

Simulationsrechnungen zur klimastabilen Auslegung von Depots und Archiven bei Sanierung und Neubau

Kristin Lengsfeld
Doris Rösler
Martin Krus
Kristina Holl
Stefan Bichlmair
Ralf Kilian
Lars Klemm

*Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis
zum 80. Geburtstag gewidmet*



Simulationsrechnungen zur klimastabilen Auslegung von Depots und Archiven bei Sanierung und Neubau

In Kunstdepots und Archiven ist es erforderlich, ein möglichst konstantes Raumklima zu gewährleisten, um Schädigungen am Archivgut zu vermeiden. Darüber hinaus handelt es sich hier um einen Gebäudetypus, der in der Regel lange Zeit genutzt wird. Daher ist die Frage nach den laufenden Energiekosten von besonderer Relevanz. Hier können über passive Maßnahmen bereits gute Ergebnisse erzielt werden, die sowohl ein gutes Raumklima für die Erhaltung der Kulturgüter, als auch einen energie- und damit kosteneffizienten Betrieb gewährleisten. Nachfolgend werden verschiedene Sanierungsmöglichkeiten eines bestehenden Gebäudes sowie Varianten für eine Depotenerweiterung und einen Depotneubau mit Hilfe von hygrothermischen Gebäudesimulationen in Hinblick auf die Stabilität des Innenraumklimas beurteilt und bewertet. Der Einfluss unterschiedlicher Luftwechselraten sowie die Menge des Archivgutes auf die Stabilität des Raumklimas werden gezeigt.

Stichworte: Depotbau; Museen; Archive; Klimastabilität; präventive Konservierung; Raumklima; hygrothermische Simulationen; Passive Klimatisierung

1 Einleitung

Ein wesentlicher Teil der Sammlungen deutscher Museen, Bibliotheken und Archive lagert in Depots und Magazinen (Abb. 1). Zentrale gesellschaftliche Aufgabe jeder dieser Einrichtungen sind die Sammlung und Bewahrung der Bestände. Für eine langfristige und sichere Bewahrung der Kulturgüter sind auf Dauer energieeffiziente, kostengünstige und einfache Strategien für Depot- und Archibauten gefragt. Es ist daher notwendig, in Zeiten ambitionierter Klimaziele und sinkender Kulturbudgets erweiterungsfähige, schnell zu errichtende, ökonomische sowie konservatorisch geeignete Lagerflächen für Sammlungen bereit zu stellen.

Archivalien und Depotgut sollen laut DIN ISO 11799 [DIN ISO 11799:2005] bei Langzeitaufbewahrungen möglichst gleichbleibenden Raumklimaverhältnissen ausgesetzt werden. Grund für die angegebenen Klimavorgaben ist die Aufgabe, das den Institutionen übertragenen Kulturgut langfristig zu erhalten. Hierbei ist es egal, ob es sich um ein Museum, Depot oder Archiv handelt, allerdings liegen nur für Archive entsprechende Normen vor (DIN 11799 und DIN 67700).

Kunstwerke bestehen häufig aus mehreren unterschiedlichen Schichten mit organischen Bestandteilen, die bei Klimaschwankungen sorptiv reagieren – sie quellen oder

Simulations and evaluation of the indoor climate of depots and archives

Art depots and archives require constant indoor air climate to avoid damage or degradation of archived goods. In addition this type of building has a long life expectancy. Therefore, operation energy costs are of particular importance. Passive measures show good results with regard to the indoor air conditions and help to save energy and subsequently depot building operation costs. In this paper, several retrofit variants designed for an existing building and different extension/remodeling cases for an existing building as well as for a new building of a museum depot have been investigated by hygrothermal building simulation. The evaluation of the results focuses on the stability of the indoor air climate and the operation energy demand. The influence of different air change rates and the effect of type and number of archive goods are analyzed.

Keywords: museum depot; archives; preventive conservation; indoor climate; hygrothermal building simulation; passive air conditioning

schrumpfen. Dies führt zu Spannungen im Materialverbund und zur langfristigen Schädigung beispielsweise in Form von Rissbildung, Lockerung und Substanzverlust. Generell



Bild 1. Innenansicht eines Depots für technisches Kulturgut mit Regallagern aus Stahl. Die Objekte werden in Kartons und Holzpaletten in den Regalen gelagert. [Quelle: Fraunhofer IBP]

Fig. 1. Metal racks in a depot for technical cultural goods. The objects are stored in cardboard boxes and on wooden pallets. [Fraunhofer IBP]

ist für die meisten Kunstwerke das Risiko einer langfristigen Schädigung umso kleiner, je geringer klimatische Schwankungen sind. Gleichzeitig ist die Reaktion auf Klimaschwankungen stark vom jeweiligen Materialverbund wie auch vom Erhaltungszustand abhängig [Holl 2016].

Nach DIN ISO 11799 Tabelle B.1 für Papier „im laufend benutzten Magazinbereich“ liegen die empfohlenen Klimabedingungen z. B. bei 14–18°C und 35–50% r. F. und maximalen täglichen Schwankungen von $\pm 1^\circ\text{C}$ und $\pm 3\%$ r. F. Zur Stabilisierung des Raumklimas können einerseits Klimaanlage eingesetzt oder andererseits mittels baulicher Lösungen sogenannte passive Maßnahmen [Klenz-Larsen, Broström 2011] getroffen werden, um diese Anforderungen zu erfüllen. Gerade in den skandinavischen Ländern liegen hier bereits umfangreiche Langzeit-Erfahrungen vor [Klenz-Larsen et al. 2012]. Im Zeichen sinkender Budgets ist dies ein vielversprechender Ansatz, denn der Einsatz von Klimaanlage ist sehr kostenintensiv und wird durch weiter steigende Energiekosten nicht attraktiver. Zudem ist die Lebensdauer bei allen Klimaanlage deutlich kürzer, als für die Archiv- und Depotgebäude selbst angesetzt wird.

Aus diesem Grund wird im Rahmen der hygrothermischen Simulationsberechnungen der Einfluss verschiedener baulicher Maßnahmen in Hinblick auf das sich im Anschluss einstellende Raumklima in Archivräumen gezeigt und bewertet. Es werden mögliche Sanierungsmaßnahmen an einem bestehenden Archiv sowie Konstruktionsvorschläge für die Erweiterung eines Depotgebäudes zur Aufbewahrung verschiedener Papiermaterialien gezeigt. Zusätzlich wird eine Nebausituation mit verschiedenen passiven Ansätzen zur Klimastabilisierung betrachtet.

