

IBP-Bericht WB 199/2017

Konzeption einer beispielhaften energetischen Sanierung der Ausstellungshallen des Museums Mathildenhöhe in Darmstadt

gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) – Az. 32110-25

Johann Reiß
Micha Illner
Hans Erhorn
Ralf Kilian
Lars Klemm

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht WB 199/2017

Konzeption einer beispielhaften energetischen Sanierung der Ausstellungshallen des Museums Mathildenhöhe in Darmstadt

gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
(DBU) – Az. 32110-25

Der Bericht umfasst
74 Seiten Text
11 Tabellen
47 Abbildungen
1 Anhang

Johann Reiß
Micha Illner
Hans Erhorn
Ralf Kilian
Lars Klemm

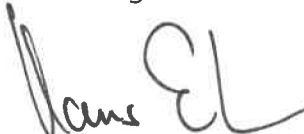
Stuttgart, 22. Juli 2017

Institutsleiter



Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Philip Leistner

Abteilungsleiter



Dipl.-Ing. Hans Erhorn

Bearbeiter



Dipl.-Ing. Johann Reiß

06/02

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32110/-25	Referat	Fördersumme	122.370 €
Antragstitel		Konzeption einer beispielhaften energetischen Sanierung der Ausstellungshallen des Museums Mathildenhöhe Darmstadt		
Stichworte		Energetische Sanierung, Bestandsgebäude, Museum, Denkmal, Weltkulturerbe, Aerogel-Wärmedämmputz, Energiebedarf, Energiespeicher, thermisch aktivierte Flächen, BHKW, Wärmepumpen.		
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
3 Jahre	5. Mai 2014	5. November 2016	eine	
Abschlussbericht				
Bewilligungsempfänger	Wissenschaftsstadt Darmstadt Eigenbetrieb der Kulturinstitute Frankfurter Straße 71 64293 Darmstadt		Tel:	06151-133929
			Fax	06151-133398
			Projektleitung Prof. Dr. Hünnekens	
			Bearbeiter Johann Reiß, Micha Illner, Hans Erhorn, Ralf Killian, Lars Klemm	
Kooperationspartner	Fraunhofer-Institut für Bauphysik Schneider + Schumacher, Planungsgesellschaft mbH, Frankfurt Ingplan, Ingenieurplanung der Technischen Gebäudeausrüstung, Marburg Ingenieurbüro Schlier und Partner, Darmstadt Tichelmann & Barillas, Ingenieurgesellschaft mbH, Darmstadt			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens				
Die Mathildenhöhe in Darmstadt ist ein architektonisches und städtebauliches Gesamtensemble, zu welchem u.a. die Ausstellungshallen als historisches und unter Denkmalschutz stehendes Gebäude des Jugendstils gehören. Ziel ist es, eine den Bauvorschriften entsprechende Musterlösung für die energetische Sanierung von Museen am Beispiel der Ausstellungshallen Mathildenhöhe zu erarbeiten. Dabei stehen 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. Neben der Umsetzung der konkreten Maßnahmen soll aufgezeigt werden, welche Lösungen durch eine interdisziplinäre und integrale Planung erarbeitet werden. Da der Gebäudekomplex unter Denkmalschutz steht, ergibt sich hier zudem die Chance modellhafte Lösungen für die besondere Herausforderung des Denkmalschutzes – Sanierungsansätze und -konzepte zu entwi-				

ckeln, welche die vorhandene Substanz erhalten und gleichzeitig eine schonende zeitgemäße Museumsnutzung und Betriebsführung erlauben – aufzuzeigen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Ziel wurde in folgenden Schritten erreicht:

- Detaillierte Bestandaufnahme des Gebäudes und der Anlagentechnik
- Energetische Bewertung des Ist-Zustandes
- Erarbeitung von baulichen und anlagentechnischen Konzepten, die alle vorliegenden Randbedingungen hinsichtlich Denkmalschutz und konservatorischen Anforderungen berücksichtigen
- Detaillierte Überprüfung der Umsetzbarkeit des Aerogel-Wärmedämmputzes an den Außenwänden
- Abstimmungen und Diskussionen über die entwickelten Energie- und Sanierungskonzepte im Rahmen der integralen Planung

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

Aufgrund der integralen Planung ist es dem Projektteam gelungen, ein Sanierungskonzept aufzustellen, das zu einer Endenergieeinsparung von 61 % und zu einer Primärenergieeinsparung von 65 % führt und dabei sowohl die Belange des Denkmalschutzes erfüllt als auch den konservatorischen Anforderungen eines Museums gerecht wird.

Bei der Entwicklung des Energiekonzepts waren – hauptsächlich aus Gründen des Denkmalschutzes – viele Randbedingungen vorhanden, die zu berücksichtigen waren. Die bisherige Nutzung der Trinkwasserleitung als Wärmequelle und Wärmesenke darf nicht mehr verwendet werden. Weiterhin ist die Errichtung eines Schornsteins nicht erlaubt. Ferner darf kein Rückkühler außerhalb des Bauwerks aufgestellt werden. Für die Aufstellung der Lüftungsanlagen ist extrem wenig Platz vorhanden. An den Außenwänden darf kein Wärmedämmverbundsystem aufgebracht werden. Eine Innendämmung wird vom Bauherrn nicht akzeptiert. Der Boden kann aufgrund der Aufbauhöhe keine Dämmung erhalten.

Durch folgende Maßnahmen wurde das Ziel erreicht:

- Dämmung der Außenwände mit einem mineralischen 3 cm dicken Aerogel-Wärmedämmputz, der eine Wärmeleitfähigkeit von 0,028 W/mK aufweist
- Ersatz der einfachverglasten Dachverglasung durch eine Zweischeibenverglasung mit Kapillarglasplatte im Scheibenzwischenraum
- Ersatz der einfachverglasten Deckenverglasung durch eine Zweischeibenisolierverglasung
- Reduzierung des U-Wertes der Unterdecken und des Daches
- Nutzung des ehemaligen Wasserreservoirs als Energiespeicher
- Energiespeicher als Kältesenke für die Kältemaschinen im Sommer
- Energiespeicher als Wärmequelle für die Wärmepumpen im Winter
- Nutzung eines Blockheizkraftwerks für die Bereitstellung der Grundlast
- Abdeckung der Spitzenlast mit Gasbrennwert-Kessel
- Thermische Aktivierung einiger Wand- und Deckenflächen
- Ersatz der bisherigen Beleuchtung durch LED-Beleuchtung

Die Anlagentechnik ist so geplant worden, dass die geforderten Klimabedingungen ganzjährig eingehalten werden können. Aus energetischer Sicht ist es jedoch ratsam, auch größere Schwankungen zuzulassen. In den Hallen mit Oberlicht kann mit Verdunklungsanlagen, die sich zwischen Glasdecke und Glasdach befinden, die für Ausstellungsobjekte ideale Beleuchtungsstärke eingestellt werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt wurde bisher auf folgenden Veranstaltungen vorgestellt:

- Lars Klemm, Ralf Kilian, Johann Reiß and Micha Illner: Sustainable refurbishment of museum buildings – Energy efficiency, preservation of monuments and sophisticated solutions for museums – Exemplary presentation of Mathildenhöhe, Darmstadt (Germany). Choosing the Green Way Sustainable Strategies in Cultural Heritage; Berlin, 2015.
- Ralf Kilian und Kristina Holl: Vorträge bei „Das grüne Museum“ am 08.10.2015 in Frankfurt, am 14.10.2015 in Berlin und am 28.10.2015 in Wien: „Sicheres Klima – Hintergründe zur aktuellen Klimadebatte und neue Klimakonzepte“

Fazit

Im Rahmen des Vorhabens 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 Energiebedarf 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 Museen 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.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ <http://www.dbu.de>

Inhalt

Projektkennblatt	2
Verzeichnis der Bilder	7
Verzeichnis der Tabellen	10
1 Zusammenfassung	11
2 Hintergrund	13
3 Ziele	15
4 Bestandsaufnahme	17
4.1 Gebäude	17
4.2 Anlagentechnik	23
5 Weltkulturerbe-Bewerbung	25
6 Denkmalschutz	25
7 Bauliche Veränderungen	29
8 Energiekonzept	31
8.1 Bauliche Sanierungsmaßnahmen	31
8.1.1 Außenwände	31
8.1.2 Dachverglasung	37
8.1.3 Lichtdecke	39
8.1.4 Hallenboden	41
8.1.5 Unterdecken und Dach	41
8.2 Anlagentechnische Sanierungsmaßnahmen	43

8.2.1	Wärme- und Kälteerzeugung	43
8.2.2	Lüftung	49
8.2.3	Statische Heiz- und Kühlsysteme	53
8.2.4	Wärme- und Kälteerzeuger	56
8.2.5	Wasserspeicher als Energiespeicher	57
8.2.6	Beleuchtung	58
9	Energetische Bewertung	59
9.1	Zustand vor Sanierung	60
9.2	Zustand nach der Sanierung	61
9.3	Energetischer Einfluss der Aerogel-Dämmung	64
9.4	Gegenüberstellung von Bedarfskennwerten und Anforderungen nach EnEV 2014	66
10	Konservatorische Anforderungen	67
10.1	Klimatische Anforderungen	67
10.2	Internationale Anforderungen an das Raumklima in Museen	68
10.3	Lichtschutz	69
10.4	Anforderungen Sicherheitskonzeption	70
11	Vorbereitung des Monitorings	71
12	Fazit	72
13	Literaturverzeichnis	73
	Anhang A	75

Verzeichnis der Bilder

Bild 1	Erdgeschossgrundriss der Eingangshalle und der vier Ausstellungshallen. Die Pläne tragen das Datum von 1976 [Quelle: [2]].	17
Bild 2	Längsschnitt durch die Ausstellungshallen mit dem darunterliegenden Wasserreservoir [Quelle: [2]].	18
Bild 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] .	19
Bild 4	Ansicht der Westseite gemäß den Plänen von 1976 [Quelle: [2]].	19
Bild 5	Darstellung des Schnittes durch die Ausstellungshalle 3 mit Angabe der U-Werte der Hüllflächenbauteile [Quelle: Schneider + Schumacher].	23
Bild 6	Photographische Aufnahme der veralteten Klimaanlage [Quelle: IBP].	24
Bild 7	Photographische Ansicht der Westseite vor der Sanierung [Quelle: Schneider + Schumacher].	26
Bild 8	Photographische Ansicht des freigelegten, konkaven Original-Putzes von 1908 mit Mulden [Quelle: IBP] .	27
Bild 9	Photographische Ansicht des bauzeitlichen Putzes [Quelle: [3]].	28
Bild 10	Photographische Ansicht einer partiell freigelegten Wandfläche. Es ist die ursprüngliche Lisene hinter der freigelegten Vormauerung zu erkennen [Quelle: [3]].	29
Bild 11	Photographische Aufnahme der Kunsthallen Mathildenhöhe vor der Sanierung [Quelle: Nikolaus Heiss] .	30
Bild 12	Photographische Darstellung der mit Aerogel-Dämmputz applizierten Musterfassade [Quelle: IBP].	34
Bild 13	Darstellung eines Wandausschnitts – einmal mit und einmal ohne Putz [Quelle: IBP].	35
Bild 14	Aufbau des Aerogel-Wärmedämmputzes [Quelle: Schneider + Schumacher].	36
Bild 15	Schematische Darstellung der lichtstreuenden Dachverglasung mit einer Kapillarplatte zwischen den Glasscheiben [Quelle: OKALUX].	38

Bild 16	Lichtdecke im Bestand ohne speziellen UV-Filter [Quelle: IBP].	40
Bild 17	Blick in das Wasserreservoir, welches als Pufferspeicher genutzt werden soll. [Quelle: Nikolaus Heiss].	44
Bild 18	Schematische Darstellung der Beheizung der Ausstellungshallen [Quelle: Tichelmann & Barillas].	45
Bild 19	Schematische Darstellung der Kühlung der Ausstellungshallen [Quelle: Tichelmann & Barillas].	46
Bild 20	Zu erwartende Fluidtemperaturen des Erdwärmesondenfeldes nach 25 Jahren Betrieb [Quelle: [7]].	47
Bild 21	Grafische Darstellung der Ergebnisse aus der Gebäude- und Anlagensimulation. [Quelle: Tichelmann & Barillas].	49
Bild 22	Darstellung der thermisch aktivierten Flächen (rot) und der mit Akustikputz versehenen Flächen (blau) in Halle 1 [Quelle: Schneider + Schumacher].	54
Bild 23	Kapillarrohrmatten zur Herstellung von Wand- und Deckenheizungen. Quelle: beka-klima.de [Quelle: Clina].	55
Bild 24	Querschnitt von Halle 3 mit Angabe der thermisch aktivierten Wandflächen sowie Darstellung der Zu- und Abluftführung in der Halle [Quelle: Schneider + Schumacher].	56
Bild 25	Zonierung des Erdgeschosses der Mathildenhöhe für die Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599 [Quelle: IBP].	60
Bild 26	Endenergiebedarf der Mathildenhöhe im Zustand vor der Sanierung [Quelle: IBP].	61
Bild 27	Endenergiebedarf der Mathildenhöhe im Zustand nach der Sanierung [Quelle: IBP].	62
Bild 28	Gegenüberstellung des nach DIN V 18599 berechneten Endenergiebedarfs vor und nach der Sanierung [Quelle: IBP].	63
Bild 29	Vergleich des nach DIN V 18599 berechneten Primärenergiebedarfs vor und nach der Sanierung [Quelle: IBP].	64
Bild 30	Darstellung des Einflusses des Aerogel-Wärmedämmputzes auf den Heizwärme-Endenergiebedarf des Gebäudes [Quelle: IBP].	66

- Bild A 1.1 Grundriss Erdgeschoss [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.2 Grundriss 2. Untergeschoss [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.3 Grundriss 3. Untergeschoss [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.4 Schnitt a-a [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.5 Schnitt b-b [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.6 Schnitt c-c [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.7 Schnitt d-d [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.8 Ansicht West [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.9 Ansicht Nord [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.10 Ansicht Ost [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.11 Ansicht Süd [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.12 Darstellung unterschiedlicher Putzflächen an der Westfassade [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.13 Schematische Darstellung der Wärme- und Kälteversorgung mit Angabe der Monitoring-Messstellen [Quelle: IBP].
- Bild A 1.14 Darstellung der thermisch aktivierten Wand- und Deckenflächen in Halle 2 [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.15 Darstellung der thermisch aktivierten Wand- und Deckenflächen in Halle 3 [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.16 Darstellung der thermisch aktivierten Wand- und Deckenflächen in Halle 4 [Quelle: Schneider + Schumacher].
- Bild A 1.17 Darstellung des Gebäudelängsschnittes mit Angabe der thermisch aktivierten Wand- und Deckenflächen in Halle 3 [Quelle: Schneider + Schumacher].

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	Zusammenstellung der an der integralen Planung beteiligten Partner.	17
Tabelle 2	Zusammenstellung der Bauteilaufbauten und der U-Werte des Gebäudes vor der Sanierung.	21
Tabelle 3	Zusammenstellung der Materialbasis und der Eigenschaften des Aerogel-Dämmputzes [5].	33
Tabelle 4	Zusammenstellung der Glas- und Rahmenkennwerte der Dachverglasungen der Hallen 1 und 3 und der Sheddachverglasung der Halle 4.	39
Tabelle 5	Glaskennwerte der Lichtdecke.	41
Tabelle 6	Zusammenstellung der Bauteilaufbauten (innen nach außen) und der U-Werte des Gebäudes für den Zustand nach der Sanierung.	42
Tabelle 7	Zusammenstellung der Raumvolumen sowie Angabe der Außenluft-, Fortluft- und Umluftvolumenströme.	50
Tabelle 8	Zusammenstellung der Aufstellungsorte der Lüftungsanlagen sowie Angabe der Wärmerückgewinnungstechnik.	51
Tabelle 9	Zusammenstellung der nach DIN V 18599 berechneten Endenergie- und Primärenergiebedarfskennwerte vor und nach der Sanierung sowie Angabe der prozentualen Einsparungen.	63
Tabelle 10	Zusammenstellung des End- und Primärenergiebedarfs für den Fall mit Aerogel-Wärmedämmputz, so wie geplant, und ohne Aerogel-Wärmedämmputz. Ferner Angabe des End- und Primärenergiebedarfs des Referenzgebäudes nach EnEV 2014 [11].	65
Tabelle 11	Zusammenstellung der nach DIN V 18599 berechneten Endenergiebilanzanteile für den Fall mit Aerogel-Wärmedämmputz und ohne Aerogel-Wärmedämmputz.	65

1 Zusammenfassung

Die Mathildenhöhe in Darmstadt ist ein Gesamtensemble, zu welchem unter anderem die Ausstellungshallen als historisches und unter Denkmalschutz stehendes Gebäude des Jugendstils gehören. In den Ausstellungshallen werden wechselnde Ausstellungen bedeutender Gegenwartskunst gezeigt. Die Mathildenhöhe mit der Künstlerkolonie in Darmstadt zählt zu den weltweit bedeutendsten Jugendstilensembles. Sie soll daher nach dem Wunsch der deutschen Kultusministerkonferenz UNESCO-Weltkulturerbe werden. Die Stadt Darmstadt bewirbt sich derzeit um die Aufnahme in die offizielle Bewerberliste Deutschlands, die im Frühjahr 2019 bei der UNESCO eingereicht wird. Die Ausstellungshallen sind 1908 fertiggestellt worden. Die Planung erfolgte durch Joseph Maria Olbrich. Seit der Zeit bis heute sind an dem Gebäude immer wieder Änderungen vorgenommen worden. Die im Krieg zerstörten Dächer mussten wieder aufgebaut werden. Ein größerer baulicher Eingriff fand in den 1970er Jahren statt. Zur energetischen Verbesserung sind bisher jedoch keine Maßnahmen erfolgt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war, im Rahmen der Sanierung der Mathildenhöhe Darmstadt eine den Bauvorschriften entsprechende Musterlösung für die energetische Verbesserung von denkmalgeschützten Museen zu erarbeiten. Dies erfolgte in einem Projektteam, das sich aus den Architekten, Anlagenplanern, Bauphysikern und dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik zusammensetzt.

Im Rahmen der anstehenden Sanierung sind auch einige bauliche Änderungen vorgesehen. So werden beispielsweise auf der Ostseite des Gebäudes Fenster freigelegt, die es bereits früher gab, die aber zwischenzeitlich verschlossen wurden. Ferner wird das Café in einen Bereich verlegt, der barrierefrei zugänglich ist. Die Außenwände bestehen aus Ziegelmauerwerk und weisen einen U-Wert von $1,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf. Die Hallendächer waren bisher einfachverglast. Die Anlagentechnik war dermaßen veraltet, dass die geforderten Klimabedingungen der Leihgeber nicht mehr eingehalten werden konnten. Eine Erneuerung der Anlagentechnik war zwingend notwendig geworden. Dieser Zeitpunkt wurde von der Bauherrschaft genutzt, um das gesamte Gebäude energetisch zu verbessern, gemäß dem Grundsatz: Verluste minimieren, benötigte Energie für die Beheizung, Lüftung, Kühlung und Beleuchtung durch innovative Anlagen effizient bereitstellen und für die Restenergie möglichst regenerative Energieträger verwenden.

Da aus Gründen des Denkmalschutzes keine Außendämmung möglich und eine Innendämmung von der Bauherrschaft nicht erwünscht ist und ferner der bestehende Außenputz nicht erhalten werden muss, da es sich um keinen Originalputz handelt, wird ein innovativer mineralischer Aerogel-Wärmedämmputz mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,028 \text{ W/mK}$ in einer Dicke von ca. 3 cm auf-

gebracht. Die Außenansicht des Gebäudes bleibt auf diese Weise erhalten. Durch diese Maßnahme kann der bisherige U-Wert der Außenwand mehr als halbiert werden. Neben der Verringerung der Transmissionswärmeverluste wirkt sich die Dämmung positiv auf die inneren Wandoberflächentemperaturen aus. Ferner werden die übrigen Hüllflächenbauteile wie Unterdecken und Dach ebenfalls gedämmt. Die bisher einfachverglasten Glasdächer erhalten künftig eine Zweifachverglasung mit integrierter, lichtstreuender Kapillarglasplatte mit eingelegter »Museumsfolie«, die für Strahlungen unter 390 nm Wellenlänge als UV-Filter wirkt. Auch die Glasdecken werden zweifachverglast ausgeführt. Die bisherige Wärmeversorgung erfolgte durch Wärmepumpen und Kälteanlagen. Dabei diente die öffentliche Trinkwasserversorgung den Wärmepumpen als Wärmequelle in der Heizperiode und den Kältemaschinen als Wärmesenke in der Kühlperiode. Ein Rückkühlwerk war daher bisher nicht vorhanden. Diese Art, die öffentliche Trinkwarmwasserleitung als Wärmequelle und Wärmesenke zu nutzen, ist künftig nicht mehr erlaubt. Ferner ist es aus Gründen des Denkmalschutzes künftig nicht erlaubt, außerhalb des Bauwerks einen Rückkühler aufzustellen. Diese Umstände führten dazu, eine Hälfte (2.400 m³) des unter dem Gebäude befindlichen Wasserreservoirs als Energiespeicher zu nutzen und zwar im Winter als Wärmequelle für die Wärmepumpen und im Sommer als Energiesenke für die Kühlmaschinen. Da die Speichergröße nicht ganz ausreicht, werden noch sieben Erdsonden zur Kapazitätserweiterung eingebracht. Auf diese Weise kann die im Sommer anfallende Wärme im Winter für Heizzwecke genutzt werden. Indem ein Teil der Decken und Wände thermisch aktiviert wird, muss nicht die gesamte Heiz- und Kühlenergie über die Luft den Räumen zugeführt werden. Dadurch wird Transportenergie eingespart, da der Wärmetransport mittels Wasser effizienter ist als mittels Luft. Darüber hinaus führt dies zu geringeren Luftbewegungen und damit wird auch das Zugluftproblem minimiert. Die Luftbefeuchtung erfolgt aufgrund der engen Platzverhältnisse mit elektrisch betriebenen Dampfbefeuchtern. Diese Art der Befeuchtung erfordert allerdings einen hohen Energieaufwand. Es ist vorgesehen, die Ausstellungshallen mit LED-Beleuchtung auszustatten, da LED-Lampen deutlich energieeffizienter als Leuchtstofflampen und inzwischen marktgängig und finanziell erschwinglich sind. Der internationale Standard für Wechselausstellungen fordert für das Innenraumklima folgenden Werte:

20 °C ± 2 K und 50 % ± 5 % relative Raumluftfeuchte.

Die Anlagentechnik ist so geplant worden, dass diese Klimabedingungen ganzjährig eingehalten werden können. Aus energetischer Sicht ist es jedoch ratsam, auch größere Schwankungen zuzulassen. In den Hallen mit Oberlicht kann mit Verdunklungsanlagen, die sich zwischen Glasdecke und Glasdach befinden, die für Ausstellungsobjekte ideale Beleuchtungsstärke eingestellt werden. Die Messstellen für die Sensoren wurden während der Planungsphase bereits vorgegeben und in die Pläne übernommen. Wenn sie in der Ausführungsphase

dann auch eingebaut werden, kann nach Fertigstellung der Sanierung mit dem Monitoring begonnen werden. Die Durchführung eines Monitorings wird empfohlen. Es ist im Rahmen der integralen Planung gelungen, auch unter sehr schwierigen Randbedingungen, die dieser Sanierung zugrunde lagen, den Endenergiebedarf gegenüber dem Ausgangszustand um 61 % und der Primärenergiebedarf um 65 % zu reduzieren.

2 Hintergrund

Die Mathildenhöhe in Darmstadt ist ein architektonisches und städtebauliches Gesamtensemble, zu welchem u. a. die Ausstellungshallen als historisches und unter Denkmalschutz stehendes Gebäude des Jugendstils gehören. In den Ausstellungshallen werden wechselnde Ausstellungen bedeutender Gegenwartskunst gezeigt. 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 und einem entsprechend hohen Energiebedarf erwidert. Dies ist mittel- bis langfristig weder ökologisch noch wirtschaftlich sinnvoll, da Ressourcenknappheit und fehlende finanzielle Mittel dazu führen, dass sich Museen die hohen Betriebskosten nicht mehr leisten können.

Auch fehlen häufig die Mittel, eine komplexe Anlagentechnik in regelmäßigen Intervallen zu warten und zu pflegen. Nicht mehr wie geplant funktionierende Klimaanlageanlagen oder veraltete, völlig überdimensionierte Anlagen sind die Folge. Ein stabiles Innenraumklima ist kaum zu gewährleisten und das wertvolle Kunst- und Kulturgut ist einem großen Risiko ausgesetzt. Darüber hinaus verbauen sich diese Wechselausstellungshäuser oder Kunsthallen die wirtschaftliche Überlebensfähigkeit, da sich immer weniger Leihgeber trauen, ihre Werke temporär hier zu präsentieren.

Eine besondere Herausforderung sind Museen, die in denkmalgeschützten historischen Gebäuden untergebracht sind. Die in der Vergangenheit häufig eingebaute Anlagentechnik entspricht heute nicht mehr dem Stand der Technik bzw. führte durch massive Eingriffe in die historische Struktur teilweise zu Schäden und gravierenden Substanzverlusten. Der Kosten- und Energieaufwand für den Betrieb der Klimaanlageanlagen ist immens. Gleichzeitig kann bei aktuell zu planenden Museumssanierungen nicht einfach eine Außendämmung der denkmalgeschützten Fassaden erfolgen. Jedoch ist der bloße Austausch der An-

lagentechnik ebenfalls nicht zielführend. Im Rahmen einer energetischen Sanierung ist es unerlässlich, das Museumsgebäude ganzheitlich zu betrachten und interdisziplinäre Konzepte zu entwickeln, welche die Fehler der Vergangenheit nicht wiederholen und konservatorische wie ästhetische Aspekte nachhaltig umsetzen.

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, diese individuell auf die Sanierungsaufgabe abzustimmen und für die Bedürfnisse der Gebäudetypologie Museum beispielhaft zu erschließen.

Dies betrifft sowohl Dämmmaßnahmen wie auch den Umgang mit Strategien der Klimakontrolle. Ist die Außendämmung aufgrund einer denkmalgeschützten Fassade nicht möglich, wird im Allgemeinen eine Innendämmung vorgesehen. Gerade in Museen, die überwiegend Gemälde ausstellen, sind die Wände die Hängefläche, an welchen die Kunstwerke durch Schraubverbindungen befestigt werden. Bei der Planung einer Sanierung muss dieser Aspekt genauso berücksichtigt werden wie die Tatsache, dass beispielsweise beim Einsatz von Niedertemperatursystemen in den Umschließungs- oder Wandflächen durch die »Verhängung« der Fläche keine Mikroklimata bzw. größere Feuchte- und Temperaturgradienten entstehen dürfen und das System konstante Bedingungen gewährleisten muss. Insgesamt sind verschiedenste, scheinbar gegenläufige Aspekte zu berücksichtigen. Ein weiterer Aspekt sind die Systeme in den Wänden, mit denen häufig die Kunstwerke vor Diebstahl gesichert werden. Auch hier darf die Dämmmaßnahme keine Einschränkung bedeuten.

In Summe gilt es, eine ausgewogene Balance der Einzelmaßnahmen Dämmung und Erneuerung der Anlagentechnik zu finden. Die bisherige Arbeit im BMWi-Basisprojekt »Nachhaltige Sanierung von Museumsgebäuden« ([1]) hat deutlich gezeigt, dass der Stand der Forschung in Bezug auf museal taugliche Sanierungsmaßnahmen – hier sei beispielhaft auf Niedertemperatursysteme hingewiesen – intransparent ist und Wissen um mögliche Probleme bei der energetischen Sanierung von Museumsbauten wenig bis gar nicht an die Nutzer, Bauherren, Fachplaner und Architekten weitergegeben wird. Die intensive Betreuung und wissenschaftliche Begleitung des Sanierungsvorhabens Mathildenhöhe als Leuchtturmprojekt soll diese Lücke schließen.

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, innovative Baustoffe oder Passivbaukonzepte 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.

3 Ziele

Das gesamte Ensemble Mathildenhöhe besteht aus den Ausstellungshallen (gebaut auf dem ehemaligen Wasserreservoir der Stadt Darmstadt), dem sogenannten Hochzeitsturm, dem Ernst-Ludwig-Haus (Museum Künstlerkolonie), der russischen Kapelle, dem Wasserbecken, dem Platanenhain sowie den verschiedenen Atelier- und Wohnhäusern der ehemaligen Künstlerkolonie. Einzelne Gebäude wurden bereits saniert bzw. rekonstruiert: Der Hochzeitsturm konnte durch Privatinitiative des Förderkreises im Inneren umfassend restauriert und durch den Einbau eines Aufzugs auch für Ältere und Behinderte zugänglich gemacht werden. 1984 bis 1990 wurde das Ernst-Ludwig-Haus rekonstruiert und zum Museum Künstlerkolonie ausgebaut. Von 1989 bis 1992 erfolgte die denkmalpflegerische Instandsetzung des Hauses Deiters. Dabei konnten Teilbereiche der Außenanlagen, die unmittelbar zu den restaurierten Gebäuden gehörten, in ihrer ursprünglichen Gestalt wiederhergestellt werden. Die komplette Sanierung und Restaurierung der Russischen Kapelle im Äußeren und Inneren wurde 2008 abgeschlossen.

