.

Bei inhomogenen Untergründen kann der Lehmputz auf gebräuchlichen Putzträgern aufgetragen werden.

Bei Untergründen, bei denen aufgrund von Bewegungen oder Spannungen mit erhöhter Rissbildung zu rechnen ist, kann der Lehmputz mit konventionellen Putzarmierungen ausgeführt werden. Alternativ können dem Unterputz Pflanzenfasern oder Tierhaare zugesetzt werden.

Zuschläge für den Lehmputz

Es eignen sich die natürlichen Sande mit geringem Anteil an Feinstkorn.

Dabei gilt, je dicker die Putzlage ist, um so grober sollte das Korn sein, das Größtkorn kann bis zu 1/3 der Putzdicke betragen.

Grundsätzlich kann der regional angebotene „Gewaschene Sand“, also Flusssand immer eingesetzt werden. Für den Unterputz wählt man je nach Putzdicke Korngrößen 0/4 bis 0/8 mm (Estrichsand), für den Oberputz 0/1 bis 0/2 mm.

Auch so genannte Grubensande können verwendet werden, dabei ist vor allem darauf zu achten, dass der Feinstkorn-Anteil gering ist.

Brechsande aus Sandsteinbrüchen, so genannte Mauer-sande, sind in der Regel weniger geeignet, sie neigen im Putz zur Rissbildung.

Brechsande aus magmatischem Gestein wie Granit oder Basalt eignen sich bei entsprechender Kornauswahl vor allem in Kombination mit gewaschenen Sanden gut, da sie auf Grund ihrer splittigen Form und rauen Oberfläche die Elastizität sowie die Zug- und Scherfestigkeit des Putzes erhöhen.



Abb. 5 Der Absetzversuch zeigt die Kornverteilung natürlicher Sande

Der Anteil des Lehms im Mörtel, vor allem im Unterputz, sollte mit Rücksicht auf das Sorptionsverhalten des Putzes, das durch die Tonminerale begünstigt wird, möglichst hoch eingestellt werden.

Dabei wird eine geringfügige Schwundrissbildung des Unterputzes in Kauf genommen, da die Risse durch den mehrlagigen Putzauftrag überdeckt werden.

Herstellung der Mischung für den Unterputz

Die Zuschläge und der aufbereitete Lehm werden in den angegebenen Verhältnissen (in Raum-Teilen) miteinander vermengt. Die angegebenen Mischungsverhältnisse gewährleisten durch die dabei entstehende Konsistenz eine gute Mischfähigkeit auch im Freifallmischer.

Rezepturen für je 1m³ Lehmunterputz:

Für Auftragsstärken von 2 bis 6 cm

| | |
|------------------------|---------------------------------------|
| <i>Lehmunterputz 1</i> | Rohdichte ca. ~1700 kg/m ³ |
| Mischungsverhältnis | 1 / 3,5 |
| Aufbereiteter Lehm | 286 Liter |
| Gewaschener Sand | 0 - 8 mm 1000 Liter |

| | |
|------------------------|---------------------------------------|
| <i>Lehmunterputz 2</i> | Rohdichte ca. ~1700 kg/m ³ |
| Mischungsverhältnis | 1 / 2 / 1 / 0,5 |
| Aufbereiteter Lehm | 286 Liter |
| Gewaschener Sand | 0 - 4 mm 570 Liter |
| Gewaschener Sand | 0 - 2 mm 285 Liter |
| Basaltsplitt | 4 - 8 mm 143 Liter |

Verarbeitung des Lehmunterputzes

Die Wandoberflächen sind so zu reinigen, dass tragfähiges Mauerwerk oder feste Putzflächen vorhanden sind, die mit Lehmschlämme grundiert werden.

Der Lehmputz wird durch Anwerfen mit der Kelle, oder der Putzmaschine auf den abgetrockneten Untergrund in Lagen von 20 bis 30 mm aufgetragen. Beim Antragen der zweiten Schicht, sollte die zuvor angetragene Putzschicht, je nach Witterung, mindestens drei Tage antrocknen. Wenn der Baufortschritt dies erlaubt, ist es sinnvoll, die zuerst aufgetragene Putzschicht abtrocknen zu lassen bevor die zweite Putzschicht aufgetragen wird. Damit wird gewährleistet, dass die in der ersten Putzschicht eventuell auftretenden Schwundrisse durch die nächste Putzschicht überdeckt werden.

Die Oberfläche der zuletzt angetragenen Putzschicht wird mit der Latte oder mit der Putzkartätsche rau abgeglichen.

DBU Modellprojekt Altes Rentamt Worbis

Modellhafter Einsatz von Lehm zur Wärmedämmung im Fachwerkbau und Optimierung des energetischen Konzeptes

Lehmoberputze

Herstellung der Lehmputzmischung

Die Zuschläge und der aufbereitete Lehm werden in den angegebenen Verhältnissen (in Raum-Teilen) miteinander vermengt. Die Mischungsverhältnisse gewährleisten durch die dabei entstehende Konsistenz eine gute Mischfähigkeit auch im Freifallmischer.

Die Konsistenz der Mischung wird vor allem zur Gewährleistung einer optimalen Verarbeitbarkeit durch die entsprechende Wasserzugabe eingestellt.

Die Mischdauer sollte in jedem Fall 5 min. nicht unterschreiten. Je intensiver der Mörtel gemischt wird, umso homogener wird die Mörtelmasse.

Bei Mörteln in angegebener Mischung und vor allem bei Mischungen nach eigener Zusammenstellung sind in jedem Fall Musterflächen anzulegen, um Festigkeit, Haftung und Rissbildung zu überprüfen.

Rezepturen für je 1 m³ Lehmoberputz

Für Auftragsstärken von 0,5 bis 1 cm

| | |
|-----------------------|--|
| <i>Lehmoberputz 1</i> | Rohdichte ca. ~ 1600 kg/m ³ |
| Mischungsverhältnis | 1 / 2 / 2 |
| Aufbereiteter Lehm | 280 Liter |
| Gewaschener Sand | 0 - 2 mm 560 Liter |
| Gruben - Sand | 0 - 2 mm 560 Liter |

| | |
|-----------------------|---------------------------------------|
| <i>Lehmoberputz 2</i> | Rohdichte ca. ~1600 kg/m ³ |
| Mischungsverhältnis | 1 / 3,5 |
| Aufbereiteter Lehm | 300 Liter |
| Gewaschener Sand | 0 - 2 mm 1060 Liter |
| Wasser | 135 Liter |

Verarbeitung des Lehmoberputzes

Vor dem Auftragen des Oberputzes muss die Lehmunterputzschicht in ihrer ganzen Dicke durchgetrocknet sein.

Die Oberfläche des Lehmunterputzes ist mit Wasser zu besprühen, so dass die Lehmschlämme der außen liegenden Putzschicht angeweicht wird. Alternativ kann die trockene Oberfläche mit einer Lehmschlämme vorgestrichen werden.

Der Lehmputz wird mit der Glattscheibe in einer Lage von 5 bis 10 mm auf den abgetrockneten Untergrund aufgetragen.

Die Oberfläche wird nach einer Abtrocknungszeit, je nach Witterung, von einigen Stunden mit dem Reibebrett

verrieben, so dass eine ebene, gleichförmige, feinkörnige Struktur entsteht.

Eine zusätzliche Armierung des Putzes ist nicht notwendig.



Abb. 6 Antragen und Abgleichen des Putzes

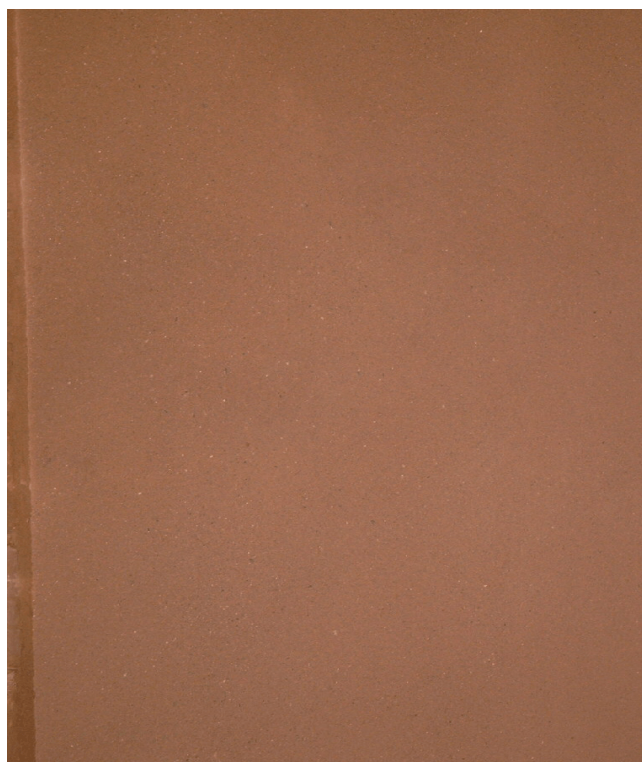


Abb. 7 Lehmputzoberfläche, gerieben und abgetrocknet

DBU Modellprojekt Altes Rentamt Worbis

Modellhafter Einsatz von Lehm zur Wärmedämmung im Fachwerkbau und Optimierung des energetischen Konzeptes

Kalkspachtel auf Lehmputz

Zur Festigung der Oberflächen und als tragfähiger, feuchtesteher Untergrund für nachfolgende Anstrich- und Beschichtungssysteme, kann eine Behandlung der Lehmoberputze mit Kalkspachtel in folgender Weise ausgeführt werden:

Aus feinkörnigem Sand und weißem Kalk wird ein Spachtelmörtel hergestellt.

Rezepturen für je ca. 10 l Kalkspachtel:

Für Auftragsstärken von ca. 1mm

| | |
|-----------------------|---------------------------------------|
| <i>Kalkspachtel 1</i> | Rohdichte ca. ~1800 kg/m ³ |
| Mischungsverhältnis | 1/ 1,5 |
| Weißkalkhydrat CL 90 | 7 Liter |
| Quarzsand | 0 - 0,8 mm 10 Liter |
| Wasser | ca. 5 Liter |

| | |
|-----------------------|---------------------------------------|
| <i>Kalkspachtel 2</i> | Rohdichte ca. ~1800 kg/m ³ |
| Mischungsverhältnis | 1/ 1,5 |
| Sumpfkalk | 5 Liter |
| Gruben - Sand | 0 - 1 mm 8 Liter |
| Wasser | ca. 3 Liter |

Verarbeitung des Kalkspachtels

Der Lehmuntergrund muss in seiner ganzen Dicke vollständig ausgetrocknet sein.