Durch geeignete bauliche Maßnahmen im Depot- und Archivbereich soll sichergestellt werden, dass das Innenraumklima während des Betriebs des Depots bzw. Archivs möglichst konstant ist. Dabei liegt das Augenmerk in erster Linie darauf, kurzfristige Feuchte- und Temperaturspitzen, wie sie oft in unsanierten Gebäuden auftreten, sowie längere Perioden in zu feuchten oder trockenen Raumluftmilieus zu vermeiden. Jahreszeitlich bedingte Klimaschwankungen stellen eine geringere Gefährdung der Archivgüter dar als kurzzeitige Schwankungen im Tagesgang. Der Eintrag von Baufeuchte durch Baumaßnahmen sollte möglichst vermieden werden, da dadurch über einen längeren Zeitraum erhöhte Raumluftfeuchten zu erwarten sind. Unvermeidbare Baufeuchte ist im Planungsprozess zu berücksichtigen, indem entsprechende Maßnahmen geplant werden bis hin zu Vorgaben für die Vorgehensweise während der Inbetriebnahme des Depots.

Stabile Raumklimaverhältnisse werden im Wesentlichen von folgenden Gebäudeeigenschaften beeinflusst:

- Wärmespeichervermögen und die hygroskopischen Eigenschaften der Bauteile der Raumumschließungsflächen, des Interieurs und der Art und der Menge des Archivgutes,
- Luftaustausch mit der Außenluft bzw. mit weiteren Räumen mit anderem Innenraumklima,
- Feuchte- und Wärmeeintrag durch innere Quellen (z. B. Anwesenheit von Personen, Beleuchtung, Gebäudereinigung) und
- Fensterflächenanteil an den Außenwänden sowie gegebenenfalls der Sonnenschutz.

Infolge des engen Zusammenspiels dieser Rahmenbedingungen ist es in einem konventionellen Planungsprozess schwierig bis unmöglich, genau abzuschätzen, wie sich z. B. bauliche Veränderungen bei einer Sanierung, bei einem Erweiterungsbau bzw. einem Neubau auf das Raumklima auswirken werden. Ziel der durchgeführten hygrothermischen und energetischen Simulationen ist es daher zu zeigen, wie durch wenig und unkomplizierte Gebäudetechnik ein stabiles, an die jahreszeitlichen Klimaschwankungen angepasstes Innenraumklima in Depots erreicht werden kann.

2 Ausgangssituationen für die hygrothermischen Raumklimaberechnungen

Mit Hilfe der instationären hygrothermischen Gebäudesimulationssoftware WUFI®Plus [Lengsfeld 2007] werden die Auswirkungen verschiedener Sanierungsvarianten sowie von Neubaukonstruktionen bezüglich ihrer Wirkung auf das Raumklima und den Heizenergieverbrauch vergleichend bewertet.

Die Berechnungen erfolgen nach dem in Abb. 2 dargestellten Ablaufschema. Für die Berechnung werden neben den eingesetzten Materialien der einzelnen Bauteile die Randbedingungen – d. h. die Luftwechselrate, die Feuchteproduktion, die Leistung der Heizung und ggf. weitere technische Anlagen zur Raumklimatisierung im betrachteten Raum sowie die Menge des Archivgutes – berücksichtigt. Hierfür sind für die verwendeten Baumaterialien und des angesetzten Depot- bzw. Archivgutes geeignete hygrothermische Materialkennwerte erforderlich. Im Ergebnis erhält man realitätsnahe hygrothermische Verhältnisse der Umschließungsflächen, der Innenraumluft sowie den Energiebedarf bei instationären Randbedingungen.

2.1 Gebäudehülle – Sanierung

Im Rahmen der Berechnungen wird ein bestehender Archivraum mit ca. 480 m³ Volumen untersucht. Die Außenwand besteht aus in den Raum hineinragenden Stahlbetonträgern mit dazwischenliegenden Wandelementen aus Porenbeton. Es sind Lichtschlitze vorhanden, die mit einer gelb eingefärbten Folie versehen sind. Die angrenzenden Räume sind durch Leichtbetonwände abgetrennt.

Im Rahmen der Sanierung ist vorgesehen, die Geschossdecke zu dämmen sowie ein 20 cm dickes Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit einer vorgehängten Fassade aus Aluminiumblech und emaillierten Verbund-Sicherheitsverglasungen an die Außenfassade anzubringen. Zusätzlich zu diesen Maßnahmen stehen innenseitig folgende zwei Varianten zur Beurteilung:

- Sanierungsvariante 1: Innenseitige Ausmauerung einschließlich der Lichtschlitze zwischen den Stahlbetonträgern mit 43 cm Vollziegelmauerwerk und innenseitigem Kalkzementputz (als Beispiel für eine Sanierungsvariante mit großer innenseitiger Wärmespeicherkapazität als Wandaufbau).
- Sanierungsvariante 2: nur Ausmauerung der Lichtschlitze mit Porenbeton und innenseitigem Kalkzementputz

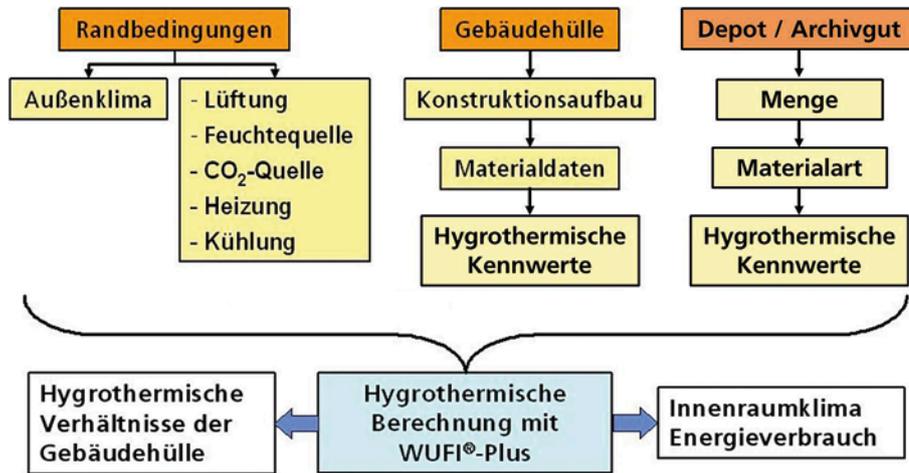


Bild 2. Ablaufschema zur Durchführung einer hygrothermischen Gebäudesimulation.

Fig. 2. Schematic for the implementation into the hygrothermal building simulation software tool.

2.2 Gebäudehülle – Erweiterungsbau/Aufstockung

Der Erweiterungsbau basiert auf einer Aufstockung eines bestehenden Depotgebäudes, das ein Raumvolumen von ca. 660 m³ aufweist. Hierfür werden folgende drei Varianten betrachtet und beurteilt:

- Variante 1: 49 cm Vollziegelmauerwerk mit innenseitigem Kalkzementputz (U-Wert = 1,2 W/m²K)
- Variante 2: 24 cm WDVS, 24 cm Ziegel mit innenseitigem Kalkzementputz (U-Wert = 0,18 W/m²K)
- Variante 3: 42,5 cm hochdämmender Ziegel mit innenseitigem Kalkzementputz (U-Wert = 0,18 W/m²K)

Die Materialkennwerte der eingesetzten Materialien sind Standardwerte aus der WUFI®-Materialdatenbank. Um die sich langfristig einstellenden Raumklimata vergleichend beurteilen zu können, werden die Berechnungen ohne die Berücksichtigung von Baufeuchte durchgeführt.