Nun sollen auch die Ausstellungshallen saniert werden. Das bisher geplante Bauvorhaben sah 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 Erhöhung des Gebäudes unumgänglich. Seit Oktober 2009 wurden die Ausstellungshallen der Mathildenhöhe Darmstadt im Rahmen des BMWi-Basisprojektes »Nachhaltige Sanierung von Museumsgebäuden« als eines der ersten Museen untersucht ([1]).

Ziel ist es, eine den Bauvorschriften entsprechende Musterlösung für die energetische Sanierung von Museen am Beispiel der Ausstellungshallen Mathildenhöhe zu erarbeiten. Dabei stehen 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. 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 – Sanierungsansätze und -konzepte zu entwickeln, welche die vorhandene Substanz erhalten und gleichzeitig eine schonende zeitgemäße Museumsnutzung und Betriebsführung erlauben – aufzuzeigen.

Die explizit definierten Projektziele sind nachfolgend stichpunktartig aufgeführt:

- Konzeption, Planung und Realisierung eines Leuchtturmprojektes zur nachhaltigen energetischen Sanierung der Ausstellungshallen Mathildenhöhe Darmstadt. Um den Ausstellungs- und Museumsbetrieb zu verbessern, ist eine hohe Klimastabilität ohne aufwändige Anlagentechnik sowie eine größtmögliche Nutzbarkeit und Bespielbarkeit der Wand- und Bodenflächen anzustreben.
- Durch die Planung und Umsetzung eines innovativen und nachhaltigen Sanierungskonzeptes, das den Belangen eines modernen und zukunftsfähigen Ausstellungshauses entspricht, soll das Projekt Vorbild- und Leuchtturmcharakter entwickeln.
- Der Nachweis einer Realisierung von Niedrigstenergiekonzeptionen für das Museum unter Berücksichtigung strenger denkmalpflegerischer und konservatorischer Vorgaben. Die energetische Sanierung der Mathildenhöhe soll die Reduzierung der Energiekosten um bis zu 50 % anstreben.
- Die wissenschaftliche Aufarbeitung, Publikation und der Forschungstransfer zur Adaption der erarbeiteten Lösungen in andere Museumssanierungsprojekte.
- Die Einbindung von Industriepartnern zur Erforschung von Produkten speziell für die energetische Sanierung von Baudenkmalern und Museen.
- Die Förderung einer interdisziplinären Kommunikation zur Umsetzung einer integralen Planung, durch die beispielhaft Lösungen für die besonderen Problemstellungen bei der Sanierung denkmalgeschützter Museen aufgezeigt werden (Architekten, Anlagentechniker, Bauingenieure, Restauratoren, Kuratoren, Projektsteuerung etc.).

Die an der integralen Planung beteiligten Partner sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1:
Zusammenstellung der an der integralen Planung beteiligten Partner.

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

4 Bestandsaufnahme

4.1 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. In Bild 1 ist der Grundriss dargestellt.

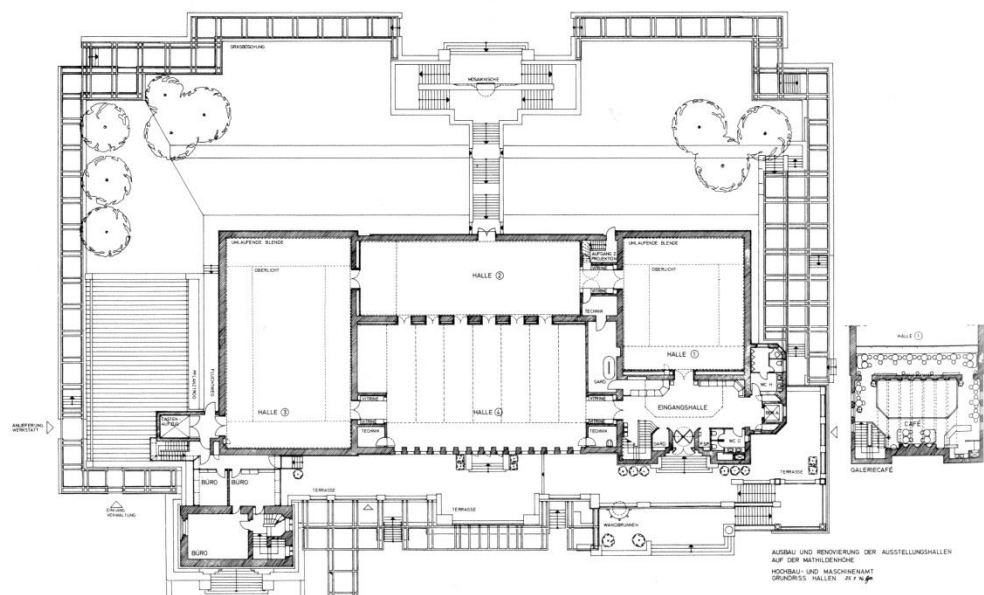


Bild 1:
Erdgeschossgrundriss der Eingangshalle und der vier Ausstellungshallen. Die Pläne tragen das Datum von 1976 [Quelle: [2]].

Die Eingangshalle und die vier Ausstellungshallen 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 2 zeigt den Längsschnitt der Hallen mit dem darunterliegenden Wasserbehälter.

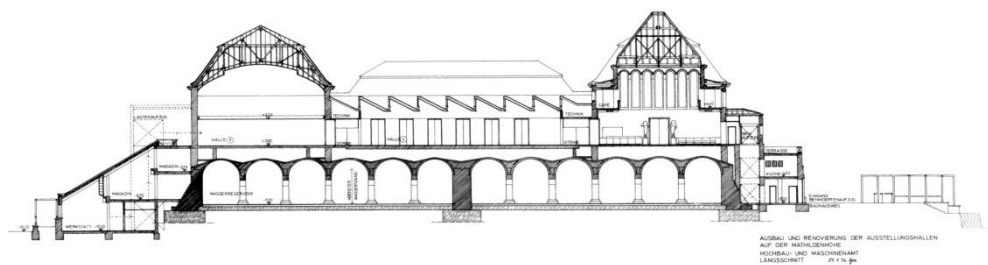


Bild 2:
Längsschnitt durch die Ausstellungshallen mit dem darunterliegenden Wasserreservoir [Quelle: [2]].

Nach dem Krieg mussten die Dächer der Hallen wieder instandgesetzt werden, da sie 1943 zerstört wurden. Halle 4 wurde erst im Jahr 1950 genehmigt. Davor befand sich auf dieser Fläche der offene Ehrenhof. In den 1960er und 1970er Jahren erfolgten einige Umbauten und Sanierungen. Der Bau zwischen Halle 3 und dem Hochzeitsturm wurde abgerissen und neu erstellt. Halle 4 erhielt ein Sheddach, in der Eingangshalle wurde eine zusätzliche Geschossebene eingezogen und ein Café errichtet. Die Fenster der Ausstellungshallen wurden mit Mauerwerk geschlossen.

Aufgrund der anstehenden Feiern zum 100jährigen Bestehen der Künstlerkolonie Mathildenhöhe, die 1899 vom Großherzog Ernst Ludwig gegründet wurde, erhielt die Bauverwaltung Darmstadt den Auftrag, dringend notwendige Sanierungsarbeiten durchzuführen. In diesem Zuge wurden sämtliche Außenputzflächen der Ausstellungshallen überarbeitet. Ferner wurden in Halle 1 und 3 zur Regulierung des Tageslichteinfalls, das über das verglaste Dach und die verglaste Staubdecke in die Ausstellungshallen tritt, Jalousien eingebaut. Sie befinden sich im Bereich zwischen Staubdecke und Dachverglasung. Die Lamellen werden je nach gewünschtem Tageslichtbedarf elektronisch gesteuert und können auch komplett geschlossen werden.

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 ist die Ostseite dargestellt, wie sie sich vor dem Verschließen der Fenster zeigte.



Bild 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].

Bild 4 zeigt die Westseite des Gebäudes mit dem Hochzeitsturm gemäß den Plänen von 1976. Im Bild ist auch das Sheddach auf Halle 4 erkennbar.

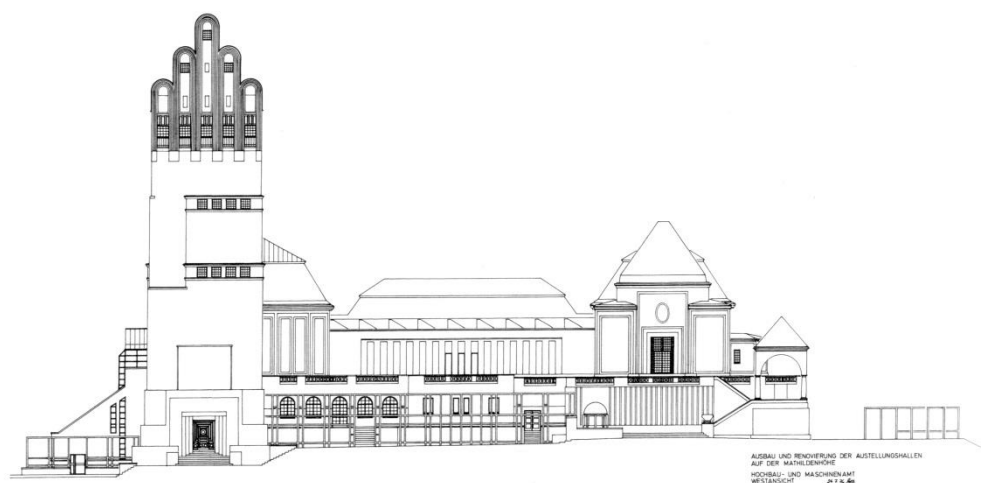


Bild 4:
 Ansicht der Westseite gemäß den Plänen von 1976 [Quelle: [2]].

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

Die thermische Qualität der Außenbauteile wurde dabei detailliert gemäß dem jeweiligen Aufbau ermittelt und den Werten für die bauüblichen Altersklassen gegenübergestellt. Sie sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2:
Zusammenstellung der Bauteilaufbauten und der U-Werte des Gebäudes vor der Sanierung.

Bauteil	Aufbau	Schichtdicke	U-Wert
		mm	W/m ² K
Außenwand Halle	Innenputz	10	1,17
	Vollziegel	600	
	Außenputz	20	
Außenwand Werkstatt gegen Erdreich und Außenluft	zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung	10	0,40
		240	
		80	
		240	
Boden zum Wasserspeicher	Parkett	40	0,62
	Estrich	40	
	Beton	200	
	Sand	1.200	
	Ziegel	240	
Boden zum Wasserspeicher	Parkett	40	1,47
	Estrich	40	
	Beton	200	
	Hohlraum	400	
	Ziegel	240	
Unterdecke	Gipsputz	20	0,61
	Holzschalung	24	
	Mineralwolle	50	
Dach Halle 1, 2, 3	Holzschalung	24	1,40
	Dachhaut	-	
Dach Halle 4	Leichtkonstruktion	-	0,80
	Dämmung	40	
	Dachhaut	-	
Dach Werkstatt	Porenbeton	200	0,37
	Dämmung	70	
	Dachhaut	-	
Glasdecke über Hallen	Einfachverglasung		5,8
Glasdach außen	Einfachverglasung		5,8
Holzfenster vorhanden	Zweifachverglasung		2,8
Fenster Werkstatt	Zweifachverglasung in Metallrahmen		4,3

Bei wärmeübertragenden Bauteilen, deren Aufbau nicht genau bekannt war oder nicht zerstörungsfrei nachvollzogen werden konnte, wurde der U-Wert messtechnisch ermittelt. Dies war bei den Hallenaußenwänden der Fall. Durch die Messung der Wärmeströme und der inneren und äußeren Wandoberflächentemperatur über einen längeren Zeitraum (ca. drei Wochen während der kalten Winterperiode auf der westlichen Außenwand der Halle 3) konnte der Wert von $1,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ ermittelt werden. Es wird angenommen, dass alle Hallenaußenwände diesen Wert aufweisen, da sie alle die gleiche Dicke haben und zur gleichen Zeit erstellt wurden. Auch die U-Werte des Bodens mussten messtechnisch ermittelt werden, da der Aufbau des Bodens zum darunter liegenden Wasserreservoir nicht bekannt war. Der Bodenaufbau besteht aus zwei unterschiedlichen Bereichen. Ein Bereich in Halle 3 konnte durch einen begehbaren, umlaufenden Schacht analysiert werden, im anderen Bereich war der Hohlraum mit einem Material unbekannter Art und Güte verfüllt. Der Bereich mit begehbarem Schacht weist gemäß den durchgeführten Messungen einen U-Wert von $1,47 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf, der verfüllte Bereich einen U-Wert von $0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die gewölbten Decken über den Räumen bestehen aus einem Gipsputz 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 oben liegender 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 $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ und das Dach der im Norden liegenden Werkstatt einen U-Wert von $0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$ 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 im Gebäude bestehenden Holzfenster weisen einen U-Wert von $2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf. Die Metallfensterrahmen der Werkstatt sind nicht thermisch getrennt. Der resultierende U-Wert dieser Fenster liegt bei $4,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bild 5 zeigt einen Schnitt durch die Ausstellungshalle 3 mit Angabe der U-Werte der Hüllflächenbauteile für den Zustand vor der Sanierung. Der spezifische Gesamttransmissionsverlustwert H_T' der Hüllfläche liegt bei $1,22 \text{ W/m}^2\text{K}$.

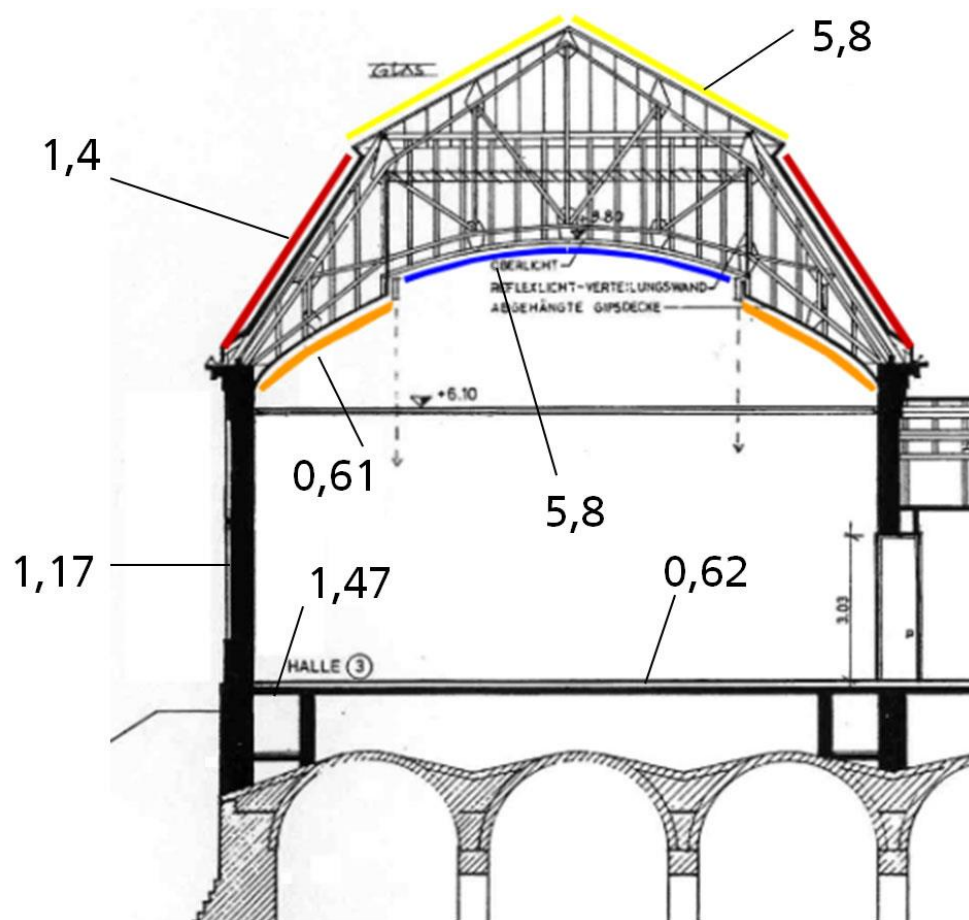


Bild 5:
Darstellung des Schnittes durch die Ausstellungshalle 3 mit Angabe der U-Werte der Hüllflächenbauteile [Quelle: Schneider + Schumacher].

4.2 Anlagentechnik

Von dem Entwurfsarchitekten Joseph Maria Olbrich war keine Heizung vorgesehen gewesen, denn die Ausstellungshallen sollten nur im Sommer genutzt werden. Für die Stadt Darmstadt kam bei dieser hohen Bausumme jedoch eine temporäre Nutzung auf keinen Fall infrage [2].

Der Ist-Zustand der Anlagentechnik und der Beleuchtung wurde durch mehrere Begehungen der Fachplaner mit dem Betreiber des Gebäudes ermittelt. Dabei wurden unter anderem die eingestellten Zu- und Abluftvolumenströme, der Frischluftanteil, die Art der Befeuchtung und Nacherhitzung, die installierte Beleuchtungsleistung sowie die Art der Wärme- und Kälteerzeugung sowie deren Übergabe genau dokumentiert. Die Ausstellungshallen wurden bisher ausschließlich über Luft beheizt, gekühlt und klimatisiert. Die Wärmeerzeugung erfolgte mit Wärmepumpen und die Kältebereitstellung mit elektrisch betriebenen

nen Kompressionskältemaschinen. Die Anlagen sind inzwischen sehr veraltet, wie Bild 6 zeigt.

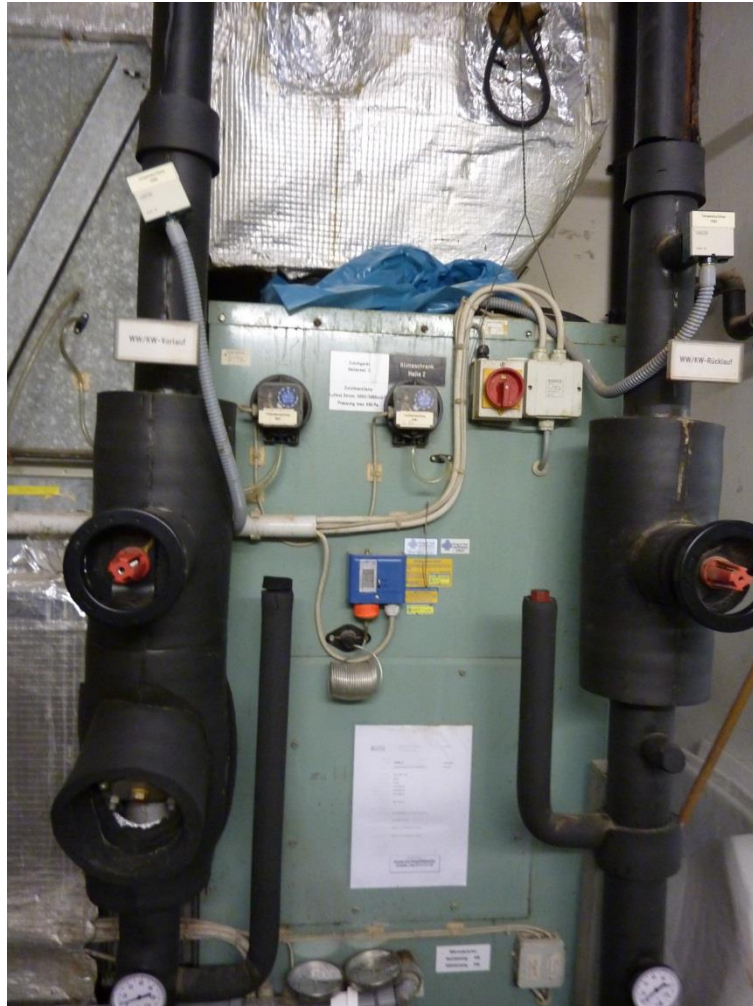


Bild 6:
Photographische Aufnahme der veralteten Klimaanlage [Quelle: IBP].

An dieser Stelle soll vor allem die sehr spezielle Art der Wärme- und Kälteerzeugung der Bestandsanlage Erwähnung finden, welche so nicht oft anzutreffen ist. Aufgrund der ursprünglichen Funktion des unterhalb der Ausstellungshallen befindlichen Wasserreservoirs zur Sicherstellung der Wasserversorgung der umliegenden Gebiete läuft eine große Anschlussleitung des Trinkwassernetzes durch diese Räumlichkeiten. Der Trinkwasserleitung, welche die umliegenden Gebiete versorgt, wurde im Winter mittels eines Wärmetauschers und einer Wärmepumpe Wärme zur Beheizung der Ausstellungshallen entzogen. Während der Sommermonate wurde über diesen Wärmetauscher ebenfalls die vorhandene Kompressionskältemaschine gekühlt. Diese effiziente Möglichkeit der Wärme- und Kälteerzeugung ist heutzutage nicht mehr genehmigungsfähig.

hig, weshalb ein komplett neues System zur Wärme- und Kälteerzeugung aufgebaut werden muss.

5 Weltkulturerbe-Bewerbung

Die Mathildenhöhe mit der Künstlerkolonie in Darmstadt zählt zu den weltweit bedeutendsten Jugendstilensembles. Sie soll daher nach dem Wunsch der deutschen Kultusministerkonferenz UNESCO-Weltkulturerbestätte werden. Bedingung für die Aufnahme in die Bewerberliste ist jedoch eine umfangreiche Sanierung, die dem Denkmalschutz entspricht. Dabei ist es nicht notwendig, dass immer der Zustand der Bauzeit hergestellt wird, also der Zustand von 1908, sondern es sollen auch Zeitschichten gezeigt werden, die die bauliche Veränderung des Bauwerks sichtbar machen. In mehreren Sitzungsrunden wurden und werden die erarbeiteten Sanierungsvorschläge dem Advisory Board vorgestellt. Das Advisory Board ist ein Fachgremium, das vom Präsidenten des Landesdenkmalamtes Hessen geleitet wird. Das Gremium berät die Stadt Darmstadt bei der Bewerbung um die Anerkennung. Sämtliche Nominierungsunterlagen müssen bis zum 1. Februar 2019 bei der UNESCO vorliegen.

Aufgrund dieses Bewerbungsprozesses verzögert sich die geplante Sanierung um mehrere Jahre. Die Ausstellungshallen wurden bereits 2012 geschlossen. 2015 sollte ursprünglich die Sanierung abgeschlossen sein. Der jetzige Sanierungsbeginn startete im Juni 2017. Der Wiedereröffnungstermin ist im Frühjahr 2019 vorgesehen.

6 Denkmalschutz

Im Zuge der energetischen Sanierung der Mathildenhöhe soll das heutige Erscheinungsbild, dargestellt in Bild 7, wieder dem ursprünglichen Erscheinungsbild (siehe Bild 3) angenähert werden. Das Advisory Board forderte jedoch, dass dabei die Zeitschichten, die das Gebäude seit 1908 durchlaufen hat, berücksichtigt werden. Es ist insbesondere vorgesehen, die am Gebäude in den 1970er Jahre vorgenommenen Renovierungen, wie beispielsweise die Vor- und Ausmauerungen an der Fassade, nicht wieder rückzubauen. Die Fassadengliederung soll sich an der »1970er-Jahre-Intervention« orientieren.



Bild 7:
Photographische Ansicht der Westseite vor der Sanierung [Quelle: Schneider + Schumacher].

In Abstimmung mit der lokalen Denkmalbehörde und der Landesdenkmalbehörde wurde beschlossen, dass der Putz an der Ausstellungshalle der Mathildenhöhe entfernt und ein neuer angebracht werden soll. Der originale Putz von 1908 ist nicht mehr großflächig vorhanden. Im August 2014 wurden kleinere Flächen bei der Öffnung einer vermauerten Fensternische an der Rück-Fassade gefunden (vgl. Bild 8).



Bild 8:
Photographische Ansicht des freigelegten, konkaven Original-Putzes von 1908 mit Mulden[Quelle: IBP].

Es sind unter dem aktuellen Putz der 1970er Jahre noch großflächig jüngere Putzschichten aus einem ockerdurchfärbten Mörtel mit einer Ausfallkörnung einer bis dato undatierten Renovierungsphase erhalten.

Gemäß der Untersuchung von Hangleiter [3] besteht der bauzeitliche Putz, dargestellt in Bild 9, aus einem 15 mm dicken grauen Grundputz und einem darüber liegenden anthrazitgrauen Spritzbewurf, wobei die Oberfläche des Spritzbewurfs durch eine dünne violettgraue Tünche gebildet wird.



Bild 9:
Photographische Ansicht des bauzeitlichen Putzes [Quelle: [3]].

Im Zuge der Zumauerung der Fenster in den 1970er Jahren erhielt auch die Oberfläche eine andere Struktur. Die ursprünglich gegliederte Fassadenoberfläche wurde durch eine Vormauerung in eine glatte Fläche überführt, wie in Bild 10 zu erkennen ist.



Bild 10:
Photographische Ansicht einer partiell freigelegten Wandfläche. Es ist die ursprüngliche Lisene hinter der freigelegten Vormauerung zu erkennen [Quelle: [3]].

Eine Restaurierung des Bestandputzes, der an vielen Stellen gar nicht mehr vorhanden ist, wäre zu aufwendig, daher wurde diese Option ausgeschlossen. Auch würde dies nicht zur energetischen Verbesserung des Gebäudes beitragen, was bei der Sanierung gewünscht ist. Daher wurde festgelegt, den bauzeitlichen Putz und dessen Farbigkeit auf einem neuen Putzsystem zu rekonstruieren.

7 Bauliche Veränderungen

Das derzeitige Erscheinungsbild der Kunsthallen Mathildenhöhe vor der Sanierung ist in Bild 11 dargestellt.



Bild 11:
Photographische Aufnahme der Kunsthallen Mathildenhöhe vor der Sanierung[Quelle: Nikolaus Heiss] .

Im Zuge der Sanierung werden auch bauliche Veränderungen vorgenommen. Der geplante Zustand ist im Anhang in den Bildern Bild A 1.1 bis Bild A 1.11 dargestellt. So wird das bisherige Café, das sich auf der Empore über dem Foyer der Eingangshalle befindet und teilweise in den Bereich der Ausstellungshalle 2 ragt und nicht barrierefrei zu erreichen ist, rückgebaut und in das erste Untergeschoss verlegt. In diesem südlichen Bereich vor der Ausstellungshalle 4 befinden sich derzeit noch der Schieberraum des Wasserspeichers sowie Technikräume und Büros. Die Anordnung der Räume des Cafés ist in Bild A 1.2 zu sehen. Die Caféräume können über eine Treppe und auch barrierefrei (über einen Aufzug neben der Eingangstreppe) erreicht werden. Auf dem Plan sind auch Sitzplätze außerhalb des Cafés zu erkennen. Der Zugang zur Besichtigung des Wasserspeichers ist ebenfalls vom Café aus möglich.

Ferner werden die Büros zwischen Halle 3 und dem Hochzeitsturm, zu erkennen in Bild 1, rückgebaut. An dieser Stelle ist ein neuer verglaster Besprechungsraum vorgesehen. Auch die Treppe neben dem Aufzug entfällt künftig. Auf der Nordseite (Bild A 1.9) ist nur noch die Außenwand des Lastenaufzugs vor der Wand der Ausstellungshalle 3 zu sehen. Wie aus Bild 3 zu erkennen ist, war die komplette Westseite mit Fenstern ausgestattet gewesen. Sie wurden

jedoch, wie in Ziffer 4 bereits erwähnt, in den 1970er Jahren zugemauert. Künftig sollen jedoch die Fenster der Halle 2 wieder freigelegt werden. Es sind weiße, ungegliederte Holzfenster in der historischen Fensterlage mit geputzten Laibungen vorgesehen. Dabei sollen die Fenster im Erscheinungsbild der Fassade sich »dienend« einfügen, wie dem Protokoll des 5. Welterbeworkshops zu entnehmen ist. Danach erhält auch diese Halle wieder Tageslicht von der Seite. Halle 1 und Halle 3 erhalten Tageslicht über die verglasten Dächer von oben und Halle 4 über die verglasten Sheddächer.

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

8 Energiekonzept

Um das energetische Ziel zu erreichen, wurde bereits ab Planungsbeginn mit der Erarbeitung des Energiekonzeptes begonnen. Es konnte dabei davon ausgegangen werden, dass die gesamte Anlagentechnik (Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung, Sanitär) komplett zurückgebaut und neu errichtet wird. Die von den in Tabelle 1 aufgeführten Projektpartnern jeweils entwickelten Energiekonzeptvarianten wurden in vielen 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 ihnen abgestimmt. Zur Steigerung der Energieeffizienz eines Gebäudes sind sowohl bauliche als auch anlagentechnische Maßnahmen notwendig.

8.1 Bauliche Sanierungsmaßnahmen

Bei der Reduzierung der Wärmeverluste eines Gebäudes spielt die Minimierung der Transmissionswärmeverluste eine maßgebende Rolle.

8.1.1 Außenwände

Für die energetische Sanierung der Außenwände wurde eine Vielzahl an möglichen Varianten diskutiert, detailliert betrachtet und Berechnungen durchgeführt, um die Auswirkungen zu bestimmen und so für das Museum die am besten geeignete Lösung zu finden.

