

Bernhard Weller
Leonie Scheuring *Hrsg.*

Denkmal und Energie 2019

Energieeffizienz, Nachhaltigkeit
und Nutzerkomfort

Denkmal und Energie 2019

Bernhard Weller · Leonie Scheuring
(Hrsg.)

Denkmal und Energie 2019

Energieeffizienz, Nachhaltigkeit
und Nutzerkomfort

Hrsg.

Bernhard Weller
Institut für Baukonstruktion
Technische Universität Dresden
Dresden, Deutschland

Leonie Scheuring
Institut für Baukonstruktion
Technische Universität Dresden
Dresden, Deutschland

ISBN 978-3-658-23636-6 ISBN 978-3-658-23637-3 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-23637-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Mussten die Denkmalpfleger früher noch um gesellschaftliche Akzeptanz kämpfen, stößt nach nunmehr 40 Jahren Bestehen der Denkmalschutzgesetze die denkmalpflegerische Arbeit in der breiten Öffentlichkeit weitestgehend auf Zustimmung. Ins Bewusstsein der Öffentlichkeit kommt indes neben denkmalpflegerischer Erfordernisse bei Gebäudesanierungen das Bewusstsein zur Notwendigkeit energetischer Ertüchtigungen hinzu. Bis 2050 fordert die Bundesregierung einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand und stellt damit Architekten, Ingenieure, Denkmalpfleger und Fachunternehmer des Bauhandwerks vor besondere Herausforderungen.

Herkömmliche energetische Sanierungen bedeuten aktuell einen erkennbaren Eingriff in das äußere Erscheinungsbild, baukonstruktive Besonderheiten der alten Bausubstanz ziehen individuelle bauphysikalische Problemstellungen nach sich, die es im Speziellen zu lösen gilt, und Ungewissheiten über die energetischen Eigenschaften der Bausubstanz erschweren die Dimensionierung von Dämmmaßnahmen. Die Beiträge in diesem Buch sollen Wissen vermitteln und Möglichkeiten aufzeigen, wie eine Symbiose zwischen dem behutsamen Umgang mit dem Gebäudebestand und einer energetischen Ertüchtigung geschaffen werden kann.

Im Teil „Bauten und Projekte“ dieses Bandes werden Beispiele jüngster Sanierungen beschrieben, die den Spagat zwischen dem Erhalt der Bausubstanz und einer energetischen Ertüchtigung jedes auf seine Weise hervorragend meistern. Sanierungen von Fassaden der Nachkriegsmoderne werden dabei neben denen von Herrenhäusern aus dem 16. Jahrhundert und von Bauten, die sich auf eine Bewerbung zum UNESCO-Welterbe vorbereiten, ins Detail beleuchtet.

Die Rubrik „Planung im Detail“ geht auf Problemstellungen und Lösungen in der denkmalpflegerischen und energetischen Planung ein. Darunter fällt die sorgfältige Herausarbeitung und Diskussion von Handlungsempfehlungen für Bauten verschiedener Baualtersklassen.

Der Teil „Material und Technik“ stellt in der Sanierung erfolgreich verwendete Materialien vor. Möglichkeiten und Grenzen sowohl neuartiger als auch etablierter Materialien werden diskutiert und zukünftige Entwicklungen abgeschätzt.

Abschließend werden im Teil „Forschung und Entwicklung“ Fragestellungen zur Wirtschaftlichkeit von Sanierungsstrategien sowie aktuelle Entwicklungen des Denkmalschutzes und der Energieeinsparregelungen beleuchtet und diskutiert.

Die Herausgeber danken den Autoren, welche mit ihren Beiträgen dem Leser einen vielfältigen Einblick in das Themenfeld der energetischen Sanierung von Baudenkmalen ermöglichen. Ein besonderer Dank gilt Frau Johanna Daum am Institut für Baukonstruktion in Dresden für ihre engagierte Mitarbeit an der Drucklegung des Buches sowie Frau Prenzer und Herrn Harms bei Springer Vieweg für die angenehme Zusammenarbeit.

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Dipl.-Ing. Leonie Scheuring

Dresden, November 2018

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
----------------------	----------

Bauten und Projekte

Mathildenhöhe Darmstadt – energetische Sanierung des Ausstellungsgebäudes	1
Johann Reiß, Astrid Wuttke	

Strategien zur denkmalgerechten Sanierung von Fassaden der Nachkriegsmoderne	19
Florian Mähl	

Innovative Umwelttechnologien für die Giraffen – Sanierung des Giraffenhauses im Schönbrunner Tiergarten	33
Vanessa Sonnleitner, Claudia Paul	

U-Wert und Schimmelmessung – Potentiale und technische Realisierbarkeit bei der Sanierung von denkmalgeschützten Bauten	45
Lukas Durrer, Holger Hendrichs	

Planung im Detail

Leitfaden für das nachhaltige Prozessmanagement bei energetischen Sanierungsmaßnahmen in WEG-Mehrfamilienhäusern	55
Georgi Georgiev, Katharina Rupp, Gunnar Grün	

Plattenbau – Handlungsleitfaden für die energetische Sanierung von Typenbauten	77
Antje Vargas	

Systematisierte Instandhaltungsplanung für Sakralbauten – Bewahrung und Anpassung	91
David Schiela, Benno Günther	

Das Raumbuch in der Denkmalpflege – ein Werkzeug zur Dokumentation und zur Kostenermittlung	105
Manfred von Bentheim	