Die Oberfläche des Lehmoberputzes ist mit Wasser zu besprühen, so dass die Lehmschlämme auf der Putzoberfläche angefeuchtet ist. Der Kalkspachtel wird mit der



Abb. 8 Die aufgespachtelte Kalkschlämme wird mit dem Filz in den Lehmputz eingerieben.

Glattscheibe auf den angefeuchteten Untergrund in einer Lage von ca. 1 mm aufgetragen.

Die Oberfläche wird danach direkt mit einem angefeuchteten Filzbrett verrieben, so dass eine ebene, gleichförmige, feinkörnige Struktur entsteht, die im feuchten Zustand den lehmigen Untergrund durch die transparent – weiße Oberfläche durchscheinen lässt.



Abb. 9 frische Kalkschlämmenoberfläche

Die noch feuchte Kalkspachteloberfläche kann 2–3 mal mit Kalkmilch in „Fresco- Technik“ lasierend gestrichen werden. Nach Durchtrocknung des Anstrichs ist die Oberfläche „rein weiß“, wischfest und feuchteunempfindlich. Alternativ kann die Spachteloberfläche mit Kalk in „Secco- Technik“ oder anderen Anstichsystemen beschichtet werden.



Abb. 10 abgetrocknete weiße Kalkoberfläche

Lüftung - Konzept, Ausführung und Prüfung*

Wulf Eckermann

Der Raumlüftung kommt eine wesentliche Funktion zur Sicherung der beabsichtigten Nutzung zu. Das gilt in besonderem Maße in einem öffentlich genutzten Gebäude wie dem Rentamt Worbis.

Erfahrungsgemäß besteht hier ein hohes Maß an Sensibilität gegenüber raumklimatischen Belastungen. Das Rentamt ist Sitz des Bürgermeisters, des Standesamtes sowie des Hauptamtes der Stadt Leinfelde-Worbis.

Die Sicherung eines behaglichen Raumklimas sowie der Feuchteschutz der Fachwerkkonstruktion erfordern eine Lüftungskonzeption, die mit der Ausführung der Bauhülle und der Art der Heizung abgestimmt ist.

In der Baupraxis bestehen erhebliche Unsicherheiten bei Bauherren und Planern zur angemessenen Raumlüftung im Altbau. Schimmelpilzbildung in Folge von Sanierungsmaßnahmen kennzeichnet diese Problematik.

In den letzten Bauschadensberichten des BMBau (1988 und 1996) wird als häufigste Schadensursache nach Modernisierungsmaßnahmen mit etwa 13 % die Ursache "Schimmelpilz nach Fenstertausch" benannt.

Insgesamt ist zu konstatieren, dass Versuche zur Schulung der Nutzer zum "richtigen" Lüften, um den Einbau von dichten Fenstern zu kompensieren, praktisch nicht realisierbar sind. In Gebäuden mit öffentlicher Nutzung gilt das im besonderen Maße. Somit sind eine ständig wirksame, nutzerunabhängige Grundlüftung und eine zeitweise Stoßlüftung (Fensteröffnen oder Abluftanlage) nötig. Dieses Konzept wurde im Rentamt konsequent umgesetzt.

Ventilation und Infiltration

In Gebäuden erfolgt der gezielte Luftaustausch (Ventilation) über:

- bewusste Fensterlüftung
- mechanische Lüftung

Der unkontrollierte Luftaustausch (Infiltration) erfolgt über Undichtheiten der Bauhülle:

- Flächenbauteile
- Anschlüsse bei Bauteil- oder Schichtwechsel
- bewegliche Elemente (Türen, Fenster etc.)

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) regelt die Anforderungen an die Dichtheit von Gebäuden generell sowie außen liegender Fenster im Speziellen.

Die Definition von Grenzwerten nach EnEV / DIN 12207 für die zulässige Fugendurchlässigkeit erfolgt mit dem Ziel der Begrenzung der Lüftungswärmeverluste. Eine zu große Fugenlüftung führt zu einem unwirtschaftlichen Heizbetrieb. Unabhängig von dieser ökonomischen und umweltpolitischen Zielsetzung ist auf die Sicherung einer hygienisch und bautenschutztechnisch erforderlichen Grundlüftung des Raumes zu achten. Die Grundlüftung eines Raumes dient zur Gewährleistung des Wohlbefindens der Bewohner / Nutzer und zur Sicherung des Feuchteschutzes der Bausubstanz.

Die DIN 1946 Teil 2 nennt Werte für den personenbezogenen Mindestluftstrom. Für Büroräume sind 40 m³/h pro Person anzusetzen.

Lüftungskonzept

In der konzeptionellen Vorplanung wurden verschiedene zentrale und dezentrale Lüftungssysteme auf ihre Eignung für das Gebäude untersucht.

Ein zentrales Zu- oder Abluftsystem mit horizontalem Kanalverzug wäre aufgrund der Fachwerkstruktur mit quer liegenden Deckenbalken technisch und formal nicht befriedigend lösbar. Letztlich wurde die Kombination einer natürlichen Grundlüftung mit einer durch dezentrale Abluftventile unterstützten Bedarfslüftung angestrebt.

Die nutzer- und technikunabhängige Grundlüftung des Gebäudes erfolgt über die Bauteilfugen der Bauhülle. Die individuelle Lüftung der Büroräume erfolgt über die dezentralen Abluftventile sowie durch manuelle Fensterlüftung. Zur Abfuhr der Feuchte- und Geruchslasten aus den Sanitärbereichen dient eine Permanentlüftung in zwei Schaltstufen.

Damit ist in das Lüftungskonzept des Rentamtes eine "Bautenschutzfunktion" integriert. Um einen konvektiv bedingten Feuchteeintrag in die innengedämmten Fachwerkwände sowie in die Balkenköpfe der Decke zu vermeiden, wird Wert auf eine relativ luftdichte Wandkonstruktion gelegt.

* Dieses Arbeitsblatt ist ein Ergebnis des DBU-Projektes „Altes Rentamt“ in Worbis / Eichsfeld. Die erläuterten Verfahren und technischen Ausführungen gelten für die konkreten Bedingungen in diesem Bauvorhaben und sind deshalb nicht generell auf andere Situationen und Materialien übertragbar.

Eine völlige Dichtheit der Bauhülle wird im Sinne der geforderten Grundlüftung über Infiltration durch Bauteilfugen jedoch nicht angestrebt.

Die Abluftanlage erzeugt Unterdruck in den Arbeitsräumen. Damit können der konvektive Feuchteintrag in das Fachwerk und damit die Gefahr von Tauwasser reduziert werden. Der größte Teil der Frischluft soll über die Fensterfugen einströmen.

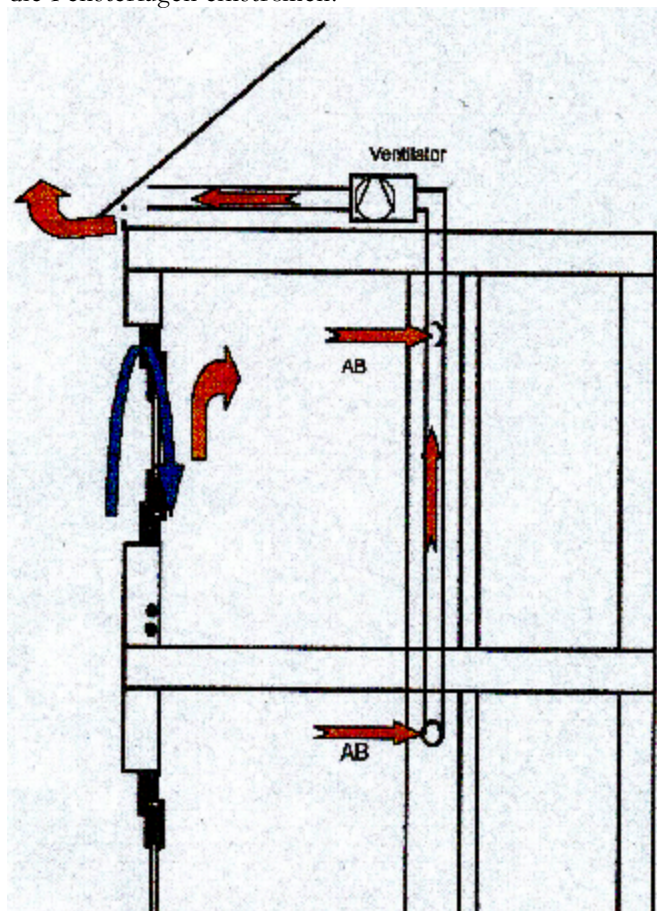


Abb.1 Prinzipskizze Lüftung

Das Lüftungsprinzip eines beispielhaften Raumes ist in Abbildung 1 dargestellt:

Die Zuluft (blau) strömt über die Fenster ins Gebäude. Die Abluft (orange) wird in den Büroräumen abgesaugt und über Schächte abgeführt.

Diese Schächte befinden sich in der Regel an den Standorten der ehemals im Gebäude vorhandenen Schornsteine. Bereits bestehende Durchbrüche in den Decken können genutzt werden. Entgegen der Darstellung wird im Rentamt die Abluft nicht über die Traufe ausgeblasen, sondern über Ablufthauben in der Dachfläche gezielt nach außen gebracht.

Die Regelung der Luftmenge kann weitgehend zentral über die Abluftventilatoren erfolgen. Natürlich ist jederzeit das manuelle Fensteröffnen möglich. Im Sommer ist bei Bedarf durch gezielte Nachtlüftung eine Auskühlung des Gebäudes möglich.

Einen Sonderfall stellt der Ratsaal dar:

Hier wird wegen des Lüftungsbedarfs und Feuchteanfalls während der Nutzung eine kontrollierte Be- und Entlüftung über Rohrführung angestrebt. Damit ist eine gezielte Lüftung möglich. Aufgrund des höheren Luftwechsels ist die Erwärmung der Zuluft erforderlich. Wegen des gewählten dezentralen Lüftungskonzeptes ist eine technische Wärmerückgewinnung in den Büroräumen nicht möglich. Auch im Ratsaal mit kontrollierter Be- und Entlüftung kann aufgrund der Infiltration über die Bauhülle eine technisch aufwändige Wärmerückgewinnung nicht wirtschaftlich betrieben werden.

Fensterlüftung

Während die Abluftführung mit den Ventilatoren geregelt und gezielt eingestellt werden kann, strömt die Zuluft weitgehend über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle ein. Eine technische Alternative besteht im Einbau von regelbaren Einströmventilen in der Außenwand.