Bei denkmalgeschützten Gebäuden ist der Einsatz von Wärmedämmsystemen auf der Außenseite der Außenwände in den allermeisten Fällen nicht zulässig. Diese einfache, günstige und wirkungsvolle Methode war auch im Fall der Ma-

thildenhöhe von der Denkmalschutzbehörde aufgrund der Außenwirkung zunächst abgelehnt worden.

Im Zuge dessen wurden verschiedene Innendämmsysteme für den Einsatz in den Ausstellungshallen diskutiert. Parallel zur erfolgten Diskussion wurden für die verschiedenen diskutierten Systeme auch Wärmebrückenberechnungen durchgeführt, welche die Diskussionsgrundlage noch erweitern sollten. Alle auf Wärmebrücken untersuchten Außenwandkonstruktionen sind vom Projektpartner Schlier und Partner berechnet worden. Die Berechnungen sind in [4] zusammengestellt. Grundsätzlich sind Innendämmsysteme bauphysikalisch anspruchsvoller, benötigen mehr Detailplanung, neigen verstärkt zur Ausbildung von Wärmebrücken und reduzieren die Nutzfläche. Bei Innendämmungen gibt es prinzipiell zwei verschiedene Systeme, das diffusionsdichte und das diffusionsoffene, kapillaraktive System. Bei ersterem wird der Feuchtestrom vom Innenraum in die Wand durch dampfdiffusionsdichte Schichten verhindert, bei dem zweiten wird im Winter ein Dampfdiffusionsstrom in die Wand zugelassen, dafür aber während der Sommermonate die Austrocknung ermöglicht. Die dampfdiffusionsdichten Systeme haben den Vorteil, dass mit ihnen kleinere U-Werte für die zu sanierende Wand möglich sind, da die verwendbaren Dämmstoffe kleinere Wärmeleitfähigkeiten aufweisen. Die Umsetzung eines diffusionsoffenen Systems bringt insbesondere beim Einsatz im Museum unpraktische Nebenwirkungen mit sich, da sichergestellt sein muss, dass die dampfdiffusionsdichte Schicht keine Undichtigkeiten aufweist. Dies erfordert nicht nur eine hohe Ausführungsqualität, sondern schränkt gleichzeitig die Möglichkeit der Anbringung von Kunstgegenständen an den so gedämmten Wänden ein, da die dampfdiffusionsdichte Schicht leicht durch übliche Anbringungssysteme verletzt wird, was zum Versagen des kompletten Systems und zu Bauschäden führen kann. Um die Flexibilität der Ausstellungshallen und die darin enthaltene Möglichkeit, alle Arten von Kunstgegenständen auszustellen zu erhalten, wurde der Ansatz der diffusionsdichten Innendämmsysteme verworfen.

Bei diffusionsoffenen, kapillaraktiven Systemen gibt es keine Probleme mit handelsüblichen Befestigungsmaßnahmen. Durch diese kann geschraubt und gedübelt werden, ohne die Funktion nennenswert einzuschränken. Diffusionsoffene, kapillaraktive Systeme beruhen meist auf der Verwendung von mineralischen Dämmstoffen wie beispielsweise Kalziumsilikatplatten oder geblähtem Perlit. Die einfach zu handhabenden und fehlertoleranten Kalziumsilikatplatten sind relativ teuer, verfügen aber mit 0,06 bis 0,09 W/mK über nicht besonders ambitionierte Wärmeleitfähigkeiten. Etwas teurer sind die Dämmplatten aus geblähtem Perlit, allerdings bieten diese mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,045 W/mK eine gute Dämmqualität. Nachteilig an allen Innendämmungen ist, dass der Wand die Wärmezufuhr abgeschnitten wird, was die Austrocknung der Wand bei aufsteigender Feuchte vermindert. Da der bauliche Feuchteschutz der Mathildenhöhe nicht optimal ist und zusätzlich der Wasser-

speicher unter dem Gebäude teilweise reaktiviert werden soll, ist mit einem erhöhten Aufkommen von aufsteigender Feuchte zu rechnen, was bei Innendämmsystemen kritisch betrachtet werden muss.

Aufgrund der Feuchteproblematik und der Tatsache, dass der Bestandsaußenputz aufgrund von Schadhaftheit sowieso erneuert werden muss und sich herausstellte, dass es sich nicht um den Originalputz zum Zeitpunkt der Bauproduktion (1908) handelt, wurde die Verwendung eines Dämmputzes in Betracht gezogen. Konventionelle Dämmputze mit dem Zuschlagsstoff Polystyrol oder geblähtem 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. Im Rahmen einer Recherche stellte sich der 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 es sich um einen hochporösen Festkörper, der zu über 99 % aus Poren besteht. Gemäß dem Produktdatenblatt [5] weist der Putz die in Tabelle 3 angegebenen Eigenschaften auf.

Tabelle 3:
Zusammenstellung der Materialbasis und der Eigenschaften des Aerogel-Dämmputzes [5].

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

Zum Test und zur Anschauung wurde im Mai 2014 auf der Ostseite von Halle 3 der bestehende Putz von einer ca. 10 m² großen Fassadenfläche entfernt und ein Aerogel-Dämmputz aufgetragen (siehe Bild 12).



Bild 12:
Photographische Darstellung der mit Aerogel-Dämmputz applizierten Musterfassade [Quelle: IBP].

Der Aerogel-Dämmputz kann entweder von Hand oder maschinell auf die Wand aufgebracht werden. Bei der maschinellen Aufbringung verschlechtert sich allerdings die Dämmwirkung des Putzes geringfügig, da ein geringer Anteil des Aerogel-Zuschlages durch die maschinelle Beförderung und Aufbringung zerrieben wird. Um abgesehen von den thermischen Eigenschaften die Verarbeitbarkeit des Putzes mit den beiden Aufbringungsmethoden bewerten zu können, wurde die obere Hälfte manuell und die untere maschinell aufgetragen. In Bild 13 ist ein Ausschnitt der Putzfläche dargestellt.



Bild 13:
Darstellung eines Wandausschnitts – einmal mit und einmal ohne Putz [Quelle: IBP].

Durch die Ausführung der Musterfassade wurde festgestellt, dass der Aerogel-Dämmputz bei Handauftrag zur sichtbaren Rissbildung neigt. Bei der maschinellen Aufbringung hingegen ist dies nicht der Fall. Aufgrund dessen und beruhend auf der Tatsache, dass der Putz kostengünstiger maschinell aufgebracht werden kann, wurde festgelegt, dass der Aerogel-Dämmputz für das Projekt maschinell verarbeitet wird.

Durch die Aufbringung eines 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 enge Abstimmung aller beteiligten Planer sowie der Einbeziehung der Denkmalpflege und des Institutes Mathildenhöhe konnten offene Fragen und Bedenken ausgeräumt werden, um schließlich die Verwendung eines solch innovativen und neuartigen Produktes ausreichend zu konsolidieren.

Durch die Profilierung der Fassade wird der Putz nicht überall eine Dicke von 3 cm aufweisen können, wie anhand Bild A 1.12 zu erkennen ist. Im Mittel kann jedoch von 3 cm 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. Die Armierschicht besteht aus einem Glasfasergewebe (160 g/m²). Der Mörtel, in dem die Armierschicht eingelegt ist, ist auch für die Überarbeitung von Altputzen in der Denkmalpflege geeignet; Weißkalk ist die Materialbasis. Die Materialbasis des Oberputzes ist ebenfalls Weißkalkhydrat. Es handelt sich hierbei um einen Renovier-Strukturputz für den universellen Einsatzbereich. Er ist auch zugelassen als Oberputz von Wärmedämmverbundsystemen. Die Oberputzfläche erhält abschließend einen lichtbeständigen, einkomponentigen Kieselol-Silikatanstrich. Der Putzaufbau ist in Bild 14 dargestellt.

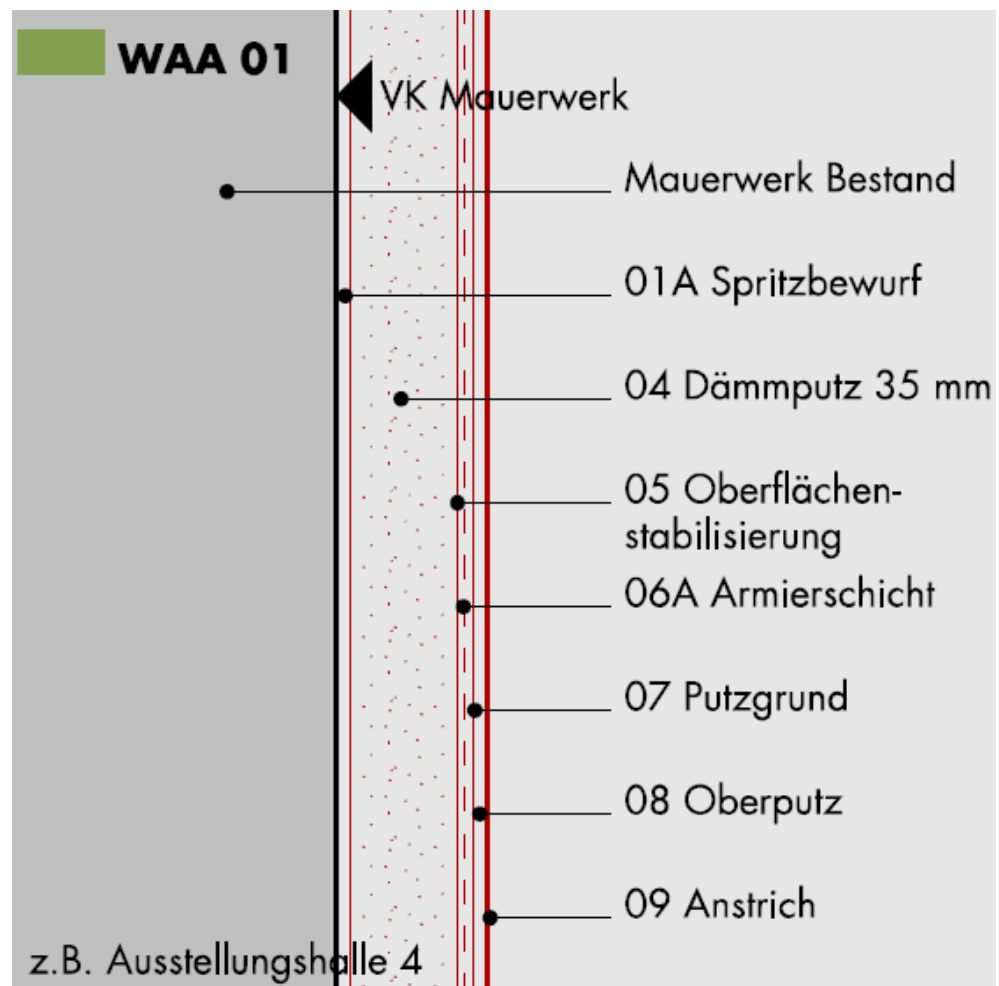


Bild 14:
 Aufbau des Aerogel-Wärmedämmputzes [Quelle: Schneider + Schumacher].

8.1.2 Dachverglasung

Die Auswahl der Dachverglasung ist ein gutes Beispiel für die Notwendigkeit einer integralen Planung, da hier energetische, tragwerksplanerische, tageslichttechnische, gestalterische, sicherheitstechnische und konservatorische Anforderungen in gleichem Maße berücksichtigt werden müssen.

Als Grundvoraussetzung für die Auswahl der Verglasungen wurden sicherheitsrelevante Kennwerte für den Einbruchschutz definiert sowie aus konservatorischen Gründen Anforderungen an den UV-Transmissionsgrad.

Aus energetischer Sicht wäre der Einsatz von Dreischeibenisolierverglasungen erstrebenswert, da dadurch insbesondere bei geneigten Verglasungen deutliche Vorteile bezüglich des Wärmeschutzes gegenüber Zweischeibenisolierverglasungen erzielt werden, wie im vorliegenden Fall. Allerdings widerspricht das Gewicht von Dreischeibenverglasungen auch durch das aufgrund der gestalterisch vorgegebenen Scheibengrößen nötige Verbundsicherheitsglas (VSG) den Randbedingungen, welche durch die zu erhaltende Rahmen- und Dachkonstruktion definiert werden. Deshalb wurde von Schneider + Schumacher die Verwendung eines Folienglases zur Sprache gebracht, bei welchem die mittlere der drei Glasscheiben durch eine spezielle Folie ersetzt wird. Dadurch hat das Produkt die thermischen Eigenschaften einer Dreischeibenisolierverglasung und ist nur geringfügig schwerer als eine Zweischeibenisolierverglasung. Allerdings ist hier die Dauerhaftigkeit der Folie noch fragwürdig, genauso wie das Erscheinungsbild, da beim Glasmuster eine gelb-grünliche Einfärbung erkennbar war. Der U_g -Wert des Folienglases variiert je nach Aufbau zwischen 1,2 und 0,6 W/m^2K und der g -Wert kann zwischen 0,18 und 0,53 gewählt werden. Dementsprechend sind auch Schwankungen des Transmissionsgrades im sichtbaren Spektrum des Folienglases von 0,29 bis 0,66 möglich.

Zur Streuung des einfallenden Sonnenlichtes wurden ebenfalls verschiedene Ausführungen diskutiert und evaluiert. Betrachtet wurden unter anderem Spiegelerasterverglasungen, stationäre Prismensysteme, Aerogelfüllungen, Kapillarsysteme, Mikrolamellen und Vlieseinlagen. In den meisten Fällen disqualifizierten sich die genannten Systeme entweder bei den U -Werten, den Flächengewichten oder einfach aufgrund der teilweise sehr hohen Kosten. Bei den Dachverglasungen ist aber nicht alleine der U_g -Wert entscheidend, sondern auch der Gesamtenergiedurchlassgrad g und der Lichttransmissionsgrad im sichtbaren Spektrum τ_v . Als Zielbeleuchtungsstärke in den von Tageslicht beleuchteten Hallen wurde 300 lx bei einem bedeckten Himmel festgelegt, da dies der Erwartungswert für die Beleuchtungsstärke bei Um- und Aufbauten von Ausstellungen ist und außerdem als guter Wert für Ausstellungen ohne spezielle Anforderungen an die Beleuchtungsstärke angesehen werden kann. Durch die Definition der Zielbeleuchtungsstärke durch Tageslicht bei einem bedeckten Him-

mel ergab sich im vorliegenden Fall ein großes Spektrum an möglichen g-Werten, so dass die Auswahl der Verglasungen nicht stark eingeschränkt war.

Am Ende des Entscheidungsprozesses entschied sich das Planungsteam für das lichtstreuende Isolierglas OKALUX+ als Dachverglasung für die Halle 1 und Halle 3. Es handelt sich hierbei um eine Zweifachverglasung mit einer zwischenliegenden lichtstreuenden Kapillarglasplatte. Die Kapillare reduzieren bei einer geneigten Scheibe den konvektiven Wärmeübergang im Scheibenzwischenraum. Der U_g -Wert einer Scheibe wird im geneigten Bereich nicht höher, wie dies bei einer Scheibe ohne Kapillare der Fall ist, sondern hat in allen Lagen den gleichen U_g -Wert. 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. In Bild 15 ist der Aufbau der Dachverglasung dargestellt, allerdings ohne die »Museumsfolie«.

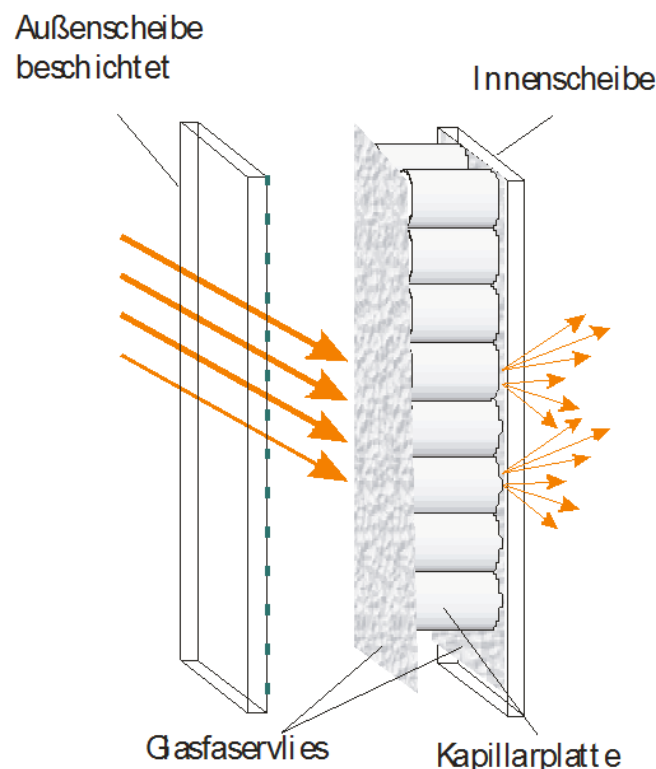


Bild 15:
Schematische Darstellung der lichtstreuenden Dachverglasung mit einer Kapillarglasplatte zwischen den Glasscheiben [Quelle: OKALUX].

Die senkrechten Scheiben der Sheddachverglasung der Halle 4 sind dreifachverglast und ebenfalls mit einer Kapillarglasplatte ausgestattet. Das Produkt nennt sich OKALUX K. Im Gegensatz zur Dachverglasung ist die äußere Scheibe als eine Zweischeibenwärmeschutzverglasung ausgeführt. Die Glas- und Rahmenkennwerte sowohl der Dachverglasung als auch der Sheddachverglasung sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4:
Zusammenstellung der Glas- und Rahmenkennwerte der Dachverglasungen der Hallen 1 und 3 und der Sheddachverglasung der Halle 4.

Bauteil	Bezeichnung	Einheit	Halle 1 und Halle 3 Dachverglasung	Halle 4 Sheddachverglasung
Glas	Wärmedurchgangskoeffizient, U_g -Wert	W/m ² K	0,9	0,8
	Energiedurchlasskoeffizient, g-Wert	-	0,32	0,34
	Lichttransmissionsgrad, T_v	-	0,3	0,33
	Farbwiedergabegabeindex, R_a	-	0,97	0,87
	UV-Durchlässigkeit	-	0,3	0,30
	Scheibenzwischenraum, SZR 1	mm	18	12
	Scheibenzwischenraum, SZR 2	mm	-	8
Rahmen	Rahmenkonstruktion	-	Aluminium	Stahl
	Wärmedurchgangskoeffizient, U_f -Wert	W/m ² K	0,7	2,0
	Randverbund, ψ -Wert	W/mK	0,06	0,04

Die für den Wärmeschutz relevanten U_g -Werte liegen bei 0,9 W/m²K für die Dachverglasung und bei 0,8 W/m²K für die Sheddachverglasung.

8.1.3 Lichtdecke

Die Lichtdecke soll eine gleichmäßige Ausleuchtung der Ausstellungshallen entweder durch Tageslicht oder gegebenenfalls durch die Zuschaltung oder durch alleinigen Betrieb mit Kunstlicht ermöglichen.



Bild 16:
Lichtdecke im Bestand ohne speziellen UV-Filter [Quelle: IBP].

Da sie als thermische Trennung zum unbeheizten Dachraum fungiert, stellte sich für sie ebenfalls die Frage nach der thermischen Qualität des Bauteils. Da die Verglasungen der Lichtdecke nicht luftdicht in die vorhandene und zu erhaltende Tragstruktur integriert wird, muss damit gerechnet werden, dass im Winter feuchtwarme Luft in den unbeheizten Dachraum eindringen kann und dort an kalten Oberflächen Tauwasser ausfällt. Um die Eventualität von auftretendem Tauwasser bei der Verwendung einer Zweischiebenisolierverglasung auf der dem Dachraum zugewandten Seite der Lichtdecke zu bewerten, wurde vom Projektpartner Tichelmann & Barillas eine thermische Gebäudesimulation durchgeführt [6]. Die Simulation kam zu dem Ergebnis, dass es bei der Verwendung einer Zweischiebenisolierverglasung zum Tauwasserausfall kommen kann, denn die niedrigste Raumlufttemperatur im Dachraum liegt der Berechnung zufolge bei 3,2 °C. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Wert der Taupunkttemperatur der Raumluft in der Halle, die bei 21 °C und 50 % relative Luftfeuchte 10,2 °C beträgt. Eine weitere Simulation mit einer Einfachverglasung zeigte, dass der niedrigste Stundenmittelwert im Winter bei 12,9 °C liegt. Dieser Wert liegt zwar knapp über der Taupunkttemperatur, doch das Planerteam wollte das Risiko des Tauwasserausfalls auf den Bauteilen des Dachraums nicht eingehen und hat sich daher für eine dezentrale mechanische Lüftung mit Zulufterwärmung im Dachraum entschieden. Eine solche Anlage kann jedoch auch die notwendigen Klimakonditionen im Dachraum herstellen, wenn die Lichtdecke zweifachverglast ausgeführt wird. Aus diesem Grunde fiel die Entscheidung dann für eine zweifachverglaste Lichtdecke.

Tabelle 5:
Glaskennwerte der Lichtdecke.

Bezeichnung	Einheit	Lichtdecke
Wärmedurchgangskoeffizient, U_g -Wert	W/m ² K	1,1
Energiedurchlasskoeffizient, g-Wert	-	0,64
Lichttransmissionsgrad, T_v	-	0,8
Farbwiedergabeindex, R_a	-	0,97
Scheibenzwischenraum, SZR 1	mm	16

8.1.4 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.

8.1.5 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 W/m²K. Einige Unterdecken werden, wie in Kapitel 8.2.3 beschrieben, 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 W/m²a erzielt.

In Tabelle 6 sind die U-Werte für den Zustand nach der Sanierung zusammengestellt.

Tabelle 6:
Zusammenstellung der Bauteilaufbauten (innen nach außen) und der U-Werte des Gebäudes für den Zustand nach der Sanierung.

Bauteil	Aufbau	Schichtdicke	U-Wert
		mm	W/m ² K
Außenwand Halle	Innenputz	10	0,52
	Vollziegel	600	
	Aerogel-Wärmedämmputz	30	
	Außenputz	20	
Außenwand Werkstatt gegen Erdreich und Außenluft	Multipor 045	50	0,26
	Innenputz	10	
	Kalksandstein	240	
	Dämmung	80	
	Bruchstein	240	
Boden zum Wasserspeicher	Parkett	40	0,62
	Estrich	40	
	Beton	200	
	Sand	1.200	
	Ziegel	240	
Boden zum Wasserspeicher	Parkett	40	0,21
	Estrich	40	
	Beton	200	
	Liapor	400	
	Ziegel	240	
Unterdecke	Gipsputz	20	0,24
	Holzschalung	24	
	Mineralwolle	160	
Dach Halle 1, 2, 3	Mineralwolle	240	0,23
	Holzschalung	30	
	Dachhaut	-	
Dach Halle 4	Leichtkonstruktion	-	0,15
	Dämmung	240	
	Dachhaut	-	
Dach Werkstatt	Multipor 045	50	0,25
	Porenbeton	200	
	Dämmung	70	
	Dachhaut	-	
Glasdecke über Hallen	Zweifachverglasung		1,1
Glasdach außen	Zweifachverglasung		0,9
Sheddachverglasung	Dreifachverglasung		0,8
Fenster Werkstatt	Dreifachverglasung		0,9

8.2 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 Mathildenhöhe nicht in Frage, da aus Gründen des Denkmalschutzes kein Schornstein zugelassen ist.

8.2.1 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. Der produzierte Strom kann für den Betrieb der Lüftungsanlage und für die Beleuchtung herangezogen werden. Als weiterer grundlastfähiger Wärmeerzeuger befinden sich in der Mathildenhöhe Sole-Wasser-Wärmepumpen, welche auf den unterhalb der Ausstellungshallen befindlichen historischen Wasserspeicher (2.400 m³ Speichervolumen) als Wärmequelle zurückgreifen. Bild 17 zeigt einen Blick in den Wasserspeicher.



Bild 17:
Blick in das Wasserreservoir, welches als Pufferspeicher genutzt werden soll. [Quelle: Nikolaus Heiss].

Auftretende Heizlastspitzen werden durch Gasbrennwertkessel abgedeckt, welche ebenfalls im Gebäude der Künstlerkolonie untergebracht sind. Das BHKW kann ganzjährig in Betrieb genommen werden. Wenn die Wärme nicht für Heizzwecke genutzt werden kann, kann sie an das Wasserreservoir oder an die vorhandenen Erdwärmesonden abgegeben werden. In Bild 18 ist die Beheizung des Gebäudes schematisch dargestellt.

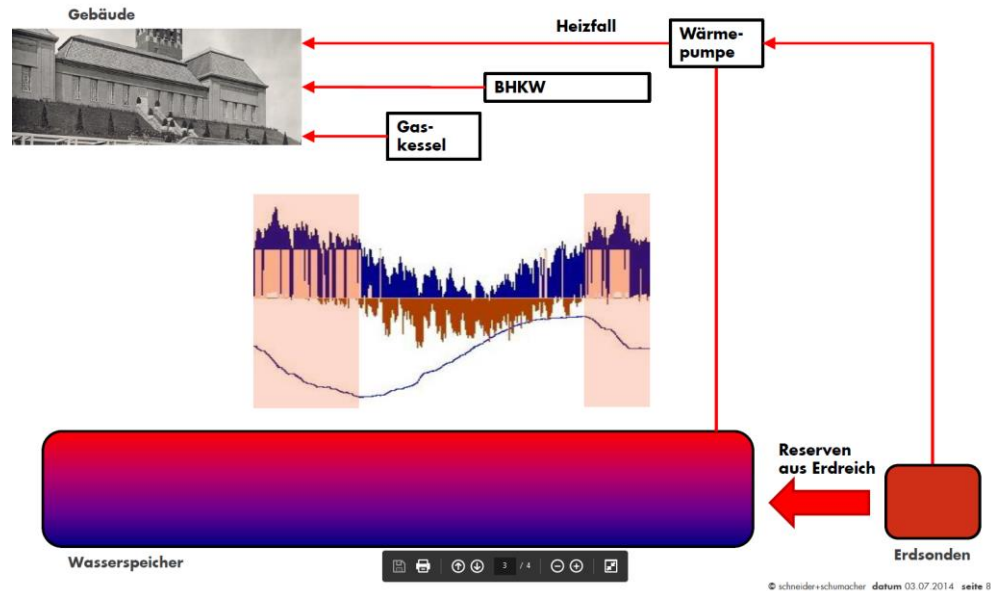


Bild 18:
Schematische Darstellung der Beheizung der Ausstellungshallen [Quelle: Tichelmann & Barillas].

Um den Wasserspeicher im Winter als Wärmequelle für die Wärmepumpen zu regenerieren, wird die sommerliche Abwärme der Kompressionskältemaschine dem Speicher zugeführt. Dadurch kann auf ein Rückkühler verzichtet werden. Ferner werden noch Erdwärmesonden betrieben; zum einen, um aus Gebäudeschutzgründen sicherzustellen, dass der Speicher nicht unterhalb von 5 °C abkühlt und zum anderen, um die Quelltemperatur für die Wärmepumpe auf möglichst hohem Niveau zu halten. Zum Ende der Heizperiode wird die Wassertemperatur im Wasserreservoir durch den Wärmeentzug über die Wärmepumpe minimal absinken, darf aber nicht unter 5 °C liegen.

Die gespeicherte Kälte ermöglicht eine niedrige Rückkühltemperatur für den Rückkühlkreis der Kompressionskältemaschine, was sich positiv auf deren Leistungszahl und Energieeffizienz auswirkt. Durch den Wärmeeintrag über die Kältemaschine erhöht sich die Temperatur im Wasserreservoir und verschlechtert dadurch die Arbeitszahl. Deshalb wird der Wasserspeicher dann aktiv über die Erdwärmesonden rückgekühlt. Dies hat auch den Vorteil, dass dadurch das Erdsondenfeld für die nachfolgende Heizperiode regeneriert. 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 Aufstellungsort gefunden werden, weshalb hier auf die Erdwärmesonden als Rückkühlmöglichkeit zurückgegriffen werden muss. Bild 19 zeigt schematisch die sommerliche Kühlung der Ausstellungshallen.

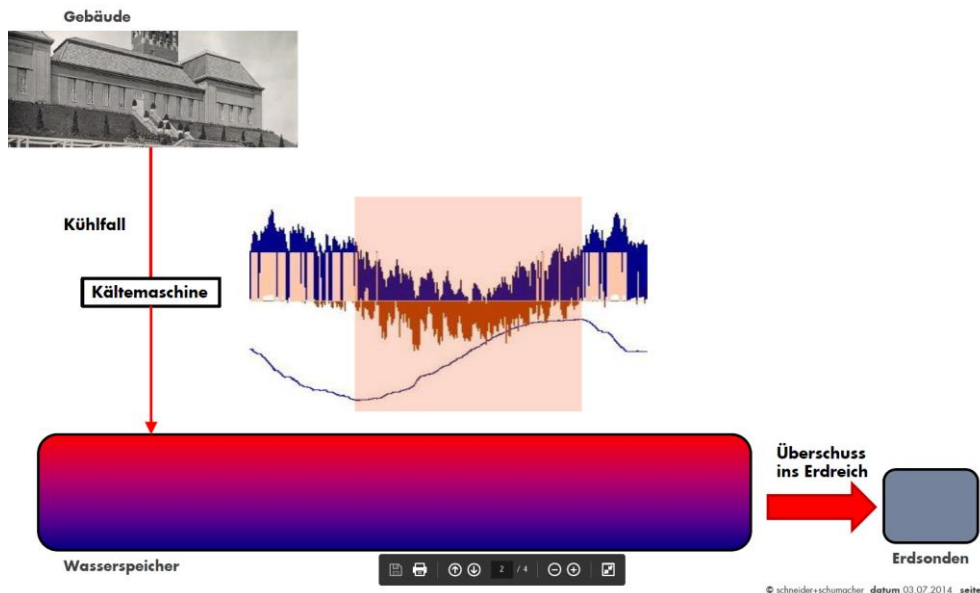


Bild 19:
Schematische Darstellung der Kühlung der Ausstellungshallen [Quelle: Tichelmann & Barillas].