Material und Technik

TYPHABOARD als Innendämmung bei Mehrfamilienhäusern mit Eigentümergemeinschaften in Bulgarien	111
Georgi Georgiev, Werner Theuerkorn, Katharina Rupp, Nikolay Tuleschkow, Pentscho Dobrev, Martin Krus	

Die RAL-Zertifizierung „Innendämmung“ – Voraussetzungen und Potentiale	123
Walter L. Meyer	

Oberseitige Dämmungen historischer Saaldecken am Beispiel der Bremer Glocke	139
Kerstin Paschko, Arnold Drewer	

Forschung und Entwicklung

Bewertung der energetischen Qualität von Verglasungen am Campus der TU Dresden	149
Maartje van Roosmalen, Dennis Thorwarth, Bernhard Weller	

Das „Ökohaus“ als technisches Denkmal? Eine architekturgeschichtliche und denkmalkundliche Einordnung	163
Johannes Warda	

Wandheizungssysteme für historischen Bestand – vergleichende Untersuchungen am realen Gebäude	175
Martin Krus, Stefan Bichlmair, Ralf Kilian	

Das Gebäude-Emissions-Gesetz (GEG-2050)	185
Stefan Oehler	

Autorenregister	199
------------------------------	------------

Schlagwortregister	201
---------------------------------	------------



Mathildenhöhe Darmstadt – energetische Sanierung des Ausstellungsgebäudes

Dipl.-Ing. Johann Reiß¹, Dipl.-Ing. Astrid Wuttke²

1 Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, Deutschland

2 schneider+schumacher Planungsgesellschaft mbH, Poststr. 20A, 60329 Frankfurt am Main, Deutschland

„Habe Ehrfurcht vor dem Alten und Mut, das Neue frisch zu wagen.“

Großherzog Ernst Ludwig, Gründer der Künstlerkolonie Mathildenhöhe (1868-1937)

Die Mathildenhöhe Darmstadt ist ein einzigartiges architektonisches und städtebauliches Gesamtkunstwerk. 1908 wurde auf der höchsten Stelle der östlich der Innenstadt gelegenen Anhöhe das von Josef Maria Olbrich geplante Ausstellungsgebäude errichtet. Zusammen mit dem zeitgleich erbauten Hochzeitsturm bildet es ein das Stadtbild bis heute prägendes eindrückliches Jugendstil-Ensemble. Ziel des Projektes ist es, neben einer Vielzahl von denkmalpflegerischen und aktuellen funktionalen Anforderungen (größtmögliche Flexibilität für wechselnde Ausstellungskonzepte, Barrierefreiheit, Sicherheitsanforderungen u.v.m.) eine den heutigen Vorgaben entsprechende energetische Sanierung zu planen, die sich aus den spezifischen Rahmenbedingungen des Ausstellungshauses entwickelt und damit gleichzeitig in ihrer methodischen Herangehensweise beispielgebend für energetische Sanierungen von Museen insgesamt sein kann. Dabei standen die Grundsätze der präventiven Konservierung, die konservatorischen Anforderungen, niedrige Investitions- und Folgekosten, möglichst geringer aber intelligenter Technikeinsatz, hohe Energieeffizienz und vor allem die Nachhaltigkeit im Sinne eines ganzheitlichen, interdisziplinär entwickelten Sanierungskonzeptes im Mittelpunkt. Zudem ergab sich hier die Chance, modellhafte Lösungen für die besondere Herausforderung des Denkmalschutzes zu entwickeln, welche die vorhandene Substanz erhalten und gleichzeitig eine schonende zeitgemäße Museumsnutzung und Betriebsführung erlauben.

Im Rahmen der Sanierungsplanung wurde gezeigt, dass auch ein unter Denkmalschutz stehendes Museum bei schwierigen Randbedingungen und unter Einhaltung der konservatorischen Anforderungen im Rahmen der integralen Planung so saniert werden kann, dass der Endenergiebedarf im Vergleich zum Zustand vor der Sanierung um mehr als 50 % reduziert werden kann. Die Maßnahmen, die dabei zum Einsatz kamen, können in ähnlicher Form auch in anderen Museumsbauten Anwendung finden. In gleicher Weise kann auch der innerhalb der Projektgruppe durchgeführte Prozess der integralen Planung, der bei diesem Vorhaben zum Ziel führte, künftig auch auf andere Vorhaben übertragen werden.

Schlagerwörter: Denkmalschutz, Mathildenhöhe Darmstadt, Ausstellungshallen, Jugendstil, energetische Sanierung, Aerogelputz, integrale Planung

1 Hintergrund

Die Darmstädter Mathildenhöhe ist ein einzigartiges Gesamtensemble von außergewöhnlichem universellen Wert. Im Ausstellungsgebäude werden wechselnde Ausstellungen der bildenden und angewandten Kunst gezeigt. Die Kultusministerkonferenz formuliert 2014 in ihrem Beschluss zur UNESCO-Welterbepewerbung: „Die Künstlerkolonie ist ein Markstein in der Entwicklung der Künste und Architektur auf dem Weg in die Moderne des 20. Jahrhunderts und gilt darüber hinaus zugleich als hervorragendes Beispiel eines architektonisch geschlossenen Bauensembles.“ Die Stadt Darmstadt bewirbt sich derzeit um die Aufnahme in die Welterbeliste. Im Frühjahr 2019 wird der offizielle Bewerbungsantrag bei der UNESCO in Paris eingereicht.