Eine Realisierung im Rentamt scheidet allerdings sowohl an dem konstruktiven und gestalterischen Eingriff in die Fachwerkfassade wie auch an der schwierigen Integration der Zuluftöffnungen in die Büroräume, zumal keine Heizkörper zum "Kaschieren" der Öffnungen existieren. Die Luftführung über lokale Einströmventile führt gegenüber der großflächig verteilten Infiltration über Fensterfugen nicht selten zu Behaglichkeitsproblemen durch Luftzug.

Zur Luftführung über die Fenster sind verschiedene Lösungen möglich. Das äußere Fenster bleibt dabei in allen Varianten gleich, ein einfachverglastes Fenster ohne Dichtung in historisierenden Formen.

Die Lüftung nach innen erfolgt jeweils über den mit Außenluft gut durchströmten Fensterkasten. Alternativen zur Lüftung über den Fensterfalz bestehen in der Anordnung von Lüftungsschlitzen im Flügel- oder Blendrahmen bzw. in der Wahl eines Beschlages mit Lüftungsstellung.

Für das Rentamt Worbis fiel die Entscheidung zugunsten der Belüftung des Raumes über die natürlichen Fugen im Fensterfalz.

DBU Modellprojekt Altes Rentamt Worbis
Modellhafter Einsatz von Lehm zur Wärmedämmung im Fachwerkbau und Optimierung des energetischen Konzeptes

Gegenüber dem Lüftungsschlitz oder dem Beschlag mit Lüftungsstellung ergeben sich folgende Vorteile:

- Vorerwärmung der Zuluft im Fensterkasten
- gleichmäßige Zuströmung bei Nutzung der gesamten Fugenlänge
- traditionelle Lösung ohne optische Beeinträchtigung

Zu klären waren die Ausführung der Falzfuge und die Wahl des geeigneten Dichtungsmaterials. Es wurde auf folgendes Verfahren orientiert: Einbau relativ dichter Fenster mit üblicher Lippendichtung und Anpassung an individuelle Raumsituationen nach Fertigstellung des Gebäudes.

Dazu erfolgte eine Prüfung des Luftwechsels in Musterräumen mit dem BlowerDoor Verfahren (s.u.). Je nach den Messergebnissen in diesen Referenzräumen können zur Sicherung der Zuluftmenge dann 10 bis 40 cm lange Teilstücke der Dichtung problemlos wieder entfernt werden.

Entgegen dem Einsatz einer "undichten" Dichtung (Noppendichtung etc.) bleibt durch dieses Vorgehen ein flexibles Reagieren auf die schwer vorhersagbaren Lüftungsverhältnisse im alten Fachwerkhaus möglich.




| A Lüftung über Fensterfalz | B Lüftungsschlitz | C Lüftung über Beschlag |
|---|--|---|
|  |  |  |
| Erläuterungen | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • zur Sicherung der Zuluftfunktion wäre der Verzicht auf Dichtungen in beiden Fensterebenen konsequent • dann jedoch Gefahr von Zugluft bei Wind, Schallbelastung und erheblicher Kondensatausfall im Winter im Fensterkasten • Einsatz spezieller, formstabiler Dichtungen und ggf. nachträgliche Herausnahme einzelner Abschnitte | <ul style="list-style-type: none"> • Fensterfuge dicht (Dichtung) • zusätzliche Lüftungsöffnung in das Fenster integrieren • Öffnung in Blendrahmen einfräsen und Lüftungselement einsetzen • relativ genaue Einregulierung der benötigten Luftmenge über Schieberegler oder Klappen möglich | <ul style="list-style-type: none"> • Fensterfuge dicht (Dichtung) • Dreh-Kipp-Beschlag mit Funktion "Spaltöffnung" • in dieser Mittelstellung zwischen "auf" und "zu" schließt der Flügel im oberen Bereich nicht völlig (leichte Kippstellung) so dass Luft eintreten kann • Lufteintritt ähnlich der Variante "Lüftung über Fuge" |
| Vorteile | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Vorerwärmung der Zuluft im Fensterkasten • gleichmäßige Zuströmung bei Nutzung der gesamten Fugenlänge • traditionelle Lösung ohne optische Beeinträchtigung | <ul style="list-style-type: none"> • gute Regulierung der Luftmenge • während Gebrauch ist eine Feinregelung möglich • recht simple handwerkliche Lösung | <ul style="list-style-type: none"> • Fenster können durch Nutzer problemlos "dicht" geschlossen werden (z.B. bei Schall oder Wind) • optisch unauffällig |
| Nachteile | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • keine "Systemlösung", ggf. nachträgliche Handarbeit erforderlich • Fenster können durch Nutzer nicht "dicht" geschlossen werden • während des Gebrauchs keine Feinregelung möglich | <ul style="list-style-type: none"> • große Eingriffsmöglichkeiten durch Nutzer • Blendrahmen ca. 20 mm breiter, Fensterflügel wird kleiner • Gefahr von Zugluft, örtlich konzentrierten Luftzutritt | <ul style="list-style-type: none"> • große Eingriffsmöglichkeiten durch Nutzer • während Gebrauch keine Feinregelung möglich • evtl. nachlassende Funktionalität durch mechanischen Verschleiß |

Tabelle 1 Vor- und Nachteile verschiedener Lüftungsvarianten

Technische Ausführung

Die Abluftanlage ist in sechs Stränge aufgeteilt. Die durchgängige Luftführung in vertikaler Richtung, vom Erd- zum Dachgeschoss, erfolgt mit Lüftungselementen aus Wickelfalzrohr. Im ungenutzten Dachraum befinden sich schallgedämmte Radial-Rohrventilatoren, welche die Luft über optisch angepasste Dachlüfterhauben nach außen befördern. Die Deckendurchführung erfolgte mit Brandschutzklappe im Rohr und Brandschutzkasten aus Promatwerkstoff.

Die Abluft wird über einstellbare Ventilatoren in den Büroräumen sowie in den Sanitärräumen im Fachwerkteil abgesaugt. In die Abluftventile sind Volumenstrombegrenzer entsprechend den raumbezogenen Planungsvorgaben installiert.

Die Beeinflussung der voreingestellten Luftmengen im Kanalnetz durch individuelle Einstellungen an den Abluftventilen wird dadurch gemindert. Die Zuluft gelangt unregelmäßig über die Außenfassade über die Luftdurchlässigkeit der Fenster und über konstruktiv gegebene Undichtheiten in die Räume.

Regelung

Abluftanlage Bürobereich

- Winterbetrieb: durchgängig während der Betriebszeiten (ca. 7 bis 17 Uhr)
- Sommerbetrieb: durchgängiger auf die Nachtstunden begrenzter Betrieb, Zwangsweiser Intervallbetrieb über den restlichen Tagesgang

Abluftanlage WC-Bereich

- Schaltung analog zu den Anlagen im Bürobereich
- Zusätzlich Überlagerung durch Türkontakt und Bewegungsmelder

Nachlauf-Intervallschalter nehmen die Lüftung in eingestellten Zeitintervallen automatisch in Betrieb, wenn innerhalb dieser Zeitphase keine Lüftung durch manuelles Einschalten erfolgt. Bei manueller Betätigung (z.B. über Lichtschalter) ist der Nachlauf einstellbar. (3, 6, 9 oder 12 min)



Abb. 2 Kanäle an einem Knotenpunkt

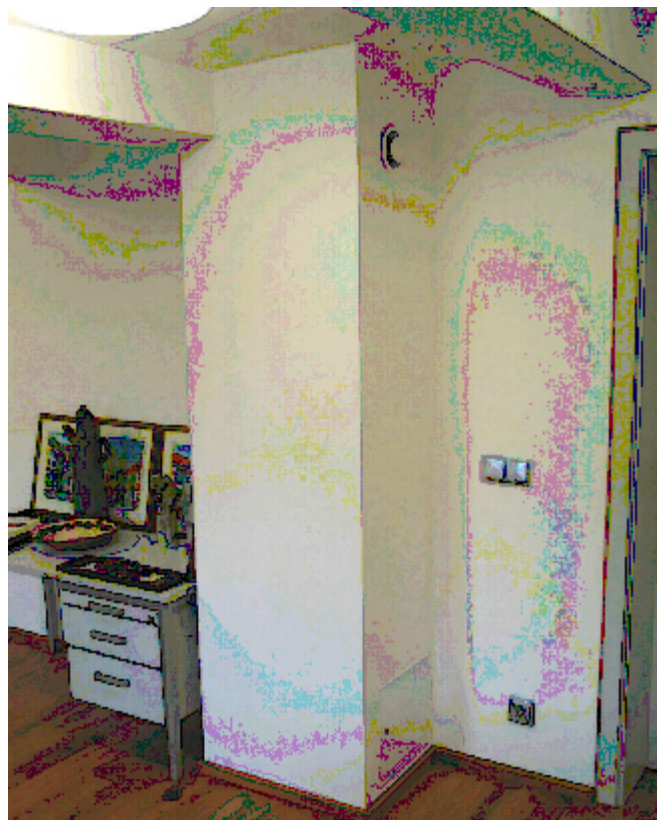


Abb. 3 verkleidete Lüftungsrohre mit Abluftventil

DBU Modellprojekt Altes Rentamt Worbis

Modellhafter Einsatz von Lehm zur Wärmedämmung im Fachwerkbau und Optimierung des energetischen Konzeptes

Prüfung

Das Lüftungskonzept wurde nach Fertigstellung des Gebäudes in wichtigen Funktionen geprüft. Dazu wurden die Planungsparameter und die zulässigen Grenzwerte mit den in Referenzräumen ermittelten Praxiswerten verglichen.

Anforderungen an den Luftwechsel bestehen einerseits aus Sicht der Nutzerbehaglichkeit und des Feuchteschutzes (unterer Grenzwert) und andererseits aus Sicht der Heizenergieeinsparung (oberer Grenzwert).

Das Lüftungskonzept im Fachwerkteil sieht eine geregelte Abluftströmung durch raumweise Abluftschächte und das freie Nachströmen der Zuluft über Fensterfugen und Bauteilfugen vor. Die Qualität der Ausführung von Bauhülle und Lüftungsanlage wurde durch mehrmalige Tests mit dem BlowerDoor Verfahren geprüft.

Die zunächst unbefriedigenden Ergebnisse konnten durch Diskussion mit den Fachplanern und bauliche Nacharbeiten verbessert werden.

Luftdichtheit

Im Zusammenhang mit modernen energiesparenden Bauweisen hat das Thema der "Luftdichtigkeit" der Bauhülle eine große Bedeutung erlangt. Die Übertragung derartiger Konzepte auf die Fachwerksanierung muss gleichwohl hinterfragt werden.