Des Weiteren wird das Archivgut berücksichtigt, das einen wesentlichen Anteil an der thermischen und hygri-schen Trägheit des Raumes hat. Die hygri-schen Eigenschaften von Papier und Büchern werden anhand von Daten aus [Derlyn 2006] für die Simulationsrechnungen herangezogen. Zudem fließt die thermische Speichermasse der verwendeten Regalsysteme in die Berechnungen mit ein. Für den Sanierungsfall wird von einer Belegung des

Regalsystems mit Archivgut von 80 % und im Erweiterungsbau von 40 % ausgegangen.

Es werden für die Berechnungen gemessene Außenklimadaten des entsprechenden Standortes verwendet. Für die angrenzenden Räume wird ein Innenraumklima angenommen, das je nach Raumnutzung Temperaturen zwischen (18 und 21) ± 5 °C und eine relative Raumluftfeuchte von (45 ± 5) % aufweist. Es wird von einer sehr geringen Luftwechselrate von 0,05 h⁻¹ ausgegangen.

Die Raumnutzung durch Personen, die Beleuchtung und Heizung sowie die Archivgutmenge wird anhand der bestehenden Nutzung der Archive übernommen und in den Simulationen berücksichtigt. Zu Beginn der Untersuchungen wird jeweils der Ist-Zustand des Innenraumklimas simuliert und mit Messdaten, die für einen Zeitraum von Dezember bis September vorhanden sind, verglichen. Darauf aufbauend werden die verschiedenen Varianten in die Simulationssoftware WUFI®Plus implementiert, um den Einfluss auf das Raumklima und den Energieverbrauch zeigen zu können.

2.3 Gebäudehülle – Neubau

Bei den Simulationen eines Neubaus handelt es sich um ein einstöckiges Museumsdepot mit ca. 4700 m³ Depotraum und angrenzend ca. 1000 m³ für Vorbereitungs-, Quarant-

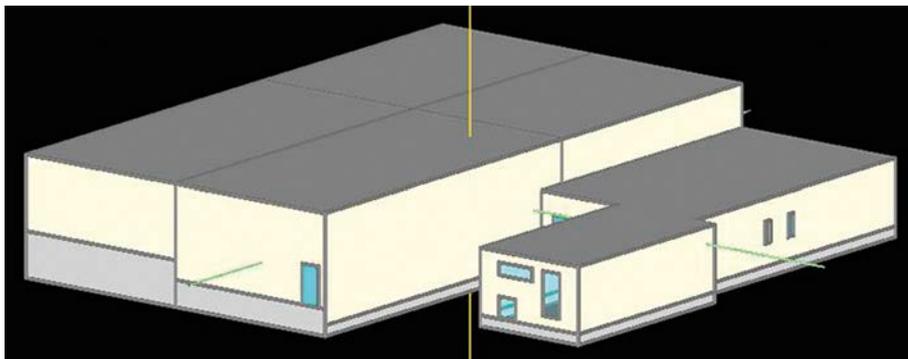


Bild 3. Darstellung des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware WUFI®Plus.

Fig. 3. Graphical view of the implemented 3D model into the hygrothermal simulation tool WUFI®Plus.

Tabelle 1. Übersicht der gewählten Varianten des Museumsdepots.
Table 1. List of the selected variations of the depot for the museum.

Variante	Mindest-Innenlufttemperatur [°C]	Luftwechselrate im Depotraum [h ⁻¹]		Sonstige Angaben
		Infiltration	mech. Luftwechsel	
A	18	0,05	0,3	mit Be- und Entfeuchtung
B	18	0,05	–	ohne Be- und Entfeuchtung
C	18	0,05	–	ohne Bodenplattendämmung
D	15	0,05	–	ohne Bodenplattendämmung
E	18	0,05	0,1 für 1 h/d	ohne Be- und Entfeuchtung
F	15	0,05	0,1 für 1 h/d	ohne Be- und Entfeuchtung

täne- und Funktionsräume. Das Gebäude wird mit wärme-gedämmten Beton-Doppelwänden (Außenwände U-Wert 0,13 W/m²K) und einem Flachdach (U-Wert 0,12 W/m²K) konstruiert. In Abb. 3 ist das 3D-Modell der Simulation dargestellt.

Bei diesen Berechnungen wird konstruktiv der Einfluss einer Bodendämmung unterhalb des Depotraumes sowie der Einfluss verschiedener Luftwechsel- und Heizregelungsvarianten näher betrachtet. Dabei wird die Einhaltung eines vorgegebenen Klimakorridors berücksichtigt. Für das Innenraumklima sind folgende Werte vorgegeben: Mindesttemperatur im Depotraum 18 °C, in den Funktionsräumen Temperaturen bis 22 °C bei Anwesenheit von Personen. Die Raumluftfeuchte im Depot sollte zwischen 40 und 60 % r. F. mit einer maximalen täglichen Schwankung von ±5 % r. F. liegen. Um den Einfluss der Luftwechselrate und des Zeitpunktes der Lüftung auf das Innenraumklima beurteilen zu können, werden hierfür mehrere Varianten berechnet. Das Außenklima wird entsprechend dem Standort angesetzt. Das Depotgut besteht aus Möbelstücken, Papier/Karton und Gemälden sowie als zusätzliche thermische Masse Regalen zur Einlagerung. Insgesamt ergibt sich eine Archivgutmenge von ca. 700 m³. In Tabelle 1 sind die Varianten aufgelistet, die für das Museumsdepot simuliert wurden, um zeigen zu können, wie sich das Innenraumklima durch die Variation der Mindesttemperatur und des Luftwechsels beeinflussen und stabilisieren lässt. Je nach Nutzung eines Depots bzw. eventuell auftretender geringer Ausdünstungen aus Archivgütern kann es sinnvoll sein, eine tägliche Luftspülung mithilfe einer mechanischen Lüftungsanlage zu gewährleisten. In den Varianten E und F wird zusätzlich zur Infiltration eine mechanische Lüftung berücksichtigt, die zu einem festgelegten Zeitpunkt für eine Stunde mit einer Luftwechselrate von 0,1 h⁻¹ angesetzt wird.

