

## **Entwicklung eines Modularen Nullenergiedepots**

### **Hygrothermische Berechnungen zum Einfluss auf das Depotklima**

M. Krus, D. Rösler, A. Buddenbäumer, L. Klemm

Dr. Martin Krus, Gruppenleiter der Arbeitsgruppe Feuchtmanagement in der Abteilung Raumklima im Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen.

Doris Rösler, wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen.

Annika Buddenbäumer, wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen.

Lars Klemm, wissenschaftliche Mitarbeiter im Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen und Geschäftsführer der Moduldepot GmbH.

## **1. Hintergrund**

Es steht außer Frage, dass es wichtig ist, Sammlungen von historischem Wert für die Menschheit zugänglich zu machen, so dass jeder in unserer Gesellschaft die Möglichkeit hat, zumindest einen Teil auch seiner Vergangenheit zu betrachten. Jedoch ist der Teil, der in den Museen zugänglich gemacht wird, sehr gering im Vergleich zu dauerhaft gelagerten Sammlungen. Etwa 70 % der Fläche von Museen steht zur Ausstellung von Objekten zur Verfügung, die nur ca. 20 % des Kulturguts ausmachen. Demgegenüber steht für ca. 80 % der Kulturgüter, die dauerhaft konservatorisch gelagert werden sollten, nur etwa 10 % an effektiver Lagerfläche zur Verfügung. Oft werden Sammlungen Stadtarchiven oder den Museen überlassen, so dass die Größe der Kulturgüter, die unter konservatorischen Anforderungen gelagert werden sollten, stetig steigt. Es ist somit nicht verwunderlich, dass wertvolle Sammlungen aus Mangel an geeigneten Depoträumen häufig unter ungünstigen Lagerbedingungen aufbewahrt sind.

Es mangelt somit an geeigneten Depotbauten, die neben den konservatorischen Anforderungen auch den heutigen Anforderungen an Nachhaltigkeit und Energieeffizienz gerecht werden. Gleichzeitig fehlt es an finanziellen Mitteln, um aufwändige Depotbauten zu realisieren und deren hohen Anforderungen an das Innenraumklima über komplexe und energieintensive Klimatisierungsanlagen sicher zu stellen. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP führte dazu zusammen mit der Südhausbau GmbH München und k3-artservices München eine Studie für die Realisierung eines Nullenergiedepots für Kunst- und Kulturgüter durch [1].

Im Rahmen dieser Arbeit werden die hygrothermische Berechnungen zum Einfluss der Baukonstruktion auf das Depotklima und die erforderlichen Maßnahmen vorgestellt.

## 2. Klimatische Anforderungen und aktuelle Konzepte für Depotbauten

Anhaltswerte für Depoträume, in denen zeitweise auch gearbeitet wird, gibt DIN ISO 11799 [1], welche die Anforderungen an die Aufbewahrung von Archiv- und Bibliotheksgut stellt. Die folgende Tabelle 1 zeigt die Grenzwerte für Archivdepots in Bezug auf Temperatur und Feuchte sowie die Grenzwerte für Gemäledepots. Diese Grenzwerte orientieren sich an der aktuellen Version des British Standard BSi PAS 198:2011 Specification for environmental conditions for cultural collections sowie durchschnittlichen Forderungen aus Leihverträgen einiger Museen mit überwiegend internationalem Leihverkehr.

Tabelle 1: Optimale Temperatur- und Feuchtwerte für Archivalien (Papier) nach DIN ISO 11799 [1] und für Gemälde.

Material	Temperatur (°C)	Tolerierbare tägliche Schwankung (°C)	Relative Feuchte (%)	Tolerierbare tägliche Schwankung (%)
Archivgut	14 – 18	± 1	35 – 50	± 3
Gemälde	16 – 22	± 3	40 – 55	± 5

Diese Werte sind als Richtwerte zu betrachten. Der Magazinbestand weist außerdem oft eine Fülle von Materialien mit unterschiedlichen Aufbewahrungsbedingungen auf, so dass Kompromisse hinsichtlich der oben genannten Bedingungen eingegangen werden müssen. Die Bestände reichen oft von Büchern und Handschriften aus Papier über Akten, Urkunden und Karten bis hin zu graphischen Sammlungen. Neben Papier sind auch Materialien wie Leder, Pergament, Papyrus, Film und fotografische Materialien, audiovisuelle, magnetische und optische Medien sowie maschinenlesbare Formate zu archivieren. Hier ist es erforderlich, einen sinnvollen Kompromiss zu finden, wie z.B. die Vergrößerung des Temperatur- und Feuchtekorridors. Nach Möglichkeit ist aber darauf zu achten, die Materialien mit verschiedenen Anforderungen im Depotraum zu separieren. Dies ist in Bezug auf eine wirksame Klimakontrolle sowie aus Gründen des Feuerschutzes sinnvoll.

Angaben zu erforderlichen Luftwechselraten sind in DIN ISO 11799 nicht zu finden. Jedoch wird auf die Notwendigkeit einer sauberen Luft, die gleichmäßige Verteilung dieser sowie auf die Abführungen von schädlichen Ausgasungen hingewiesen. Bei der Beleuchtung sollte grundsätzlich darauf geachtet werden, dass Intensität und Dauer der Lichteinwirkung sowohl bei Tageslicht als auch bei Kunstlicht so gering wie möglich gehalten wird. Die optimale Lösung stellt dabei ein Raum ohne natürliche Tageslichtversorgung und eine Beschränkung der Beleuchtung auf die Zeit der Anwesenheit von Personen im Depot dar. Aus Gründen der Energieeffizienz und zum Schutz der Archivalien vor UV-Licht sollten diese bei Dauerbeleuchtung nicht mehr als 50 Lux ausgesetzt sein [2].

Die Klimaregulierung nach dem „Kölner Modell“ macht sich das Prinzip der freien Lüftung zu Eigen. Voraussetzung ist ein massiver Wandaufbau aus Vollziegelmauerwerk, Dämmung und hinterlüfteter Fassade, welcher optimale Wärme dämmende Eigenschaften besitzt [3]. Somit soll das Innenraumklima so wenig wie möglich saisonalen Schwankungen in Bezug auf Temperatur und Feuchte ausgesetzt werden. Die Regulierung des Innenraumklimas erfolgt ausschließlich über Fensterlüftung, im günstigsten Fall über Oberlichter, die eine Querlüftung ermöglichen und über Heizkörper oder eine Wandtemperierung. Zusätzlich kann es nötig sein, die Belüftung durch Ventilatoren zu unterstützen. Oft ist der Einsatz von mobilen Entfeuchtern notwendig, da im Sommer durch die natürliche Lüftung die Feuchte im Innenraum stark ansteigen kann [3].

Ein zweites Modell, auf das bei der Konzeption von Depotbauten zurückgegriffen wird, ist das „Schleswiger Modell“, das beim Landesarchiv Schleswig-Holstein (Bezug 1991) Anwendung fand. Hier wurde bewusst auf eine aktive Beeinflussung des Innenraumklimas im Depot verzichtet und der Luftaustausch auf ein Minimum reduziert, um den Einfluss des Außenklimas auf das Innenklima so gering wie möglich zu halten.