In den meisten Fällen geht es nicht darum, "dicht" oder "undicht" zu bauen, sondern einen angemessenen Kompromiss aus den Forderungen des Bautenschutzes, der Energieeinsparung und des Nutzungskomforts zu finden. Letztlich gibt es kein praktikables Messverfahren um die Qualität der Raumlüftung zu prüfen. Das in der EnEV benannte BlowerDoor Verfahren zur Ermittlung des Luftwechsels unter Prüfbedingungen entspricht weder in der Größe der Druckbelastung noch hinsichtlich der Raumströmung den natürlichen Verhältnissen.

Dabei ist die Luftwechselzahl, daher das in einer bestimmten Zeit ausgetauschte Raumluftvolumen, nicht das allein entscheidende Kriterium für die Qualität der Raumlüftung. Nicht minder bedeutsam ist die Lüftungseffektivität, daher die Sicherung einer vollständigen Raumdurchströmung durch sinnvoll verteilte Zu- und Abluftöffnungen. In den Büroräumen im Rentamt kann sich aufgrund der gegenüberliegenden Fenster an den Außenwänden und der Abluftventile an den Innenwänden eine Querlüftung der Räume mit hoher Lüftungseffektivität ausbilden.



Abb. 4 BlowerDoor in der Hauseinganstür

Erste Luftdichtheitsprüfung¹

Im Juli 2003 ermöglichte der nun erreichte Ausbaustand eine Prüfung der Luftdichtheit des Gesamtgebäudes sowie ausgewählter Räume mit dem BlowerDoor Verfahren.

Bis auf die fehlende Dichtung und noch zu ergänzende Elektroinstallationen waren zu diesem Zeitpunkt die Baumaßnahmen abgeschlossen.

Noch vorhandene Undichtheiten wie die provisorische Außentür sowie Öffnungen in den Kellern wurden für die Messdauer verschlossen.

Bei dem BlowerDoor Test wurde bei Unterdruck von 50 Pascal eine Luftwechselrate $n_{50} = 6,6 \text{ h}^{-1}$ erreicht. Der Grenzwert für Gebäude mit Lüftungsanlage nach DIN 4108 Teil 7 von $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$ wird damit deutlich überschritten.

Damit Abluftanlagen mit zielgerichteten Volumenströmen arbeiten können, ist es erforderlich, dass diese Anlagen Unterdrücke in der Größenordnung von 5 bis 10 Pascal erzeugen. Aus der Leckagekurve für das Gesamtgebäude ergibt sich, dass $3.000 \text{ m}^3/\text{h}$ abgesaugt werden müssen, um einen Unterdruck von 5 Pascal zu erzeugen.

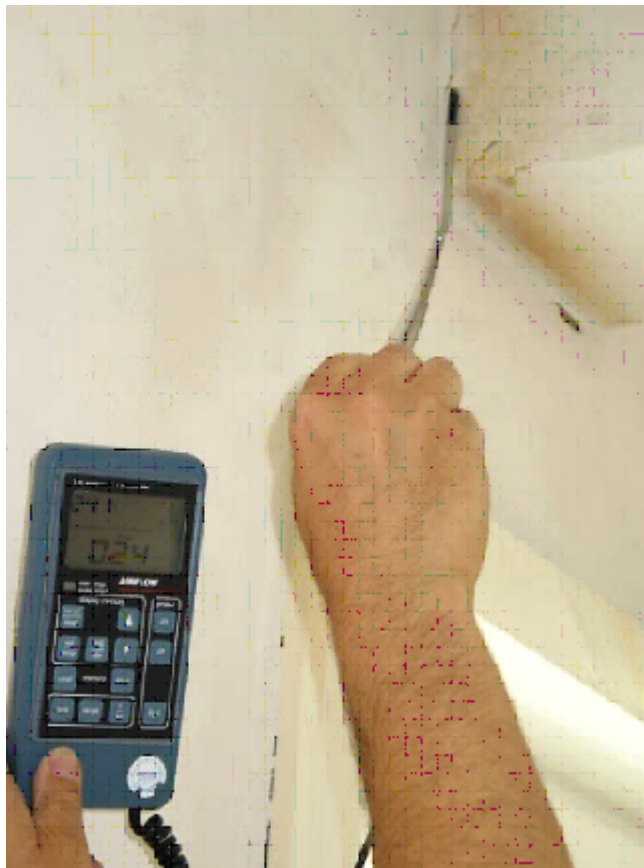


Abb. 5 Leckagesuche mit dem Anemometer

Die geplante Leistung aller Abluftventile liegt bei 850 m³/h. Da demzufolge nur ein geringer Unterdruck aufgebaut wird konnte zum Zeitpunkt der ersten Luftdichtheitsprüfung die gewünschte Bautenschutzfunktion durch das Vermeiden von Feuchtekonvektion in die Fachwerkwand erst in wenigen Räumen realisiert werden.

Der Lüftungsanteil über die Bauwerksfugen (z.B. Fachwerk und Deckenbalken) ist zu hoch.

Sofern der luftdichte Putz unterbrochen wird, wirkt die Lehmshale aufgrund der geringen Dichte und der damit verbundenen Porosität als Luftverteiler. Die Luftverteilung und die kapillare Leitfähigkeit verhindern andererseits die örtliche Feuchteakkumulation und verbessern die Austrocknung.

Als wesentliche Maßnahmen zur Verbesserung der Luftdichtheit wurden benannt:

- Die Dichtheit der Installationsdurchbrüche durch die Decke zum DG zu verbessern.
- Alle Bodenanschlussfugen in den Geschossen eindichten.
- Die Bodentür zum Dachgeschoss im Schwellenbereich dichten.
- Die Kellerräume nach außen ein zu dichten.

Zweite Luftdichtheitsprüfung²

Auf die erstmalige Prüfung der Gebäudehülle auf Luftdichtheit im Jahr 2003 folgten bauseitige Nachbesserungsarbeiten.

Zur Kontrolle der erreichten Verbesserungen, kam es im Oktober 2004 nochmals zu einer BlowerDoor-Messung, um die Luftwechselrate im verbesserten Zustand zu dokumentieren und Leckagen stichpunktartig zu orten.

Gegenüber der Messung im Juli 2003 hat sich der Wert n_{50} von 6,6 h⁻¹ deutlich auf 4,0 h⁻¹ verbessert. Nach DIN 4108-7 ist für Gebäude mit Lüftungsanlagen einzuhalten: $n_{50} \leq 1,5$ h⁻¹. Diese Anforderung ist nicht erfüllt.

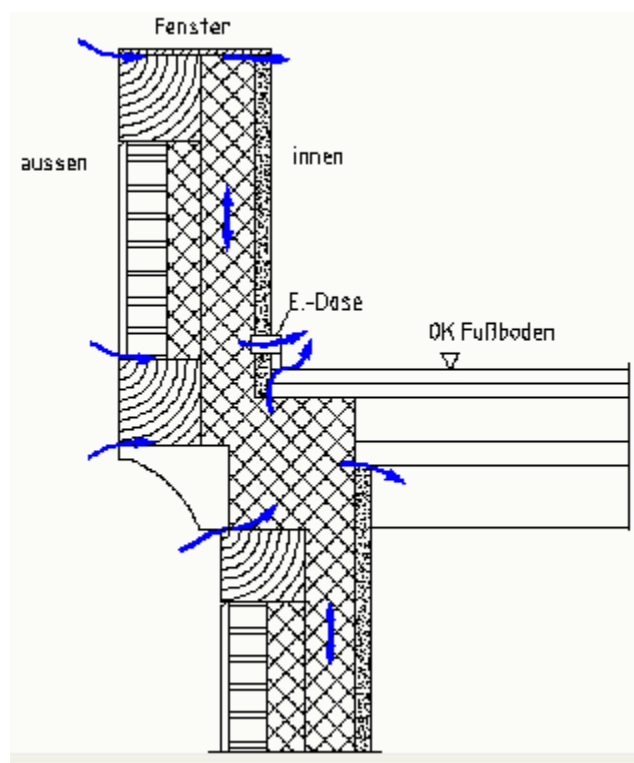


Abb. 6 Luftwege bei Unterdruck

Fensterlüftung

Mit einem speziellen Messverfahren wurde in zwei Referenzräumen geprüft, ob die nach DIN zulässigen Grenzwerte einhalten werden und ob gleichzeitig die notwendige Zuluftmenge (Grundlüftung) gesichert ist.

Bei Berücksichtigung der Abluft-Volumenströme entsprechend der Lüftungsplanung und bei Annahme eines Differenzdruckes von 5-10 Pa zwischen Raumluft und Außenluft ist für die Fenster ein mittlerer a -Wert von ca. 0,8 m³/hm Pa^{2/3} erforderlich.

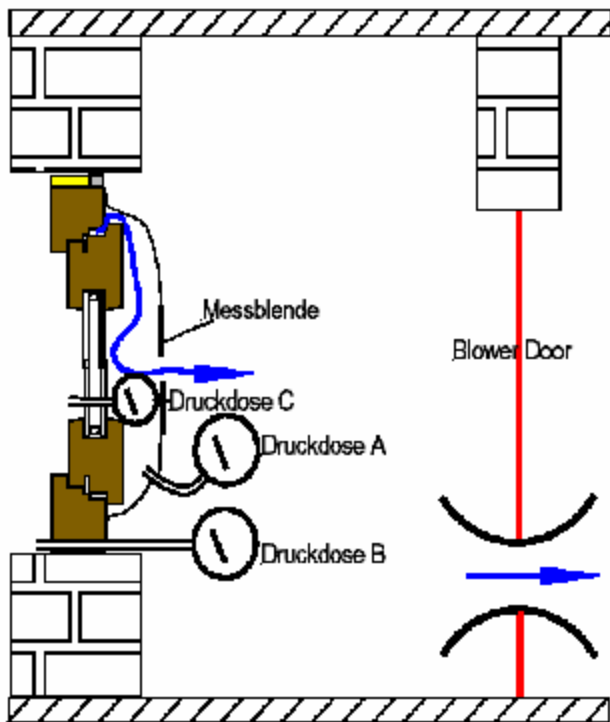


Abb. 7 Prinzipskizze zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit des Fensters

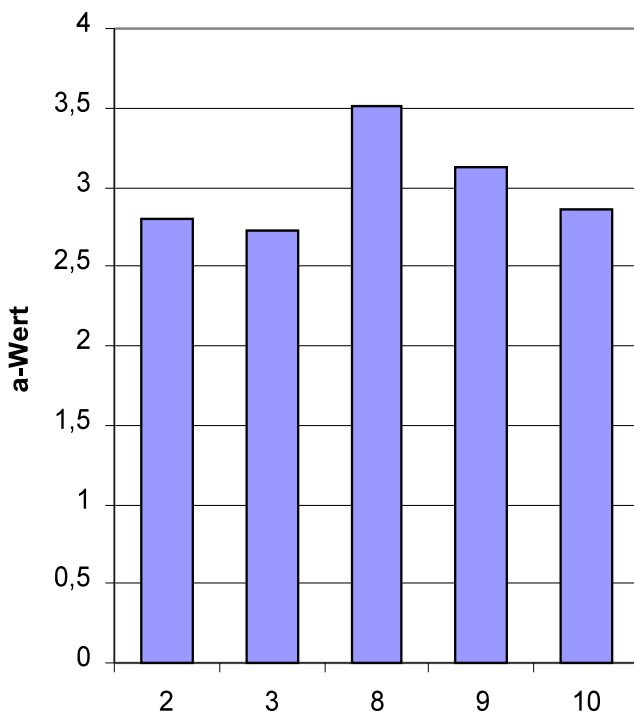


Abb. 8 Fugendurchlasskoeffizienten (a-Wert) für Raummessung

Wird die gesamte über die Außenwand inkl. Fenster ausgetauschte Luft auf die Fugenlänge der Fenster hochgerechnet, so ergibt sich eine äquivalente Fenster-Fugendurchlässigkeit nach Abbildung 8.