Um die Leistungsfähigkeit der Erdwärmesonden schon während der frühen Planungsphase genau zu kennen, wurde eine geothermische Vorstudie zur Nutzung des Untergrundes angefertigt [7]. Dabei wurden Erdwärmesondenfelder mit bis zu 30 Sonden genauso betrachtet wie die Unterschiede einer direkten und indirekten (über einen Wärmetauscher) Anbindung des Wasserreservoirs an die Erdwärmesonden. Eine indirekte Anbindung über einen Wärmetauscher hätte den Vorteil, dass die Wärmepumpe auch am Speicher vorbei auf die Erdwärmesonden zugreifen kann, wodurch höhere entzogene Wärmemengen realisiert werden könnten. In Bild 20 sind die Ergebnisse der geothermischen Voruntersuchung von 9 Erdwärmesonden und die damit zu erreichenden Fluidtemperaturen nach 25 Jahren Betrieb dargestellt. Es zeigt sich, dass im Winter Fluidtemperaturen von minimal 7 °C und im Sommer von maximal 22,5 °C zu erwarten sind. Die Vorstudie gibt für die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs aufgrund der vorliegenden geologischen Situation einen Wert von 3 W/mK an. Dadurch werden mit 9 Erdwärmesonden über den Verlauf eines Jahres Wärmeentzugsmengen von bis zu 350 MWh und Wärmeeinleitungsmengen von ca. 180 MWh möglich.

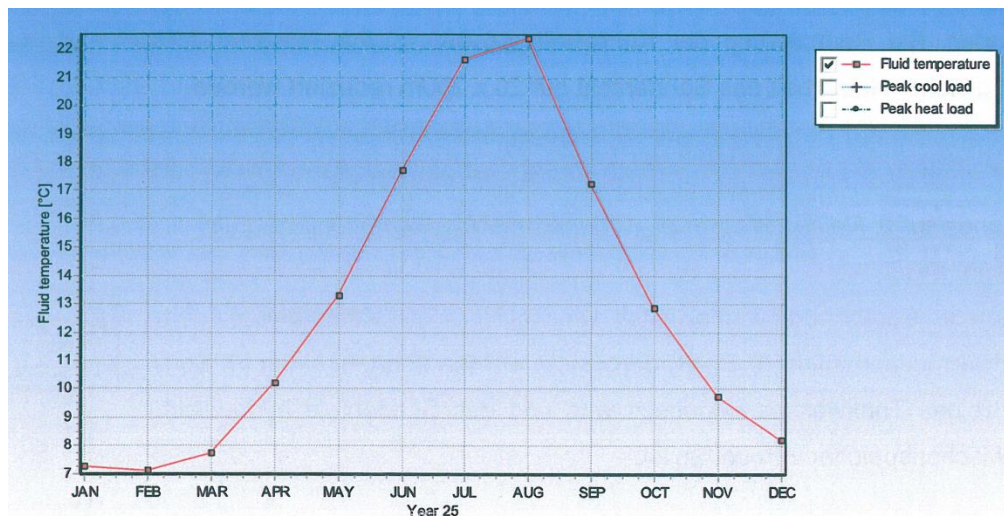


Bild 20:

Zu erwartende Fluidtemperaturen des Erdwärmesondenfeldes nach 25 Jahren Betrieb [Quelle: [7]].

Da die Erdwärmesonden neben dem Speicher die einzige Möglichkeit der Bereitstellung von Rückkühlung für die Kompressionskältemaschinen sind, musste deren Leistung noch während der Planungsphase genauestens bekannt sein. Aus diesem Grund wurde ein sogenannter Geothermal Response Test (GeRT) durchgeführt, bei welchem die tatsächliche Leistung einer Erdwärmesonde am Standort gemessen wird [8]. Für einen GeRT wird eine definierte Wärmelast (Heizen oder Kühlen) an eine Erdwärmesonde angelegt und die Temperaturentwicklung des Wärmeträgermediums bei Sondereintritt und Sondereintritt über die Zeit aufgezeichnet. Diese Temperaturänderung erlaubt die Ermittlung thermischer Parameter und die Vorhersage der zukünftigen Temperaturentwicklung in den Erdwärmesonden. Ein Verfahren dazu ist die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes als Grundlage weiterer Berechnungen, wobei vorwiegend konduktiver Wärmetransport im Untergrund vorausgesetzt wird.

Die Messung der ca. 195 m langen Erdwärmesonde ergab eine Erdreichwärmeleitfähigkeit von 3,1 W/mK, was sich sehr gut mit den Werten aus der Vorstudie deckt. Die thermische Leistung der Erdwärmesonde beträgt rund 8 kW bei einer Vorlauftemperatur von 25 °C und einem Durchfluss von rund 2,1 m³/h, somit beträgt die Entzugsleistung der Erdwärmesonde rund 41 W/m.

Die geothermische Vorstudie hat gezeigt, dass die Leistung der aufgrund der beengten Platzverhältnisse maximal möglichen 7 Erdwärmesonden nicht ausreicht, um zu Hoch- und Spitzenlastzeiten den Betrieb der Wärmepumpe und der Kompressionskältemaschine sicherzustellen. Deshalb wird das historische Wasserreservoir als Puffer dazwischen geschaltet, um die anfallenden Lastspit-

zen zu glätten und so mit der geringeren Entzugs- bzw. Einleiteleistung der Erdwärmesonden einen effizienten und gesicherten Betrieb zu gewährleisten.

Um das gewählte Konzept zur Wärme- und Kälteerzeugung im Rahmen der integralen Planung weiter zu konsolidieren, wurden thermische Simulationen vom Projektpartner Tichelmann & Barillas durchgeführt, deren Zielsetzung vorab intensiv durch alle Fachplaner diskutiert wurde. Dabei entstand die Zielvorgabe, alle Ausstellungshallen unter extremalem Klima mitsamt der Anlagentechnik zu betrachten, um die Anlagenauslegung (Heizung, Kühlung, Wasserreservoir und Erdsonden) zu überprüfen. Die erforderliche Heiz- und Kühlleistung für das Gesamtgebäude gemäß [9] ist in Bild 21 dargestellt. Die maximale Heizlast ergibt sich zu etwa 122 kW, der Betrag der maximalen Kühlleistung liegt bei 61 kW. Die Temperatur des Wasserspeichers schwankt zwischen 5 °C und 14 °C. Die Simulation ergab ferner, dass hauptsächlich während der Heizperiode auf die Erdsonden als Wärmequelle zurückgegriffen werden muss. Während der Kühlperiode reicht die gespeicherte Kältemenge im Wasserreservoir nahezu komplett aus, um für die Kompressionskältemaschine als Wärmesenke zu dienen. Dadurch ist während der Kühlperiode noch ein großes ungenutztes Kühlpotenzial vorhanden, um das BHKW auch in dieser Zeit stromgeführt zu betreiben. Dies ist auch nötig, da dadurch das Erdreich regeneriert wird.

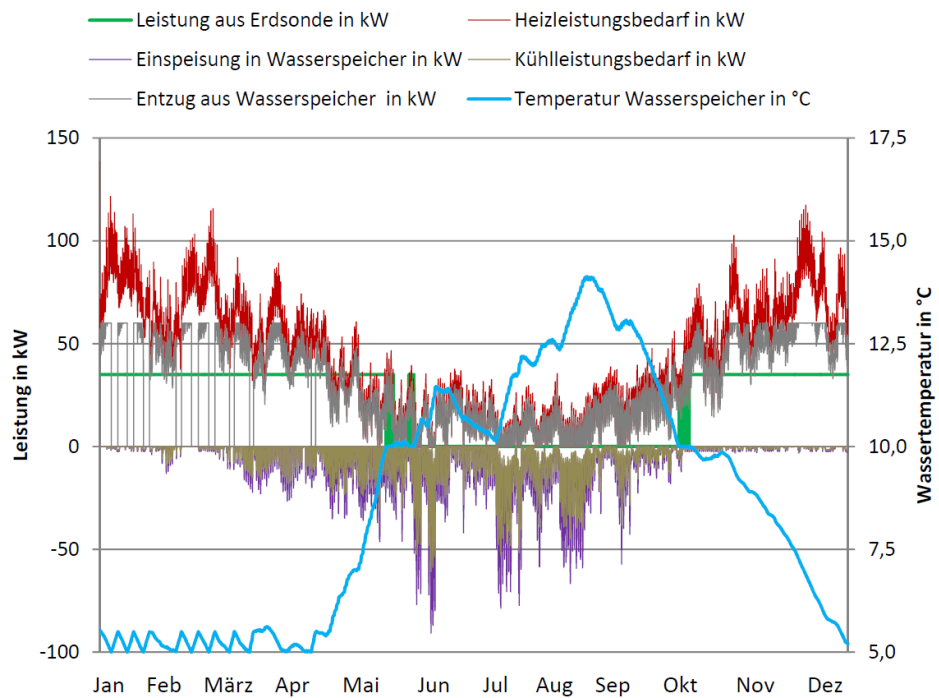


Bild 21:
Grafische Darstellung der Ergebnisse aus der Gebäude- und Anlagensimulation. [Quelle: Tichelmann & Barillas].

Die Gebäude- und Anlagensimulation hat somit das gewählte Energiekonzept bestätigt und gezeigt, dass durch die Einbindung des Wasserreservoirs der effiziente Betrieb der Wärmepumpe und Kompressionskälteanlage sowie des BHKWs möglich ist.

In Bild A 1.13 ist das komplette Anlagenschema der Wärme- und Kälteversorgung dargestellt. Es sind auch bereits die Wärmemengenzähler eingetragen, die für ein Monitoring notwendig sind.

8.2.2 Lüftung

Jede der 5 Hallen sowie Küche, Werkstatt, Magazin und Café erhalten eine separate Lüftungsanlage. Zur Konditionierung des Dachraumes, der in Halle 1 und Halle 3 zwischen der Dachverglasung und der Lichtdecke liegt, werden ebenfalls Lüftungsanlagen eingesetzt. Die Volumen der Räume sowie die Außenluft-, Fortluft- und Umluftvolumenströme sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Die Außenluftwechsel der Hallen liegen zwischen $1,1 \text{ h}^{-1}$ und $2,6 \text{ h}^{-1}$. Die geplanten Luftwechsel von $2,6 \text{ h}^{-1}$ in Halle 3 und $2,2 \text{ h}^{-1}$ in Halle 4 werden als zu hoch erachtet. Dieser hohe Außenluftwechsel sollte nur in Extremsituationen

bei hoher Besucherfrequenz umgesetzt werden, denn er führt zu hohen Lüftungswärmeverlusten und zu hohen Ventilatorstromverbräuchen.

Tabelle 7:
Zusammenstellung der Raumvolumen sowie Angabe der Außenluft-, Fortluft- und Umluftvolumenströme.

Raum	Volumen	Außenluft	Fortluft	Luftwechsel	Umluft
	m ³	m ³ /h	m ³ /h	1/h	m ³ /h
Halle 1	1.730	2.400	2.400	1,4	3.460
Halle 2	1.350	1.500	1.500	1,1	2.700
Halle 3	2.850	7.380	7.380	2,6	0 - 6.000
Halle 4	1.670	3.750	3.750	2,2	5.595
Halle 5	1.680	2.400	2.400	1,4	5.040
Café	610	2.600	2.600	4,3	-
Vortragsraum	112	1.000	1.000	8,9	-
Küche	170	1.000 - 3.500	1.000 - 3.500	6 - 20	-
Werkstatt	486	3.660	3.660	-	-
Magazin	581	4.060	4.060	-	-
Dachoberlicht H1	213	3.000	3.000	-	-
Dachoberlicht H3	537	3.000	3.000	-	-

Im Café und Vortragsraum sind die Luftwechsel höher, da diese Räume zu bestimmten Zeiten eine hohe Belegungsdichte aufweisen können. In der Küche werden aus hygienischen Gründen hohe Werte gefordert. Für die übrigen Räume sind die Werte nicht angegeben, da mit den entsprechenden Anlagen nicht nur die in der Tabelle angegebenen Räume, sondern auch noch Nebenräume mitversorgt werden.

Bis auf die Anlagen der Küche und der Dachräume sind alle Anlagen mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet, wie anhand Tabelle 8 zu sehen ist.

Tabelle 8:
Zusammenstellung der Aufstellungsorte der Lüftungsanlagen sowie Angabe der Wärmerückgewinnungstechnik.

Raum	Wärmerückgewinnung	Luftkonditionierung	Standort der Anlage
Halle 1	WRG mit KVS	H/K/B/E *	BT1-ZWG 00.02
Halle 2	WRG mit KVS	H/K/B/E	BT1-ZWG 00.04
Halle 3	WRG mit KVS	H/K/B/E	BT2-UG2 00.06
Halle 4	WRG mit KVS	H/K/B/E	BT1-ZWG 00.07
Halle 5	WRG mit KVS	H/K/B/E	BT1-ZWG 00.03
Café	WRG	H/K	BT1-UG2 00.22
Vortragsraum	WRG	H/K	BT2-UG1 00.xx
Küche	Nein	H/K	BT1-UG1 00.08
Werkstatt	WRG mit KVS	H	BT2-UG3 00.15
Magazin	WRG mit KVS	H/K/B/E	BT2-UG1 00.03
Dachoberlicht H1	Nein	H	Dachraum Halle 1
Dachoberlicht H3	Nein	H	Dachraum Halle 3

* H: Heizen; K: Kühlen; B: Befeuchten; E: Entfeuchten

Überwiegend wird sie über ein Kreislaufverbundsystem (KVS) realisiert. Hierbei wird im Abluftvolumenstrom ein Wärmetauscher eingebaut, der die Abluftwärme auf einen Wasserkreislauf überträgt. Diese Wärme wird dann wiederum über einen Wärmetauscher, der im Zuluftvolumenstrom installiert ist, an die Zuluft übertragen. Die Dachräume werden nur so konditioniert, dass im Winter an den kalten Bauteilen kein Tauwasser ausfällt. Im Sommer sorgt die Anlage für einen hohen Luftwechsel, um die überschüssige Wärme abzutransportieren. Da sich im Dachraum der Halle 1 und 3 jeweils eine horizontale Jalousie für die Verdunklung des darunterliegenden Raumes befindet, wird dieses Volumen in eine untere und eine obere Hälfte unterteilt. Damit im gesamten Dachraum die gleichen thermischen und hygri-schen Luftkonditionen vorliegen, wird mittels Lüftungsanlage im Dachraum jeweils unterhalb und oberhalb der Jalousie die belastete Luft abgezogen und nach außen abgeführt. Mit einer weiteren Anlage wird diesen Bereichen dann die gleiche Außenluftmenge wieder zugeführt. Die Anlagen sind ohne Wärmerückgewinnung geplant. Falls eine Erwärmung der Zuluft an kalten Wintertagen notwendig ist, erfolgt dies über eine elektrische Widerstandsheizung.

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. Es zeigte sich im Verlaufe der Planung, dass es schwierig ist, genügend Platz für das Aufstellen der Anlagen zu finden. Die Anlagen der Hallen 1, 2, 4 und 5 werden in den beiden Zwischengeschossen zwischen Halle 1 und 2 sowie zwischen Halle 2 und 3 untergebracht. Die Anlage der Halle 3 kommt in das zweite Untergeschoss in den Raum zwischen Wasserspeicher und Hochzeitsturm.

Während der integralen Planung wurde auch intensiv darüber diskutiert, welche Art von Luftbefeuchter verwendet werden sollte. Betrachtet wurden Kontaktbefeuchter, welche die Verdampfungsenthalpie aus der zu befeuchtenden Luft entnehmen. Da die dafür nötige Wärme über die Wärmepumpe oder das BHKW erzeugt wird, würde es sich hierbei um eine primärenergetisch sinnvolle Art der Befeuchtung handeln. Problematisch an Kontaktbefeuchtern ist allerdings deren hygienisch nicht einwandfreier Betrieb, weshalb auch von deren Verwendung abgesehen wurde. Eine hygienisch unbedenklichere und trotzdem primärenergetisch gute Variante ist der Kaltdampfbefeuchter, bei welchem Wasser unter hohem Druck in Düsen vernebelt wird. Die feinen Kaltdampf-Tröpfchen verdunsten dann im Zuluftstrom und entnehmen die dafür nötige Verdampfungsenthalpie, wie auch der Kontaktbefeuchter, der Zuluft. Dafür ist allerdings eine ausreichende Verdunstungsstrecke vorzusehen, welche leider nicht vorhanden ist. Deshalb musste auf die primärenergetisch weniger effiziente Befeuchtung über elektrisch getriebene Heißdampfbefeuchter zurückgegriffen werden, mit deren Betrieb auch schon früher Erfahrungen in der Mathildenhöhe gesammelt wurden.

Für die Hallen ist im Normalbetrieb ein Außenluftwechsel geplant, wie in Tabelle 7 angegeben. Dieser kann und soll jedoch entsprechend der Anzahl der Museumsbesucher angepasst werden. Empfohlen wird hier eine Regelung entsprechend dem CO₂-Gehalt der Raumluft. Hierzu müsste ein CO₂-Sensor in den Abluftkanal der Lüftungsanlage installiert werden.

Der in Tabelle 7 angegebene Umluftanteil ist für die Beheizung der Hallen nötig und erfordert somit hohe Betriebszeiten. Deshalb wurde im Verlauf des Projektes besonders darauf geachtet, dass die Druckverluste in der Lüftungsanlage und im Verteilnetz trotz der eingeschränkten Platzverhältnisse möglichst gering sind und die Effizienz der Ventilatoren möglichst groß ist.

Das Vorheizregister wird hauptsächlich über die Wärmepumpe versorgt, während das Nachheizregister aufgrund des höheren Temperaturniveaus meist über das BHKW versorgt wird.

8.2.3 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 Ausstellungshallen individuelle Lösungen zur Maximierung der thermisch aktivierbaren Wand- und Deckenflächen durchgeführt. 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 historischen Vollholz-Bodenbelag in Einklang zu bringen ist. Dadurch ist die Gesamtfläche der aktivierbaren Bauteile allerdings sehr begrenzt. Beispielhaft sind in Bild 22 für die Halle 1 Bestimmung und Festlegung der aktivierbaren Flächen dargestellt (rot), welche sich in dem dargestellten Fall auf 213 m² summieren. Neben den thermisch aktivierten sind auch die Flächen angegeben, die einen Akustikputz erhalten (blau). Bei den thermisch aktivierten Flächen handelt es sich um einen ein Meter breiten Wandstreifen im unteren Wandbereich und einen ebenfalls ein Meter breiten Streifen an den Längswänden im oberen Wandbereich. Ferner sind auch die gewölbten Deckenflächen thermisch aktiviert. Die Bild A 1.14, Bild A 1.15 und Bild A 1.16 zeigen die thermisch aktivierten Flächen der Hallen 2, 3 und 4.

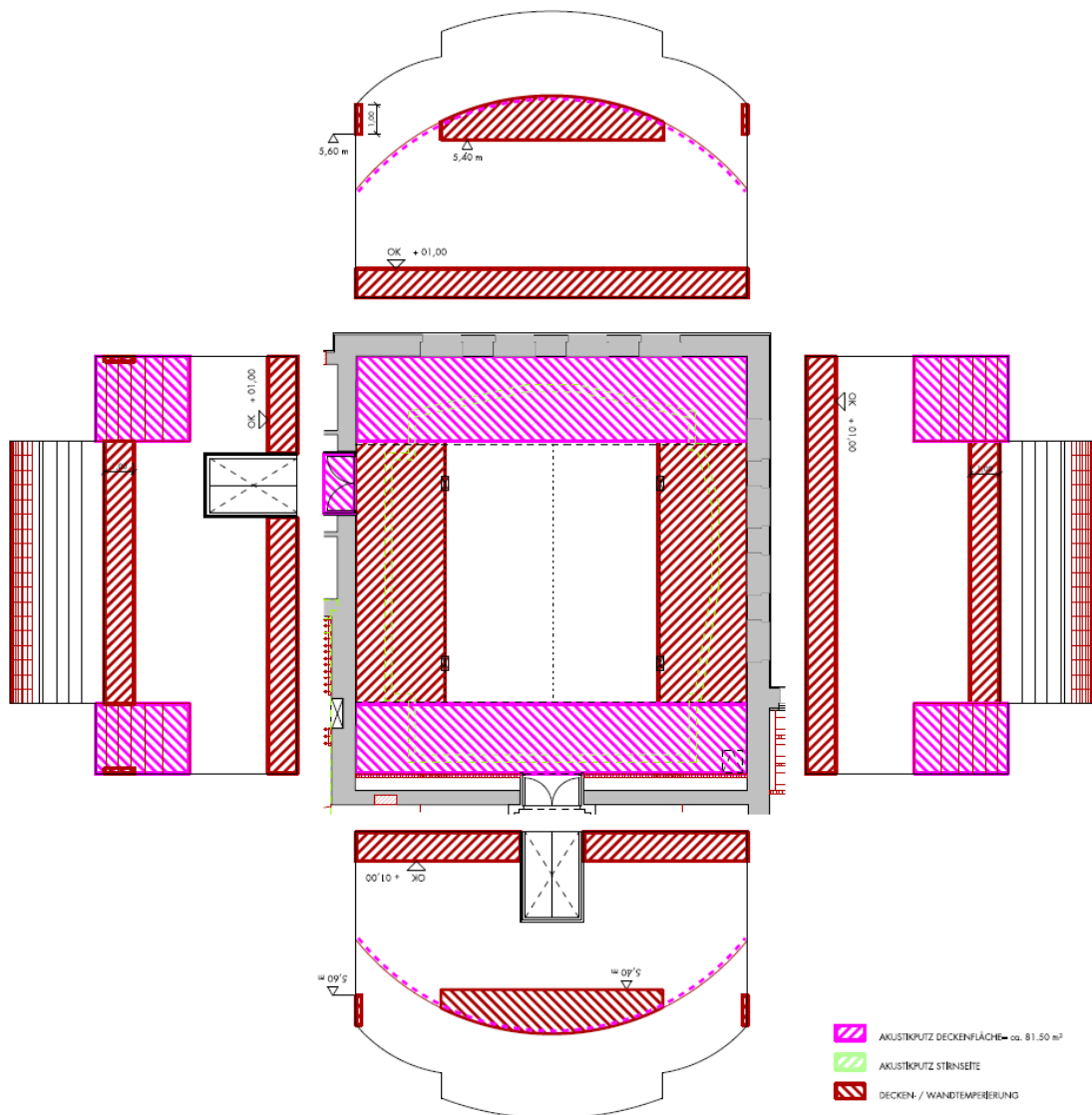


Bild 22:
Darstellung der thermisch aktivierten Flächen (rot) und der mit Akustikputz versehenen Flächen (blau) in Halle 1 [Quelle: Schneider + Schumacher].

Um mit der begrenzt vorhandenen thermisch aktivierbaren Fläche eine möglichst hohe Kühl- bzw. Heizleistung in den Ausstellungshallen bereitzustellen, wurden verschiedene Systeme betrachtet. Aufgrund der höchsten thermischen Leistung und der geringen Aufbauhöhe wird nach derzeitigem Planungsstand auf die in Bild 23 dargestellten Kapillarrohmatten zurückgegriffen. Diese werden auch an Außenwänden ohne rückwärtige Dämmung verbaut, da die dadurch entstehenden Aufbauten im Hängebereich der Bilder über Plattenbaustoffe oder Putzschichten hätten ausgeglichen werden müssen. Aufgrund der häufig wechselnden Ausstellungen und der damit verbundenen regelmäßig

notwendigen Umbaumaßnahmen werden eine Vielzahl von Bohrungen an verschiedenen Stellen über die Jahre nötig, wodurch die statische Integrität der Ausgleichsschichten nach absehbarer Zeit nicht mehr gegeben wäre. Die wasserführenden Kapillarrohre werden somit in die bestehende Wand eingelassen. Es ist vorgesehen, den bestehenden Innenputz von diesen Flächen abzutragen und danach die Kapillarrohrmatten auf einer Trägermatte zu befestigen. Zum Abschluss erfolgt das Einputzen der Matten. Die nicht aktivierten Wandflächen erhalten eine Putzausgleichsschicht, damit die fertige Oberfläche keine Stufen aufweist.

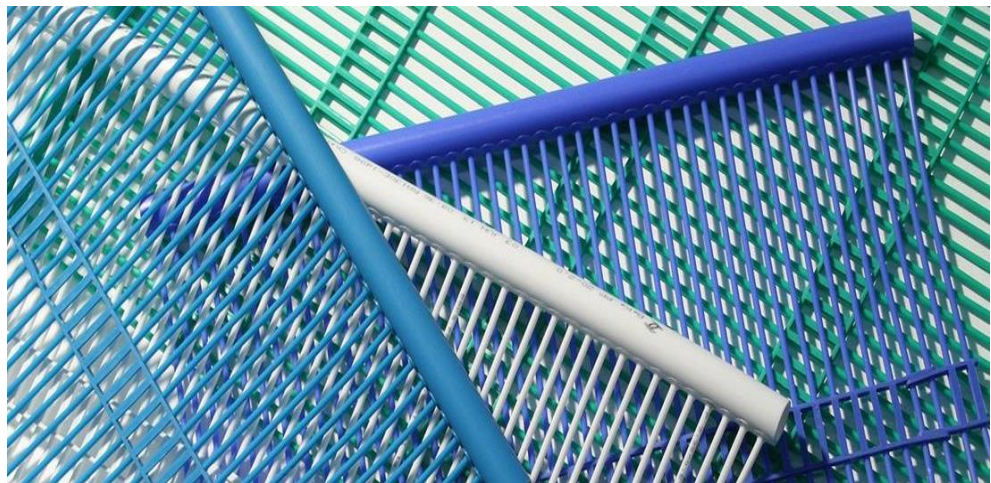


Bild 23:
Kapillarrohrmatten zur Herstellung von Wand- und Deckenheizungen. Quelle: beka-klima.de [Quelle: Clina].

Durch die Aktivierung der Wand- und Deckenflächen können z. B. in Halle 1 rund 50 % der rechnerischen Heizlast und 100 % der errechneten Kühllast gedeckt werden. Dadurch kann im Winter der erforderliche Umluftvolumenstrom für die Beheizung der Halle durch die Lüftungsanlage im Vergleich zum Bestand deutlich reduziert werden. Dadurch werden große Mengen an Antriebsenergie für die Ventilatoren eingespart.

Bild 24 zeigt den Querschnitt durch die Halle 3 mit Angabe der thermisch aktivierten Wandflächen. Auf dem Bild ist ferner zu erkennen, dass die Zuluft von oben in die Halle eingblasen und von unten abgezogen wird. Dies erfolgt in allen Hallen in der gleichen Weise. Darüber hinaus ist die Verdunklungsanlage im Dachraum erkennbar, die, wie unter Kapitel 8.2.2 beschrieben, den Dachraum in eine untere und eine obere Zone unterteilt.

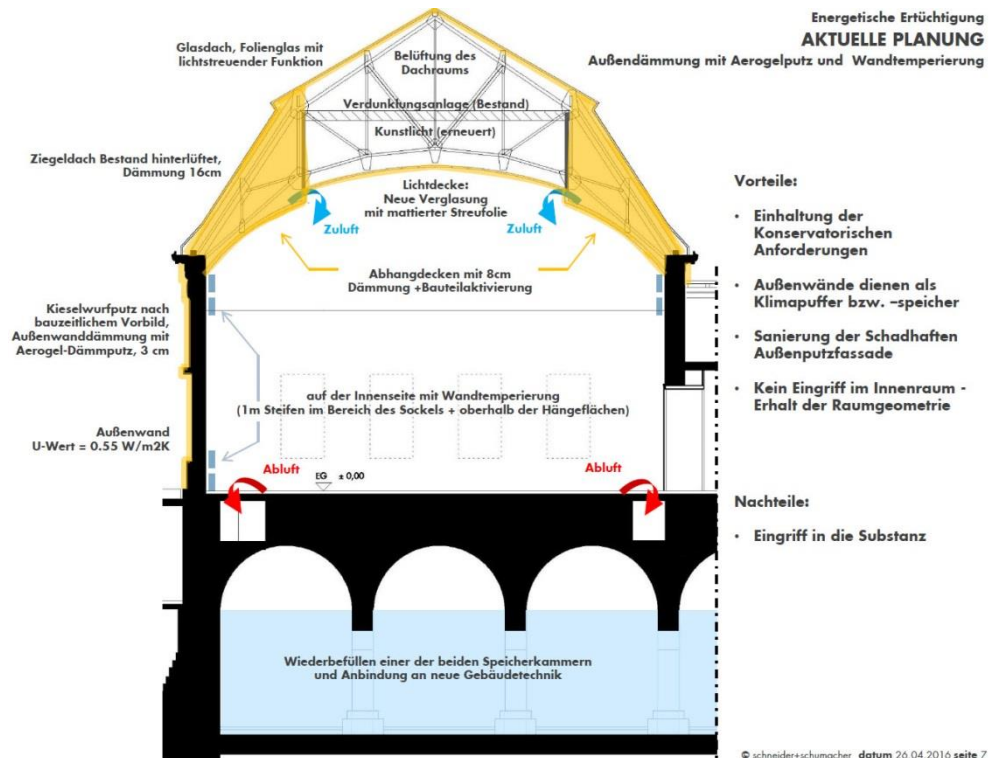


Bild 24: Querschnitt von Halle 3 mit Angabe der thermisch aktivierten Wandflächen sowie Darstellung der Zu- und Abluftführung in der Halle [Quelle: Schneider + Schumacher].