Das dritte Modell ist das „temperierte Haus“, welches sich in dieser Form erst in den letzten Jahren entwickelt hat und zum ersten Mal im Landeskirchlichen Archiv in Kassel umgesetzt wurde. Hierbei erfolgt die Temperierung des Depotraums ausschließlich über eine Wandtemperierung und nicht über eine Luftheizung.

### 3. Hygrothermische Untersuchungen

Um die klimatischen Bedingungen im Jahresverlauf sowie über mehrere Jahre hinweg im Depotraum zu untersuchen, wird das thermisch-hygrische Verhalten der geplanten Baukonstruktion auf Grundlage des architektonischen und baulichen Vorentwurfs anhand einer Raumklimasimulation mit WUFI®-Plus [4-7] untersucht. Die Berechnungen sind ausschließlich auf den Depotraum und nicht auf das Gesamtgebäude des Kulturgüterdepots bezogen (siehe Bild 1 dunkelrot hinterlegter Raum).

Die Simulationen werden für ein Depot mit Gemäldegut sowie mit Archivgut durchgeführt. Bild 2 zeigt die raumklimatischen Anforderungen für Temperatur und relative Luftfeuchte. Es ist der deutlich größere Temperaturkorridor des Gemäldedepots sowie der niedrigere Ansatz der relativen Luftfeuchte im Archivdepot zu erkennen. Für beide Depottypen werden die hygrothermischen Berechnungen über einen Zeitraum von fünf Jahren mit den klimatischen Außenbedingungen von Würzburg durchgeführt. Durch Auswertung des fünften Jahres wird das vom Ausgangszustand unabhängige langfristige Verhalten beurteilt. Um den Einfluss der Baufeuchte zu betrachten, wird dementsprechend die Anfangsperiode betrachtet. Es werden neben den klimatischen Außenbedingungen, dem Aufbau der Gebäudehülle in Bezug auf Konstruktion und Materialkennwerte sowie festzulegende Randbedingungen für Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchtung auch Feuchte-, Wärme- und CO<sub>2</sub>-Quellen berücksichtigt. Die Materialkennwerte entstammen der WUFI®-Plus -

Materialdatenbank oder wurden experimentell bestimmt (Leinwand, Gemälderahmen, Archivgut). Als Nebenklimata wird für den Boden von  $9 \pm 4 \text{ °C}$  und  $100 \text{ \% r. F.}$ , für die Anlieferungszone von  $18 \pm 9 \text{ °C}$  und  $60 \pm 10 \text{ \% r. F.}$  sowie für die Werkstatt von  $18 \text{ °C}$  und  $50 \pm 5 \text{ \% r. F.}$  ausgegangen.

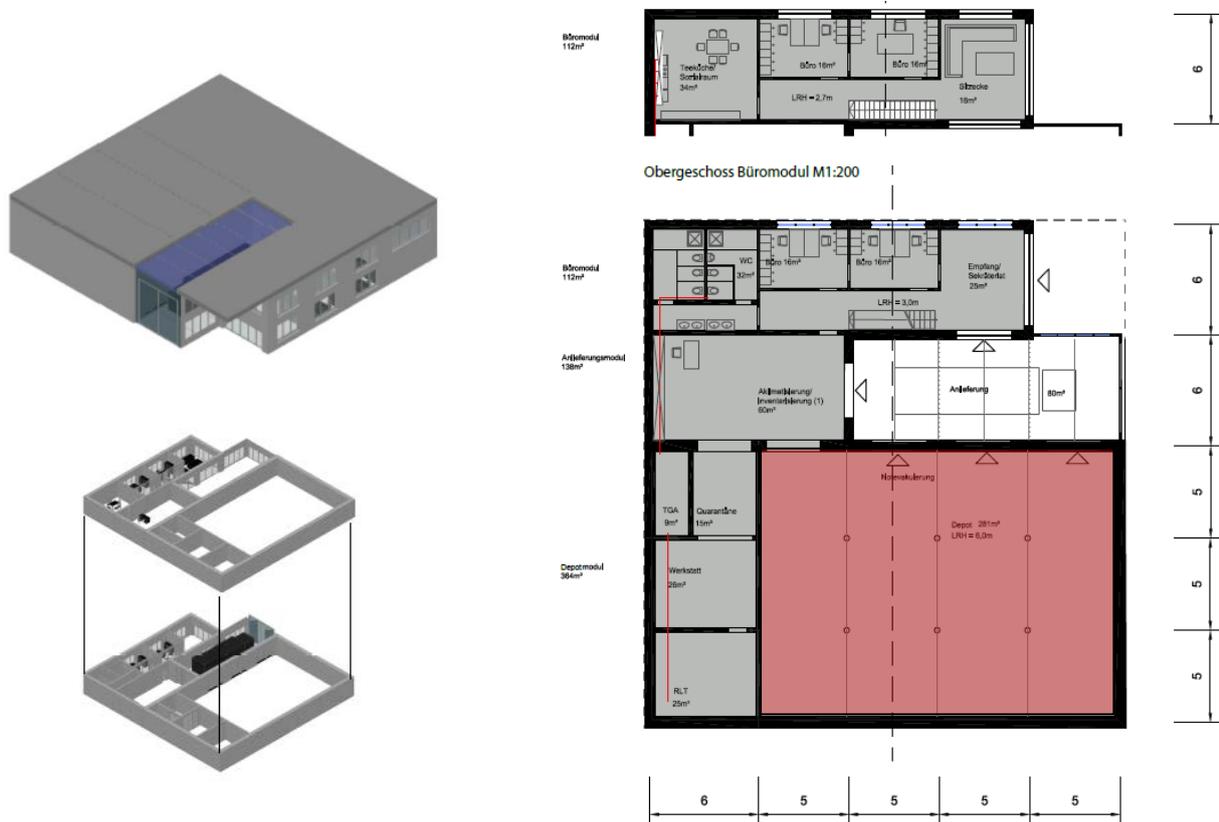


Bild 1: Entwurfsplan für das Modulare Null-Energie-Depot; Entwurf Dipl. Ing. Architekt Volker Huckemann.

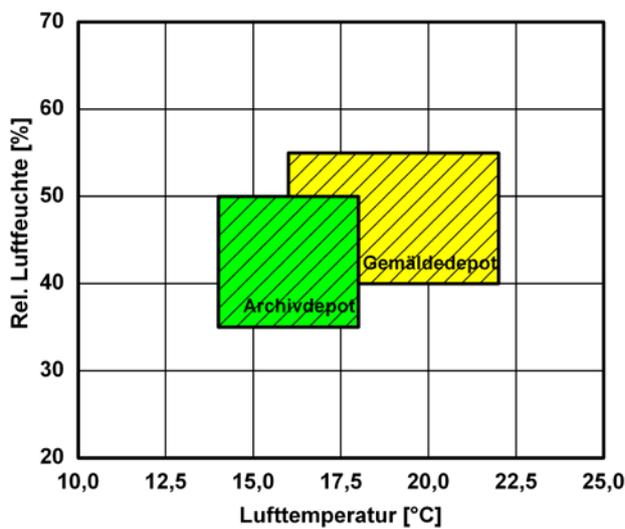


Bild 2: Darstellung des vorgegebenen hygrothermischen Bereichs für Archiv- und Gemäldedepot.