Der Anteil an Bauteilleckagen führt bei diesem Verfahren zu "theoretischen" Fugendurchlasskoeffizienten a die weit über den zulässigen Grenzwerten liegen. Fazit: Der Raum ist zu undicht.

Erläuterung zu Abbildung 8:

- Variante 2 Raum, normal
- Variante 3 Anschlussfugen zwischen Fenster und Mauerwerk gedichtet
- Variante 8 Lippendichtung im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 4,4 m)
zusätzlich: Außenflügel leicht geöffnet
- Variante 9 Lippendichtung im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 4,4 m)
- Variante 10 Lippendichtung teilweise im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 0,4 m)

Die Variation der Fensterdichtung und -öffnung hat relativ wenig Einfluss auf den äquivalenten a -Wert, da die "Fremdlüftung" über Bauteilfugen im Raum überwiegt. Aufgrund der im Verhältnis zur Grundfläche eher geringen Fensterfläche ergeben sich hohe äquivalente a -Werte.

Insgesamt bestätigen diese Raummessungen, die bereits erläuterten Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen für das Gesamtgebäude.

Werden dagegen die mit dem Hilfswandverfahren ermittelten Werte der reinen Fensterlüftung über die Fuge zwischen Flügel und Blendrahmen betrachtet, so liegt diese deutlich unter den normativen Anforderungen (Abbildung 9). Fazit: Die Fenster sind zu dicht.

Erläuterung zu Abbildung 9:

- Variante 4 Fenster, normal
- Variante 5 Lippendichtung im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 4,4 m)
- Variante 6 Lippendichtung im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 4,4 m)
zusätzlich: Innenflügel leicht geöffnet (Griff gelockert)
- Variante 7 Lippendichtung im inneren Fensterflügel entnommen (ca. 4,4 m)
zusätzlich: Außenflügel leicht geöffnet

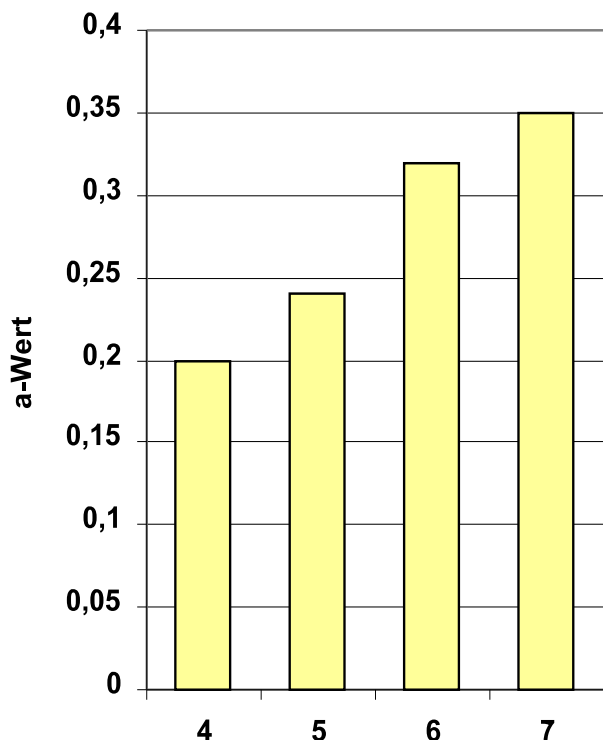


Abb. 9 Fugendurchlasskoeffizienten (a-Wert) für Fenstermessung

Die Variation der Fensterdichtung und -öffnung bei der Fenstermessung zeigt die erwarteten Veränderungen am a-Wert. Insgesamt sind die Einflüsse durch das Herausnehmen der Lippendichtung sowie das Öffnen einzelner Flügel gering.

Fazit

Insgesamt ist festzustellen, dass die Grundlüftung der Prüfraume und damit die Mindestluftwechselraten nach DIN EN 12832 gesichert sind, allerdings nicht über die Fenster sondern über die Bauhülle.

Die Fenster sind eher zu dicht. Werden allerdings raumäquivalente a-Werte für die Fenster gebildet, so werden die Anforderungen der DIN 12 207 bzw. der DIN 18055 an die Fugendurchlässigkeit deutlich überschritten. Das nachträgliche Herausnehmen von Dichtstreifen aus dem Fensterfalz ist deshalb nicht zu empfehlen.

Eine absolute Dichtheit der Gebäudehülle im Fachwerkhaus ist nicht sinnvoll und praktisch nicht möglich.

Eine Verringerung der Lüftung über Bauteilfugen zugunsten der Lüftung über Fensterfugen ist für künftige Bauvorhaben anzustreben.

Dazu sind die Detaillösungen für die problematischen Durchstoßpunkte der Balkenköpfe, den Anschluss Lehmschale-Fensterlaibung und die Unterbrechung der Lehmschale in historisch sensiblen Bereichen weiter zu entwickeln.

¹ Simons, Paul:
Protokoll und Stellungnahme zur Luftdichtheitsmessung am 23. Juli 2003, Ingenieurgesellschaft Bau+Energie+ Umwelt+Springe-Eldagsen

² Simons, Paul:
Gutachten zur Gebäude thermografie mit BlowerDoor Messung und Dichtheitsprüfung von zwei Abluftsträngen am 8. Oktober 2003, Ingenieurgesellschaft Bau+Energie+ Umwelt+Springe-Eldagsen

Wandheizung - Konzept, Ausführung und Prüfung*

Wulf Eckermann

Während der konzeptionellen Vorplanung wurde der Einsatz verschiedener Heizsysteme mit unterschiedlichen Wirkungsweisen diskutiert. Letztlich fiel die Wahl auf ein Wandheizsystem, wobei die ohnehin notwendige Erneuerung der Innenschale mit einer Verbesserung der Dämmwirkung und der Integration der Heizfunktion kombiniert wird.

Den zu erwartenden positiven Einflüssen auf Raumklima und Feuchteschutz der Fachwerkwand standen zunächst Zweifel an der ausreichenden Heizwirkung und der Regelungsfähigkeit der Anlage gegenüber.

Feuchteverhalten von Fachwerk

Das entscheidende Kriterium für den dauerhaften Erhalt einer Fachwerkwand ist eine ausgewogene Feuchtebilanz im Bereich der Fachwerkhölzer. Das eindringende Wasser, sei es Schlagregen- oder Spritzwasser, Kondensat im Bauteil oder Baufeuchte muss schnell abtrocknen können. Besondere Bedeutung kommt dabei der Schlagregenbelastung zu. Schlagregen bewirkt einen hohen Feuchteeintrag in die zahlreichen Fugen zwischen den Fachwerkhölzern und den Gefachen.

Bei Fachwerkgebäuden wird das eindringende Schlagregenwasser durch kapillaren Wassertransport größtenteils von den mineralischen, porösen Ausfachungsmaterialien und zu einem kleinen Teil von den Fachwerkhölzern aufgenommen. Anschließend setzt die Verteilung und Abtrocknung der Feuchte durch Wasserdampfdiffusion, sowohl nach außen wie nach innen, ein. Innendämmungen, wie sie bei äußerer Fachwerksichtigkeit notwendig sind, können zu feuchtechnischen Problemen führen. Schäden im Fachwerkgefüge wären die Folge.

Dem Fachwerk angemessene Konstruktionen, Materialien und Dämmstärken müssen gewählt werden. Durch die Anordnung der Dämmebene im Innenraum verschiebt sich im Winter die Taupunktebene nach innen. Weiterhin wird die Rücktrocknungsmöglichkeit in den Innenraum durch diffusionsdichte Dämm- und Bekleidungsschichten verringert. Es könnte dann zu einem Feuchtestau in der Wand kommen und die Holzfeuchten würden langfristig auf kritische Werte steigen. Kann sich Feuchte über längere Zeit in der Wand anreichern, droht Pilz- und Insektenbefall.

Wandaufbau

Grundlage des Systemaufbaus im Rentamt sind die im Arbeitsblatt "Dämmung mit Leichtlehm" erläuterten Wandkonstruktionen mit einer Innendämmung aus Leichtlehm und Lehmputz. Den wärmetechnischen Anforderungen einer modernen Nutzung wurde durch einen an die Substanz angepassten, gleichmäßigen Wärmeschutz entsprochen. Die moderate Dämmstärke und der kompakte Schichtenaufbau mindern die Gefahr von Wärmebrücken und Ausführungsfehlern. Beeinträchtigungen des Feuchteverhaltens der Wand sind, im Gegensatz zu Innendämmungen mit Plattenbaustoffen, nicht zu erwarten. Eine Wandheizung lässt sich problemlos integrieren. Die Konstruktion ist jederzeit zugänglich und reparaturfähig.

Die homogene Wandschale aus Leichtlehm besitzt, aufgrund der Kapillaraktivität des Materials, ein vorteilhaftes Trocknungsverhalten. Dieser Umstand hat einen ähnlich hohen Stellenwert, wie die Verringerung von Kondensation im Wandquerschnitt.