3 Ergebnisse der hygrothermischen Berechnungen

3.1 Gebäudehülle – Sanierung

Die Ergebnisse der Berechnungen zu den beiden Sanierungsvarianten sind in Abb. 4 im Vergleich zu den Validierungsrechnungen und zu den Messwerten dargestellt. Dabei sind jeweils die gleichen internen Lasten wie in der Validierungsrechnung berücksichtigt. Die Beheizung erfolgt wie bei den Validierungsrechnungen ab einer Temperatur von 16 °C. Zusätzlich ist die Außenlufttemperatur als 1h-Werte und als gleitender Mittelwert über 24h mit angegeben. Die Messwerte zeigen deutlich, dass im vorlie-

genden unsanierten Zustand die Raumlufttemperatur maßgeblich von der Außenlufttemperatur abhängt. Die Validierungsrechnung konnte diese Abhängigkeit gut nachvollziehen. Durch die Sanierung, vor allem infolge der Wärmedämmung außen, ist bei beiden Sanierungsvarianten die Raumtemperatur von den kurzfristigen Schwankungen der Außenlufttemperatur weitgehend entkoppelt. Im Winter wird durch die Heizung eine gleichbleibende Raumtemperatur gewährleistet.

Erwartungsgemäß steigt infolge der thermischen Trägheit die Innenraumtemperatur bei der Sanierungsvariante 1 im Frühjahr langsamer an, als bei Sanierungsvariante 2. Im Sommer gleichen sich die Temperaturen an und im Herbst ist die Temperatur bei Variante 1 höher als bei Variante 2. Durch beide Sanierungsvarianten wird eine Stabilisierung des Raumklimas erreicht, so dass die täglichen Schwankungen unter den empfohlenen Werten nach [DIN ISO 11799: 2005] liegen. Die innenseitige Ausmauerung bringt im Vergleich zu Variante 2 keinerlei Vorteile.

Der Vergleich des berechneten Heizenergiebedarfes der einzelnen Varianten zeigt, dass bei einer gut gedämmten Wandkonstruktion mit einer Energieeinsparung von etwa 70 % zu rechnen ist.

Des Weiteren wird mit Hilfe der hygrothermischen Berechnungen gezeigt, wie sich eine höhere Luftwechselrate auf das Innenraumklima auswirkt. Die zusätzlichen Luftwechselraten werden mit 0,1 h⁻¹, 0,25 h⁻¹ und 0,5 h⁻¹ angesetzt. Die Ergebnisse bei unterschiedlicher Luftwechselrate der Sanierungsvariante 2 zeigt Abb. 5. Für die Validierungsrechnung (rot in Abb. 5) und für die Berechnung der Sanierungsvarianten (Variante 2, blau in Abb. 5) wird eine Luftwechselrate von 0,05 h⁻¹ genutzt. Bei einer leicht höheren Luftwechselrate (0,1 h⁻¹) ist nur eine geringfügig größere Schwankung der Temperatur zu beobachten. Allerdings steigen die tägliche und monatliche maximale Änderung für die relative Feuchte schon deutlich an. Bei einer Luftwechselrate von 0,25 h⁻¹ und erst recht bei 0,5 h⁻¹ sind vor allem die maximalen Schwankungen der relativen Feuchte von bis zu 9,1 % am Tag sehr groß und übersteigen die empfohlenen Grenzwerte der täglichen Schwankung nach [DIN ISO 11799: 2005]. Die Innenraumtemperatur ist durch die höhere Luftwechselrate stärker an das Außenklima gekoppelt. Die maximale Raumtemperatur ist im Sommer niedriger als bei geringerer Luftwechselrate. Gleichzeitig sinkt die Temperatur im Winter bei der Heizleistung von max. 1 kW unter die Minimumtemperatur von 16 °C, da durch die eingebrachte kalte Au-

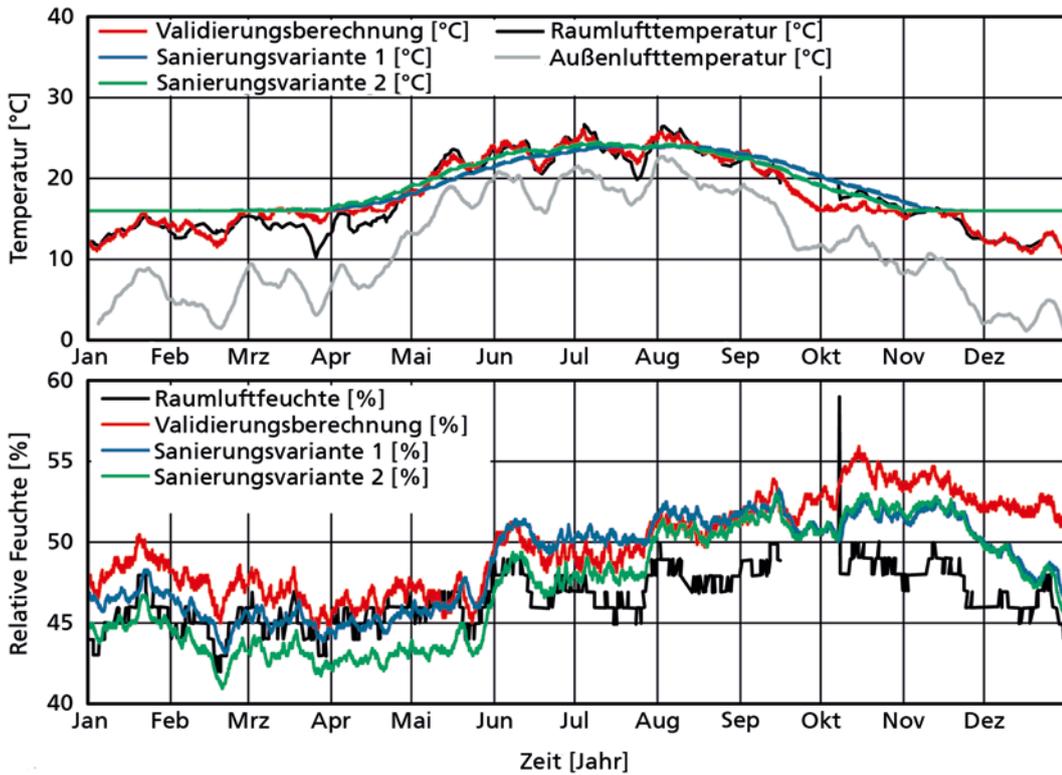


Bild 4. Zeitlicher Verlauf der Temperaturen (oben) und der relativen Feuchten (unten) der Sanierungsvarianten im Vergleich zur Validierungsberechnung des unsanierten Zustands.

Fig. 4. Course of the temperatures (above) and the RH (below) of the retrofitted variations in comparison to the validation.