Da für das Innenklima auch die thermischen und hygrischen Massen des Archivgutes von wesentlicher Bedeutung sind, werden diese zusammen mit der Regalierung in die Betrachtung mit einbezogen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Festlegung des Magazinbestands und des Lagersystems sowie der Nutzungszeiten und der Beleuchtung für Archiv- und Gemäldedepot.

Depotart	Archivdepot	Gemäldedepot
Magazinbestand	4700 Archivkartons (70 % Belegung)	4800 Gemälde
Masse/Volumen	282 m <sup>3</sup> Papier	2500 kg Holz, 1000 kg Leinwände
Lagersystem	10 Fachbodenregale, je 12 m mit je 14 Fachböden	48 Ziehwände
Masse	10 t Stahl	10 t Stahl
Nutzungszeiten	3 x täglich 2 Personen für 20 min; Montag – Freitag	3 x täglich 2 Personen für 20 min; Montag – Freitag
Beleuchtung	bei Anwesenheit 12 W/m <sup>2</sup> → 3372 W; Notbeleuchtung 32 W durchgängig	bei Anwesenheit 12 W/m <sup>2</sup> → 3372 W; Notbeleuchtung 32 W durchgängig

Für die Berechnungen werden drei Varianten, welche unterschiedliche Bauteilaufbauten in Hinblick auf die Dämmmaterialien aufzeigen, zugrunde gelegt. Zwei der Varianten verfügen über einen Außenwandaufbau mit Sandwichelementen aus Betonfertigteilen. Dabei wird bei einer der Varianten die wärmedämmende Schicht mit expandiertem Polystyrol-Hartschaum (Ausgangsvariante) und bei der anderen Variante mit Phenolharzschaum ausgeführt. Um eine Variante ohne den negativen Effekt der Baufeuchte bewerten zu können, wird zusätzlich eine dritte Variante berechnet bei der die Außenwände des Depotraums ausschließlich aus Schaumglas bestehen. Bei der Ausgangsvariante wird für das Flachdach eine Mineralschaumplatte und für die Bodenplatte extrudierter Polystyrol-Hartschaum als Dämmung untersucht. Für die zweite Variante wird beim Flachdach ebenfalls Phenolharzschaum verwendet. Für die Bodenplatte wird Schaumglas festgelegt. Bei der Variante mit einem Außenwandaufbau aus Schaumglas wurden die Bauteilaufbauten und Materialien für das Flachdach und die Bodenplatte von der Ausgangsvariante übernommen. Tabelle 3 listet die wesentlichen Merkmale der drei Varianten auf.

Tabelle 3: In die Berechnungen einbezogene Varianten des Depots.

<b>Varianten</b>	<b>Ausgangsvariante</b>	<b>Verbesserte Gebäudehülle</b>	<b>Baufeuchtereduzierte Gebäudehülle</b>
<b>Boden</b>	10 cm XPS, 30 cm Beton, Bitumenbahn, 6 cm Parkett U-Wert: 0,276 W/m <sup>2</sup> K	20 cm Schaumglas, 30 cm Beton, Bitumenbahn, 6 cm Hartholz U-Wert: 0,177 W/m <sup>2</sup> K	wie Ausgangsvariante
<b>Außenwand</b>	6 cm Beton, 14 cm EPS, 18 cm Beton U-Wert: 0,214 W/m <sup>2</sup> K	6 cm Beton, 14 cm Phenolharzschaum, 10 cm Beton U-Wert: 0,151 W/m <sup>2</sup> K	28 cm Schaumglasplatten U-Wert: 0,132 W/m <sup>2</sup> K
<b>Dach</b>	Dachbahn, 16 cm Mineralschaumplatte, 25 cm Porenbeton U-Wert: 0,153 W/m <sup>2</sup> K	Dachbahn, 16 cm Phenolharzschaum, 25 cm Porenbeton U-Wert: 0,098 W/m <sup>2</sup> K	wie Ausgangsvariante
<b>Innenwände</b>	10 cm Phenolharz, 13 cm Beton U-Wert: 0,274 W/m <sup>2</sup> K	wie Ausgangsvariante	wie Ausgangsvariante

Tabelle 4 zeigt die bei den hygrothermischen Berechnungen durchgeführten Variationen der Randbedingungen in Bezug auf Klimatechnik, Gebäudehülle, Dämmniveau der Bodenplatte, Luftwechsel, Archivgutmenge und Baufeuchte.

Tabelle 4: Variation der Randbedingungen.

	Variation	Archivdepot	Gemälde depot
<b>Klimatechnik</b>	Vollklimatisierung	x	x
	nur Heizen	x	x
	freies Schwingen	x	x
<b>Gebäudehülle</b>	Ausgangsvariante	x	x
	Variante Phenolharzschaum	x	x
	Variante Schaumglas	x	x
<b>Variation Bodenplatte</b>	Ausgangsvariante	x	
	ohne Dämmung	x	
	mit Schaumglas	x	
<b>Luftwechsel</b>	0,05 1/h	x	
	0,2 1/h	x	
	0,5 1/h	x	
<b>Archivgutmenge</b>	voll	x	
	halbvoll	x	
	leer	x	
<b>Baufeuchte</b>	reduzierte Baufeuchte	x	

### 3.1. Variation der Klimatisierung

Bei der Ausgangsvariante, deren Wärmedämmung größtenteils aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum besteht, zeigt sich das in den Grafiken von Bild 3 dargestellte Temperatur- und Feuchteverhalten. Variiert wurde hier die Art der Klimatisierung, also freies Schwingen (keinerlei Klimatisierung), Heizen sowie zum Erreichen des mit eingezeichneten Klimakorridors (grüner Bereich) Heizung mit Kühlung. Beim Archivdepot sinkt bei freiem Schwingen die Raumtemperatur im Winter bis auf 5 °C ab, im Sommer übersteigt diese 20 °C, so dass die obere Grenze von 18 °C nicht eingehalten werden kann. Bei einer strikten Einhaltung der Temperaturgrenzen beim Archivdepot ist somit eine Beheizung und Kühlung erforderlich. Zudem wirkt sich das freie Schwingen ungünstig auf die relative Luftfeuchte im Raum aus. Diese bewegt sich mit etwa 60 % auf zu hohem Niveau. Wird das Archivdepot bei einer Unterschreitung der Grenze von 14 °C beheizt, ergibt sich im Winter die geforderte Solltemperatur. Durch die Beheizung kann zudem die relative Luftfeuchte zumindest teilweise im 1. Quartal des Jahres reduziert werden, so dass der vorgegebene Korridor eingehalten wird. Im Sommer ergibt sich dieselbe Temperaturkurve wie bei der frei schwingenden Variante, aber eine

etwas niedriger liegende relative Luftfeuchte. Nur die vollständige Klimatisierung gewährleistet eine strikte Einhaltung des geforderten Klimakorridors. Die maximal zu verzeichnenden täglichen Schwankungen bei der Betrachtung des Archivdepots liegen hinsichtlich der Lufttemperatur bei 0,3 K und bei 0,9 % hinsichtlich der relativen Luftfeuchte, wenn nur eine Beheizung des Depots angesetzt wird. Zulässig sind maximale Schwankungen von 1 K und 3 % r. F. für Depoträume mit Archivgut. Damit werden die zulässigen täglichen Schwankungen eingehalten.