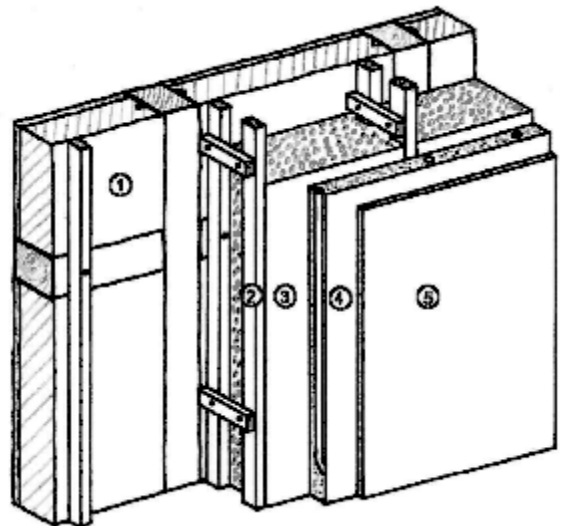


Abb. 1 Prinzipieller Aufbau der Wandkonstruktion im Fachwerkteil

Der Wandaufbau gliedert sich wie folgt:

- 1 bestehende Fachwerkwand
- 2 Lattenkonstruktion
- 3 Mineralleichtlehm (15 bis 20 cm)
- 4 Lehmunterputz mit Wandheizung
- 5 Lehmoberputz mit Kalkoberfläche

* Dieses Arbeitsblatt ist ein Ergebnis des DBU-Projektes „Altes Rentamt“ in Worbis / Eichsfeld. Die erläuterten Verfahren und technischen Ausführungen gelten für die konkreten Bedingungen in diesem Bauvorhaben und sind deshalb nicht generell auf andere Situationen und Materialien übertragbar.



Abb. 2 Modell des Wandaufbaus

Abbildung 2 zeigt ein Modell des Wandaufbaus. Der Wandaufbau erreicht als Mittelwert zwischen Holz- und Gefachanteil einen U-Wert von ca. $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (40 % Holz, 60 % Ausfachung).

Die Anforderungen der Energie-Einsparverordnung mit einem zulässigen U_{max} von $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für den nachträglichen Einbau von Dämmschichten gemäß dem Bauteilverfahren werden zwar nicht erreicht, jedoch ein für historische Fachwerkgebäude durchaus beachtlicher Dämmwert erzielt.

Eine Vergleichsmessung des tatsächlich erzielten U-Wertes vor Ort ergab mit ca. $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ im untersuchten Wandabschnitt eine deutliche Unterbietung des Rechenwertes.

Temperierung und Bauteilheizung

In den letzten Jahren werden unter Bezeichnungen wie "Temperierung", "Temperiersystem", "Hüllflächentemperierung" oder "Bauteiltemperierung" verschiedene Heizsysteme angeboten, denen besondere bauphysikalische Wirkungen zugesprochen werden.

Meist wird darunter die Verlegung von warmwasserdurchflossenen Heizrohren (Cu) in den Außenwänden eines Raumes verstanden, häufig ohne Wärmedämmung. Ein charakteristisches Merkmal wäre in diesem Sinne die direkte Erwärmung der "Hüllfläche" eines Raumes im Gegensatz zu herkömmlichen Heizflächen, die in erster Linie die Luft eines Raumes erwärmen.

Die Wärmeabgabe der installierten Rohrmenge unterschreitet in vielen Fällen den nach DIN EN 12831 (ehemals DIN 4701) erforderlichen Wärmebedarf.

Im technisch-physikalischen Sinne ist unter "Temperieren" eines Raumes das Heizen auf ein geringes Temperaturniveau zu verstehen.

Ein "Temperieren" ist demzufolge mit den üblichen Heizsystemen bei entsprechender Betriebsweise generell möglich. Das Temperaturniveau liegt dabei unterhalb der für eine "Behaglichkeit" (Anwesenheit von Personen) geforderten Werte und oberhalb des sich ohne Zuführung von Heizwärme einstellenden Eigenklimas des Gebäudes. Das "Temperieren" von Räumen kann eine eingeschränkte Nutzbarkeit ermöglichen oder eine Grundheizung zur Vermeidung von Bauschäden beinhalten.

Eine andere Zielstellung wird mit der "Bauteiltemperierung" verfolgt. Darunter ist die gezielte Wärmezufuhr an feuchtegefährdeten Bauteilen (z.B. Balkenköpfen in Holzdecken oder Fensterlaibung im Natursteinmauerwerk) zu verstehen, um dort Kondensatausfall zu verhindern und generell bessere Trocknungsmöglichkeiten zu schaffen. Hier handelt es sich um eine Methode des Bautenschutzes, die unabhängig von der Heizaufgabe mit einem Energieeinsatz verbunden ist.

Heizungskonzept

Im Gegensatz zum oben erläuterten "Temperiersystem" im direkten Kontakt mit der Wandkonstruktion, dessen Wirkungsweise stark umstritten ist, handelt es sich im Rentamt um eine Wandheizung mit Dämmschicht zur Verminderung der Transmissionsverluste.

Die Wandheizung erwärmt den Aufenthaltsbereich der Personen überwiegend durch die Wärmestrahlung der beheizten Flächen.

Durch die Einbindung von Wärme in kalten Bauteilen werden die Wärmeverluste des Menschen durch Strahlung zum Bauteil gemindert. Je kleiner der Wärmeverlust des Menschen ist, umso behaglicher empfindet der Mensch den Raumzustand. Kalten Flächen, wie z.B. Fenstern, werden warme Zonen zugeordnet.



Der Strahlungsaustausch des Menschen mit den kälteren Raumumfassungsflächen wird positiv beeinflusst.

Erfahrungen mit Wandheizungen zeigen, dass in vielen Fällen bei gleicher Behaglichkeit die mittleren Raumtemperaturen niedriger sein können als bei einer Konvektionsheizung. Durch den wenig ausgeprägten konvektiven Wärmeübergang - Wandoberfläche/Raumluft - im Falle niedriger Heiztemperaturen ist die thermische Luftbewegung im Raum vergleichsweise gering.

Ist im Winter eine Behaglichkeit bei geringeren Lufttemperaturen möglich, so resultieren daraus höhere relative Luftfeuchten. Aufgrund der geringen Auftriebskräfte ist der Staubtransport im Verhältnis zu statischen Heizflächen weniger ausgeprägt.

Durch die Montage von Heizrohren auf den Außenwänden ist es möglich, die raumseitigen Oberflächen zu erwärmen und damit das Risiko von Tauwasser zu verringern. An Außenbauteilen ist auf eine ausreichende Dämmschicht hinter der Heizebene zu achten.

Alternativlösung: Statische Heizflächen

Grundsätzlich ist eine Beheizung des Fachwerkhäuses auch mit konventionellen Heizkörpern möglich. Allerdings können dann die oben genannten Vorteile der niedrigeren Raumtemperaturen, der kleinen Temperaturspreizung und der höheren relativen Feuchte nicht genutzt werden.

Ein weiterer Vorteil der Hüllflächen-Temperierung ist, dass die Räume ihren ursprünglichen Charakter behalten. Übliche Heizflächen sind sichtbar, meist unterhalb der Fenster an den Außenwänden montiert. Bei der Hüllflächen-Temperierung bleiben die Wände frei. Die freie Möblierung des Raumes ist allerdings durch das Freihalten der beheizten Wandfläche eingeschränkt.

Technische Ausführung

Die heiztechnische Versorgung des Gebäudes erfolgt über eine Fernwärme-Anschlussstation. Energieträger der Fernwärmeerzeugung ist Erdgas. Die Fernwärmeübergabestation befindet sich im Kellergeschoss des Hauptgebäudes. Die Raumheizung erfolgt mit einer Warmwasserheizung, die als Wandflächenheizung mit unter Putz verlegten WICU-Rohrleitungen (Kupfer mit Kunststoffmantel) ausgebildet ist.

Auf Grundlage der Wärmebedarfsberechnung nach DIN EN 12831 erfolgte die Auslegung der Hüllflächen-Temperierung unter Berücksichtigung von individuellen Korrekturfaktoren.

Zur optimierten Leistungsabgabe des Systems wurde zunächst vorgeschlagen, Heiztaschen mit einem "Heizputz" hoher Dichte im Bereich des Leichtlehms an der Rauminnenseite auszubilden.

Aus der Wärmebedarfsberechnung resultierte jedoch eine hohe Anzahl von Heizrohren auf der Wand, so dass die Ausführung von speziellen Heiztaschen im Lehmputz nicht sinnvoll war.

Der die Heizrohre umschließende Lehmputz hat eine relativ hohe Dichte und eine gute Wärmeleitung. Durch die damit verbundene große spezifische Wärmekapazität verläuft die Wärmespeicherung effektiv. Zur Beheizung des Gebäudes wurden vier Heizkreise angelegt. Im Ratssaal wird zusätzlich die Frischluft vorgewärmt. (Tabelle 1)

Zur Befestigung der Rohre auf der Lattung dienen aufgeschraubte Alublech-Streifen. An den Wendepunkten wurden die Rohre zusätzlich zu ihrem Kunststoffmantel mit Schaumstoffschläuchen ummantelt, um thermische Dehnungen ohne Zwängungen zuzulassen. Es ist nicht auszuschließen, dass durch die kraftschlüssige Befestigung die thermischen Dehnungen der Rohre auf die Lattung übertragen werden.

| | Heizkreis 1 | Heizkreis 2 | Heizkreis 3 | Heizkreis 4 |
|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|
| Bezeichnung | Büro | WC / Nebenbereiche | Ratssaal | Lüftung |
| Leistung | 41 KW | 11 KW | 9,5 KW | 8 KW |
| Spreizung | 70 / 55 C | 70 / 60 C | 70 / 55 C | 70 / 55 C |

Tabelle 1 Technische Angaben zu den Heizkreisen



Abb. 3 Beispiel für Rohrverlegung

Regelung

Die Grundregelung der Heizungs-Vorlauftemperatur erfolgt witterungsgeführt in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Weitere Funktionen der übergeordneten Regelung sind die Wochenend- und Nachtabsenkungen und die Abschaltung der Heizkreise bei bestimmten Außentemperaturen.

Zur nutzerabhängigen Beeinflussung sind in jedem Heizkreis Thermostatventile (Unibox) angeordnet. Über diese voreinstellbaren Ventile wird gleichzeitig der hydraulische Abgleich sichergestellt. Daneben verfügen diese Reglereinheiten noch über eine Automatik-Entlüftung.

Heizwärmeverbrauch

Jeder Heizkreis der Heizungsanlage verfügt über einen Wärmemengezähler. Die monatlichen Verbrauchswerte werden regelmäßig ausgelesen.

Der jährliche, auf die beheizte Nutzfläche bezogene Heizwärmeverbrauch ist in Abbildung 4 dargestellt.