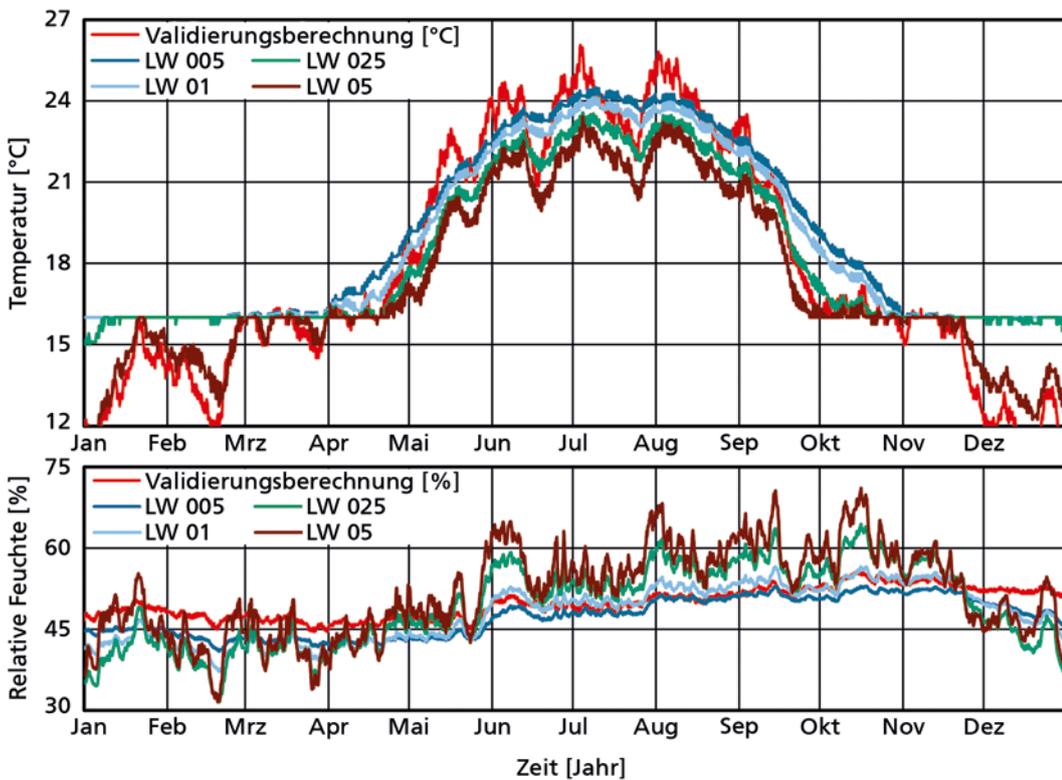


Bild 5. Zeitlicher Verlauf der Temperaturen (oben) und der relativen Feuchten (unten) der Sanierungsvariante 2, bei der Variation der Luftwechselrate von $0,05 \text{ h}^{-1}$ bis max. $0,5 \text{ h}^{-1}$ im Vergleich zur Validierungsberechnung des unsanierten Zustands.

Fig. 5. Course of the temperatures (above) and the RH (below) of the retrofitted variation 2 with different air change rates (between $0,05 \text{ h}^{-1}$ to $0,5 \text{ h}^{-1}$) in comparison to the validation.

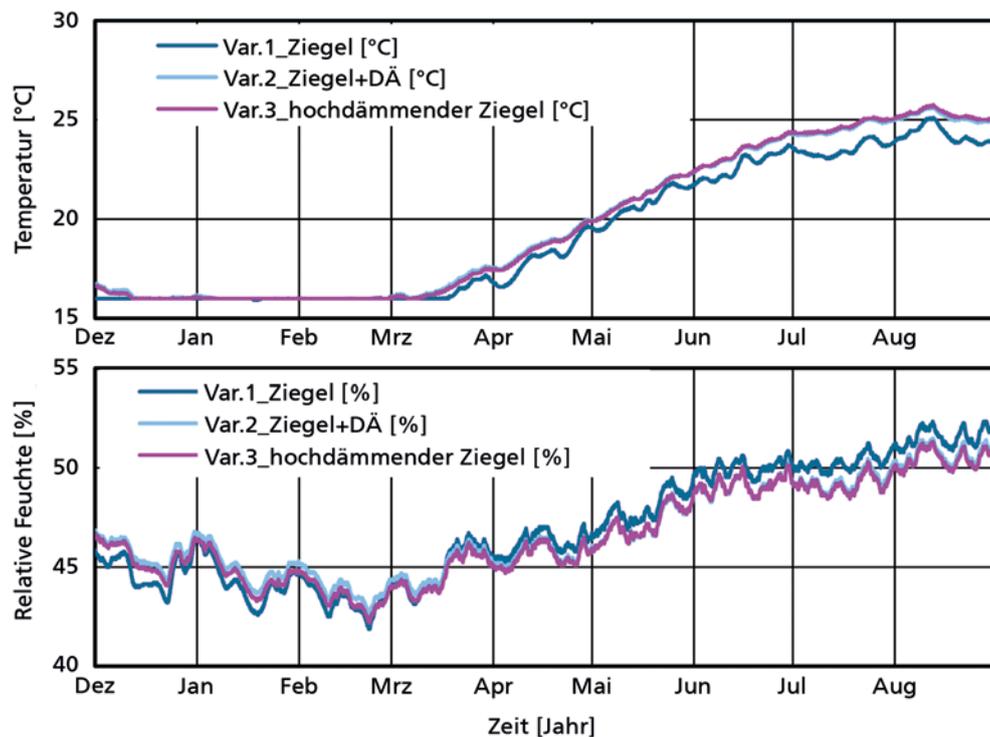


Bild 6. Zeitlicher Verlauf der Temperaturen (oben) und der relativen Feuchten (unten) im Archiv bei der Simulation eines Erweiterungsbaus (Aufstockung).

Fig. 6. Course of the temperatures (above) and the RH (below) of the extension/remodeling of the archive.

ßenluft die Heizleistung nicht ausreicht. Der Temperaturverlauf ähnelt dem vor der Sanierung. Der Heizenergiebedarf für die Sanierungsvariante 2 steigt in Abhängigkeit von der Luftwechselrate. Bei einer Luftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$ wird mehr Heizenergie benötigt als vor der Sanierung bei einer Luftwechselrate von $0,05 \text{ h}^{-1}$.

3.2 Gebäudehülle – Erweiterungsbau/Aufstockung

Mithilfe der Ergebnisse der Varianten des Erweiterungsbaus soll nachfolgend gezeigt werden, welchen Einfluss die verschiedenen Konstruktionen auf das Raumklima haben. Hierbei wird in den Simulationsberechnungen davon ausgegangen, dass das Regalsystem zu 40% mit Archivgut gefüllt ist. In Abb. 6 oben sind die Temperaturverläufe der verschiedenen Varianten abgebildet. Die Temperaturen der Varianten 2 und 3, die beide hochgedämmte Außenwandkonstruktionen beinhalten, sind nahezu identisch. Es zeigt sich bei diesen beiden Varianten im Sommer ein etwas höherer Anstieg der Temperatur im Innenraum als bei Verwendung einer herkömmlichen massiven Ziegelmauer (Variante 1). Die höheren Temperaturen sind durch die thermische Trägheit und den höheren Dämmwert dieser beiden Konstruktionen zu erklären. Bei den Varianten 2 und 3 kommt es in den kühleren Nachtstunden durch die bessere Dämmung zu einer geringeren Auskühlung. Dadurch wird es im Innenraum nach einem längeren sehr warmen Zeitraum geringfügig wärmer als bei einer Massivziegelwand. Dementsprechend liegt in diesem Zeitraum die relative Feuchte bei den hochgedämmten Konstruktionen etwas niedriger (Abb. 6 unten). Allerdings ergeben sich durch den besseren Dämmstandard auch geringere kurzfristige Temperaturschwankungen.