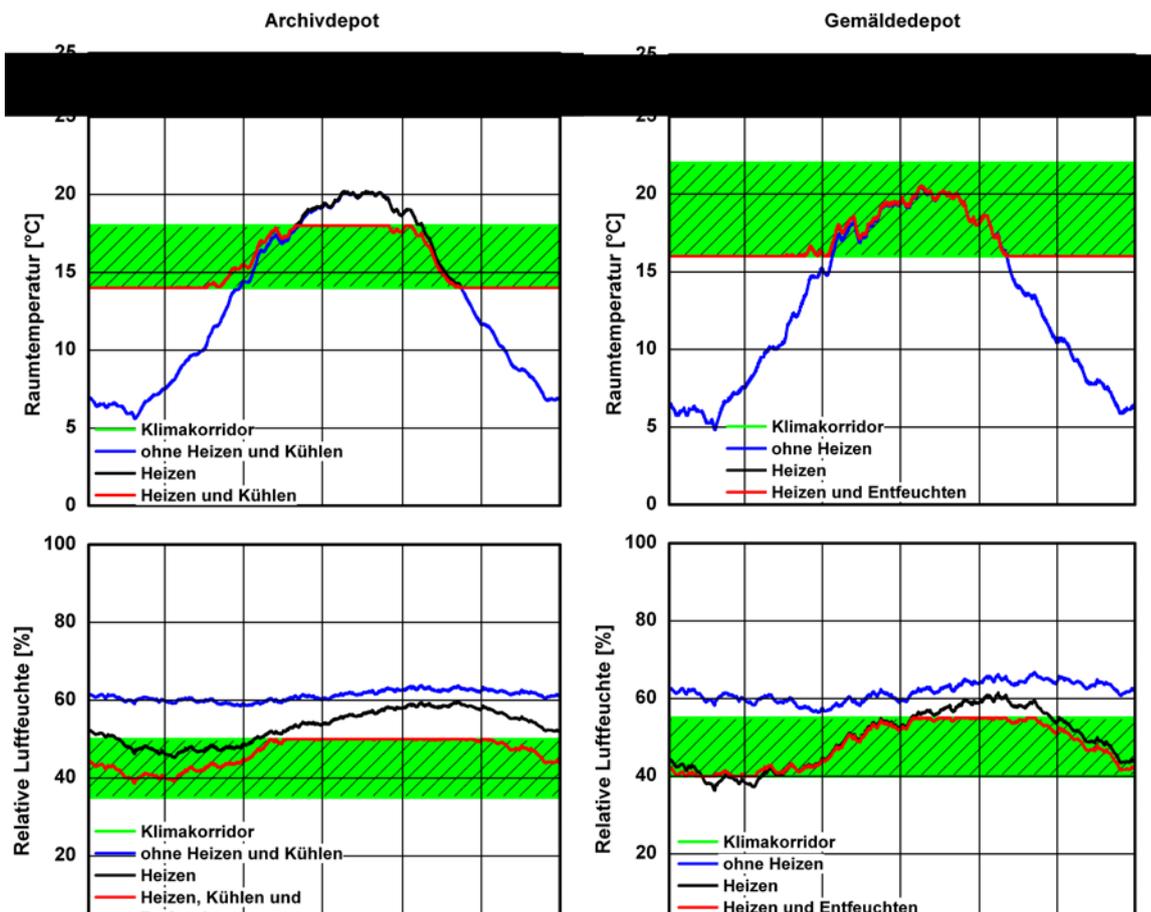


Bild 3: Hygrothermisches Verhalten der Ausgangsvariante bei Variation der Klimatisierung, links für das Archivdepot und rechts für das Gemäldedepot.

Für das Gemäldedepot ist die Situation durch die Lage und größere Breite des erlaubten Klimakorridors günstiger. Bei freiem Schwingen ergibt sich in Bezug auf die Raumtemperatur ein nahezu gleiches Verhalten wie beim Archivdepot. Allerdings wird hier die zulässige Maximaltemperatur nicht überschritten, da diese bei 22 °C liegt. Eine Kühlung ist somit nicht erforderlich. Die relative Luftfeuchte weist dagegen sowohl im Jahres- als auch in Bezug auf die Tagesgänge höhere Schwankungen auf, was in dem geringeren Feuchtepuffervermögen des Depotgutes begründet ist. Für Depots mit Gemäldegut liegen die maximal zulässigen Schwankungen bei 3 K und 5 % relativer Feuchte. Beim Gemäldedepot zeigt sich, dass mit Beheizung die maximalen täglichen Schwankungen bei 0,4 K und 1,1 % r. F. liegen.

Bei der hier ausgewerteten ersten hygrothermischen Betrachtung der Ausgangsvariante zeigt sich, dass in Bezug auf ein passives Gebäudekonzept der Modultyp Gemäldedepot aufgrund der Festsetzung größerer Klimakorridore nach oben ein deutlich größeres Potential aufweist. Aufgrund der höheren Mindesttemperaturen ist die Beheizung jedoch energieintensiver als beim Archivdepot. Beim Archivdepot hingegen stellen die engen Grenzen für Temperatur und Feuchte höhere Anforderungen an die Gebäudetechnik.

### 3.2. Bauliche Varianten

Die Variante „Verbesserte Gebäudehülle“, die hier als Variante „Phenolharzschaum“ bezeichnet wird, soll mit der Variante „Schaumglas“ sowie der oben behandelten Ausgangsvariante verglichen werden. Bild 4 zeigt den Vergleich der drei Varianten für den Fall, dass im Depotraum nur eine Beheizung stattfindet. Beim Archivdepot wirken sich die „Ausgangsvariante“ und die Variante „Schaumglas“ temperaturmäßig nahezu gleich aus. Bei der Variante „Phenolharzschaum“ sind höhere Sommertemperaturen zu verzeichnen. Das Feuchteverhalten deckt sich hier mit dem der Ausgangsvariante. Bei der Ausführung mit Schaumglas sind dagegen im Winter vergleichsweise geringe Feuchten zu verzeichnen. Im Sommer wird jedoch auch hier der Feuchtekorridor überschritten. Bei allen Varianten treten maximal tägliche Schwankungen von 0,3 K und 0,8 bis 0,9 % r. F. auf.