In Bild A 1.17 ist ein Schnitt mit den thermisch aktivierten Wand- und Deckenflächen von Halle 3 sowie der Zu- und Abluftführung von Halle 3 und Halle 4 zu sehen.

Eine weitere Form der Bauteilaktivierung erfolgt im Vortragssaal, der zwischen dem Hochzeitsturm und der Halle 3 neu erstellt wird. Es handelt sich hierbei um die Umsetzung einer Betonkernaktivierung in der Decke des Raumes.

8.2.4 Wärme- und Kälteerzeuger

Wie in Kapitel 8.2.1 erwähnt, wird im Heizfall die Grundlast mit dem BHKW erzeugt, da ein BHKW wirtschaftlich ist, wenn es eine lange Laufzeit aufweist. Ferner ist die Schadensanfälligkeit bei einer geringeren Taktung deutlich kleiner. Wird vom Gebäude eine höhere Heizlast angefordert, werden die Wärmepumpen zugeschaltet, die auf der Primärseite die Wärme vom Speicher beziehen. Kühlt der Speicher bis auf 5 °C ab, bezieht er weitere Energie über die Erdsonden aus dem Erdreich. Der Brennwert-Spitzenlastkessel wird hinzugeschaltet, wenn Lastspitzen abgedeckt werden müssen. Im Kühlfall geben die Kältemaschinen die Wärme an den Speicher ab. Erwärmt sich dieser über 25 °C, wird die Speicherwärme mittels Pumpen an das Erdreich abgegeben.

Die Wärmepumpen und Kühlmaschinen werden im 2. UG südlich der Café-räume im Raum 00.06 untergebracht. Die BHKW's und die Spitzenlastkessel, die einen Schornstein benötigen, kommen in das nebenan liegende Ernst-Ludwig-Haus.

8.2.5 Wasserspeicher als Energiespeicher

Zur Validierung des Energiekonzeptes wurden detaillierte Berechnungen angestellt, um die maximale Betriebssicherheit für die Ausstellungshallen sicherzustellen. Im Mittelpunkt dieser Betriebssicherheit steht das historische Wasserreservoir, welches für die Hoch- und Spitzenlastzeiten eine ausreichend große Menge Wärme- bzw. Kältepuffer bereitstellen soll. Im Folgenden soll mit einer einfachen Überschlagsrechnung gezeigt werden, dass das historische Wasserreservoir aufgrund seiner Größe diesen Anforderungen gerecht werden kann.

Mit seinem Füllvolumen von 2.400 m³ und den gesetzten Temperaturgrenzen zwischen 5 und 25 °C ergibt sich aufgrund des Wassers eine thermische Speicherkapazität von rund 55.000 kWh. Die massiven Außenwände (ohne Boden) mit Dicken zwischen 1,5 und 2,6 m tragen durch ihre thermische Speichermasse weitere 19.000 kWh zur Speicherkapazität bei. Es ist geplant, das Wasserreservoir nach dem Winter auf 5 °C abgekühlt zu haben; aufgrund von Wärmegewinnen über die Hüllflächen des Wasserreservoirs ergibt sich eine über den Sommer nutzbare eingespeicherte Kälte von rund 45.000 kWh. Nach dem Sommer, wenn der Wasserspeicher mit 25 °C aufgewärmt wurde, kann nach Berücksichtigung von Speicherverlusten und Gewinnen über den Winter mit einer nutzbaren eingespeicherten Wärme von 60.000 kWh gerechnet werden.

Die Erzeugernutzkälteabgabe der Kompressionskälteanlage wurde anhand der DIN V 18599 bestimmt und beträgt rund 93.000 kWh/a. Diese Energiemenge wird als Abwärme dem Wasserreservoir zugeführt. Die darin gespeicherte Kälte ist dafür nicht ausreichend, weshalb mindestens 48.000 kWh pro Jahr zusätzlich über die Erdwärmesonden rückgekühlt werden müssen. Diese Größenordnung ist mit den 7 geplanten Erdwärmesonden mit einer Länge von jeweils 200 m kein Problem. Laut der bereits erwähnten Vorstudie [7] können mit 7 Erdwärmesonden ca. 140 MWh Wärme in das Erdreich eingebracht werden. Somit stehen zum einen noch ausreichend Reserven für einen geänderten Betrieb des Museums (höhere interne Lasten, kühlere Innenraumtemperaturen) oder extrem heiße Sommer zu Verfügung. Außerdem kann so noch Wärme aus dem stromgeführten Betrieb des BHKWs abgeführt werden.

Für die Wärmeversorgung der Ausstellungshallen kann das Wasserreservoir ebenfalls einen großen Beitrag leisten. Anhand der nutzbaren eingespeicherten Wärme von 60.000 kWh kann über die prognostizierte Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 4,3 eine Heizwärmeerzeugung von 78.000 kWh/a realisiert

werden. Dies entspricht rund 20 % der gesamten erforderlichen Nutzwärme von 404.000 kWh für die Beheizung der Mathildenhöhe. Die verbleibenden Anteile könnten mit 270 MWh größtenteils über die Erdwärmesonden bereitgestellt und der Rest über das BHKW erzeugt werden.

8.2.6 Beleuchtung

Generell werden im Rahmen der energetischen Sanierung der Ausstellungshallen der Mathildenhöhe alle vorhandenen Beleuchtungsanlagen in den Umbau- bzw. Sanierungsbereichen demontiert und durch neue Leuchten ersetzt. Es werden, soweit dies technisch möglich ist, ausschließlich Leuchten mit energiesparenden LED-Leuchtmitteln installiert. Die Ausführung der einzusetzenden Leuchten wird entsprechend den Anforderungen des jeweiligen Einbauortes, der Beleuchtungsaufgabe und den architektonischen Anforderungen ausgewählt. Für die Festlegung der erforderlichen Leuchtenanzahl sowie deren notwendigen Wattage und genauen Platzierung wird im Rahmen der Ausführungsplanung eine detaillierte Beleuchtungsberechnung erstellt. Die zu realisierenden Beleuchtungsstärken sowie die sonstigen zu beachtenden Beleuchtungsanforderungen sind entsprechend der Nutzung des jeweiligen Raumes und der spezifischen Sehaufgabe nach DIN EN 12464-1 »Beleuchtung von Arbeitsstätten« vorgegeben.

Allgemeine Beleuchtung

Die allgemeine Raumbelichtung der Ausstellungshallen 1 und 3 erfolgt wie bisher über die hinterleuchteten Glasdecken. Oberhalb dieser Glasdecken befinden sich im Dachraum Tragekonstruktionen aus Profilstahl, an denen entsprechende Lichtbänder mit Freistrahler-Leuchten installiert werden. Diese Freistrahler-Leuchten werden mit LED-Stablampen bestückt. Entsprechend den Anforderungen der Ausstellungen bzw. sonstiger Veranstaltungen in den Ausstellungshallen besteht die Möglichkeit, die Beleuchtungsstärke durch eine entsprechende Dimmung dieser Leuchten anzupassen. Die Bedienung dieser Allgemeinbeleuchtung erfolgt über ein Lichtsteuertableau mit Touch Panel, das im Garderobenraum installiert wird. In der Ausstellungshalle 2 – diese hat keine Glasdecke – wird die allgemeine Beleuchtung über entsprechende Lichtstrahler realisiert. Diese Strahler werden, ebenso wie die Strahler zur spezifischen Objekt- und Akzentbeleuchtung, in geeigneten Stromschienensystemen installiert. Hierzu werden mehrere parallel verlaufende Stromschienen in Längsrichtung der Halle in der Bogendecke eingebaut. Alle Strahlersysteme sind mit entsprechenden LED-Leuchtmitteln ausgestattet. Diese Strahlersysteme findet man auch als zusätzliche Objekt- bzw. Akzentbeleuchtung in den übrigen Ausstellungshallen.

Die technische und optische Ausführung der Leuchten wird entsprechend der Verwendung der einzelnen Räume bzw. Funktionsbereiche festgelegt. Entsprechend den Abstimmungen mit den Nutzern und den Ergebnissen der Beleuchtungsberechnungen erfolgt die genaue Ausführung der Leuchten sowie deren Platzierung und Anordnung. Die Ausleuchtung der untergeordneten Nebenräume und Technikräume erfolgt mit Anbauleuchten als Wannenleuchten bzw. als Freistrahlerleuchten.

Objektbeleuchtung

Zur individuellen Beleuchtung der Ausstellungsobjekte werden spezifische Strahlersysteme eingesetzt. Für die detaillierte Ausführung und Anordnung der Strahlersysteme müssen die konservatorischen Anforderungen entsprechend berücksichtigt werden. Die erforderlichen Strahler werden je nach Bedarf in geeigneten Stromschienensystemen installiert. Hierzu werden mehrere parallel verlaufende Stromschienen in Längsrichtung der Hallen 1, 2 und 3 in den Bogendecken eingebaut. In der Halle 4 erfolgt die Montage der Stromschienen an den unteren Querträgern der Dach-Jets. Alle Strahlersysteme werden mit entsprechenden LED-Leuchtmitteln ausgestattet. Die Einstellung der Beleuchtungsstärke sowie des Beleuchtungsfeldes und dessen geometrische Ausrichtung erfolgt entsprechend der konservatorischen Vorgaben individuell an jedem einzelnen Strahler durch manuelle Verstellung.

Notbeleuchtung

Entsprechend den Anforderungen aus dem aktuellen Brandschutzkonzept werden zur Kenntlichmachung der Notausgangstüren und der Fluchtwege entsprechend beleuchtete Rettungszeichen und einzelne Sicherheitsleuchten installiert. Die Sicherheitsbeleuchtung kommt in Dauer- und Bereitschaftsschaltung gemäß der VDE 0108 und DIN EN 50172 zur Ausführung. Die Versorgung der Sicherheitsbeleuchtung erfolgt aus der vorhandenen zentralen Batterieanlage mit Sicherheitslichtgerät. Die Kapazität der vorhandenen Batterieanlage wird den aktuellen Bedürfnissen und dem erforderlichen Bedarf angepasst.

9 Energetische Bewertung

Auf Basis der detailliert durchgeführten Bestandserfassung der Außenbauteile und der Anlagentechnik konnte mit dem in DIN V 18599 [10] festgelegten Rechenverfahren der Energiebedarf für das Gebäude sowohl für den Zustand vor als auch nach der Sanierung berechnet werden. Zum Gebäude gehören die Ausstellungshallen, das Magazin, die Werkstatt und das zwischen Halle 3 und Hochzeitsturm liegende Büro, sozusagen der gesamte zusammenhängende Gebäudekomplex, jedoch ohne Hochzeitsturm.

9.1 Zustand vor Sanierung

Am Beispiel des Erdgeschosses ist in Bild 25 die Zonierung der Mathildenhöhe nach DIN V 18599 dargestellt.

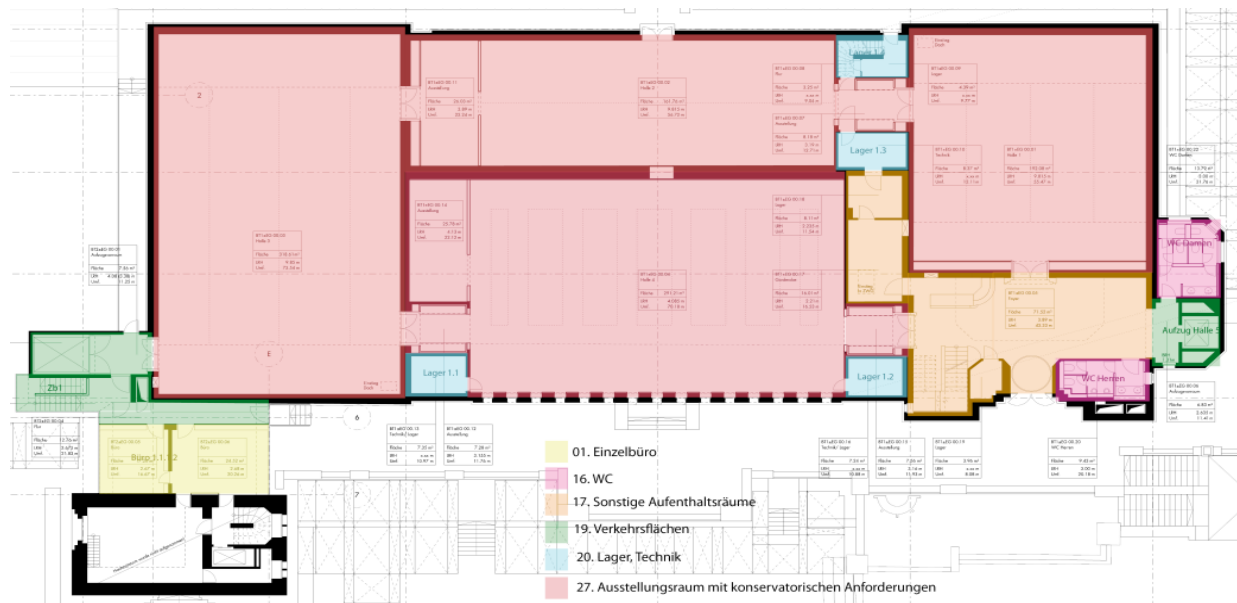


Bild 25:
Zonierung des Erdgeschosses der Mathildenhöhe für die Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599 [Quelle: IBP].

Für das Jahr 2008 lagen monatliche Ablesungen des Stromzählers bereit, welche zur Validierung der Energiebedarfsberechnung herangezogen werden konnten. In Tabelle 2 sind die U-Werte der Bestandsaußenbauteile zusammengestellt.

Für den Ist-Zustand der Mathildenhöhe ergibt sich für das deutsche Referenzklima (Potsdam) nach DIN V 18599 ein Endenergiebedarf von 1.261.036 kWh. Da im Ist-Zustand ausschließlich Strom als Energieträger verwendet wurde, kann dieser Endenergiebedarf näherungsweise mit dem gemessenen Stromverbrauch von 2008 (1.400.000 kWh) für die Mathildenhöhe (ohne Hochzeitsturm) verglichen werden. Die Jahresmitteltemperatur in Darmstadt lag im Jahr 2008 mit 10,8 °C um 1,9 K über der Jahresmitteltemperatur des Referenzklimas von Potsdam. Ein berechneter Endenergiebedarf für das Jahr 2008 mit den in dem Jahr in Darmstadt vorgelegenen Wetterdaten würde demnach noch etwas unterhalb der mit dem deutschen Referenzklima berechneten Werten liegen.

Es handelt sich beim gemessenen Verbrauch allerdings um den Gesamtverbrauch einschließlich Nutzerstrom (z. B. Stromverbrauch für Kaffee- und Spül-

maschinen im Café). Der berechnete Energieverbrauch umfasst den Stromverbrauch der gesamten Heiz-, Kühl- und Lüftungstechnik einschließlich der Beleuchtung, nicht aber den Nutzerstrom.

In Bild 26 ist der Endenergiebedarf der Mathildenhöhe im Bestand nach DIN V 18599 im Jahresverlauf dargestellt. Der im Winter für die Kühlung ausgegebene Endenergiebedarf entspricht dem Energiebedarf für die Befeuchtung der trockenen Außenluft, es handelt sich dabei also nicht um einen Kältebedarf, sondern um einen Strombedarf für die elektrisch betriebene Dampf-befeuchtung. Außerdem wird aus Bild 26 ersichtlich, wie viel Energie für die Beförderung der Luft aufgrund der Umluftheizung benötigt wird.

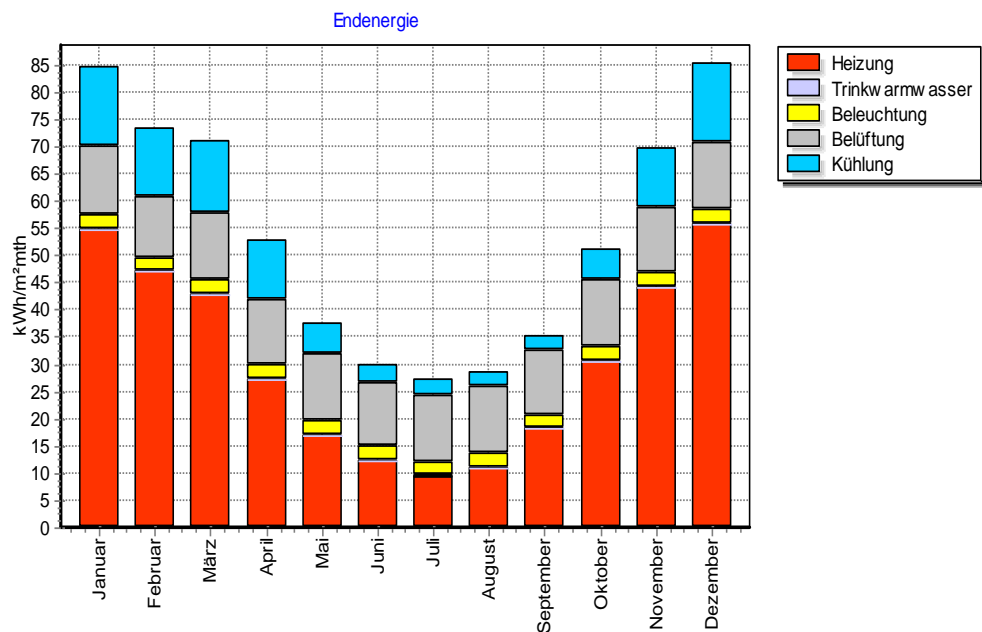


Bild 26:
Endenergiebedarf der Mathildenhöhe im Zustand vor der Sanierung [Quelle: IBP].

9.2 Zustand nach der Sanierung

Auch der Energiebedarf des künftig sanierten Gebäudes kann nach dem gleichen Verfahren gemäß derzeitigem Planungsstand berechnet werden. Die U-Werte der gedämmten Hüllflächenbauteile sind in Tabelle 6 zusammengestellt und die Anlagentechnik ist in Kapitel 8.2 »Anlagentechnische Sanierungsmaßnahmen« beschrieben. Die mit diesen Annahmen ermittelten Energiebedarfs-werte sind in Bild 27 monatsweise dargestellt.

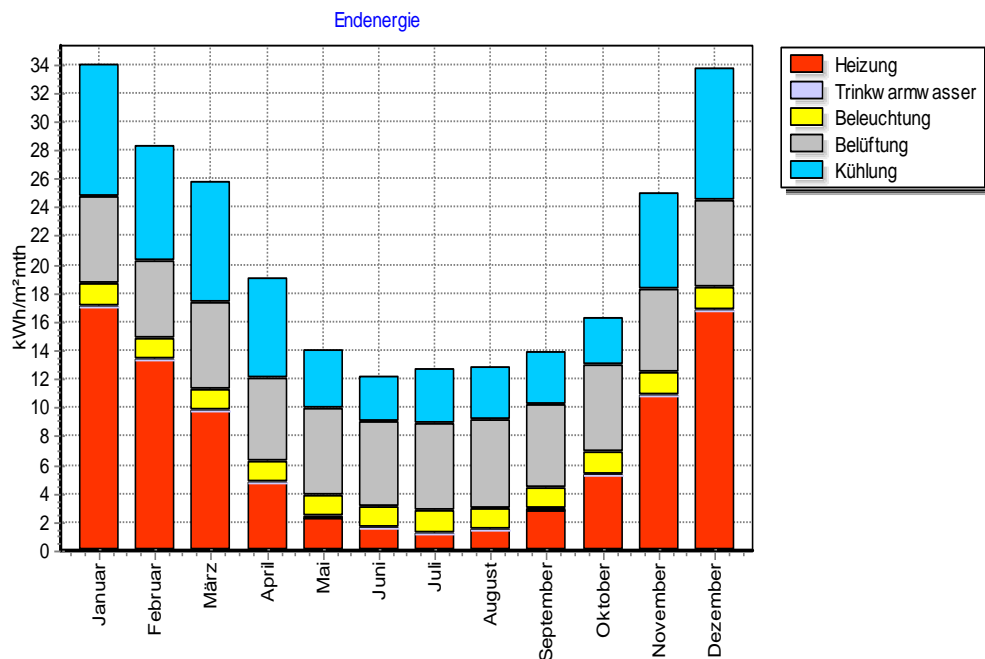


Bild 27:
Endenergiebedarf der Mathildenhöhe im Zustand nach der Sanierung [Quelle: IBP].

Aufgrund der baulichen und anlagentechnischen Sanierungsmaßnahmen kann der Endenergiebedarf der Mathildenhöhe nach DIN V 18599 um 61 % auf 497.996 kWh/a reduziert werden. Auch hier wird ersichtlich, dass die Luftbeförderung noch einen sehr großen Anteil am Endenergiebedarf aufweist, da trotz der Sanierung noch große Luftmengen zur Beheizung der Ausstellungshallen befördert werden müssen. Innerhalb der einzelnen Bedarfsgruppen konnte eine unterschiedlich starke Reduzierung des Endenergiebedarfs erreicht werden.

Der Vergleich des Bedarfs vor und nach der Sanierung ist in Tabelle 9 zusammengestellt und in Bild 28 graphisch dargestellt. So zeigt sich, dass der Endenergiebedarf für die Beheizung um 74 % gesenkt werden konnte, während der Bedarf für Beleuchtung um 48 %, für Belüftung um 52 % und für Kühlung nur um 36 % reduziert werden konnte.

Tabelle 9:
Zusammenstellung der nach DIN V 18599 berechneten Endenergie- und Primärenergiebedarfskennwerte vor und nach der Sanierung sowie Angabe der prozentualen Einsparungen.

Bezeichnung	Vor Sanierung		Nach Sanierung		Einsparung	
	Endenergie	Primärenergie	Endenergie	Primärenergie	Endenergie	Primärenergie
	kWh/a	kWh/m²a	kWh/a	kWh/m²a	%	%
Heizung	674.422	1.618.612	177.271	288.209	74	82
Trinkwarmwasser	553	1.327	553	1.327	0	0
Kühlung	223.254	457.091	143.672	311.966	36	32
Lüftung	299.338	718.411	143.235	343.764	52	52
Beleuchtung	63.469	152.325	33.265	79.836	48	48
Gesamt	1.261.036	2.947.765	497.996	1.025.102	61	65

Vergleich Endenergiebedarf nach DIN V 18599 vor und nach der Sanierung

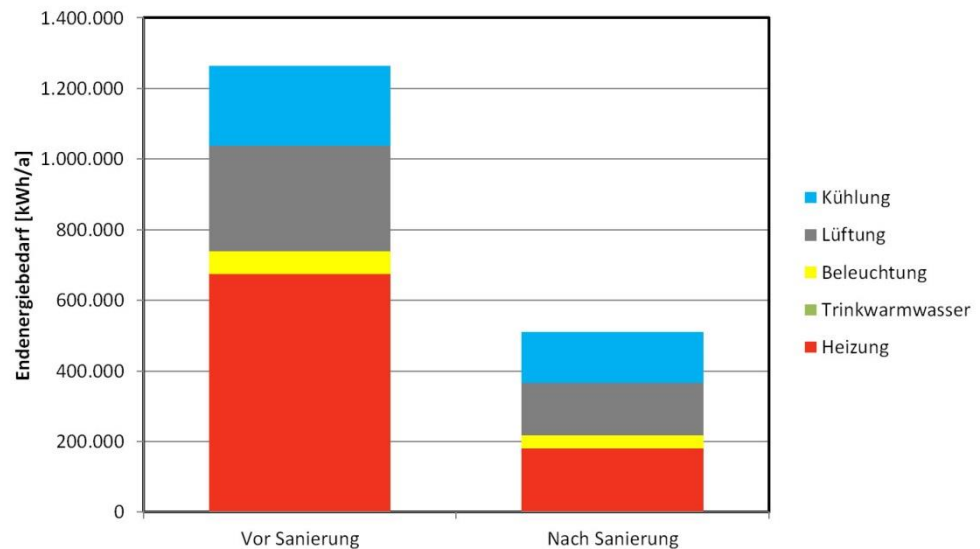


Bild 28:
Gegenüberstellung des nach DIN V 18599 berechneten Endenergiebedarfs vor und nach der Sanierung [Quelle: IBP].

Aus primärenergetischer Sicht wird der Energiebedarf nach DIN V 18599 durch die Sanierung für Heizzwecke um 82 %, für die Beleuchtung um 48 %, für die Lüftung um 52 % und für die Kühlung um 32 % gesenkt.

Die insgesamt erreichte Reduzierung des Endenergiebedarfs beträgt 61 % und die des Primärenergiebedarfs 65 %. Dies zeigt deutlich die Wirksamkeit der in-

tegralen Planung bei der Sanierung von Gebäuden mit hochkomplexen klimatischen und konservatorischen Anforderungen.

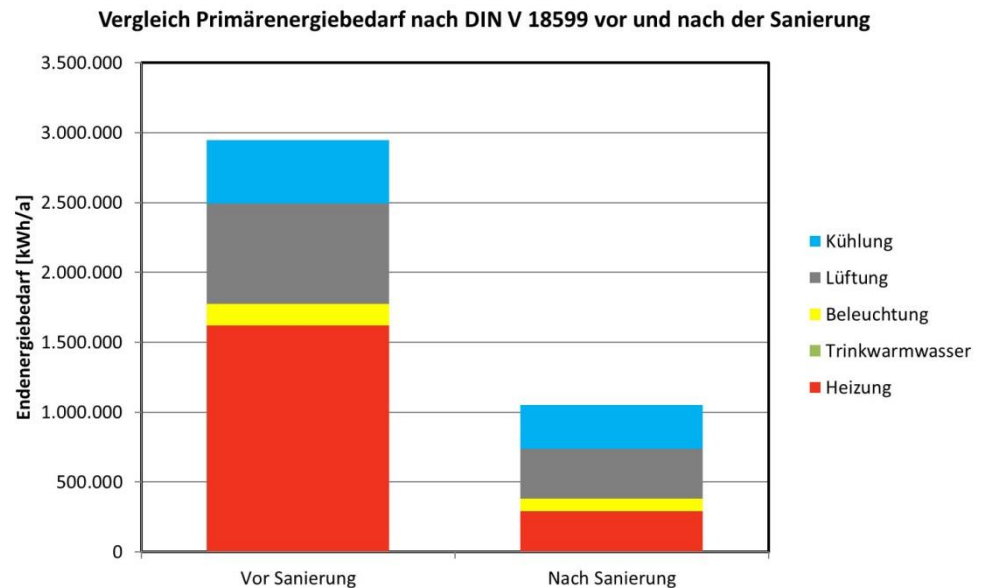


Bild 29: Vergleich des nach DIN V 18599 berechneten Primärenergiebedarfs vor und nach der Sanierung [Quelle: IBP].

9.3 Energetischer Einfluss der Aerogel-Dämmung

Wie bereits in Kapitel 8.1.1 erwähnt, wird der U-Wert der Außenwand durch den Aerogel-Wärmedämmputz von $1,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf $0,52 \text{ W/m}^2\text{K}$ mehr als halbiert. Dadurch halbieren sich auch die Transmissionswärmeverluste durch die Außenwände. Neben diesen Transmissionswärmeverlusten durch die Wände gibt es natürlich noch weitere durch Dach, Fenster und Boden. In Tabelle 10 ist in der dritten Zeile der Wertetabelle der End- und Primärenergiebedarf für den Fall ohne Aerogel-Wärmedämmputz mit 525.923 kWh/a (Endenergie) und $1.071.551 \text{ kWh/a}$ (Primärenergie) angegeben. Der Fall mit Aerogel-Wärmedämmputz steht zum Vergleich eine Zeile höher. Die Einsparung an Endenergie beträgt somit 27.927 kWh/a . Prozentual sind dies $5,6 \%$.

Tabelle 10:
Zusammenstellung des End- und Primärenergiebedarfs für den Fall mit Aerogel-Wärmedämmputz, so wie geplant, und ohne Aerogel-Wärmedämmputz. Ferner Angabe des End- und Primärenergiebedarfs des Referenzgebäudes nach EnEV 2014 [11].

Bezeichnung	Endenergie		Primärenergie	
	kWh/a	kWh/m ² a	kWh/a	kWh/m ² a
Vor Sanierung	1.261.035	611	2.947.765	1.428
Nach Sanierung (Mit Aerogel Dämmputz)	497.996	241	1.025.102	496
Nach Sanierung (Ohne Aerogel Dämmputz)	525.923	255	1.071.551	519
Referenzgebäude nach EnEV 2014	539.833	261	846.130	410

Energiebezugsfläche nach EnEV: 2.064,7 m²

Anhand Tabelle 11 ist zu erkennen, dass der Heizwärmebedarf ohne Aerogel-Wärmedämmputz statt bei 85,9 kWh/m² bei 98,0 kWh/m²a läge. Alle anderen Bilanzanteile sind erwartungsgemäß gleich oder nahezu gleich.