Ausschlaggebend für eine erfolgreiche Archivierung ist die langfristige Erhaltung des Archivguts. Aufgrund der sorptiven Reaktion des Kulturguts auf klimatische Schwankungen, die der Erhaltung nicht zuträglich sind, müssen tägliche Schwankungen der Raumtemperatur und -feuchte möglichst gering bleiben. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass die geforderte Grenze für Temperaturschwankungen bei einer ungedämmten Konstruktion sowohl ohne als auch mit Archivgut überschritten wird. Bei den gedämmten Varianten liegt die maximal auftretende tägliche Temperaturschwankung bei $0,3^\circ\text{C}$ (ohne Archivgut) bzw. bei $0,2^\circ\text{C}$ (mit 40% Archivgut). Die maximale tägliche Feuchteschwankung wird bei allen Konstruktionen mit 40% Archivgut eingehalten.

Ein weiterer interessanter Aspekt liegt im Vergleich des benötigten Heizenergiebedarfs und dessen Verringerung durch besser gedämmte Wandkonstruktionen. Die Energiemenge (kWh), die zum Erreichen der Innenraumtemperatur von 16°C während der Heizperiode von Dezember bis April benötigt wird, ist bei hochgedämmten Wänden bis zu 80% niedriger als bei der ungedämmten Vollziegelwand.

3.3 Gebäudehülle – Neubau

Für den Neubau eines Museumsdepots wird im ersten Schritt der Einfluss des Luftwechsels auf das Innenraumklima untersucht. Bei der Variante A ist zusätzlich zur Infiltrationsluftwechselrate von $0,05 \text{ h}^{-1}$ eine mechanische Lüftungsanlage mit einer konstanten Luftwechselrate von $0,3 \text{ h}^{-1}$ implementiert. Die Beheizung ist auf eine Leistung von 18 kW begrenzt. Zusätzlich ist eine Be- und Entfeuchtungsanlage mit angesetzt, um den vorgegebenen Feuchte-

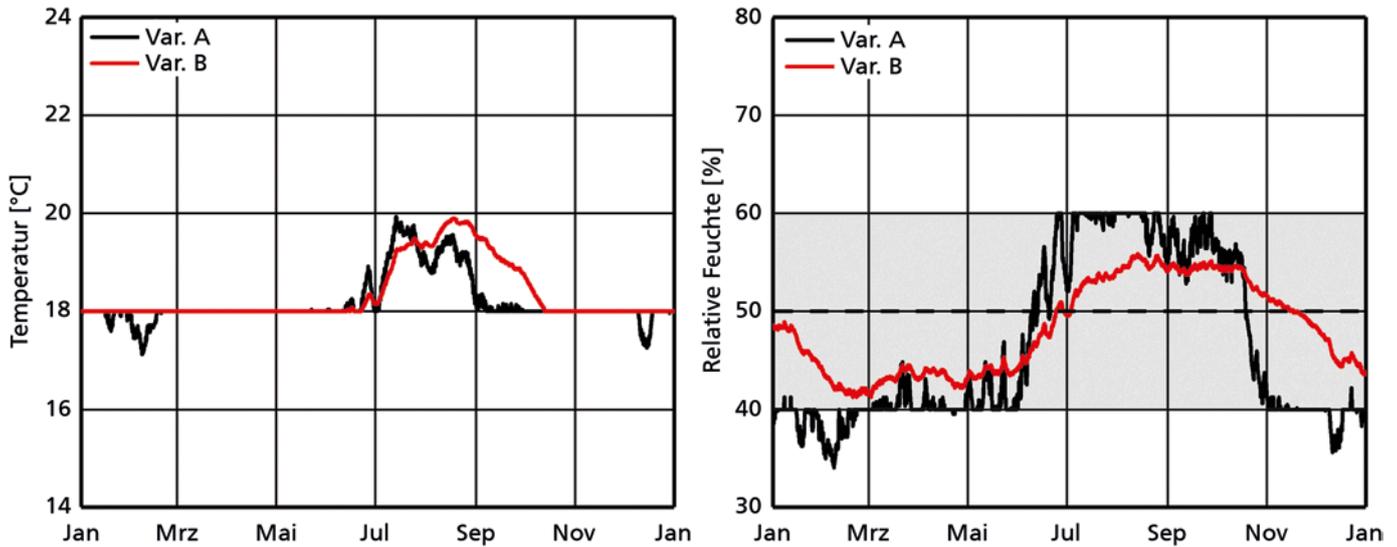


Bild 7. Zeitlicher Verlauf der Innenraumtemperaturen (links) und -feuchten (rechts) bei Veränderung der Luftwechselrate von $0,35 \text{ h}^{-1}$ (Var. A) auf $0,05 \text{ h}^{-1}$ (Var. B) im untersuchten Depotneubau.
 Fig. 7. Course of the indoor temperatures (left) and the RH (right) in the new depot for a museum with air change rate $0,35 \text{ h}^{-1}$ (Var. A) and $0,05 \text{ h}^{-1}$ (Var. B).

korridor sicherstellen zu können. Variante B ist technisch deutlich reduziert. Es werden nur eine Heizanlage sowie eine niedrige Infiltrationsluftwechselrate von $0,05 \text{ h}^{-1}$ angesetzt. Die Verläufe der Innenraumtemperatur und der -feuchte für diese Varianten sind in Abb. 7 dargestellt. Beim Vergleich der Temperaturverläufe (links) zeigt sich, dass mit der angesetzten maximalen Heizleistung von 18 kW im Depotraum und einer hohen Luftwechselrate von insgesamt $0,35 \text{ h}^{-1}$ im Gebäude die Mindesttemperatur von 18 °C in den Wintermonaten teilweise nicht eingehalten werden kann. In den Sommermonaten steigen die Temperaturen im Depotraum an. Unabhängig von der Luftwechselrate kommt es zu keiner Überschreitung der vorgegebenen Maximaltemperatur von 20 °C (Abb. 7 linkes Diagramm). Beim Vergleich der Verläufe der relativen Luftfeuchte im Depotraum zeigt sich ein erheblicher Ein-

fluss der Luftwechselrate auf das Raumklima. Je niedriger der Luftwechsel ist, desto geringer fällt der Aufwand für Be- bzw. Entfeuchtung zur Einhaltung des gewählten Feuchtekorridors von 40 bis 60% r. F. aus. Bei Variante A mit einer Luftwechselrate von $0,35 \text{ h}^{-1}$ reicht die gewählte Anlagenkapazität nicht aus, um den vorgegebenen Klimakorridor einzuhalten. Im Gegensatz dazu zeigt sich, dass bei einer Luftwechselrate von $0,05 \text{ h}^{-1}$ eine Be- und Entfeuchtung nicht mehr benötigt wird, da der Feuchtekorridor mit den gewählten Randbedingungen über die passive Feuchtespeicherung der Materialien auch so eingehalten werden kann (Abb. 7 rechtes Diagramm).