Deutlich ist die Reduzierung des Energieverbrauchs während der letzten drei Jahre zu erkennen. Für das Gebäude sollte nach der Sanierung ein Heizenergiebedarf von weniger als $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ erreicht werden.

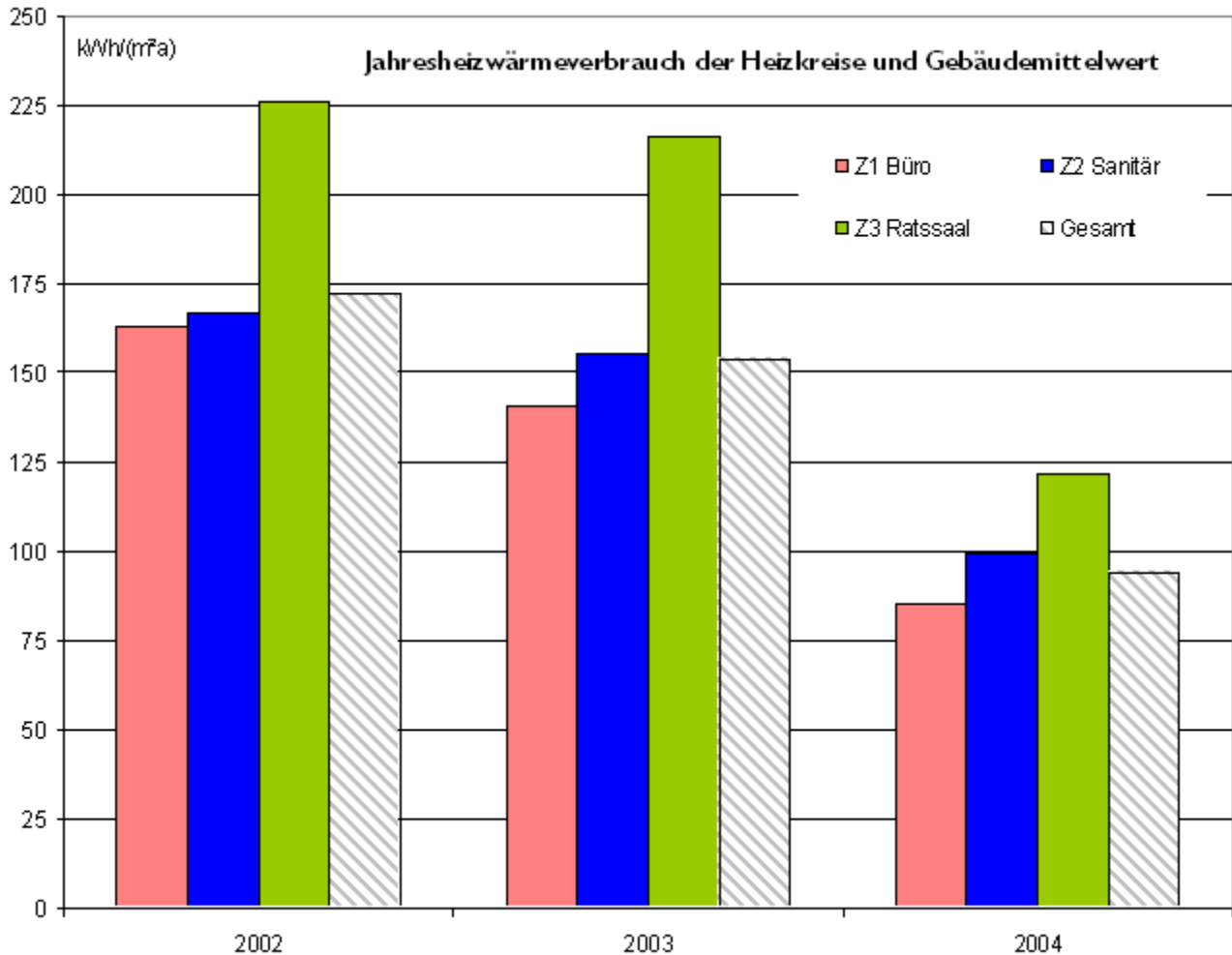


Abb. 4 Entwicklung des spezifischen Heizwärmeverbrauches [kWh/(m²a)]

Die Heizkreise Z1 (Büro) und Z2 (Sanitär) erfüllen im Jahr 2004 diese Anforderung.

Der Heizkreis Z3 (Ratssaal) lag mit 122 kWh/(m²a) über dem Richtwert. Für das Gesamtgebäude erfüllen die drei Heizkreise im Jahr 2004 in der Summe mit einem Wert von 94 kWh/(m²a) die Zielvorgabe. Der rechnerisch ermittelte Heizenergiebedarf von annähernd 90 kWh/(m²a) wird zwar noch nicht erreicht, sollte aber bei anhaltender Tendenz realisierbar sein.

Die hohen Werte der ersten Heizperioden sind auf die Bautrocknung sowie den ausgeprägten Luftwechsel aufgrund provisorischer Türen, ungedichteter Fenster und Baubetrieb zurückzuführen.

Für die schnelle Abtrocknung der Leichtlehmschale war ein erheblicher, jedoch einmaliger Heizaufwand nötig. Im trockenen Gebäude unter Nutzungsbedingungen verringern sich die Verbrauchswerte deutlich.

In den Zeiträumen der Beheizung lag der Verbrauch je Fläche für den Heizkreis Ratssaal deutlich über den Werten der Heizkreise 1 und 2.

Die Gründe hierfür liegen in dem höheren Anteil an Außenwänden mit relativ geringem Wärmeschutz wie auch in der heizenergetisch aufwendigen Vorwärmung der Zuluft.

DBU Modellprojekt Altes Rentamt Worb is

Modellhafter Einsatz von Lehm zur Wärmedämmung im Fachwerkbau und Optimierung des energetischen Konzeptes



Abb. 5
Rentamt
Nordfassade

Prüfung

Wärmeverlust über die Fassade

Zur Bestimmung der Temperaturverteilung auf der Gebäudefassade und zur Abschätzung der Heizenergieverluste durch Transmission dienten Aufnahmen mit einer Thermografiekamera an einem kalten Wintertag. Die Außenaufnahmen entstanden am 14.02.2005 gegen 7:00 Uhr kurz vor Sonnenaufgang. Die Infrarot-Thermografie Messung erfolgt mit einer IR-Kamera PM 690 der Firma FLIR.

Der Fachwerkteil weist gegenüber dem Massivteil einen besseren Wärmeschutz auf. In der Mitte des Erdgeschosses des Fachwerkgebäudes ist der Serverraum erkennbar, dessen Wärmeabgabe zu erhöhten Temperaturen auf der Außenoberfläche führt.

Die rechnerisch ermittelten U-Werte betragen für den Fachwerkteil ca. $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und für den Massivteil ca. $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Daraus resultieren höhere Oberflächentemperaturen im Massivteil, die in den IR-Aufnahmen deutlich erkennbar sind.

Weitere Inhomogenitäten im Massivteil ergeben sich durch die Tatsache, dass aufgrund von Schiefstellungen der Wände, die Leichtlehmdämmung nicht überall die gleiche Dicke erreicht.

So konnte im Ratssaal aufgrund der räumlichen Gegebenheiten die Leichtlehmdämmung nur in einer Schichtdicke von ca. 10 cm ausgeführt werden. Die Natursteine besitzen eine höhere Wärmeleitfähigkeit als der Fugenmörtel. Auch lokale Aufweichungen zeigen sich aufgrund der geringeren Dämmwirkung mit höheren Temperaturen auf der Fassade.

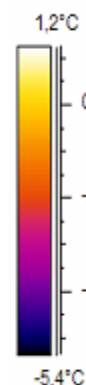
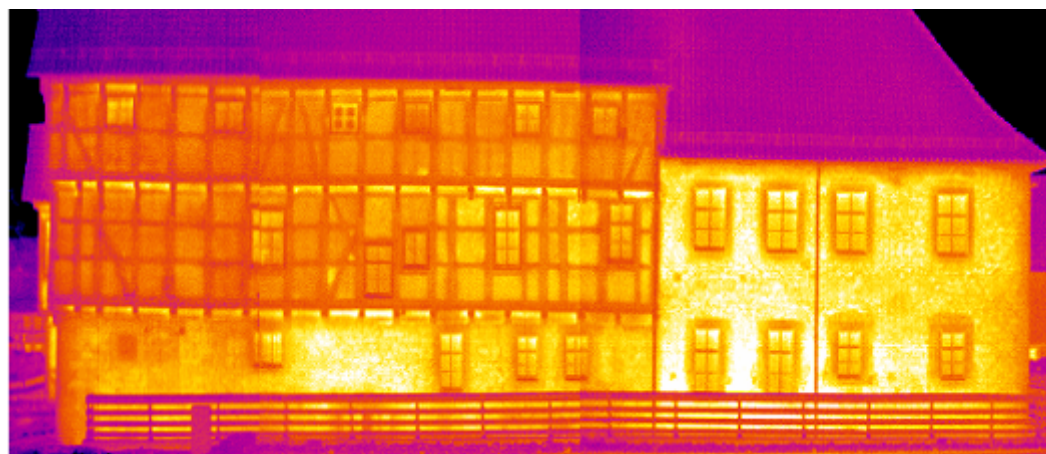


Abb. 6
IR-Aufnahme der
Nordfassade
(Montage aus drei
Aufnahmen)

Beheizte Wand

Für einen Zeitraum von vier Wochen der Heizperiode wurde aus Messwerten das Verhältnis der Wärmeleistung der Wandheizung zum Wärmeverlust durch Transmission nach außen ermittelt.

80 Prozent der von den Heizrohren in der Wand bereitgestellten Wärme kommt dem Raum zugute, 20 Prozent gehen durch die Außenwand verloren.

Bei einer Erhöhung der Wärmedämmung der Außenwand auf das Niveau der EnEV würde sich das Verhältnis auf etwa 85 % zu 15 % verbessern.