Die Variante „Phenolharzschaum“ beim Gemäldedepot zeigt im Sommer höhere Spätsommertemperaturen als die anderen beiden Varianten. Auch hier verläuft die Kurve der relativen Feuchte nahezu gleich der der „Ausgangsvariante“. Bei der „Schaumglasvariante“ ist im Winter eine niedrigere relative Feuchte als beim Archivdepot zu verzeichnen, so dass hier eine Befeuchtung erforderlich wird. Im Sommer trägt der höher liegende Klimakorridor zur Einhaltung der Feuchtegrenzen bei. Jedoch wird im Hochsommer die Grenze von 55 % dauerhaft überschritten. Im Sommer liegt die relative Luftfeuchte der Variante „Schaumglas“ etwas höher als bei den anderen Varianten, da aufgrund der geringfügig niedrigeren Raumlufttemperaturen weniger Feuchte aufgenommen werden kann. Beim Gemäldedepot liegen die maximalen täglichen Schwankungen bei 0,4 °C und 1,1 % r.F. für die Ausgangsvariante und die Phenolharzschaumvariante und bei 0,8 °C und 1,2 % r. F. für die Schaumglasvariante.

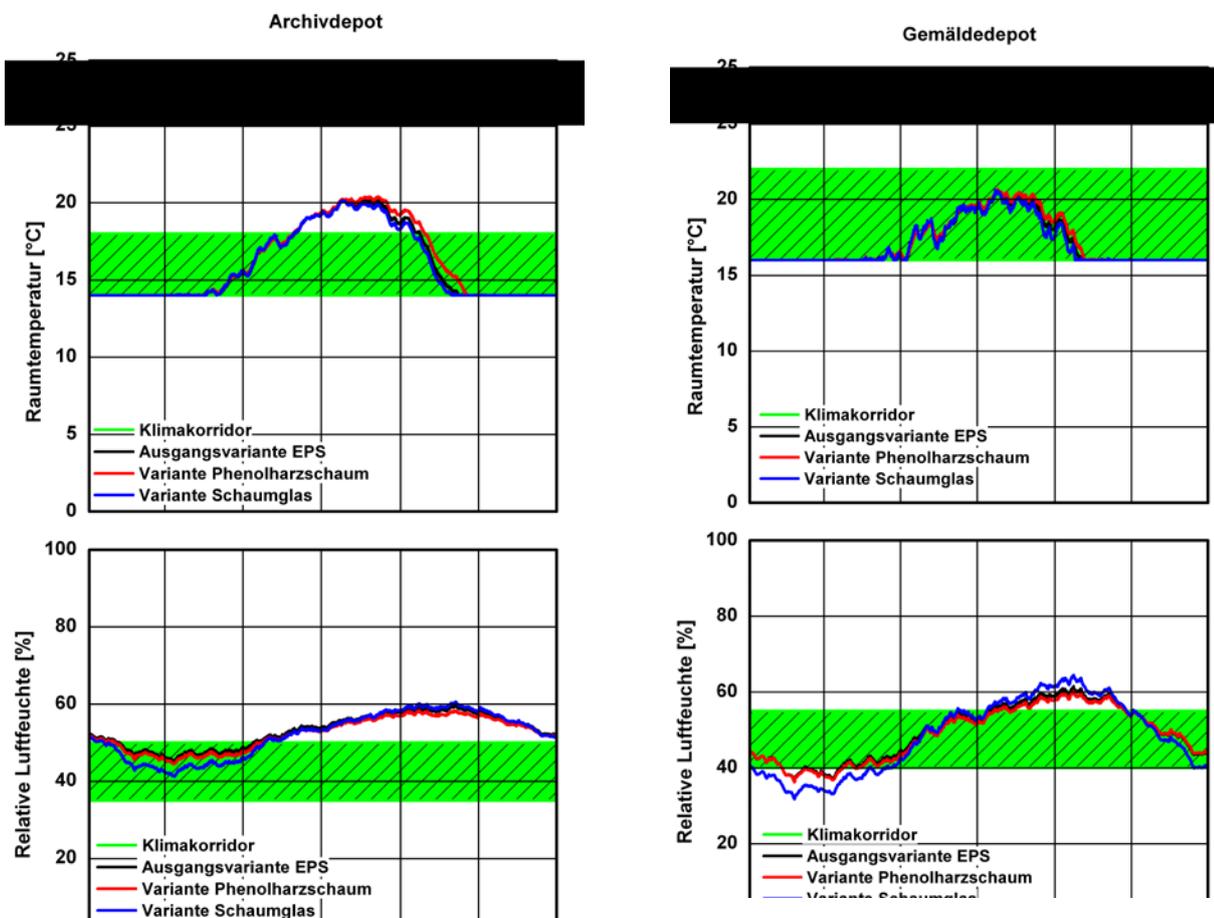


Bild 4: Vergleich des hygrothermischen Verhaltens der drei baulichen Varianten, links für das Archivdepot und rechts für das Gemäldedepot.

### 3.3. Hygrothermische Varianten

Zusätzlich wurde für den Modultyp Archivdepot der Einfluss der Baufeuchte, des Luftwechsels, der Archivgutmenge und der Bodenplatte untersucht, da hier nennenswerte hygrothermische Einflüsse zu erwarten sind. Die „Baufeuchte“ wurde für die „Ausgangsvariante“ betrachtet und deren Einfluss wird in Bild 5 links dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die in den Betonfertigteilen vorhandene hohe Baufeuchte im Depotraum deutlich höhere Luftfeuchten auftreten. Durch den sehr niedrigen Infiltrationsluftwechsel von 0,05 1/h baut sich dieser Einfluss nur sehr langsam ab, sodass nach fünf Jahren immer noch ein deutlich negativer Einfluss gegeben ist. Da Beton aufgrund seines hohen Diffusionswiderstandes nur sehr langsam trocknet, müsste vor Einlagerung des Archivgutes eine sehr lange Trocknungsperiode berücksichtigt oder über andere Maßnahmen eine Diffusion nach innen unterbunden werden.

Die rechte Grafik verdeutlicht, dass eine Steigerung des Luftwechsels geringere Sommertemperaturen und geringere Luftfeuchten im Winter bewirken. Gleichzeitig sind aber höhere Luftfeuchten im Sommer zu erwarten. Mit einem Luftwechsel von 0,2 1/h liegen die maximalen täglichen

Schwankungen noch innerhalb der Grenzwerte, aber deutlich höher als bei einer Luftwechselrate von 0,05 1/h. Beim Ansetzen eines Luftwechsels von 0,5 1/h treten mit 5,7 °C und 5,5 % r. F. erhebliche tägliche Schwankungen auf, die deutlich über den zulässigen Werten liegen.