Ein viel diskutiertes Thema im Depotbaubereich ist die Frage, ob es sinnvoll ist, eine Bodendämmung einzubauen oder nicht. Einerseits wird ohne Dämmung der Bodenplatte (Var. C und D) im Sommer mehr Wärme in das

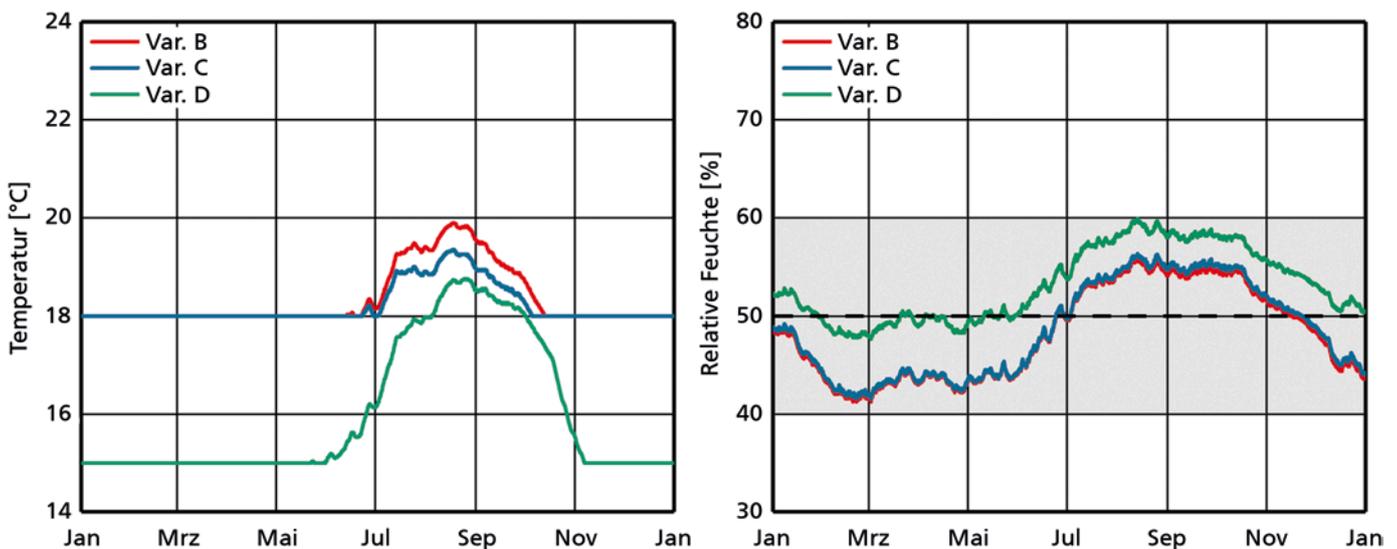


Bild 8. Zeitlicher Verlauf der Innenraumtemperaturen (links) und -feuchten (rechts) bei Veränderung der Konstruktion mit Bodendämmung (Var. B) und ohne Bodendämmung (Var. C und D) und der Mindesttemperatur auf 15 °C (Var. D).
 Fig. 8. Course of the indoor temperatures (left) and the RH (right) for constructions with (Var. A) and without (Var. C and D) ground slab insulation and reduced minimal indoor temperature to 15 °C (Var. D).

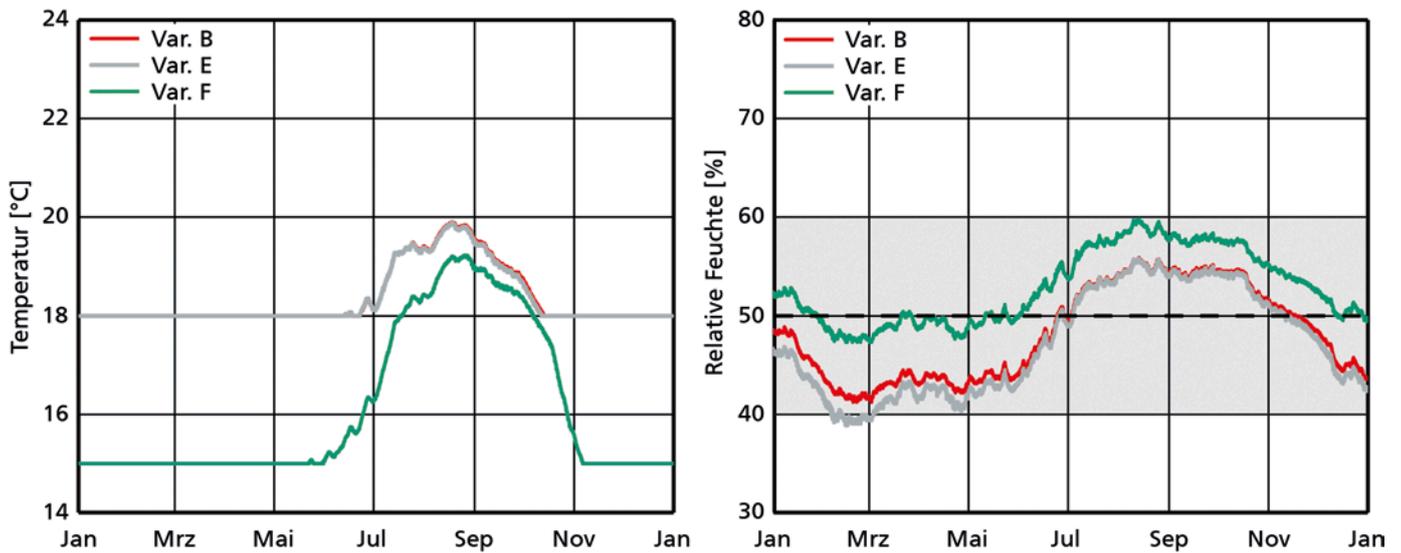


Bild 9. Zeitlicher Verlauf der Innenraumtemperaturen (links) und -feuchten (rechts) bei einem zusätzlichen Luftwechsel von $0,1\text{ h}^{-1}$ einmal täglich (Var. E und F) und einer Reduzierung der Mindesttemperatur auf 15°C (Var. F).
 Fig. 9. Course of the indoor temperatures (left) and the RH (right) for the variations with an additional air change rate of $0,1\text{ h}^{-1}$ for one hour per day (Var. E und F) and a reduced minimal indoor temperature to 15°C (Var. F).