Tabelle 11:
Zusammenstellung der nach DIN V 18599 berechneten Endenergiebilanzanteile für den Fall mit Aerogel-Wärmedämmputz und ohne Aerogel-Wärmedämmputz.

Bezeichnung	Endenergie			
	Mit Aerogel-Dämmputz		Ohne Aerogel-Dämmputz	
	kWh/a	kWh/m ² a	kWh/a	kWh/m ² a
Heizung	177.271	85,9	202.393	98,0
Trinkwarmwasser	553	0,3	553	0,3
Kühlung	143.672	69,6	143.929	69,7
Lüftung	143.235	69,4	145.784	70,6
Beleuchtung	33.265	16,1	33.265	16,1
Gesamt	497.996	241,2	525.924	254,7

Energiebezugsfläche nach EnEV: 2.064,7 m²

Bild 30 zeigt den Einfluss des Aerogel-Wärmedämmputzes auf den Heizwärme-Endenergiebedarf des Gebäudes.

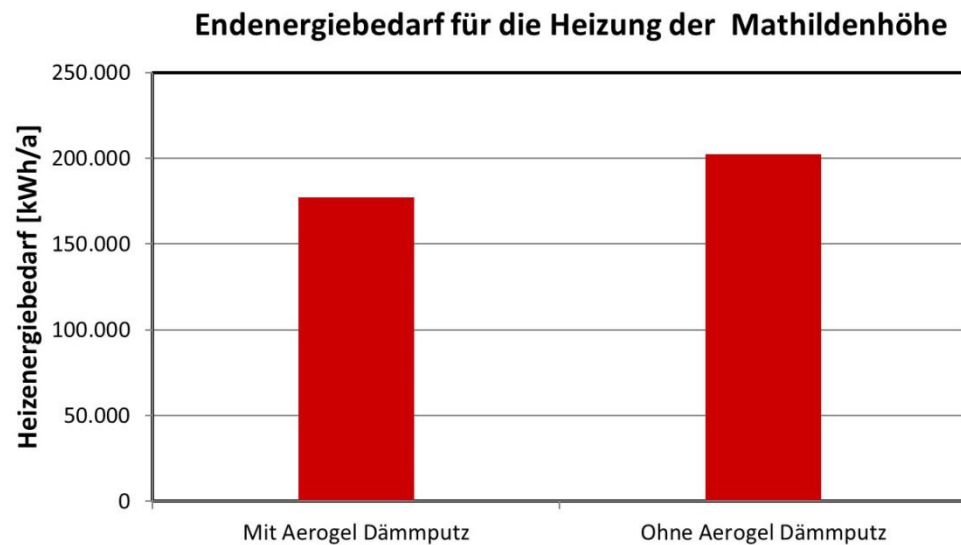


Bild 30:
Darstellung des Einflusses des Aerogel-Wärmedämmputzes auf den Heizwärme-
Endenergiebedarf des Gebäudes [Quelle: IBP].

9.4 Gegenüberstellung von Bedarfskennwerten und Anforderungen nach EnEV 2014

Wie Tabelle 10 entnommen werden kann, liegt der Endenergiebedarf des Referenzgebäudes gemäß EnEV 2014 bei 261 kWh/m²a und der Primärenergiebedarf bei 410 kWh/m²a (es ist dabei zu beachten, dass die Ausstellungshallen 1 und 3 eine lichte Höhe von knapp 10 m aufweisen). Die Bedarfswerte des Gebäudes nach Sanierung liegen bei 214 kWh/m²a (Endenergie) und 496 kWh/m²a (Primärenergie). Der Endenergiebedarf des sanierten Gebäudes liegt somit 8 % unterhalb des Wertes nach EnEV. Der Primärenergiebedarf des Gebäudes hingegen liegt 21 % über den Anforderungen der EnEV 2014. Die Anforderungen für ein saniertes Gebäude ergeben sich, indem man den Primärenergiebedarf für ein neues Referenzgebäude gleicher Bauart und gleicher Anlagentechnik berechnet und den erhaltenen Wert mit 1,4 multipliziert. Für ein saniertes Gebäude ist sozusagen ein 40 % höherer Bedarf zugelassen.

Für Gebäude, die unter Denkmalschutz stehen, gilt gemäß §24 der EnEV 2014, Absatz 1: »Soweit bei Baudenkmälern oder sonstiger besonderer erhaltenswerter Bausubstanz die Erfüllung der Anforderungen dieser Verordnung die Substanz oder das Erscheinungsbild beeinträchtigen oder andere Maßnahmen zu einem unverhältnismäßig hohen Aufwand führen, kann von der Verordnung abgewichen werden«.

10 Konservatorische Anforderungen

Die aktuelle Sanierung der Mathildenhöhe Darmstadt soll neben den geplanten Energieeinsparungen, der Erhöhung des Nutzerkomforts und der Betriebssicherheit vor allem für das Haus moderne und zeitgemäße konservatorische Rahmenbedingungen schaffen.

Um die Ausstellungsflächen auf die Präsentation von unterschiedlichen Exponaten vorzubereiten und zusätzlich den Anforderungen der internationalen Leihverträge / internationalen Wechselausstellungen zu entsprechen, bedarf es einer anlagen- und ausstellungstechnischen Optimierung in den Ausstellungsräumen. Darüber hinaus werden auch sicherheitstechnische und organisations-technische Veränderungen notwendig sein, um die vorgegebenen Leihbedingungen zu erfüllen.

Folgende Ziele müssen im Rahmen der Sanierung erfüllt werden:

- Internationale Ausstellungen in Bezug auf Raumklima, Sicherheit (Schutz der Exponate vor Diebstahl, Einbruch und Vandalismus, Brandschutz) müssen durchgeführt werden.
- Es muss ausreichend Platz für die Mitarbeiter und Organisationseinheiten geschaffen werden (Anlieferung mit Akklimatisierung, Manipulation und Pack- und Zwischenlagerraum).
- Es muss eine den Leihverträgen entsprechende Infrastruktur mit gesichertem Zwischendepot, Akklimatisierung und Anlieferung geschaffen werden.

10.1 Klimatische Anforderungen

Das Raumklima definiert sich als Zustand der Raumatmosphäre, und damit als Summe aller Einflüsse, die im Raum auf Mensch und Objekt einwirken. Die dominierenden Komponenten Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte und Luftqualität bilden zusammen ein komplexes und sich gegenseitig beeinflussendes System. Dabei sind grundsätzlich die Wechselbeziehungen zwischen Baukörper, Besucher und Klima zu beachten. Da die bauphysikalischen und konservatorischen Anforderungen ganztagig vorliegen, ist ihnen – gegenüber den Behaglichkeitsfaktoren für Besucher und Mitarbeiter – den Vorzug zu geben. Um ein sicheres Klimatisierungskonzept für die Mathildenhöhe zu erstellen, ist es wichtig, das Außenklima und die Besucherfrequenz zu kontrollieren und die Anlagentechnik daraufhin zu steuern. Ideal wäre die Einstellung eines passiven Innenraumklimas, das weitgehend von äu-

ßen Klimaeinflüssen entkoppelt ist und nur bei Bedarf auf Besucherlasten reagieren muss.

10.2 Internationale Anforderungen an das Raumklima in Museen

Für die Ausstellungen in der Mathildenhöhe sollten generell zwei Klimazonen zur Geltung kommen. Dabei wird zwischen den Wechselausstellungen, die durch Leihgaben geprägt sind, sowie den Veranstaltungs- und Umbauphasen unterschieden.

Für die Wechselausstellungen und den internationalen Leihverkehr muss sich die Kombination aus Anlagentechnik und baulichen Maßnahmen an den folgenden Standards ausrichten:

$20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$ und $50\% \pm 5\%$ relative Raumluftfeuchte.

Sollten Leihverträge es zulassen, können neben den täglichen Schwankungen auch Toleranzen über wöchentliche oder jährliche Grenzwertüberschreitungen möglich sein. In diesem Fall werden bestimmte Überschreitungen des Klimakorridors pro Woche sowie Jahr akzeptiert.

Die täglichen Schwankungen von 2 K/d können im Öffnungsbetrieb unter bestimmten Bedingungen (starke Besucheraufkommen) abweichen. In jedem Fall muss das Raumklima aber kontinuierliche tägliche Schwankungen von mehr als 3 K unterbinden. Strengere Toleranzen sind durch Mikroklimata in Vitrinen möglich, sofern dies vom Leihgeber gefordert ist.

Die Luftwechselrate muss an die Anzahl der Besucher angepasst werden. Ein variabler mechanischer Luftwechsel, der in den Schließzeiten nach dem Regelparameter Luftqualität regeltechnisch stufenlos reduziert werden kann, ist anzustreben. Das Außenklima sollte überwacht werden, ebenso sollte die Steuerung der Gebäudeleittechnik nach Bedarf darauf reagieren können. Die Lüftung muss so konzipiert sein, dass zwischen dem Ausstellungsbetrieb und dem Ruhebetrieb unterschieden werden kann und auch das Außenklima für die Frischluftkonzeption berücksichtigt wird.

Das Klima-Monitoring in der Wechselausstellungsfläche muss neben der eigenen Messdatenerfassung der technischen Gebäudeausrüstung (TGA), die durch die Gebäudeleittechnik (GLT) geregelt und gesteuert wird, auch über ein weiteres geeignetes Messkonzept verfügen. Eine redundante Messaufzeichnung gewährleistet eine zweite Beurteilungsmöglichkeit des Raumklimas und kann eine Falschmeldung der Anlagensteuerung vermeiden.

Für die Phasen außerhalb der Rahmenbedingungen durch Leihverträge kann ganzjährig nach Bizot [12], Gruppe Appendix 7, das nachfolgende Klima gefahren werden:

16 – 25 °C und 40 – 60 % relative Raumlufftfeuchte.

Die Schwankungsbreite ist hier ausdrücklich nicht täglich ausgelegt, sondern als Maximalwerte, wobei der Sollwert um 20 °C und 50 % relative Luftfeuchte gleiten soll.

In historischen Gebäuden wie der Mathildenhöhe kann das Raumklima im Nichtausstellungsbetrieb um den jährlichen Mittelwert gleiten (Raumluffttemperatur 20 °C und relative Raumlufftfeuchte 50 %). Wichtig ist hier die Vermeidung von regelmäßigen (stündlichen) Kurzzeitschwankungen über 3 K/d und 5 % rH/d.

10.3 Lichtschutz

Die Museumsbeleuchtung und das Tageslichtkonzept sollten zwei Anforderungen miteinander vereinen: zum einen die gute Beleuchtung der Exponate und zum anderen die Exponate bestmöglich vor einer Zerstörung durch Licht schützen. In der Ausstellungsfläche der Mathildenhöhe wird nach der Sanierung mit Kunstlicht und Tageslicht gearbeitet. Für das Kunstlicht sollten lediglich Leuchtmittel Verwendung finden, die einen hohen Ultraviolett A/B- und C-Schutz garantieren. Vor allem die kurzwellige und energiereiche UV-Strahlung ist schädlich. Diese wird in die Bereiche UV-A (380 – 315 nm), UV-B (315 – 280 nm) und dem schädlichsten UV-C (280 – 100 nm) unterschieden. Für die Erwärmung der Kunstwerke zeichnet sich die Infrarotstrahlung verantwortlich, auch sie wird noch einmal in die nahe (770 – 1.400 nm) und ferne (1.400 – 10.000 nm) Infrarotstrahlung unterschieden. Bei der Beleuchtung von Vitrinen ist darauf zu achten, dass die Abwärme der Lampen nicht das Luftvolumen im Vitrinenkorpus erwärmt und somit das Klima destabilisiert.

Für alle Ausstellungsbereiche gelten folgende Beleuchtungs-Grenzwerte:

- Szenario 1: maximal 250 lx (Beispiel: Gemälde)
- Szenario 2: maximal 150 lx (Beispiel: s/w Photographien)
- Szenario 3: maximal 100 lx (Beispiel: Farbfotographien)
- Szenario 4: maximal 30 lx (Beispiel: Graphik)

Die Beleuchtung kann sich nach dem lichtempfindlichsten Exponat in einer Ausstellung richten, jedoch führt dies in den meisten Fällen zu einer starken Verdunklung eines gesamten Ausstellungsraumes. Ideal sind gemischte Ausstellungsarchitekturen, in denen lichtempfindliche Exponate in Vitrinen oder mit

zusätzlichen UV-Schutzgläsern ausgestellt werden oder nur an bestimmten Tages- oder Wochenzeiten aufgedeckt werden. Das Tageslicht kann nach Bedarf vollkommen ausgeschlossen werden.

Für die Wechselausstellungsflächen muss je nach Leihvertrag und auszustellenden Exponaten die Beleuchtungsstärke angepasst werden. Hier ist es durch die gewöhnlich höhere Besucherfrequenz besonders wichtig, ein ausgewogenes Maß zwischen optischer Darstellung, Präsentation und Lichtschutz zu finden. Dabei eignen sich dimmbare und in der Lichtfarbe veränderbare LED-Leuchten am besten, um ein ausgewogenes Beleuchtungskonzept zu gestalten.

Darüber hinaus gelten für bestimmte Exponate maximale Belichtungsdauern pro Jahr. Bei einer geringen Empfindlichkeit beträgt der Grenzwert 600.000 lxh/a, dies entspricht bei einer Beleuchtungsstärke von 200 lx einer jährlichen Präsentationszeit von 3.000 h/a. Ein Wert, der in etwa eine normale jährliche Öffnungszeit im Museum repräsentiert. Bei mittlerer Empfindlichkeit wird die Belichtungsdauer auf 150.000 lxh/a reduziert, dies entspricht bei gleicher Präsentationszeit von 3.000 h/a einer empfohlenen Beleuchtungsstärke von 50 lx. Bei einer zulässigen Exposition von 15.000 lxh/a muss die jährliche Ausstellungszeit auf 300 h/a, also ca. 30 Tage, reduziert werden.

10.4 Anforderungen Sicherheitskonzeption

Für sämtliche Ausstellungsbereiche und Funktionsbereiche der Mathildenhöhe muss ein einheitliches Sicherheitskonzept vorliegen. Eine alleinige Berücksichtigung der Wechselausstellungsflächen genügt nicht, um den Auflagen der meisten Leihgeber gerecht zu werden. Das Sicherheitskonzept ist auf die Bedürfnisse des Nutzers und der Kriterien der Versicherungen abzustellen. In erster Linie ist der physische Widerstandswert der Fassaden, Außentüren und Außenfenster wichtig. Ein Eindringen in schützenswerte Bereiche muss zum Beispiel durch eine Alarmanlage detektiert werden. Ideal wäre eine Einteilung der Räume in Sicherheitszonen. Die Zonenübergänge zeigen die verschiedenen Zutrittsrestriktionen auf.

Das Sicherheitskonzept soll zusammenfassend folgende Ziele erreichen:

- Schutz von Personen
- Schutz von Werten, Sammlungsgütern sowie Einrichtungen
- Gewährleistung des Betriebes
- Schutz von Informationen
- Schadensbegrenzung auf ein akzeptables Maß im Ereignisfall
- Bedarfsgerechte und auf die Nutzung ausgelegte Alarmanlage nach VdS (Verband der Schadensverhütung) / Klasse C (höchster Schutz).

Eine Videoüberwachung spezieller Bereiche wie Anlieferung, Foyer und Eingang wird aus Sicht der Leihverträge notwendig werden. Die Daten sollen für einen bestimmten Zeitraum gespeichert werden, mindestens jedoch 72 Stunden.

11 Vorbereitung des Monitorings

Nach der Fertigstellung sowohl eines Neubaus als auch einer Sanierung sollte ein mindestens zweijähriges Monitoring durchgeführt werden. Mit einem solchen Monitoring werden folgende Ziele verfolgt:

- Hilfestellung bei Inbetriebnahme des Gebäudes und der Gebäudeleittechnik,
- Validierung des Energiekonzepts,
- Ermittlung von baulichen und anlagentechnischen Schwachstellen,
- Bewertung der Effizienzen und Wirkungsgrade der innovativen Komponenten,
- Bewertung der Behaglichkeit,
- Überwachung des Gebäudebetriebs,
- Überwachung und Dokumentation des Energieverbrauchs.

Um dies durchführen zu können, müssen bereits während der Planungsphase Messsensoren an den relevanten Stellen im Gebäude und in der Anlagentechnik geplant werden. Diese Informationen sind danach in die Ausführungspläne einzuarbeiten. Auch in den Ausschreibungsunterlagen müssen die Sensoren und deren Einbau enthalten sein. Erfolgt dies nicht in dieser Phase, wird ein Monitoring sehr schwierig und vor allem sehr teuer. Es müssen beispielsweise Rohrleitungen aufgetrennt werden, um einen Wärmemengenzähler nachträglich einzubauen oder Stromkreise nachträglich anders verdrahtet werden. Teilweise ist es finanziell auch kaum mehr zu verantworten, bestimmte Parameter zu erfassen.

Bei diesem Vorhaben erfolgte bereits die Planung der Sensoren in der Anlagentechnik. In Bild A 1.13 sind beispielsweise die Stellen der Verbrauchszähler angegeben. Es ist während der Ausführungsphase darauf zu achten, dass die Sensoren fachgerecht eingebaut werden. Die Messwerte aller Sensoren müssen von der Gebäudeleittechnik erfasst werden. Viele von der GLT aufgenommenen Daten, die für die Steuerung der Anlage notwendig sind, werden auch für das Monitoring benötigt. Die, die nicht für die Steuerung der Anlagentechnik aber für das Monitoring notwendig sind, müssen separat auf die GLT aufgeschaltet werden. Es sind dazu geeignete Sensoren zu verwenden. Ein eigenes Messsystem für diese Sensoren zu installieren, ist zu zeit- und kostenaufwendig.

Es ist dafür zu sorgen, dass die Monitoringdaten gespeichert und exportiert werden, denn üblicherweise werden GLT-Daten nicht für die Aufbewahrung gespeichert.

12 Fazit

Das im Rahmen der Sanierungsplanung entwickelte Energiekonzept, das wesentliche Aufgabe des Forschungsvorhabens war, nahm eine weitaus längere Zeit in Anspruch als ursprünglich geplant war. Grund dafür ist die Entscheidung der Stadt Darmstadt, sich mit der Mathildenhöhe für die Aufnahme in die offizielle Bewerberliste Deutschlands für das UNESCO-Weltkulturerbe zu bewerben. Das hat dazu geführt, dass Planungen, die bis dahin erfolgt waren, neu hinterfragt und teilweise wieder verworfen wurden. Es wurde ein Advisory Board gebildet, das sich aus Fachleuten zusammensetzt, die die Stadt Darmstadt bei der Bewerbung unterstützten. Alle denkmalrelevanten Fragen müssen seither diesem Gremium vorgelegt werden, das jedoch auch Vorschläge unterbreitet, die planerisch umzusetzen sind. So gibt es eine Vorgabe, die besagt, dass nicht der ursprüngliche Bauzustand zum Zeitpunkt der Gebäudeerstellung relevant ist, sondern die Zeitschichten erkennbar sein müssen; sozusagen die bauliche Entwicklung des Gebäudes über dem Verlauf der Zeit.

Bei der Entwicklung des Energiekonzepts waren – hauptsächlich aus Gründen des Denkmalschutzes – viele Randbedingungen vorhanden, die zu berücksichtigen waren. Die bisherige Nutzung der Trinkwasserleitung als Wärmequelle und Wärmesenke darf nicht mehr angewendet werden. Weiterhin ist die Errichtung eines Schornsteins nicht erlaubt. Ferner darf kein Rückkühler außerhalb des Bauwerks aufgestellt werden. Für die Aufstellung der Lüftungsanlagen ist extrem wenig Platz vorhanden. An den Außenwänden darf kein Wärmedämmverbundsystem aufgebracht werden. Eine Innendämmung wird vom Bauherrn nicht akzeptiert. Der Boden kann aufgrund der Aufbauhöhe keine Dämmung erhalten.

Auf der anderen Seite ist jedoch ein großes Wasserreservoir vorhanden, das als Energiespeicher genutzt werden kann. Zusammen mit diesen Randbedingungen ist es dem Projektteam im Rahmen der integralen Planung gelungen, ein Energiekonzept zu erstellen, mit dem der Endenergiebedarf um 61 % und der Primärenergiebedarf um 65 % gesenkt werden kann und gleichzeitig ein hoher thermischer Komfort im Gebäudeinnern zu erwarten ist. Verglichen mit den energetischen Anforderungen der Energieeinsparverordnung, die nach §24 der EnEV 2014 von einem Denkmal nicht notwendigerweise erfüllt werden müssen, liegt der Endenergiebedarf des Gebäudes 8 % niedriger als der Wert des EnEV-Referenzgebäudes vorgibt. Der relevante Primärenergiebedarf liegt allerdings 21 % über dem Anforderungswert. Bei der Berechnung wurden die vom Anlagenplaner vorgegebenen Außenluftwechsel verwendet, die jedoch für den

dauerhaften Anlagenbetrieb zu hoch sind. Hier wird dringend empfohlen, den Außenluftwechsel entsprechend dem Bedarf anzupassen. Der Bedarf orientiert sich an der Besucherzahl in den Ausstellungsräumen. Ein hoher Energiebedarf wird für die elektrisch betriebene Luftbefeuchtung aufgewendet, die notwendig ist, weil die Platzverhältnisse keine andere energieeffizientere Luftbefeuchtung zulassen.

Die Sensoren für ein Monitoring sind in den Anlagenschemen eingetragen. Wenn sie im Rahmen der Umsetzung eingebaut werden, kann nach Fertigstellung der Sanierung mit dem Monitoring begonnen werden. Es wird empfohlen, dies auch zu realisieren.

13 Literaturverzeichnis

- [1] Huckemann, V. et al.: Nachhaltige Sanierung von Museumsgebäuden. Abschlussbericht. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Förderkennzeichen 0329084 E-J, 2013.
- [2] Gellhaar, C.: Mathildenhöhe Darmstadt, 100 Jahre Planen und Bauen für die Stadtkrone 1899 – 1999, Band 3. Justus von Liebig Verlag Darmstadt, 2004.
- [3] Hangleiter, H. M.: Restauratorische Befunduntersuchung, Mathildenhöhe, Ausstellungshalle, Innenräume / Fassaden, Zusammenfassung. 2015.
- [4] Schlier und Partner: Berechnung der Wärmebrücken, November 2014.
- [5] HASIT: Technisches Merkblatt HASIT Fixit 222 Aerogel Hochleistungsdämmputz vom 01. Februar 2014.
- [6] Tichelmann und Barillas: Bericht zur thermischen Simulation der Temperaturen im Dachraum der Halle 3 vom 5. Dezember 2014.
- [7] Sauer, M.: Geothermische Vorstudie zur Nutzung des Untergrundes zur Gewinnung der Erdwärme zu Beheizungs- und Kühlzwecken im Bereich der Liegenschaft Ausstellungshallen Mathildenhöhe Darmstadt, Olbrichweg 13-15, 64287 Darmstadt, 1. Bericht vom 13. März 2013.
- [8] Sauer, M.: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes mittels Geothermal Response Test (GeRT), BV Ausstellungshallen Mathildenhöhe Darmstadt, Olbrichweg 13-15, 64287 Darmstadt, 7. Mai 2014.
- [9] Tichelmann und Barillas: Bericht zur thermischen Simulation vom 4. Dezember 2014.

- [10] DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz- End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Teile 1-11. Beuth Verlag, Berlin (2011).
- [11] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung EnEV) vom 18. November 2013 (BGBl. IS. 3951).
- [12] Burmester, A.; Eibl, M.: Klima und Kulturgut – Die Münchner Position zu den Interim Guidelines der Bizot Gruppe. In: Restauro: Zeitschrift für Restaurierung, Denkmalpflege und Museumstechnik 119 (2013), Nr. 3/2013, S. 53-58.

Anhang A

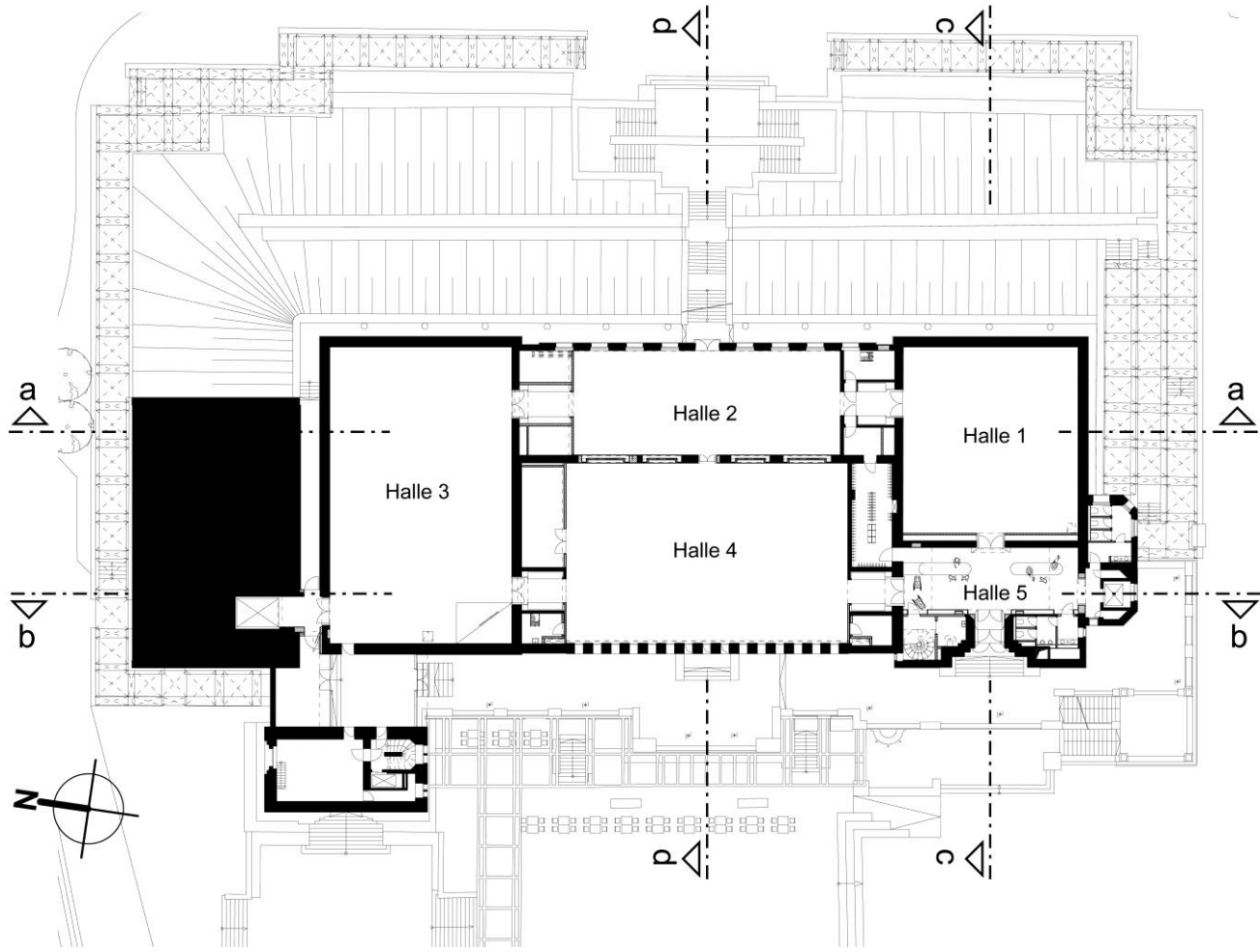


Bild A 1.1:
Grundriss Erdgeschoss [Quelle: Schneider + Schumacher].