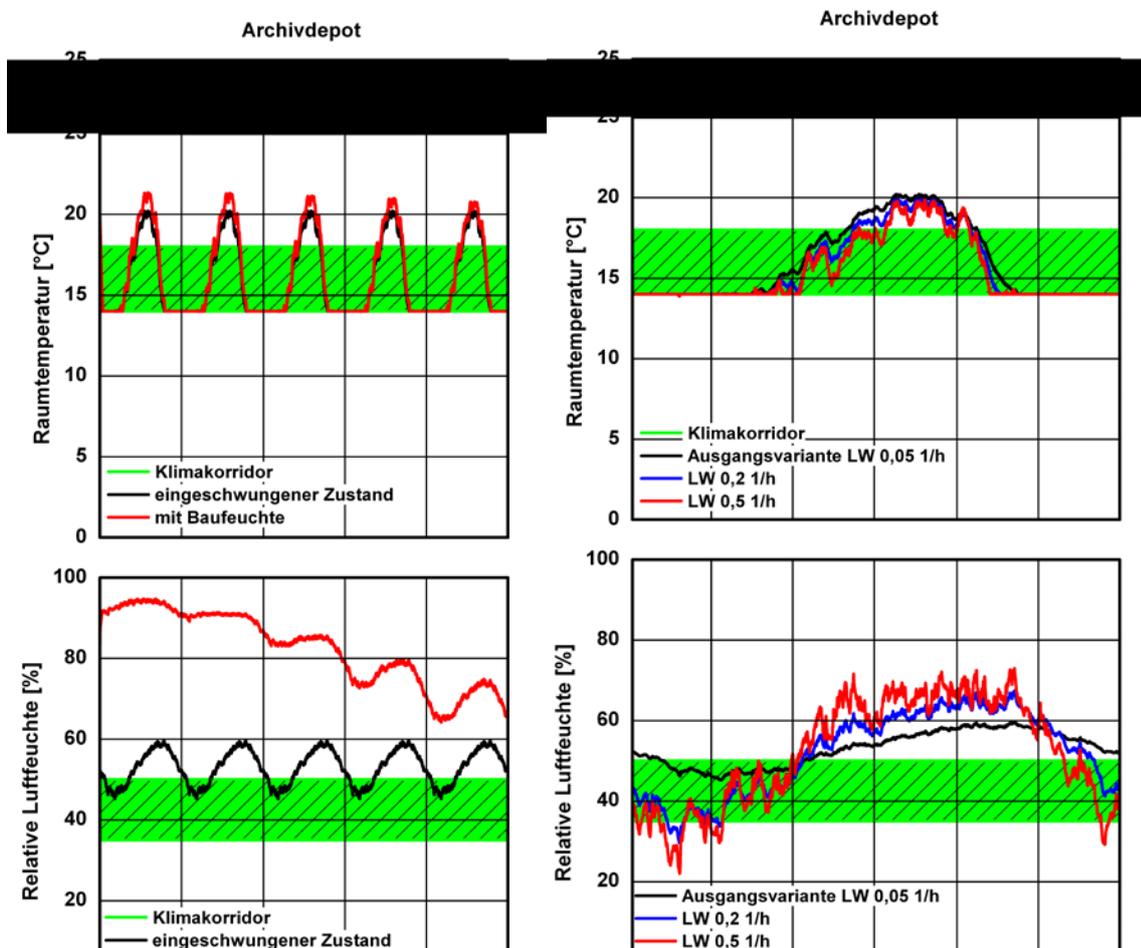


Bild 5: Hygrothermischer Einfluss der Baufeuchte (links) und des Luftwechsels (rechts) beim Archivdepot.

Auch das im Depot vorhandene Archivgut beeinflusst das Raumklima maßgeblich (Bild 6 links). Die Sommertemperaturen sind bei einem vollen sowie halbvollen Depot nahezu gleich; im leeren Zustand ergeben sich dagegen merklich höhere Temperaturen. In Bezug auf die Luftfeuchte ergibt sich ebenfalls nur ein geringer Unterschied zwischen vollem und halbvollem Depot, die kurzfristigen Schwankungen sind bei dem halbvollen Depot allerdings größer. Ohne Archivgut ergibt sich dagegen eine deutlich höhere Schwankungsbreite im Jahresgang, sodass die Luftfeuchten zwischen ca. 38 und 64 % r. F. schwanken. Ein großer Einfluss des Depotgutes zeigt sich vor allem in Bezug auf die täglichen Luftfeuchteschwankungen. Die maximalen täglichen Schwankungen der relativen Luftfeuchte von 4,1 % im leeren Zustand übersteigen die zulässigen Werte.

Bei Betrachtung des Einflusses der Bodenplatte liegt auch das Konzept des dänischen Kunstdepot und Konservierungszentrum in Vejle zugrunde, bei dem bewusst keine Bodendämmung eingebaut wurde. Die rechte Grafik in Bild 6 zeigt, dass der Verzicht einer Bodendämmung niedrigere Temperaturen im Sommer bewirkt. Dadurch ergeben sich jedoch hohe relative Luftfeuchten von bis zu 70 % und eine deutlich längere Heizperiode. Die im Vergleich zur Ausgangsvariante verbesserte Bodendämmung mit Schaumglas führt zu einer etwas kürzeren Heizperiode, aber auch höheren sommerlichen Temperaturen und damit etwas geringeren maximalen Luftfeuchten.