Die Ausstellungshallen nach den Plänen von Josef Maria Olbrich wurden 1908 fertiggestellt. Bis heute sind an dem Gebäude immer wieder Änderungen vorgenommen worden. Bereits vor dem Zweiten Weltkrieg fanden kleinere Um- und Erweiterungsbauarbeiten statt. Nach dem Krieg mussten zerstörte Dächer wiederhergestellt werden, der ehemals offene Rosenhof (die heutige Halle 4) erhielt ein Notdach und diente übergangsweise als Versammlungsort für die Sitzungen des Stadtparlamentes. Der letzte größere bauliche Eingriff erfolgte in den 1970er Jahren mit einer umfassenden Renovierung sowie An- und Umbauten für Werkstatt und Magazine, wodurch ein zeitgemäßer Wechselausstellungsbetrieb ermöglicht werden konnte. Zur energetischen Verbesserung wurden bisher nur wenige Maßnahmen realisiert.

Generell gelten für Museen besondere Anforderungen an die klimatischen Bedingungen im Innenraum, bedingt durch die konservatorischen Anforderungen des zu bewahrenden Kunst- und Kulturguts. Museumsgebäude müssen ein stabiles und träge auf wechselnde Außenklimabedingungen reagierendes Innenraumklima sicherstellen. In besonderem Maße gilt dies jedoch für Museen, in denen viele Leihgaben im Rahmen von Wechselausstellungen präsentiert werden, da die Klimasollwertvorgaben hier in den Leihverträgen besonders strikt definiert sind. Diese hohen Anforderungen an das Raumklima wurden bisher mit einem großen Aufwand im Bereich der Gebäudetechnik erwidert und konnten mit den vorhandenen, veralteten Anlagen zuletzt nicht einmal mehr zuverlässig sichergestellt werden. Ein dementsprechend sehr hoher Energiebedarf ist mittel- bis langfristig weder ökologisch noch wirtschaftlich sinnvoll, da Ressourcenknappheit und fehlende finanzielle Mittel dazu führen, dass sich Museen die hohen Betriebskosten nur noch schwer leisten können.

Die Herausforderung liegt darin, in denkmalgeschützten Gebäuden ein möglichst konstantes Innenraumklima bei geringstem Technikeinsatz und niedrigen Betriebs- und Folgekosten zu gewährleisten. Hier müssen integrale und innovative Konzepte entwickelt werden, die Raum lassen, neue Technologien zu erforschen.

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt fördert neben den Maßnahmen zur Energieeffizienz von Gebäuden auch den Erhalt von Kulturgütern, deren ressourcenschonende Sanierungen Modellcharakter besitzen. Dies bezieht sich sowohl auf passive, bauseitige Komponenten wie Dämmsysteme und innovative Baustoffe als auch auf aktive Komponenten wie moderne und energieeffiziente Anlagentechnik – die direkt helfen, Energie einzusparen. Die vorliegende Sanierungsplanung für die Ausstellungshallen der Mathildenhöhe Darmstadt nimmt sich dieser Aspekte an und erweitert sie durch die Umsetzung zahlreicher Aspekte der präventiven Konservierung. Sie wird daher von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt finanziell unterstützt. Der Abschlussbericht ist unter [1] abrufbar.

Aufgrund der Bewerbung für das Weltkulturerbe sowie erweiterter Planungsanforderungen verzögerte sich die Sanierung. Die Ausstellungshallen wurden bereits 2012 geschlossen. 2015 sollte die Baumaßnahme ursprünglich abgeschlossen sein. Mit der Umsetzung der Planung wurde jedoch erst im Sommer 2017 begonnen. Die Baufertigstellung ist nun für Ende 2019 geplant.

2 Ziele

Das gesamte Ensemble Mathildenhöhe besteht aus den Ausstellungshallen (gebaut auf dem ehemaligen Wasserreservoir der Stadt Darmstadt, einem Industriekulturdenkmal des ausgehenden 19. Jahrhunderts), dem Hochzeitsturm, dem Ernst-Ludwig-Haus (Museum Künstlerkolonie), der russischen Kapelle, dem „Lilienbecken“, dem „Schwanentempel“, dem Platanenhain sowie den verschiedenen Atelier- und Wohnhäusern der ehemaligen Künstlerkolonie. Einzelne Gebäude wurden bereits saniert bzw. rekonstruiert. Bild 2-1 zeigt die Ausstellungshallen mit dem Hochzeitsturm vor der Sanierung.

Nun sollen auch die Ausstellungshallen saniert werden. Das 2012 initiierte Bauvorhaben sah zunächst ausschließlich eine anlagentechnische Erneuerung vor. Um jedoch künftig die konservatorischen Anforderungen in einem energetisch sinnvollen Rahmen dauerhaft zu gewährleisten, ist die Planung und Umsetzung eines ganzheitlichen Sanierungskonzeptes mit zusätzlicher bauphysikalischer Ertüchtigung des Gebäudes unumgänglich.



Bild 2-1 Photographische Aufnahme des Ausstellungsgebäudes vor der Sanierung (Quelle: Nikolaus Heiss).

Neben der Umsetzung der konkreten Maßnahmen soll aufgezeigt werden, welche Lösungen durch eine interdisziplinäre und integrale Planung erarbeitet werden können. Zugleich orientiert sich die Konzeption am Niedrigstenergie-Haus und einer möglichen Nutzung regenerativer Energien. Da der Gebäudekomplex unter Denkmalschutz steht, ergibt sich hier zudem die Chance, modellhafte Lösungen für die besondere Herausforderung des Denkmalschutzes aufzuzeigen. Die an der integralen Planung beteiligten Partner sind in Tabelle 2-1 zusammengestellt.