Abb. 7 Ansicht Außenwand im Raum 2.6

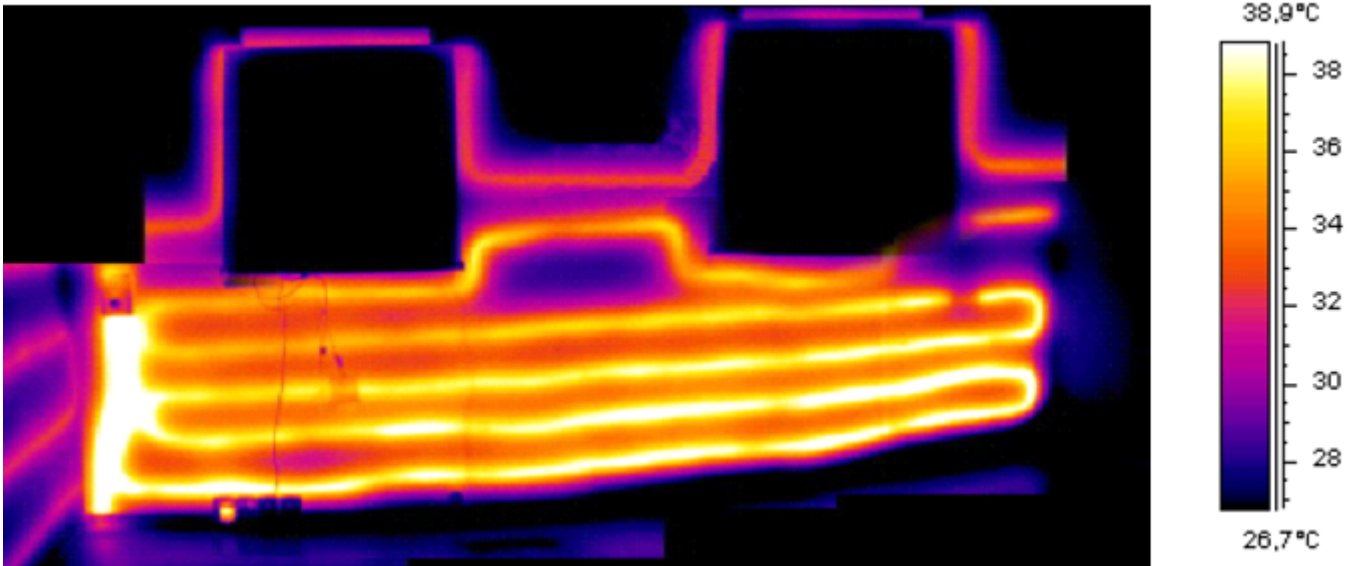


Abb. 8 IR-Aufnahme der Außenwand (Montage aus mehreren Aufnahmen)

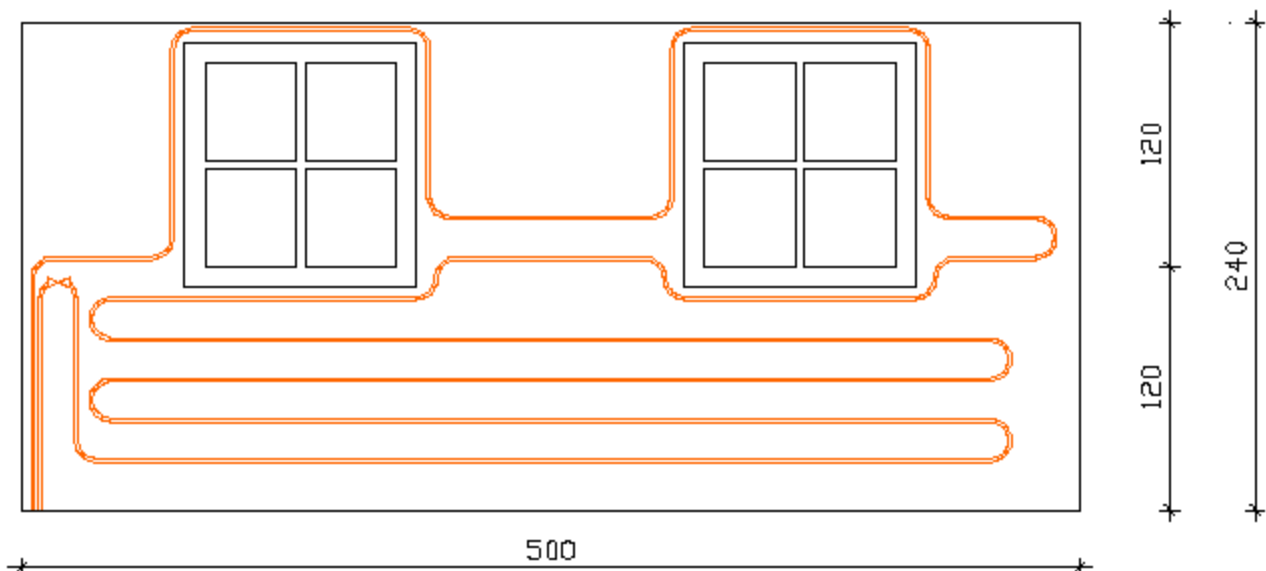


Abb. 9 Verlauf der Wandheizungsrohre und Wandtemperaturen

Holzfeuchte

Die vorhandenen Hölzer im Fachwerk wurden teilweise repariert und zum Teil durch neue Hölzer ersetzt. Für das alte Außenfachwerk und die Ersatzhölzer wurde fast ausschließlich Eiche, nur vereinzelt Ulme verwendet.

Kritische Aufweichungen sind am ehesten in der Grenzschicht zwischen Fachwerk und Innendämmung zu erwarten, da hier die so genannte Taupunkt ebene liegt. Die langfristige Entwicklung der Holzfeuchte wird an über 40 Messstellen auf der dem Dämmlehm zugewandten Innenseite des Fachwerks (Kondensatebene) regelmäßig erfasst. Die Ermittlung der Holzfeuchte erfolgt durch eine elektrische Widerstandsmessung.

In der Abbildung 10 sind die Mittelwerte typischer Bauteilsituationen dargestellt. Nach dem Einbau des Leichtlehms im Sommer 2001 ist ein Trocknungsprozess von Herbst 2001 (Verputzen der Wände) bis zum Sommer 2003 erkennbar, der durch den Betrieb der Heizung ab Ende 2001 unterstützt wurde. Die einzelnen Geschossebenen zeigen ein ähnliches Verhalten.

Gemäß DIN EN 335-1, Anhang A, 2.10 ist für die Entwicklung holzerstörender Pilze eine Holzfeuchte von mehr als 20% erforderlich.

Nach DIN 4074-1 ist 20% Holzfeuchte der obere Grenzwert für den Begriff "trocken".

Die Messungen belegen, dass sich die Holzfeuchte nach der Trocknungsphase bei ca. 13 Masseprozent stabilisiert. Daher ist das Holz nach DIN als "trocken" zu bezeichnen und der Schutz vor der Entwicklung holzerstörender Pilze ist durch die dauerhafte Unterschreitung des Grenzwertes von 20% Holzfeuchte gesichert.

Vier Jahre nach Beginn der Bauarbeiten und Einbau der Leichtlehmdämmung zeigt das Gebäude ein unproblematisches Feuchteverhalten. Die anfangs, aufgrund der Baufeuchte, hohen Holzfeuchtwerte sind durchgehend auf ein unkritisches Niveau getrocknet.

Während der winterlichen Heizperiode war keine Aufweichung durch Kondensation nachweisbar. Die Wandheizung hat einen positiven Einfluss auf das Feuchteverhalten von Fachwerk und Lehmschicht.

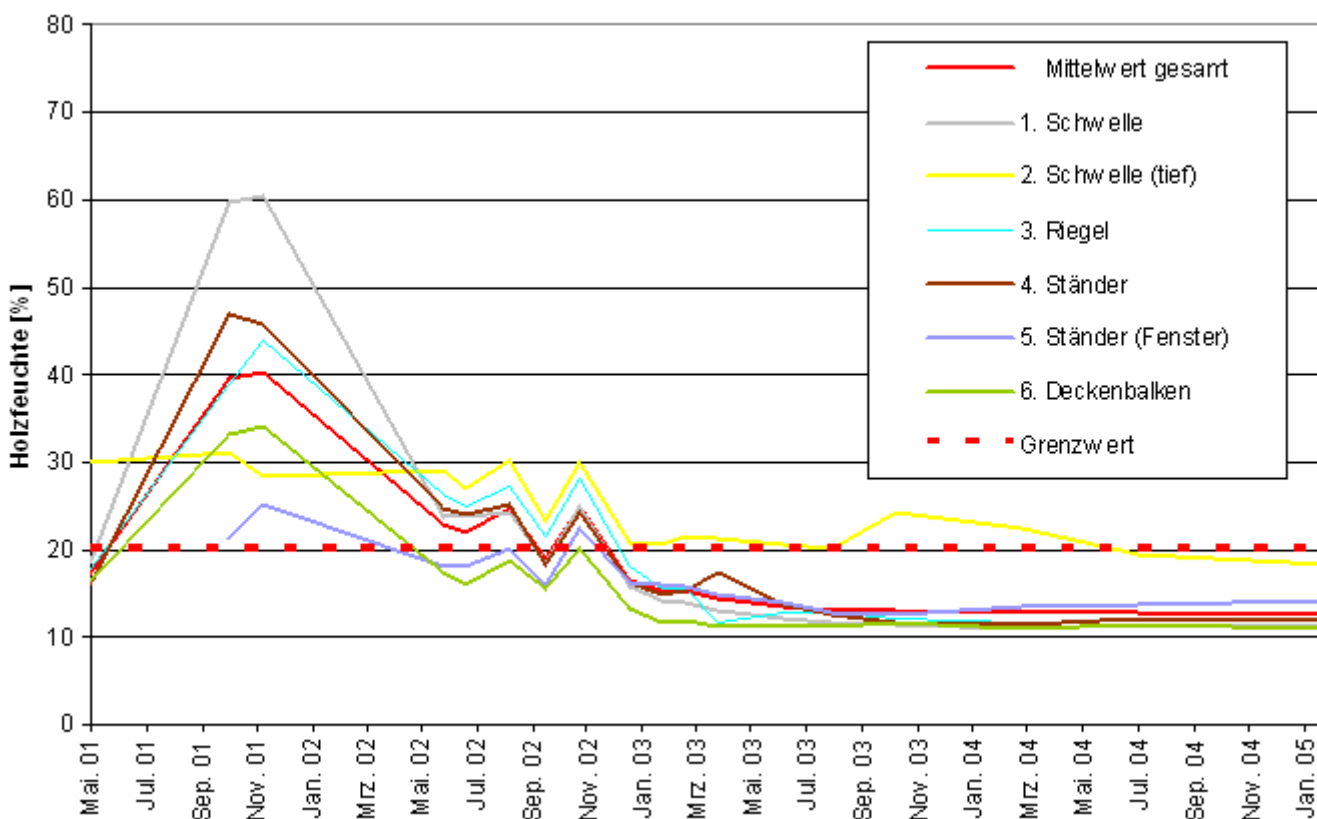


Abb. 10 Mittelwerte der Holzfeuchte nach Lage der Messpunkte