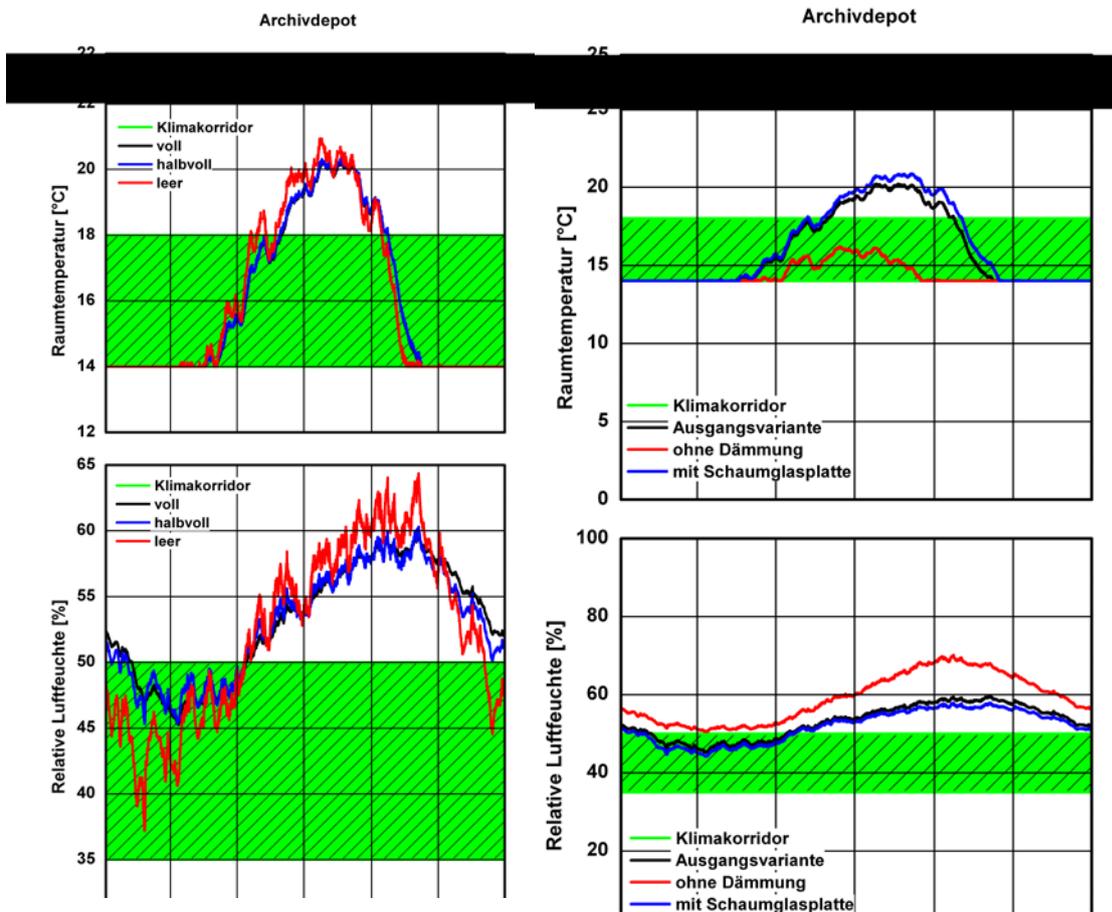


Bild 6: Hygrothermischer Einfluss des Archivguts (links) und der Bodenplatte (rechts) beim Archivdepot.

### 3.4. Für den Depotraum berechneter Nutzenergiebedarf

In Tabelle 5 ist der für den Depotraum berechnete Nutzenergiebedarf für Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten sowie der Gesamtbedarf für die drei Varianten getrennt für Archiv- und Gemäldedepot (AD bzw. GD) zusammengestellt. Da die angesetzte Mindesttemperatur für das Gemäldedepot um 2 K höher ist als beim Archivdepot, ergibt sich durchgehend bei allen Varianten ein höherer Heizwärmebedarf. Beim Archivdepot muss jedoch aufgrund des kleineren Klimakorridors mehr gekühlt und entfeuchtet werden, so dass sich hierfür zusätzliche bzw. höhere Energiebedarfe ergeben.

Der Aufwand für die Befeuchtung ist nur beim Gemäldedepot im Winter erforderlich. Bei der Gesamtbetrachtung zeigt sich, dass sich dadurch die beiden Depottypen in Bezug auf den Gesamtenergiebedarf wieder annähern. Am energetisch günstigsten zeigt sich die Variante „Phenolharzschaum“, die einen im Mittel 28 % geringeren Energiebedarf als die „Ausgangsvariante“ aufweist. Da sich die Variante „Schaumglas“ durch den Bauteilaufbau der Außenwände von der Ausgangsvariante unterscheidet, ist diese trotz besserer U-Werte von 0,13 W/(m<sup>2</sup>K) der Außenwände energetisch etwas schlechter als die Variante „Phenolharzschaum“, bei der der Boden- und der Dachaufbau deutlich besser gedämmt sind.

Tabelle 5: Ergebnisse der hygrothermischen Berechnungen des Nutzenergiebedarfs der einzelnen Energieanteile (AD = Archivdepot, GD = Gemäldedepot).

Energiebedarf [kWh]	Ausgangsvariante EPS		Variante Phenolharzschaum		Variante Schaumglas	
	AD	GD	AD	GD	AD	GD
Heizen	6.628	9.870	4.468	7.102	5.856	8.042
Kühlen	963	0	895	0	749	0
Entfeuchten	500	147	479	118	485	199
Befeuchten	0	66	0	64	0	144
Gesamt	8091	10083	5842	7284	7090	8385
Bezogen auf Ausgangsvariante [%]	100	100	72	72	88	83

## 4. Zusammenfassung

Bei der Konzeption eines modularen energieeffizienten Kulturgüterdepots müssen besondere Anforderungen und Randbedingungen beachtet werden, wobei diese von der Art des Depotgutes abhängen. Während bei einem Archivdepot 14-18 °C Raumtemperatur und Raumluftheuchten von 35-50 %r. F. gefordert werden, liegen bei einem Gemäldedepot sowohl die geforderte Raumlufthtemperatur mit 16-22 °C als auch die Raumluftheuchte mit 40-55 %r. F. höher. Außerdem sollte der Depotraum für den Erhalt des Archivgutes möglichst geringe kurzfristige Schwankungen in Bezug auf die relative Feuchte und die Raumtemperaturen aufweisen. Der Verbesserung der Energieeffizienz mit Hilfe von baulichen sowie passiven Maßnahmen ist grundsätzlich Vorzug zu geben. Denn durch die Verwendung von passiven Systemen kann oft die erforderliche Anlagentechnik eines Gebäudes reduziert werden. Die Ausführung des Depotraums ohne Fenster aus Gründen der Minimierung der Intensität und Dauer der Lichteinwirkung auf die Kulturgüter, zieht einerseits den Verzicht auf solare Wärmegewinne mit sich, andererseits kann durch die sich damit ergebenden niedrigen Raumtemperaturen zumindest beim Gemäldedepot auf eine Kühlung verzichtet werden. Eine Be- und Entfeuchtung zeigt sich hier jedoch als unumgänglich, insofern die Vorgaben des Klimakorridors eingehalten werden sollen.

Im Vergleich zur Ausgangsvariante kann durch eine Verbesserung des Dämmstandards bei Außenwand, Boden und Dach der Energiebedarf um immerhin fast 30 % reduziert werden. Trotz besserem U-Wert der Außenwände ergibt sich bei der Variante „Schaumglas“ energetisch nur ein mittlerer Platz, da sich diese nur in Bezug auf den Bauteilaufbau der Außenwände von der Ausgangsvariante unterscheidet. Hier stand aber eher die Fragestellung des Einflusses der Baufeuchte im Vordergrund. Die Berechnungen zeigen, dass vor allem auch aufgrund des niedrigen Luftwechsels die Baufeuchte ein ernst zu nehmendes langfristiges Problem darstellen kann. Hier ist konstruktiv unbedingt sicher zu stellen, dass Baufeuchte nicht in den Depotraum abtrocknen kann. Allerdings kann dieser Aufwand durch die Verwendung von Baustoffen mit einer geringen Feuchte, wie es für die modularen Depotgebäude erfolgt, deutlich minimiert werden. Der Infiltrationsluftwechsel im Depotraum muss nämlich, wie die Berechnungen zeigen, unbedingt auf diesem niedrigen Niveau liegen, um größere, für das Depotgut schädliche, Tagesschwankungen zu vermeiden. Dies gilt insbesondere dann, wenn im Depot vergleichsweise geringe thermische und Feuchte puffernde Massen vorhanden sind.