Tabelle 2-1 Zusammenstellung der an der integralen Planung beteiligten Partner.

Energiekonzept, wissenschaftliche Begleitung	Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Architektur	Schneider+schumacher, Frankfurt
Technische Gebäudeausrüstung	ingplan, Marburg
Bauphysik, Energieberatung	Schlier und Partner, Darmstadt
Thermische Simulation	Tichelmann & Barillas, Darmstadt

3 Bestandsaufnahme

3.1 Gebäude

Im Rahmen der integralen Planung wurde zu Beginn eine detaillierte Bestandsaufnahme durchgeführt. Die Ausstellungshallen wurden zusammen mit dem Hochzeitsturm nach den Plänen von Joseph Maria Olbrich im Jahre 1908 fertiggestellt. Die Eingangshalle (Halle 5) und die vier Ausstellungshallen, dargestellt in Bild 3-1, stehen auf einem 1878 erstellten Wasserreservoir. Das Reservoir mit einem Fassungsvermögen von 4.500 m³ umfasste in zwei Kammern das Trinkwasser für die Stadt Darmstadt. Bild 3-2 zeigt den Längsschnitt der Hallen mit dem darunterliegenden Wasserbehälter.

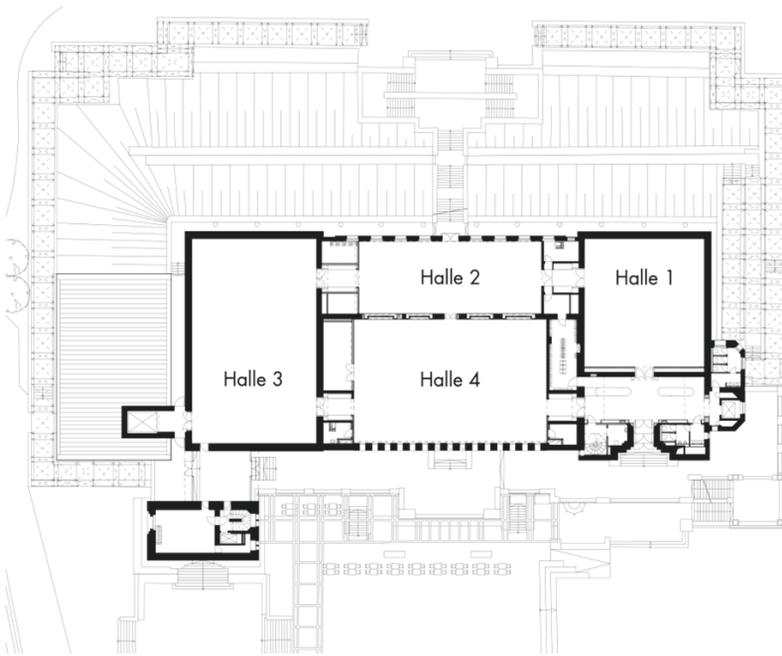


Bild 3-1 Erdgeschossgrundriss der Eingangshalle und der vier Ausstellungshallen (Quelle: schneider + schumacher).

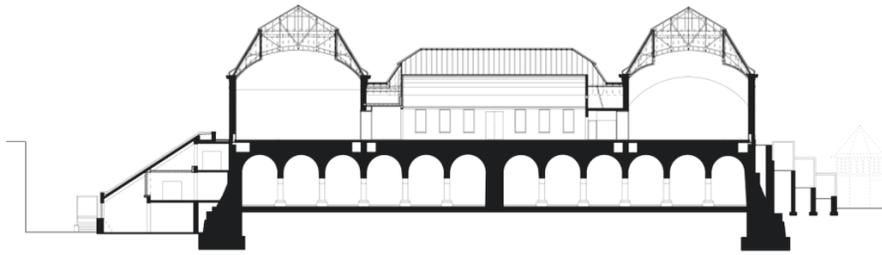


Bild 3-2 Längsschnitt durch die Ausstellungshallen mit dem darunterliegenden Wasserreservoir (Quelle: schneider + schumacher).

Erste Sanierungsarbeiten wurden zum 100-jährigen Bestehen der Künstlerkolonie Mathildenhöhe, die 1899 vom Großherzog Ernst Ludwig gegründet wurde, durchgeführt. Alle durchgeführten Maßnahmen sind in dem Buch »Mathildenhöhe Darmstadt, 100 Jahre Planen und Bauen für die Stadtkrone 1899 – 1999« [2] ausführlich beschrieben. In Bild 3-3 ist die Ostseite dargestellt, wie sie sich vor dem Verschließen der Fenster zeigte.



Bild 3-3 Photographische Darstellung der Ostseite. Die Fenster wurden im Rahmen einer Sanierungsphase in den 1970er Jahren verschlossen (Quelle: Architektur von Olbrich, Verlag Ernst Wasmuth, Bd. 3A).

Nach 1976 wurden nur noch kleinere Baumaßnahmen durchgeführt. Nachfolgend erfolgt die Beschreibung des baulichen und anlagentechnischen Zustandes, wie er zu Beginn der jetzigen Sanierungsphase vorlag.