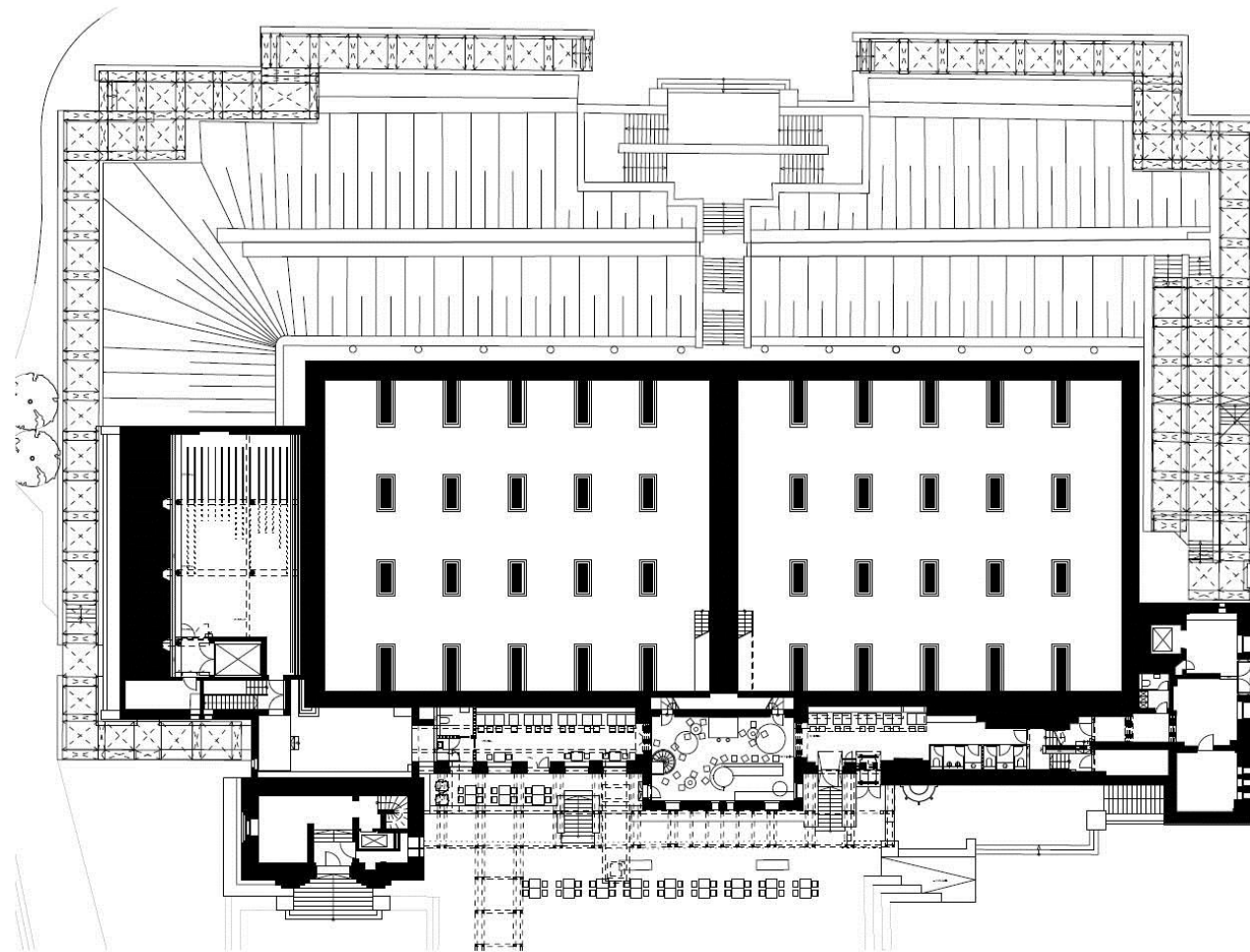


Bild A 1.2:
Grundriss 2. Untergeschoss [Quelle: Schneider + Schumacher].

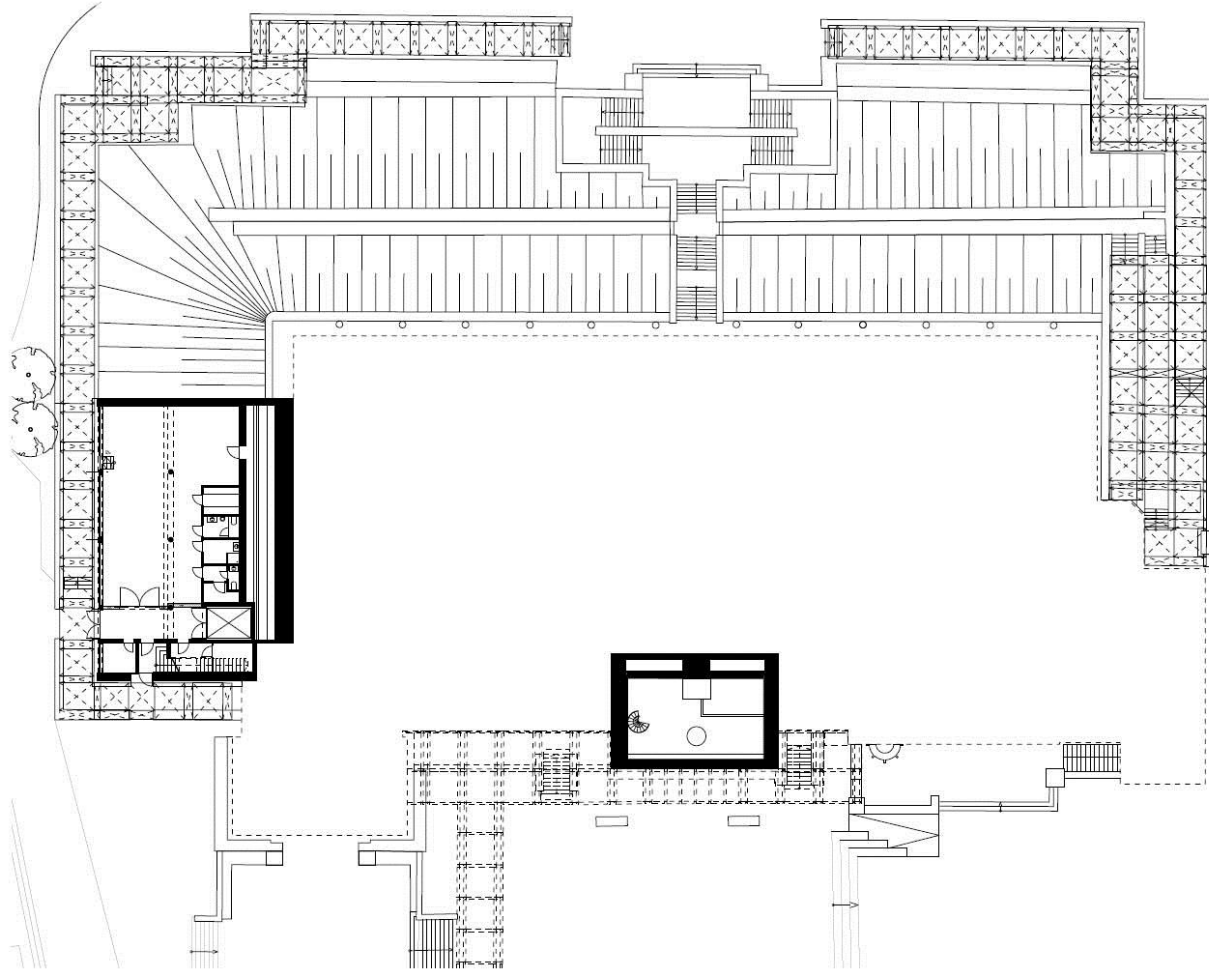


Bild A 1.3:
Grundriss 3. Untergeschoss [Quelle: Schneider + Schumacher].

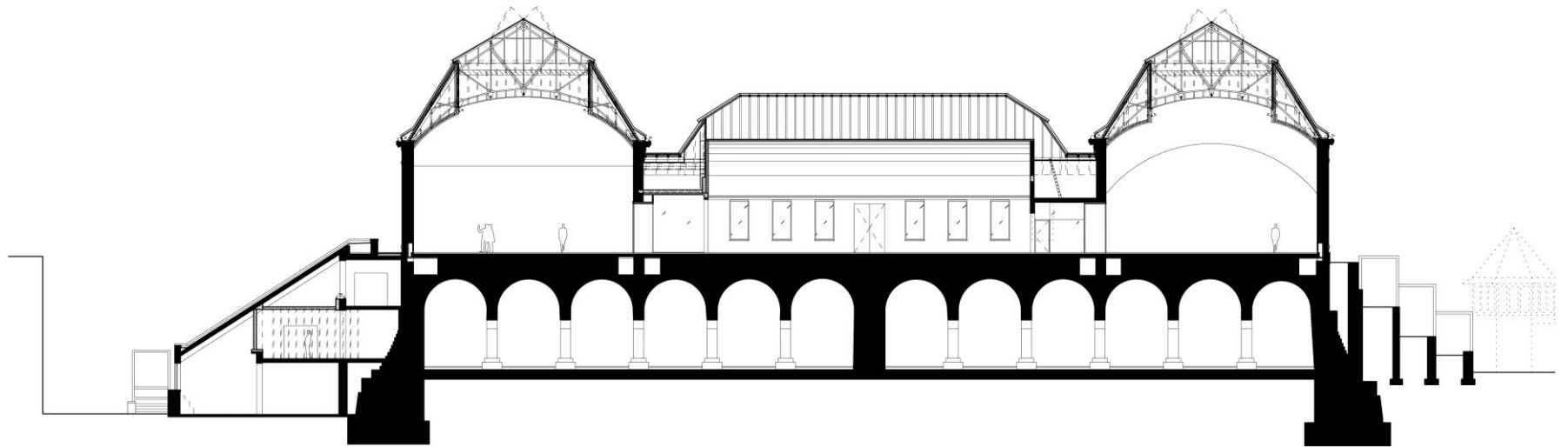


Bild A 1.4:
Schnitt a-a [Quelle: Schneider + Schumacher].

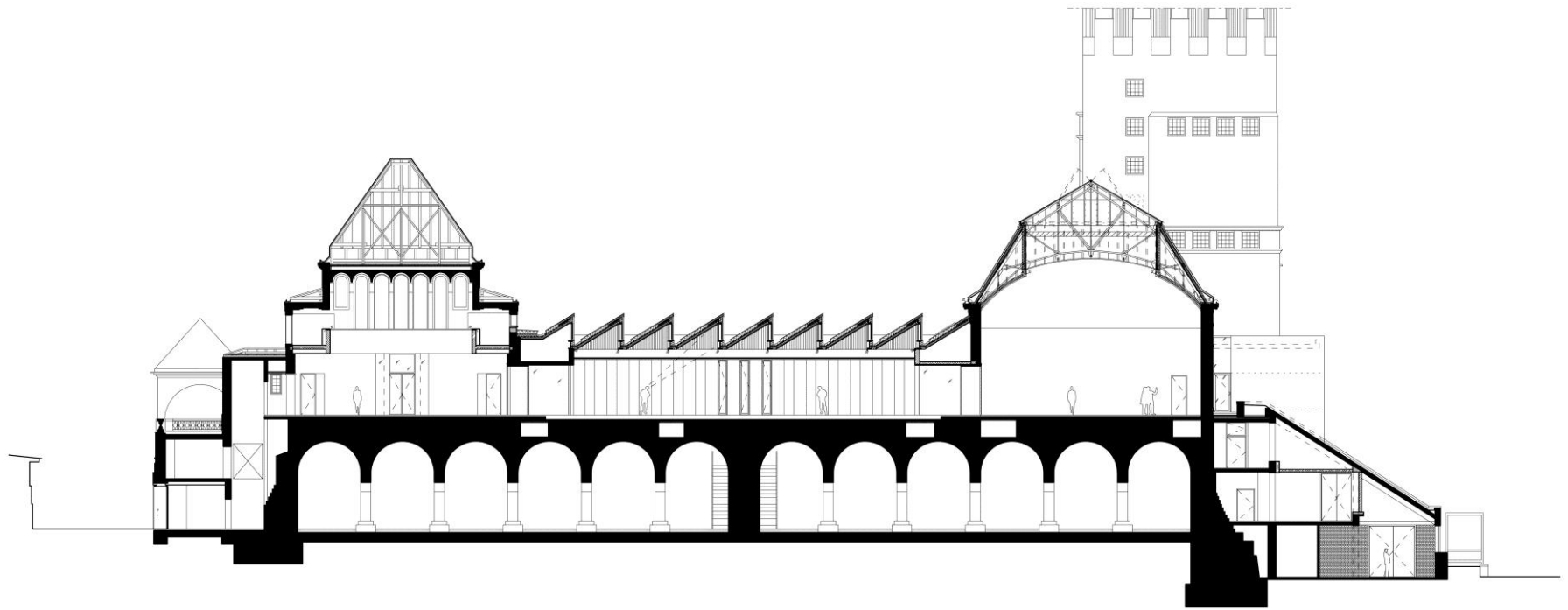


Bild A 1.5:
Schnitt b-b [Quelle: Schneider + Schumacher].

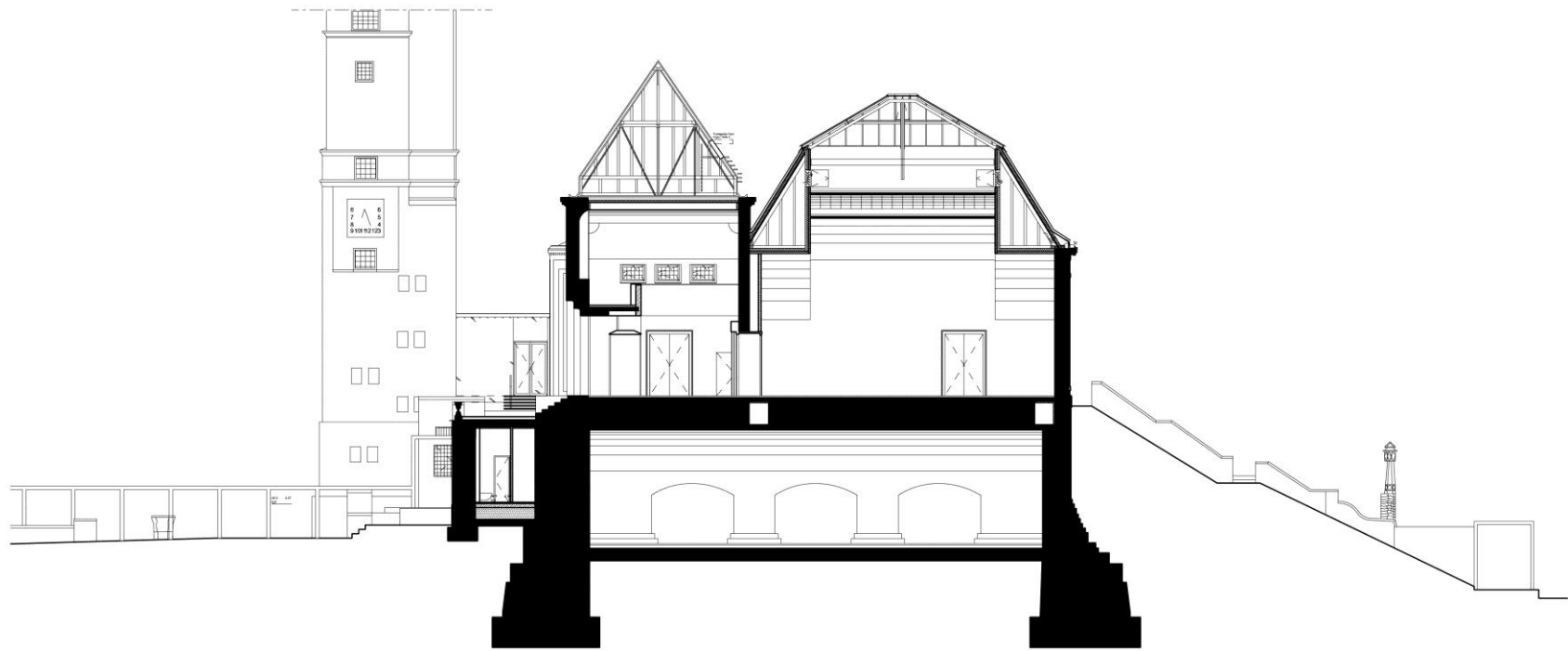


Bild A 1.6:
Schnitt c-c [Quelle: Schneider + Schumacher].

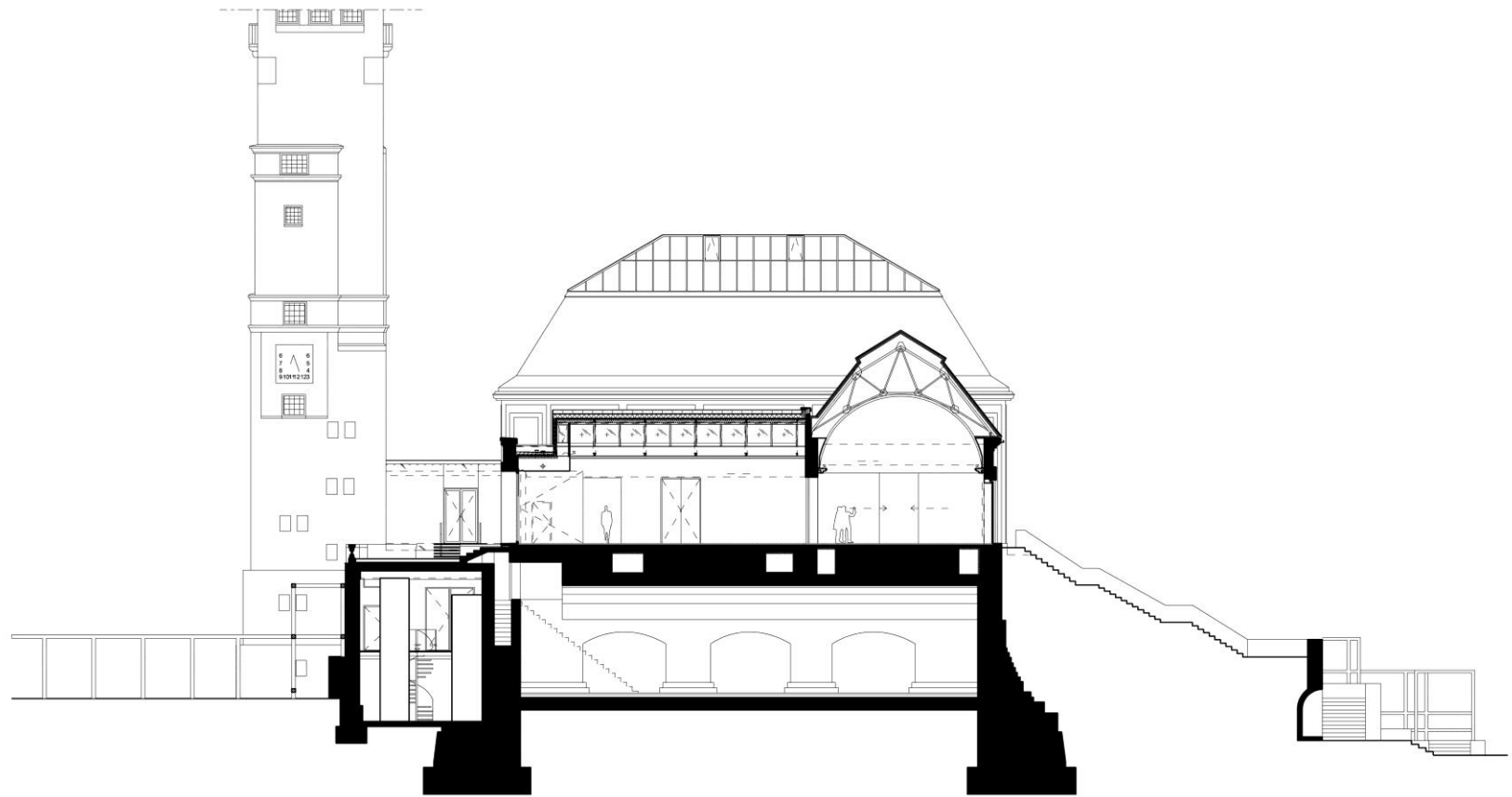


Bild A 1.7:
Schnitt d-d [Quelle: Schneider + Schumacher].

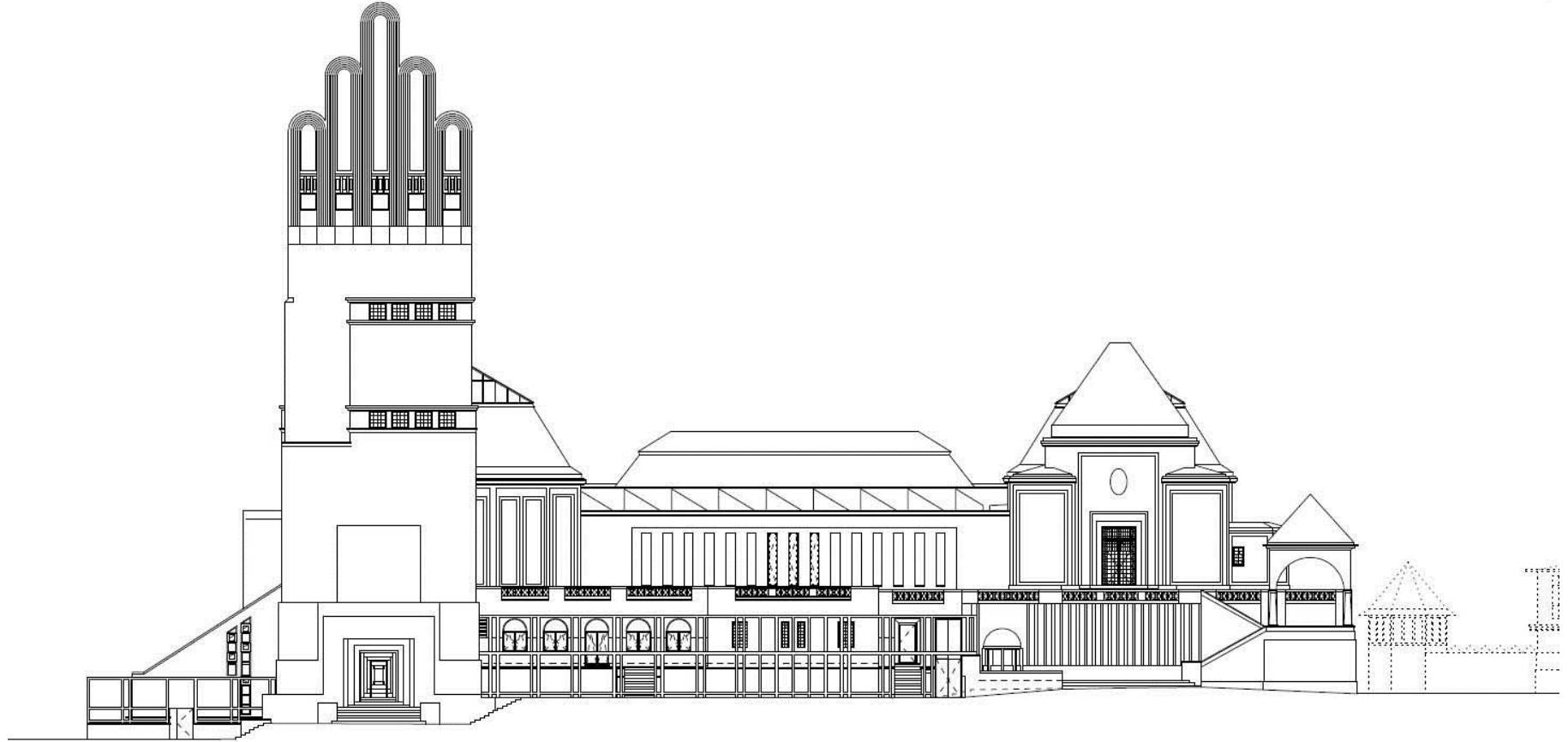


Bild A 1.8:
Ansicht West [Quelle: Schneider + Schumacher].

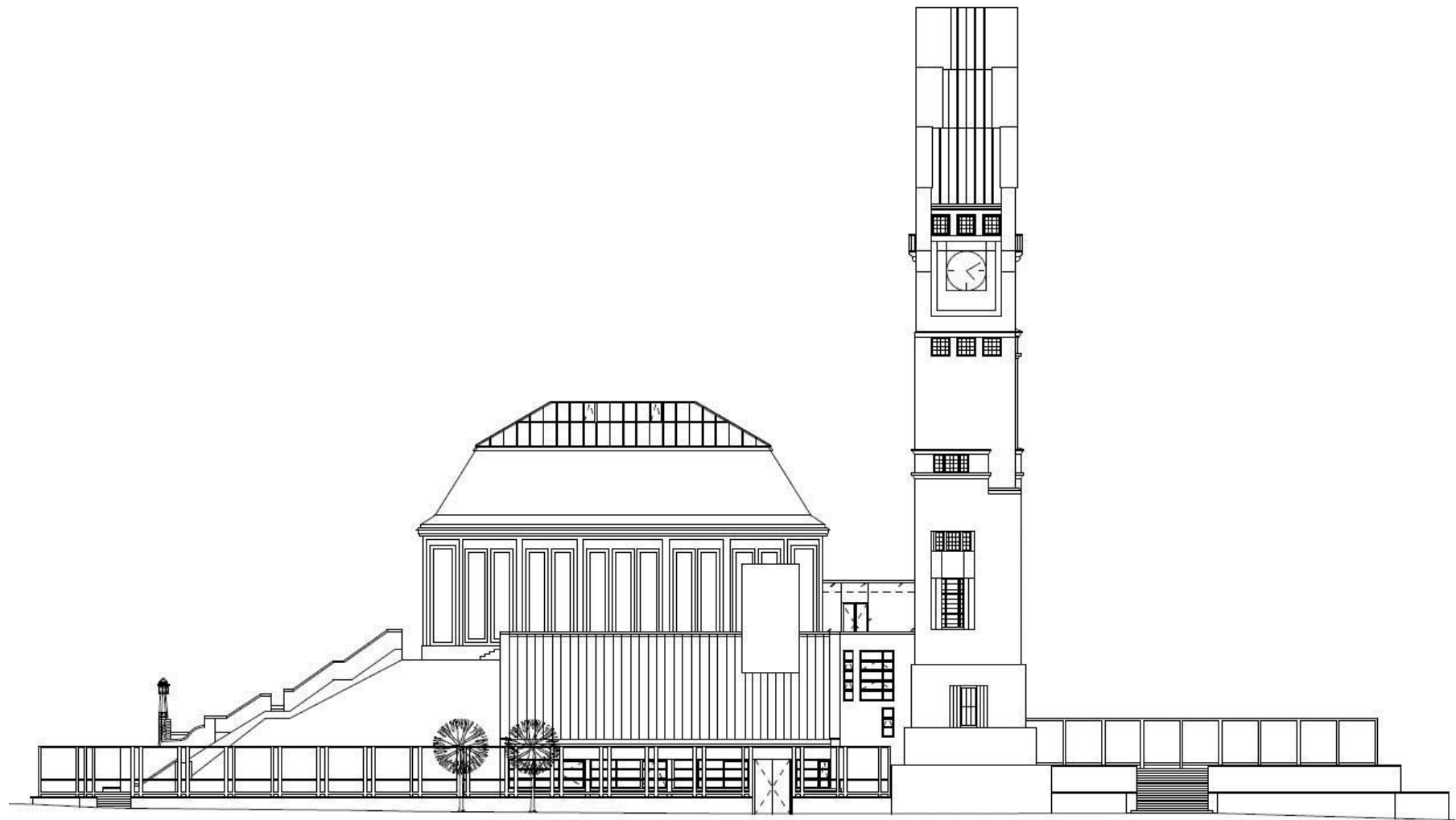


Bild A 1.9:
Ansicht Nord [Quelle: Schneider + Schumacher].

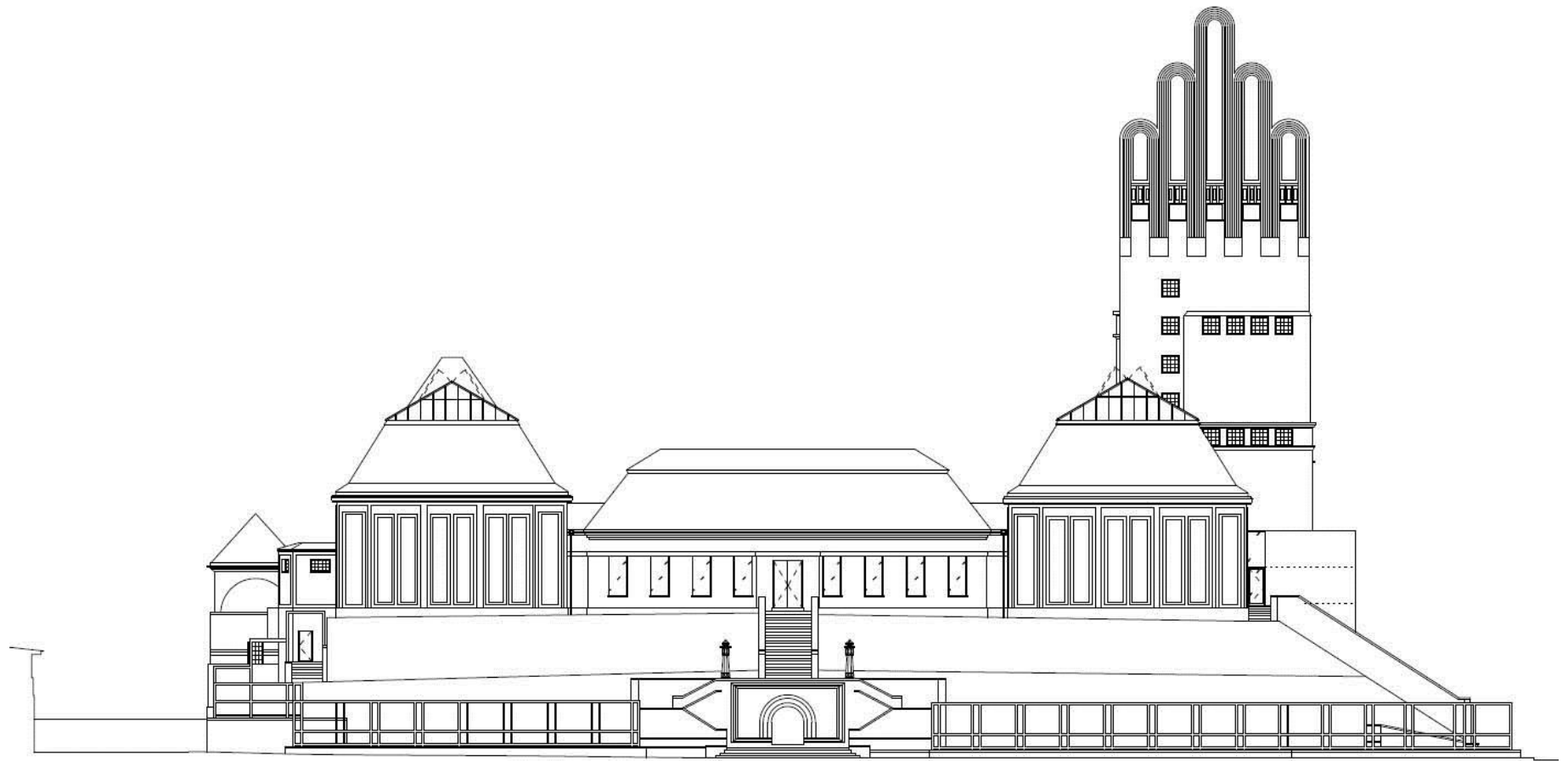


Bild A 1.10:
Ansicht Ost [Quelle: Schneider + Schumacher].