Insgesamt zeigen die Berechnungen, dass zumindest für den Depotraum, aufgrund der engen vorgegebenen Klimagrenzen durch passive Maßnahmen das Ziel eines Nullenergiedepots nicht erreicht werden kann. Die Einhaltung enger Grenzen für Temperatur und relative Feuchte gestaltet sich schwierig. Es sollte allerdings auch die Notwendigkeit derart enger Grenzen hinterfragt werden. Statt dieser sollte über die Möglichkeit nachgedacht werden, den Temperatur- und Feuchtebereich soweit wie möglich den jahreszeitlichen Schwankungen zu überlassen, um den Energiebedarf für die Konditionierung des Raumes so gering wie möglich zu halten [3]. Wie die Berechnungen

zeigen, würde dann zwar im Depot ein deutlicher Jahresgang der Temperatur auftreten, dafür aber über das Jahr eine nahezu konstante Luftfeuchte von um die 60% r. F.

Insgesamt verdeutlicht die Studie, dass es möglich ist, ein Depot nach neuesten wissenschaftlichen, ökonomischen und ökologischen Erkenntnissen zu errichten. Es hat sich gezeigt, dass nur über die Verwendung standardisierter Fertigbauelemente zwar ein effizienter Bau möglich ist, aber die Baufeuchte entweder einen späteren Bezug oder eine aktive Entfeuchtung notwendig macht. Weitere Arbeiten auf dem Gebiet der Betontechnologie ermöglichen nun den Einsatz trockener Bauteile, erste Prototypen dieser Moduldepot Gebäude werden in Kürze realisiert.

Ein wichtiges Thema sind neben den Investitionskosten die späteren Nutzungskosten der Moduldepot-Gebäude. Über die gesetzlichen Vorgaben der EnEV und des EEG hinaus werden innovative Ansätze verfolgt und lokale Ressourcen/ Umweltenergien soweit wie möglich in das Konzept eingebunden. Damit ist es möglich, ein energieeffizientes Gebäude mit einem angepassten Raumklima für eine konservatorisch sichere Aufbewahrung der Objekte zu errichten.

## 5. Nachbemerkung

Die am Fraunhofer-Institut für Bauphysik durchgeführte Studie zur Realisierung eines Nullenergie-Depot- und Archivgebäudes zeigte, dass für eine langfristige und sichere Bewahrung von Kulturgütern auf Dauer eine energieeffiziente, kostengünstige und einfache Strategie für Depotbauten notwendig ist.

Die in der Studie ausgeführte Auflistung und Vorprüfung von verfügbaren Fertigbauelementen, die Findung innovativer Wandaufbauten, die rechnerische Bewertung und Optimierung der Depotmodulkomponenten und die Konzepterstellung zur Steigerung der Energieeffizienz ist derzeit noch nicht abgeschlossen, sondern wird im Rahmen eines Anschlussförderprogramms fortgeführt.

Ziel ist es, ein Unternehmen als Spin Off aus dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik auszugründen, das eine selbstständige Vermarktung von modularen Depot- und Archivgebäuden in Deutschland und Europa betreibt, die ModulDepot GmbH. Mit dieser Vermarktung von Forschungsleistung soll ein Beitrag beigesteuert werden, präventive Konservierung effizienter und günstiger zu gestalten. Nullenergie-Depots, die zum einen den konservatorischen Ansprüchen genügen und gleichzeitig wirtschaftlich sind, weil sie eine energieneutrale Bilanz aufweisen und zudem modular in Serie produziert werden können, gehört die Zukunft.

Die Entwicklung der Depot- und Archivmodule aus unterschiedlichen Baukonstruktionen, Anlagenkomponenten und Lagertechniksystemen werden aktuell einander gegenüber gestellt und kostenmäßig bewertet. Ebenfalls werden die unterschiedlichen Nutzungsprofile von Museen und Archiven erfasst, um kundenoptimierte und wirtschaftliche Modulklassen für Lagerung

und Funktion zu generieren. Dazu zählen Module für Anlieferung, Technik, Werkstatt und Büro, Archivgut, Gemälde, Möbel- und Kunsthandwerk, Grafik und Fotografie, Archäologie sowie für Technisches Kulturgut.

Für alle Module sind die vorgefertigten Fertigbauelemente, Lieferzeiten der Lagertechnik, Errichtungskosten und notwendige Energieversorgung ausgearbeitet. Diese Fertigbauelemente erlauben eine Errichtung des Gebäudes in Skelettbauweise, das serienreif, flexibel und erweiterbar ist. Die Umsetzung ist mit einfach zu beschaffenden Materialien und zu einer gleich bleibenden Qualität möglich. Das gesamte Bauvorhaben kann, dank der integrierten Vorplanung, gegenüber konventionellen Bauten schneller und wirtschaftlicher erfolgen. Zugleich orientiert sich die Konzeption am Null-Energie Haus und der Nutzung regenerativer Energien. Alle diese Faktoren bilden das Rückgrat für eine zeitgemäße Bewahrung von Kulturgut.

Die ModulDepot GmbH ermöglicht es, alle wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und energetischen Fragen zum Thema Depotbau vollständig und "aus einer Hand" abbilden und bearbeiten zu können. Den Museen und Archiven steht so ein zentraler Ansprechpartner für die integrale Systemlösung für Depot- und Archivfragen zur Verfügung.

## 6. Literatur

- [1] DIN ISO 11799: Information und Dokumentation – Anforderungen an die Aufbewahrung von Archiv- und Bibliotheksgut (ISO 11799:2003), Beuth Verlag, Berlin
- [2] Glauert, M., Anforderungen an ein Archivmagazin - Eine Checkliste  
[http://www.landeshauptarchiv-brandenburg.de/FilePool/Archivmagazin\\_Glauert.pdf](http://www.landeshauptarchiv-brandenburg.de/FilePool/Archivmagazin_Glauert.pdf), 08.07.2011
- [3] Geller, B., Archivbauten im Klimawandel – Erfahrungen mit der natürlichen freien Lüftung zur Klimaregulierung in Magazinräumen, VDR (Verband der Restauratoren), Heft 1/2, 2007, S. 121 – 125
- [4] Holm, A.; Sedlbauer, K.; Künzel, H.M.; Radon, J.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen – Einfluss des Lüftungsverhaltens auf die Raumluftfeuchte. Tagungsbeitrag für das 11. Bau-klimatische Symposium der TU Dresden. 26. – 30. Sep. 2002, Dresden, S. 562 – 575.
- [5] Holm, A.; Radon, J.; Künzel, H.M.; Sedlbauer, K.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA-Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81-94. Hrsg.: WTA-Publications, München.
- [6] Lengsfeld, K.; Holm, A.: Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI-Plus. Bauphysik 29 (2007), Heft 3, Seite 178-186. Ernst & Sohn Verlag Berlin
- [7] Krus, M.; Holm, A.H. Neue Beurteilungsmethode in der Altbausanierung. In: Venzmer, Helmuth (Hrsg); 19. Hanseatische Sanierungstage 2008, Berlin; ISBN 978-3-8167-7673-4, Fraunhofer IRB Verlag (2009) , S. 29-40.