Die Außenwände der Ausstellungshallen bestehen aus einem 40-60 cm dicken Vollziegelmauerwerk. Der vor Ort messtechnisch ermittelte U-Wert liegt bei $1,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Gewölbedecken über dem Wasserspeicher sind in Ziegelmauerwerk ausgeführt. Der Hohlraum zwischen Gewölbedecke und Ausstellungshallenfußboden ist mit Sand gefüllt. Der 40 mm dicke Parkettboden ist auf einem 40 mm dicken Estrich verlegt. Zwischen Estrich und Betonboden ist keine Dämmung verlegt. Der U-Wert der Decke zwischen Wasserbehälter und Ausstellungshalle liegt bei $0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Die Hallen 1 und 3 werden über die Dächer mit Tageslicht versorgt. Die gewölbten Decken über diesen Räumen bestehen aus Drahtputz (Rabitz), zum Teil mit darüber liegender Mineralwollschicht. Der U-Wert liegt bei $0,61 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die über den gewölbten Decken liegenden Dächer bestehen aus einer Holzschalung mit obenliegender Lattung für die Dachziegel. Der U-Wert beträgt $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Das Sheddach der Halle 4 weist einen U-Wert von $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf. Sowohl die Glasdecken als auch die Dachverglasungen über den Hallen 1 und 3 sind mit einer Einfachverglasung mit einem U-Wert von $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ausgestattet. Die bestehenden, im Gebäude eingebauten Holzfenster weisen einen U-Wert von $2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf. Der spezifische Gesamttransmissionsverlustwert $H_{T'}$ der Hüllfläche liegt bei $1,22 \text{ W/m}^2\text{K}$.

3.2 Anlagentechnik

Vom Entwurfsarchitekten Joseph Maria Olbrich war ursprünglich keine Heizung vorgesehen, denn die Ausstellungshallen sollten nur im Sommer genutzt werden. Für die Stadt Darmstadt kam bei dieser hohen Bausumme jedoch eine eingeschränkte, temporäre Nutzung auf keinen Fall infrage. Das Gebäude erhielt daher ein Heizsystem, bei dem über Kriechgänge unterhalb der Ausstellungsflächen warme Luft in die Raumecken der Hallen geführt wurde [2]. Diese Kriechgänge können heute zur Installationsführung genutzt werden. Die Ausstellungshallen wurden nach den grundlegenden Umbauten ab 1976 ausschließlich über Luft beheizt, gekühlt und klimatisiert. Die Wärmeerzeugung erfolgte mit Wärmepumpen und die Kältebereitstellung mit elektrisch betriebenen Kompressionskältemaschinen. Die bei entsprechend hohen Außentemperaturen erforderlichen hohen Luftmengen, die mit entsprechend hohen Geschwindigkeiten eingebracht werden mussten, führten zu Zugerscheinungen und unbehaglichem Raumklima.

Aufgrund der ursprünglichen Funktion des unterhalb der Ausstellungshallen befindlichen Wasserreservoirs zur Sicherstellung der Wasserversorgung der Stadt Darmstadt läuft eine große Anschlussleitung des Trinkwassernetzes unmittelbar am Gebäude vorbei. Dieser Trinkwasserleitung wurde im Winter mittels eines Wärmetauschers und einer Wärmepumpe Wärme zur Beheizung der Ausstellungshallen entzogen. Während der Sommer-

monate wurde über diesen Wärmetauscher ebenfalls die vorhandene Kompressionskältemaschine gekühlt. Diese effiziente Möglichkeit der Wärme- und Kälteerzeugung mittels der kommunalen Infrastruktur ist aufgrund der aktuellen Trinkwasserhygienevorschriften nicht mehr zulässig und daher auch nicht mehr genehmigungsfähig, weshalb ein komplett neues System zur Wärme- und Kälteerzeugung gefunden werden muss.

4 Bauliche Veränderungen

Im Zuge der Sanierung werden auch bauliche Veränderungen vorgenommen. So wird das bisherige Café, das sich auf der Empore über dem Foyer der Eingangshalle befindet, teilweise in den Bereich der Ausstellungshalle 1 ragt und nicht barrierefrei zu erreichen ist, rückgebaut und auf die Westseite in etwa auf das Niveau des Außengeländes verlegt. In diesem Bereich vor bzw. unterhalb der Ausstellungshalle 4 befanden sich bisher die Schieberkammer des Wasserspeichers sowie Technikräume und Büros. Die geplanten Caféräume können künftig über einen vom Museum unabhängigen, separaten Zugang barrierefrei erreicht werden. Der Zugang zur Besichtigung des Wasserspeichers ist dann ebenfalls vom Café aus möglich.

Wie aus Bild 3-3 zu erkennen ist, war die komplette Ostseite ursprünglich mit Fenstern ausgestattet. Diese wurden jedoch in den 1970er Jahren zugemauert und werden jetzt wieder freigelegt. Halle 2 erhält jetzt großformatige, festverglaste Holzfenster in der ursprünglichen Fensterlage mit geputzten Laibungen. Auf eine Rekonstruktion der Fenster nach bauzeitlichem Vorbild wurde in Abstimmung mit dem Advisory Board, einem Gremium aus internationalen Denkmalexperten, welches die Stadt Darmstadt in allen Fragen der Welterbebewerbung berät, ausdrücklich verzichtet. Nach der Sanierung verfügt so nun auch Halle 2 wieder über Tageslicht.

Das Sheddach von Halle 4, das 1976 neu errichtet wurde, ist inzwischen so sanierungsbedürftig, dass es bis auf die Tagkonstruktion abgetragen und komplett erneuert werden muss. Die Belichtung dieser Halle erfolgt weiterhin von oben und von der Westseite.