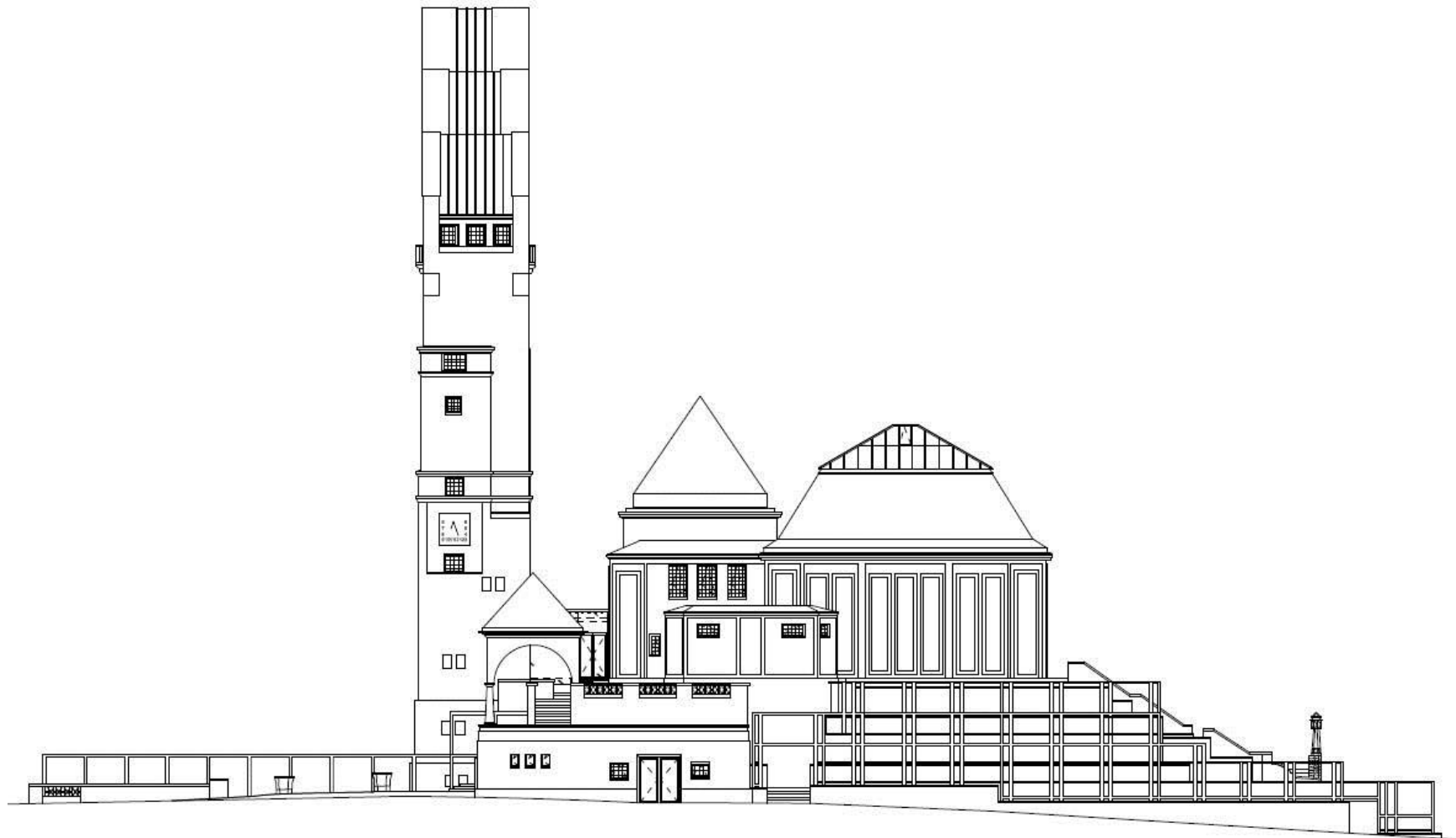
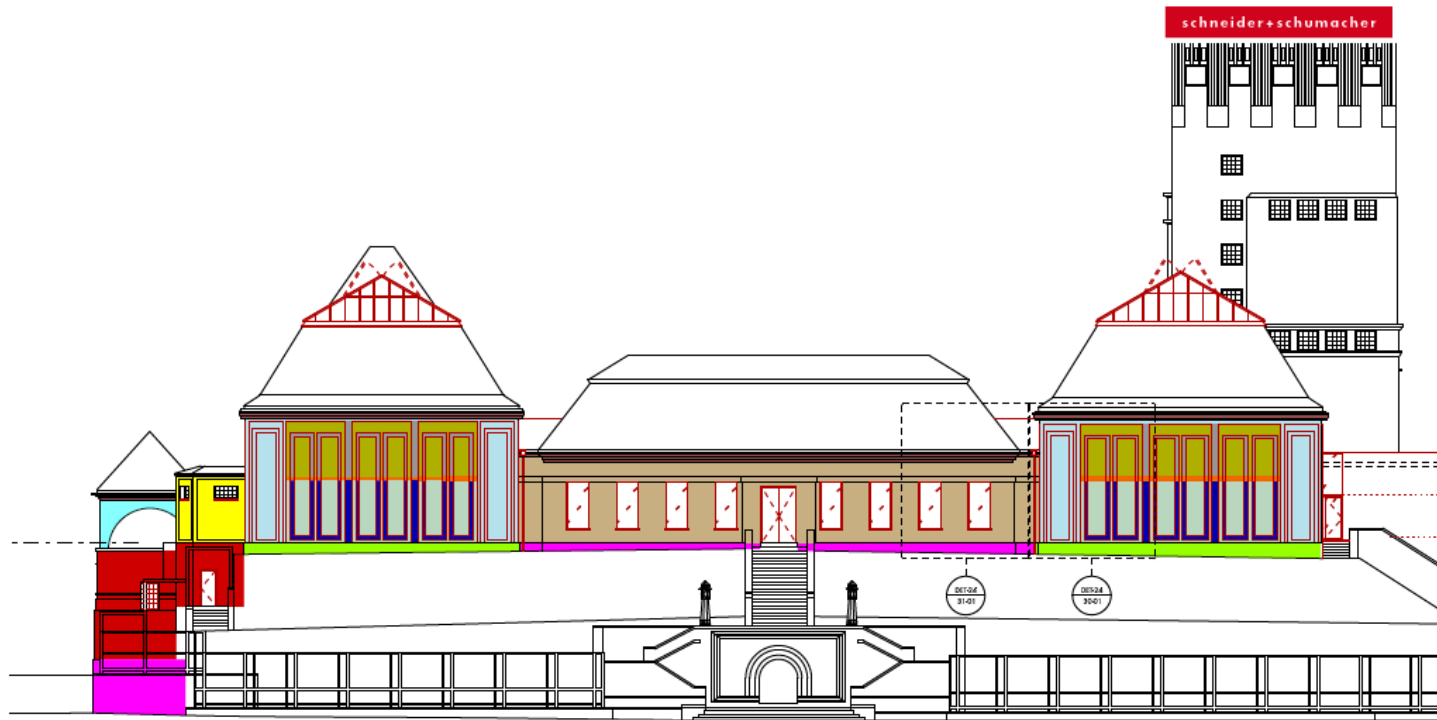


Bild A 1.11:
Ansicht Süd [Quelle: Schneider + Schumacher].



- | | | |
|------------------|---|--|
| Legende : | WAA 01 Fassade Dämmputz 35 mm | WAA 03 Fassade Dämmputz 25 mm |
| | WAA 02A Profilierung Dämmputz 60 mm | WAA 04 Fassade Dämmputz 20 mm |
| | WAA 02B Profilierung Dämmputz 25 mm | WAA 05A Giebel ohne Dämmputz |
| | WAA 02C Profilierung Ausgleichschicht 20 mm + Dämmputz 30 mm | WAA 05B Mosaik Kuppel ohne Dämmputz |
| | WAA 02D Profilierung Dämmputz 55 mm | WAA 06A Sockelputz 15 mm Grundputz |
| | WAA 02E Profilierung Ausgleichschicht 25 mm + Dämmputz 55 mm | WAA 06B Sockelputz 35 mm Grundputz |
| | WAA 02F Profilierung Riegel ohne Dämmputz | WAA 07 Fassade Dämmputz 40 mm |

Alle Maße sind vor Baubeginn doppelt und mehrmals zu prüfen. Die Maßlinie ist nur zusammen mit den Grundrissen der Ausführungsplanung und den Übersichtsplänen gültig. Zu allen Arbeiten sind die Angaben aus dem Bauablauf zu beachten. Ggf. Unstimmigkeiten sind mit dem Architekten und der örtlichen Baubehörde abzustimmen.

23.06.2017	Freigelegte Fassaden	in
15.09.2017	Maßnahmen	zur Gf.
04.08	Stellung	geändert

A_12030 Mathildenhöhe			VORABZUG
Maßstab: 1:200			Ausführungsplanung
Datum: 23.06.2017			
Mitarbeiter: mr / gf			A3
Projekt: A_12030den2401_02			Format
Projektleiter: + 010			

schneider+schumacher Raumgestaltungsarchitektur | Poststraße 20A | D-60329 Frankfurt am Main | Tel. 059 25 43 42 42

Bild A 1.12:
Darstellung unterschiedlicher Putzflächen an der Westfassade [Quelle: Schneider + Schumacher].

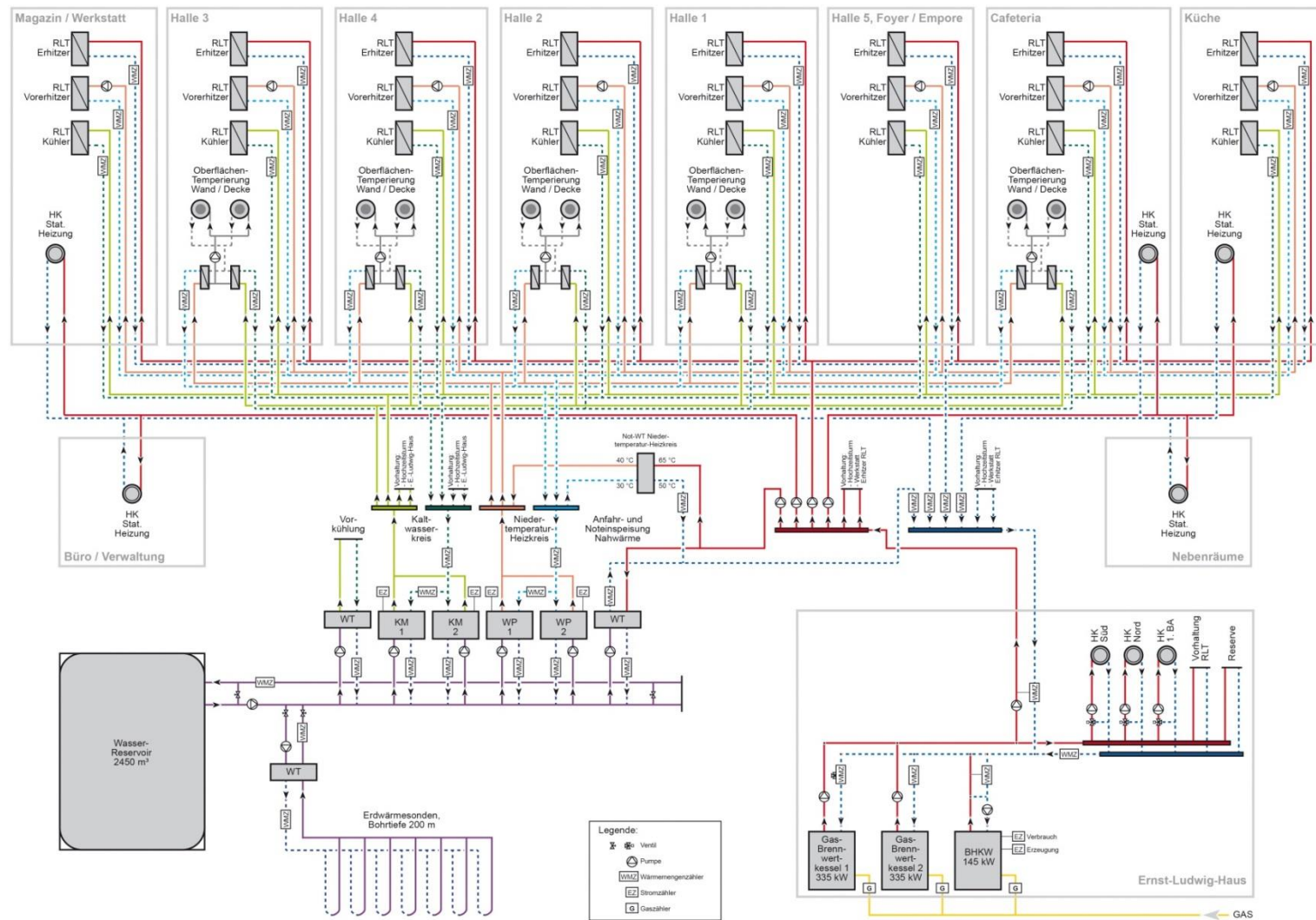


Bild A 1.13: Schematische Darstellung der Wärme- und Kälteversorgung mit Angabe der Monitoring-Messstellen [Quelle: IBP].

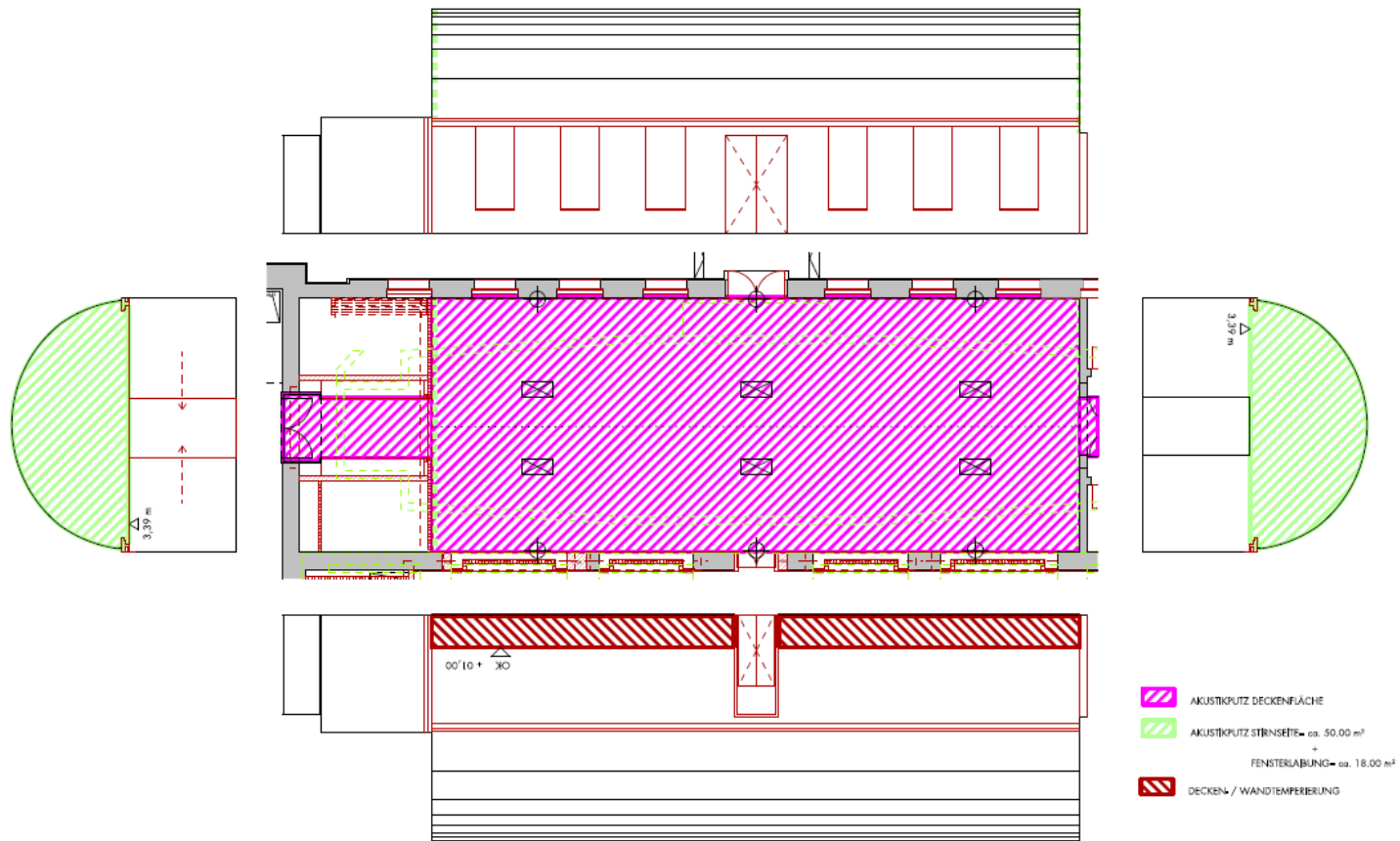


Bild A 1.14:
 Darstellung der thermisch aktivierten Wand- und Deckenflächen in Halle 2 [Quelle: Schneider + Schumacher].

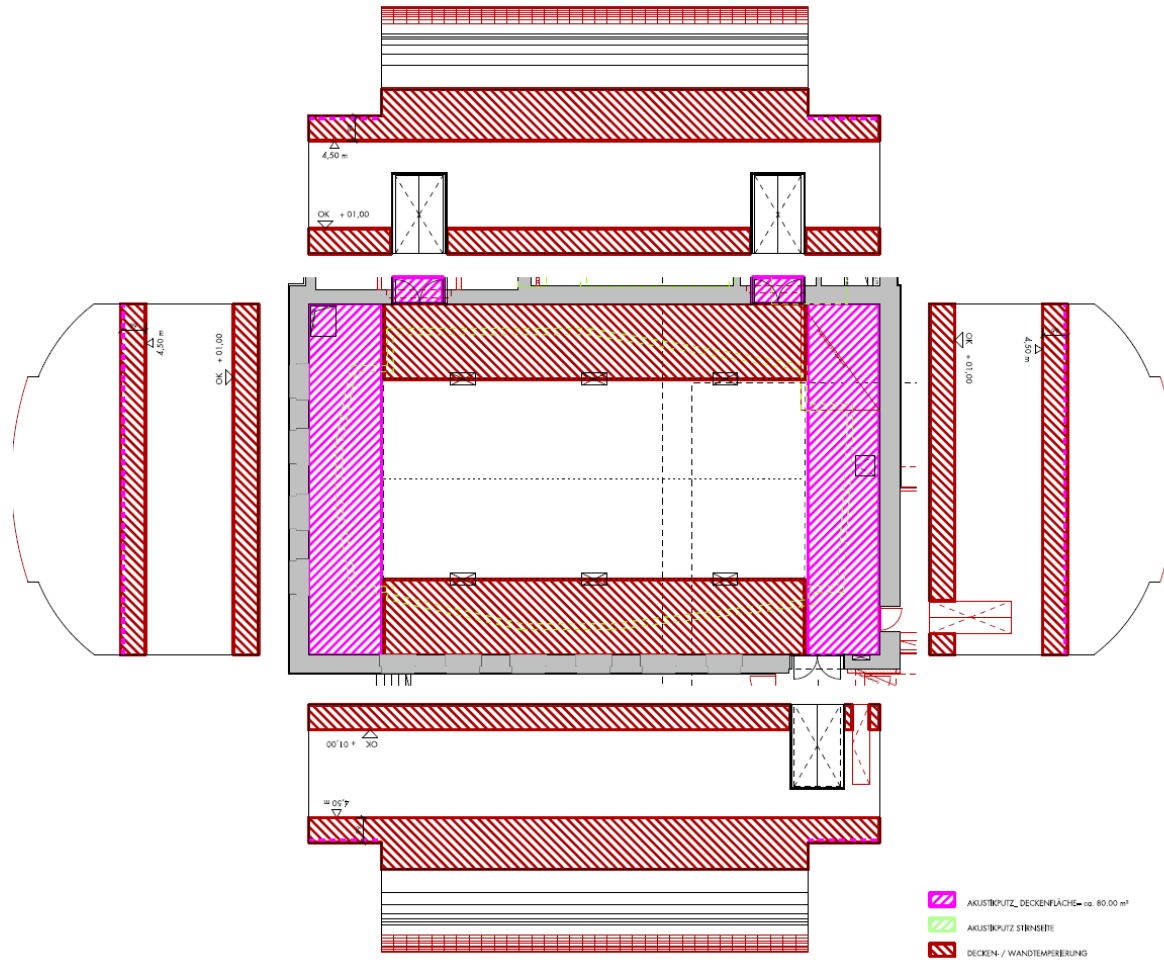


Bild A 1.15:
Darstellung der thermisch aktivierten Wand- und Deckenflächen in Halle 3 [Quelle: Schneider + Schumacher].

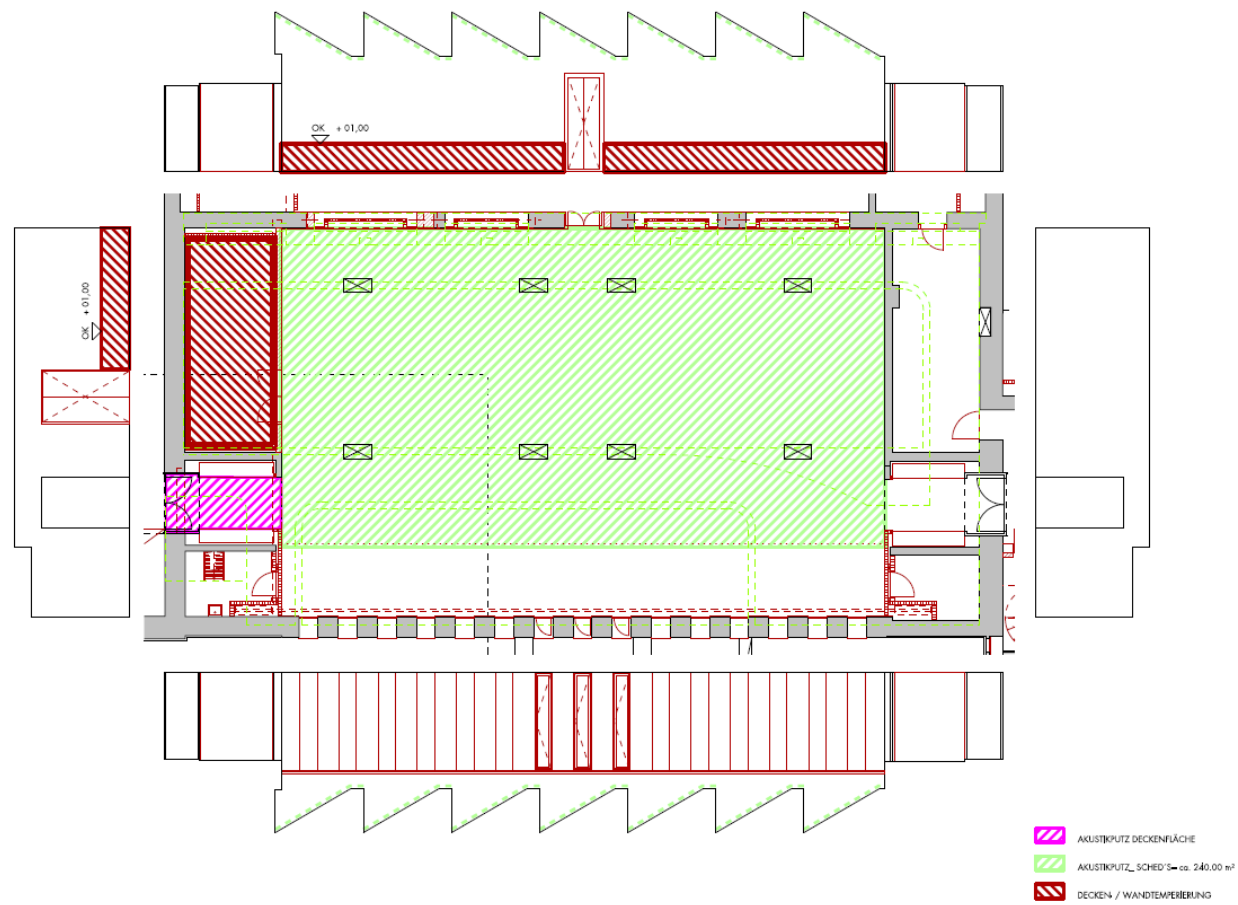


Bild A 1.16:
 Darstellung der thermisch aktivierten Wand- und Deckenflächen in Halle 4 [Quelle: Schneider + Schumacher].

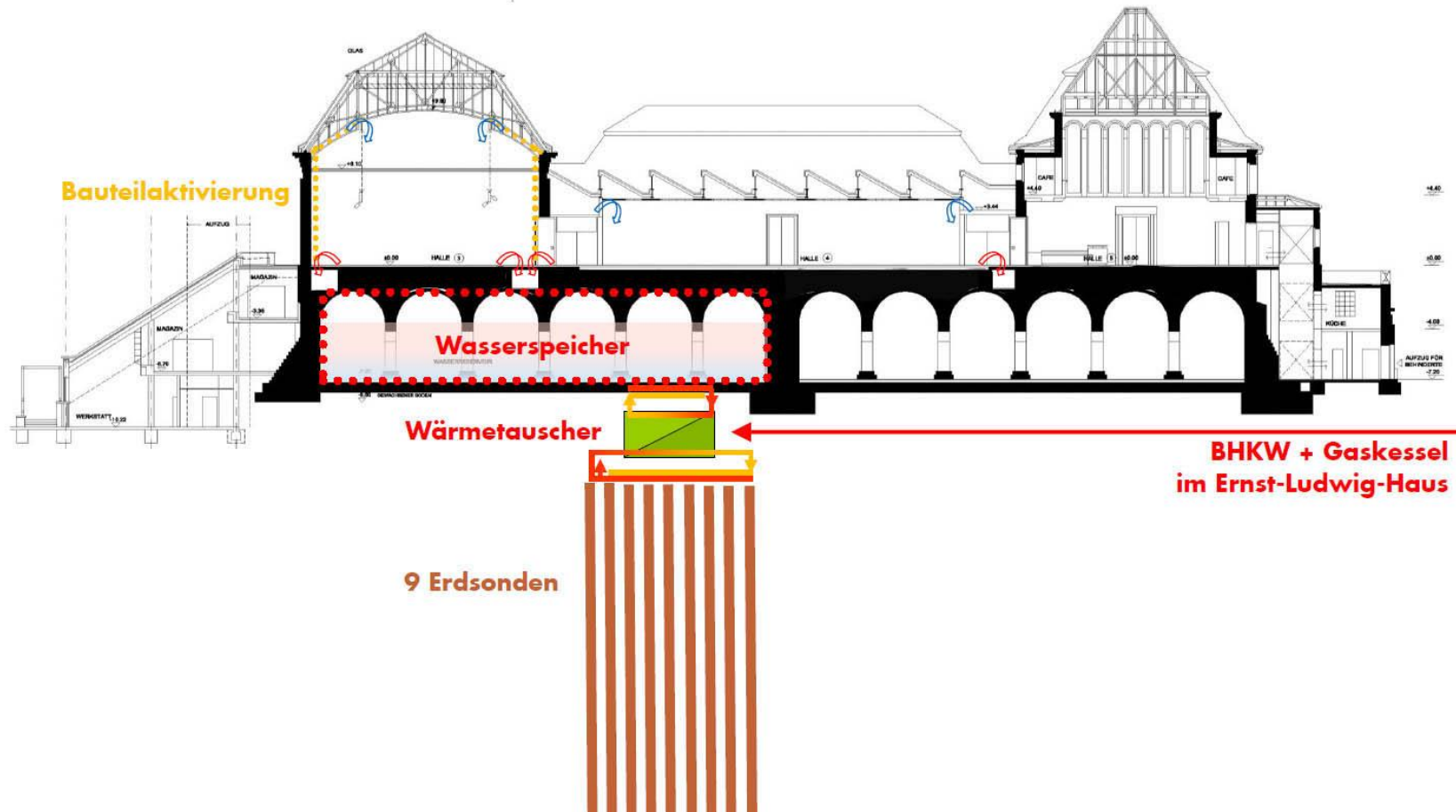


Bild A 1.17:
 Darstellung des Gebäudelängsschnittes mit Angabe der thermisch aktivierten Wand- und Deckenflächen in Halle 3 [Quelle: Schneider + Schumacher].