5 Energiekonzept

Von Anfang an stand fest, dass die gesamte Anlagentechnik (Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung, Sanitär) komplett zurückgebaut und neu errichtet werden muss. Die von den in Tabelle 2-1 aufgeführten Projektpartnern jeweils entwickelten Energiekonzeptvarianten wurden in zahlreichen Projektsitzungen den Vertretern der Eigenbetriebe Kulturinstitute und Immobilienmanagement (Fachbereich Projektsteuerung und Fachbereich Anlagentechnik) sowie Vertretern des Instituts Mathildenhöhe und Vertretern des Denkmalschutzes fortlaufend vorgestellt und mit diesen abgestimmt. Zur Steigerung der Energieeffizienz eines Gebäudes sind sowohl bauliche als auch anlagentechnische Maßnahmen notwendig. Sehr wesentlich bei diesem Projekt ist die Abwägung der Einzelmaßnahmen und ihr Zusammenspiel untereinander.

5.1 Bauliche Sanierungsmaßnahmen

5.1.1 Außenwände

Bei denkmalgeschützten Gebäuden ist der Einsatz von Wärmedämmsystemen auf der Außenseite der Außenwände in den allermeisten Fällen nicht zulässig. Diese naheliegende und wirkungsvolle Methode einer energetischen Ertüchtigung war auch im Fall der Mathildenhöhe sowohl von der Denkmalschutzbehörde als auch den Architekten aufgrund der Außenwirkung zunächst abgelehnt worden.

Aufgrund der Feuchteproblematik und der Tatsache, dass der Bestandsaußenputz aufgrund von Schadhaftigkeit sowieso erneuert werden muss und sich herausstellte, dass es sich nicht um den Originalputz zum Zeitpunkt der Bauerstellung (1908) handelt, wurde die Verwendung eines Dämmputzes in Betracht gezogen. Konventionelle Dämmputze mit dem Zuschlagsstoff Polystyrol oder geblättem Perlit erreichen allerdings nur Wärmeleitfähigkeiten von 0,06 - 0,07 W/mK und könnten somit aufgrund der Anforderungen des Denkmalschutzes nicht in ausreichender Schichtdicke aufgebracht werden, um eine effektive energetische Sanierung der Ausstellungshallen zu gewährleisten. Außerdem sind sie in ihrer Zusammensetzung (Polystyrol) kritisch zu bewerten. Im Rahmen ausführlicher Materialrecherchen stellte sich Aerogel-Dämmputz als interessante Maßnahme heraus, da er mit 0,028 W/mK eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist und auch einen niedrigen Dampfdiffusionswert μ hat. Bei Aerogel handelt sich um einen hochporösen Festkörper, der zu über 99 % aus Poren besteht. Gemäß Produktdatenblatt [3] weist der Putz die in Tabelle 5-1 angegebenen Eigenschaften auf.

Tabelle 5-1 Zusammenstellung der Materialbasis und der Eigenschaften des Aerogel-Dämmputzes [2].

Materialbasis	Eigenschaften
Natürlicher hydraulischer Kalk	Höchst wärmedämmend
Luftkalk	Hohe Ergiebigkeit
Weißzement (chromatfrei)	Hervorragende Verarbeitung
Aerogelgranulat	Ausgezeichnete Hand- und Maschinenverarbeitungseigenschaften
Leichtzuschlag (mineralisch)	Hohe Schichtdicken möglich
Organische Anteile < 5 %	Natürlicher mineralischer Systemaufbau
Zusätze zur Verbesserung der Verarbeitung	Im Denkmal empfehlenswert
Mineralisch	Sehr hohe Diffusionsoffenheit

Durch die Aufbringung eines nur 3 cm dicken Aerogel-Dämmputzes kann der U-Wert der Außenwand von $1,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf $0,52 \text{ W/m}^2\text{K}$ verbessert werden. Durch die Profilierung der Fassade wird der Putz nicht überall eine Dicke von 3 cm aufweisen können. Im Mittel kann jedoch von 3 cm Putzdicke ausgegangen werden.

Der bestehende Putz der gesamten Fassade wird bis auf das Mauerwerk entfernt. Danach wird ein dünner Spritzputz (Kalkbasis) aufgetragen, auf dem dann der Aerogel-Wärmedämmputz maschinell aufgebracht wird. Zur Oberflächenstabilisierung dient ein Tiefengrund auf Silikatbasis. Nach der Durchtrocknung der Oberfläche erfolgt die Aufspachtelung einer Armierschicht. Der Mörtel, in dem die Armierschicht eingelegt ist, ist auch für die Überarbeitung von Altputzen in der Denkmalpflege geeignet - Weißkalk ist die Materialbasis. Der Oberputz basiert ebenfalls auf Weißkalkhydrat. Die Oberputzfläche erhält abschließend einen lichtbeständigen, einkomponentigen Kieselsol-Silikatanstrich. Der Putzaufbau ist in Bild 5-1 dargestellt.

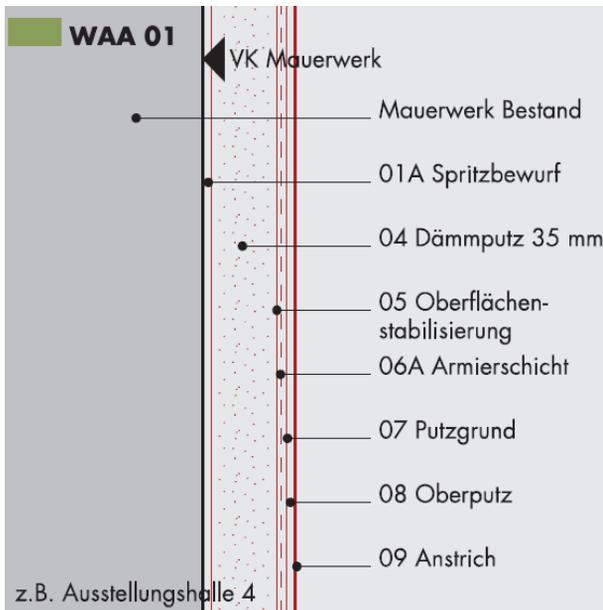


Bild 5-1 Beispielhafter Aufbau des Aerogel-Wärmedämmputzes (Quelle: schneider + schumacher).

5.1.2 Dachverglasung

Für die Dachverglasung wurde eine Vielzahl an Varianten untersucht. Am Ende des Entscheidungsprozesses wählte das Planungsteam für das lichtstreuende Isolierglas OKALUX+ als Dachverglasung für die Halle 1 und Halle 3 ($U_g = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,32$). Es handelt sich hierbei um eine Zweifachverglasung mit einer zwischenliegenden licht-

streuenden Kapillarglasplatte. Die Kapillarglasplatte ist auf beiden Seiten mit einem Glasvlies abgedeckt, das eine gleichmäßige Lichtabgabe an den Raum ermöglicht und über das auch die Lichttransmission reguliert werden kann. Zwischen dem Glasvlies auf der Innenseite und der Kapillarglasplatte befindet sich eine UV-Filterfolie (»Museumsfolie« NRS90), die Wellenlängen unterhalb 390 nm ausfiltert. Die äußere Scheibe ist auf der Innenseite low- ϵ -beschichtet. Da das Stahlträgersystem, welches das Dachtragwerk der Hallen bildet, noch nach Originalentwurf von Josef Maria Olbrich erhalten ist, aus denkmalpflegerischen Gründen möglichst unangetastet bleiben sollte, war es hier sehr wichtig, Konstruktionsgewicht einzusparen und somit auf eine energetisch sehr leistungsfähige Zweifachverglasung zurückgreifen zu können.

Die senkrechten Scheiben der Sheddachverglasung der Halle 4 sind dreifachverglast und ebenfalls mit einer Kapillarglasplatte ausgestattet ($U_g = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,34$). Im Gegensatz zur Dachverglasung ist die äußere Scheibe hier als Zweischeibenwärmeschutzverglasung ausgeführt.

5.1.3 Lichtdecke

Die Lichtdecke soll eine gleichmäßige Ausleuchtung der Ausstellungshallen entweder durch Tageslicht oder gegebenenfalls durch die Zuschaltung oder durch alleinigen Betrieb mit Kunstlicht ermöglichen. Da der Dachraum zwischen Lichtdecke und Dachverglasung und somit außerhalb des klimatisierten Bereiches liegt, stellt die hier gewählte Zweifachverglasung gegenüber einer Einfachverglasung die energetisch bessere Lösung dar. Um jedoch Tauwasserausfall im Dachraum zu vermeiden, der durch das Einströmen von warmer, feuchter Luft über die luftdurchlässige Lichtdecke entstehen könnte, wird zur leichten Erhöhung der Dachraumtemperatur mittels Lüftungsanlage warme Zuluft in den Dachraum eingeblasen. Der U_g -Wert und der g -Wert der Lichtdecke liegen bei $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $0,64$.

5.1.4 Hallenboden

Die anfängliche Planung sah vor, den Stirnholzparkettboden zu belassen. Es stellte sich jedoch heraus, dass ein in den 1970er Jahren verwendeter Kleber den Boden mit Schadstoffen durchsetzt hatte. Dies führte zu der Entscheidung, den gesamten Parkettboden auszutauschen. Aufgrund der niedrigen Bodenaufbauhöhe kann keine Dämmung unter dem Parkett eingebracht werden.

5.1.5 Unterdecken und Dach

Die Unterdecken, die die Räume nach oben zum Dachraum abschließen, erhalten auf der Oberseite eine 16 cm dicke Dämmung aus Mineralwolle. Der resultierende U-Wert der Decke liegt nach der Sanierung bei $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$. Einige Unterdecken werden thermisch

aktiviert. Das Dach, das bisher ohne Dämmung ausgeführt war, erhält unterhalb der Holzschalung eine 24 cm dicke Mineralwollendämmung, dadurch wird ein U-Wert von $0,15 \text{ W/m}^2\text{a}$ erzielt.

5.2 Anlagentechnische Sanierungsmaßnahmen

Nach den Dämmmaßnahmen an der Hüllfläche folgt im zweiten Schritt die Erneuerung der Anlagentechnik. Sie wurde sowohl für die Wärmeversorgung als auch für die Kälteversorgung des Gebäudes unter Einsatz von regenerativen Komponenten gestaltet. Eine öl- oder gasbefeuerte Wärmeversorgungsanlage kommt für die Ausstellungshallen nicht in Frage, da aus Gründen des Denkmalschutzes kein Schornstein zugelassen ist.

5.2.1 Wärme- und Kälteerzeugung

Die für die Beheizung der Ausstellungshallen und Konditionierung der Luft benötigte Wärme wird anhand von drei verschiedenen Wärmeerzeugern bereitgestellt. Ein Erdgas-BHKW deckt die Grundlast der benötigten Heizleistung und ist aufgrund der erwähnten Schornsteinproblematik im benachbarten Gebäude des Museums Künstlerkolonie untergebracht, wo bauzeitliche Kaminzüge genutzt werden können. Der dort produzierte Strom kann für den Betrieb der Lüftungsanlage und für die Beleuchtung herangezogen werden. Als weiterer grundlastfähiger Wärmeerzeuger befinden sich im Ausstellungsgebäude Sole-Wasser-Wärmepumpen, welche auf eine Kammer des historischen Wasserspeichers (2.400 m^3 Speichervolumen) als Wärmequelle zurückgreifen. Die Einbeziehung des Wasserspeichers in das Energiekonzept geht auf eine Idee von Markus Müller (Büro Schlier und Partner) zurück. Da das Volumen einer der beiden Kammern groß genug ist, um als Speicher nutzbar gemacht zu werden, konnte auch die Denkmalpflege dem Konzept zustimmen: die zweite Kammer bleibt ungenutzt und ist so weiterhin als Industriedenkmal für Besichtigungen zugänglich. Hier zeigt sich besonders deutlich, wie jede einzelne Maßnahme in der Abwägung unterschiedlicher Interessen durch die Kompromissbereitschaft aller beteiligten Experten und Institutionen sinnvoll für das Gebäude nutzbar gemacht werden konnte.

Um den Wasserspeicher im Winter als Wärmequelle für die Wärmepumpen zu regenerieren, wird die sommerliche Abwärme der Kompressionskältemaschine dem Speicher zugeführt. Dadurch kann auf einen Rückkühler verzichtet werden. Ferner werden 8 Erdwärmesonden betrieben; zum einen, um aus Gebäudeschutzgründen sicherzustellen, dass der Speicher nicht unterhalb von $5 \text{ }^\circ\text{C}$ abkühlt und zum anderen, um die Quelltemperatur für die Wärmepumpe auf möglichst hohem Niveau zu halten.

Die gespeicherte „Kälte“ ermöglicht eine niedrige Rückkühltemperatur für den Rückkühlkreis der Kompressionskältemaschine, was sich positiv auf deren Leistungszahl und Energieeffizienz auswirkt. Ursprüngliche Planungen sahen auch die Möglichkeit der

Rückkühlung des Wasserspeichers über ein Rückkühlwerk vor. Allerdings konnte aufgrund der Denkmalschutzanforderungen und der damit verbundenen Erhaltung des Gesamterscheinungsbildes kein geeigneter Aufstellort gefunden werden, weshalb hier auf die Erdwärmesonden als Rückkühlmöglichkeit zurückgegriffen wird, was insgesamt auch die deutlich nachhaltigere Variante darstellt.

Auftretende Heizlastspitzen werden durch Gasbrennwertkessel abgedeckt, welche ebenfalls im benachbarten Ernst-Ludwig-Haus untergebracht sind. Das BHKW kann ganzjährig in Betrieb genommen werden. Wenn seine Wärme nicht für Heizzwecke genutzt werden kann, kann sie an das Wasserreservoir oder an die zusätzlich vorhandenen Erdwärmesonden abgegeben werden.

5.2.2 Lüftung

Jede der fünf Hallen sowie Küche, Werkstatt, Magazin und Café erhalten eine separate Lüftungsanlage. Diese dezentrale Anordnung der Anlagentechnik ergibt sich aus dem jeweils vorhandenen Raumangebot innerhalb des denkmalgeschützten Gebäudes. Bis auf die Anlagen der Küche und der Dachräume sind alle Anlagen mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet. Überwiegend werden sie über ein Kreislaufverbundsystem (KVS) realisiert. Die den Hallen und dem Magazin zugeführte Luft kann erwärmt, gekühlt, befeuchtet und entfeuchtet werden, denn in diesen Räumen befinden sich die Ausstellungsexponate. Die Zuluft der Werkstatt wird, wenn erforderlich, nur erwärmt. Die Zuluft der übrigen Räume kann gekühlt und erwärmt werden.

Eine planerische Herausforderung stellte die Unterbringung der Lüftungsanlagen dar. Die beabsichtigte Wahl eines Kaltdampfbefeuchters konnte nicht umgesetzt werden, da die benötigten Verdunstungsstrecken nicht vorhanden sind. Deshalb musste auf die primär energetisch weniger effiziente Befeuchtung über elektrisch betriebene Heißdampfbefeuchter zurückgegriffen werden, mit deren Betrieb auch schon früher Erfahrungen auf der Mathildenhöhe gesammelt wurden.

5.2.3 Statische Heiz- und Kühlsysteme

Um die erforderlichen bewegten Luftmengen für die Beheizung der Ausstellungshallen und damit die nötige Antriebsenergie der Ventilatoren zu reduzieren, wurden für die verschiedenen Hallen individuelle Lösungen zur Maximierung der thermisch aktivierbaren Wand- und Deckenflächen geplant. Dabei wurde berücksichtigt, dass aufgrund der Flexibilität der Wandflächen und der konservatorischen und sicherheitstechnischen Anforderungen eine Aktivierung im üblichen Hängebereich von Bildkunst nicht möglich ist.

Von einer Aktivierung des Fußbodens wurde abgesehen, da dies nicht mit dem zu erhaltenden Vollholz-Bodenbelag in Einklang zu bringen ist. Dadurch war es notwendig, ak-