Erdreich abgegeben. Der Raum wird dadurch etwas weniger warm (Abb. 8 linkes Diagramm). Die Auswirkungen auf die relative Feuchte sind hier nur marginal (Abb. 8 rechtes Diagramm). Dem entgegen steht bei einer Bodendämmung eine Reduzierung der benötigten Heizenergie in den Wintermonaten.

Zusätzlich ist Var. D ohne Bodenplattendämmung und mit einer reduzierten Mindesttemperatur von 15°C mit abgebildet. Bei Auswertung (Tabelle 2) der benötigten Heizenergie für das Gebäude zeigt sich ein deutlicher und positiver Einfluss für die Variante mit Bodendämmung. Hierbei kann die benötigte Heizenergie um ca. 30% reduziert werden, unabhängig davon, ob eine Mindesttemperatur von 15°C oder 18°C vorgegeben ist. Durch die Reduzierung der Mindesttemperatur auf 15°C erhöht sich das Niveau der relativen Feuchte im Raum. In den Sommermonaten wird hier die obere Grenze des Feuchtekorridors (Abb. 8 rechtes Diagramm) erreicht.

Um zeigen zu können, welchen Einfluss eine tägliche Luftspülung auf das Innenraumklima hat, wird in Variante E einmal täglich für eine Stunde zu einer festgelegten Uhrzeit ein zusätzlicher Luftwechsel von $0,1\text{ h}^{-1}$ im Gebäude

gewährleistet. Abb. 9 zeigt die Ergebnisse dazu. Durch zusätzliche Luftspülung für eine Stunde pro Tag im Depotraum sinkt bei Variante E das Niveau der relativen Luftfeuchte gegenüber Variante B im Monatsmittel um rund 3% r. F. Die Mindestfeuchte von 40% r. F. wird dadurch geringfügig unterschritten. Der Verlauf der relativen Innenraumfeuchte im Sommer wird durch die zusätzliche Lüftung nur geringfügig verändert. Bei Variante F mit einer Mindestraumtemperatur von 15°C und zusätzlicher täglicher Luftspülung für eine Stunde liegt die relative Feuchte im Winter und Frühjahr zwischen 48 und 52% r. F. Im Sommer wird die Obergrenze von 60% nur kurzfristig erreicht (Abb. 9).

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse zum Energiebedarf und in Tabelle 3 statistische Werte zum Raumklima zusammengefasst.

Durch einen niedrigen Infiltrationsluftwechsel mit einem nur sehr geringen mechanischen Luftwechsel zur Sicherstellung einer Grundspülung mit Frischluft können die Grenzwerte des vorgegebenen Feuchtekorridors ohne einer Be- und Entfeuchtungsanlage eingehalten werden. Die kurzfristigen Schwankungen der relativen Feuchte und

Tabelle 2. Auflistung der maximalen Leistungen der Heiz- und Be- bzw. Entfeuchtungsanlage sowie die Mindest-Innenraumtemperaturen für die Varianten A bis F mit unterschiedlichen Luftwechselraten und mit einer gedämmten bzw. ungedämmten Bodenplatte.

Table 2. Maximum capacities of the HVAC system as well as the minimal indoor temperatures for the variations A to F with different air change rates and with/without ground slab insulation.

	Gesamtheizleistung Depotraum [kWh/a]	Befeuchtung [kg/a]	Entfeuchtung [kg/a]	Zus. Luftspülung täglich 1 h	Dämmung Bodenplatte	Mindest-innentemp. [$^\circ\text{C}$]
Var. A	70421	12535	2600	nein	ja	18
Var. B	30641	0	0	nein	ja	18
Var. C	43629	0	0	nein	nein	18
Var. D	22831	0	0	nein	nein	15
Var. E	30952	0	0	ja	ja	18
Var. F	16370	0	0	ja	ja	15

Tabelle 3. Vergleich der Innenraumtemperaturen und relativen Feuchten (jeweils Minimum, Maximum, Mittelwert, maximale Änderung am Tag und im Monat) für die Berechnungsvarianten A bis F.

Table 3. Comparison of the indoor air temperatures and RH values (minimum, maximum, average and maximum deviation per day and month) of the variations A to F.

	Temperatur [°C]					Relative Luftfeuchte [%]				
	Zeitraum Jan-Dez.			Tag	Monat	Zeitraum Jan-Dez.			Tag	Monat
	Min	Max	Mittelwert	Δ max	Δ max	Min	Max	Mittelwert	Δ max	Δ max
Var. A	17,1	19,9	18,2	0,4	1,9	34,1	60,0	46,4	5,8	18,9
Var. B	18,0	19,9	18,3	0,1	1,3	41,3	55,9	48,2	0,8	6,7
Var. C	18,0	19,3	18,2	0,1	1,0	41,6	56,3	48,6	0,9	6,7
Var. D	15,0	18,8	16,0	0,2	2,5	47,7	59,9	53,2	0,8	4,9
Var. E	18,0	19,9	18,3	0,1	1,4	38,9	55,8	47,3	1,1	7,4
Var. F	15,0	19,2	16,1	0,2	2,8	47,3	59,8	52,9	0,9	5,4

Temperatur werden dadurch ebenfalls verringert. Der Energieverbrauch wird bei Variante B um 56% gegenüber der Variante A gesenkt. Die Absenkung der Innenraumtemperatur von 18°C auf 15°C bewirkt eine weitere erhebliche Energieeinsparung von rund 48% (von Var. B auf Var. C). Zudem erhöht sich durch die Temperaturabsenkung das Niveau der relativen Feuchte um rund 5% r. F. im Jahresmittel. Neben der Einhaltung der oberen und unteren Grenzwerte sind die maximalen täglichen und monatlichen Schwankungen der Innenraumtemperatur und -feuchte mit ausschlaggebend für die Wahl der optimalen Heizungs- und Lüftungssteuerung im Depot. Falls ein saisonales Gleiten des Raumklimas, wie hier angenommen, aus konservatorischen Gründen möglich ist, kann über passive Maßnahmen an der Gebäudehülle weitestgehend auf aktive Klimatisierung verzichtet werden. Eine möglichst dichte Gebäudehülle trägt neben den hygrisch aktiven Oberflächen und thermischen Massen wesentlich zur Klimatisierung bei. Zusätzlich kann dadurch erheblich Energie eingespart werden. Alle Varianten, bis auf Variante A, weisen geringe Schwankungsbreiten auf. Somit zeigt sich, dass bei der Umsetzung des Museumsdepots der wichtigste Punkt für ein stabiles Innenraumklima die Dichtheit des Gebäudes ist, denn je niedriger die Infiltration ist, desto geringer sind die täglichen Feuchteschwankungen. Eine zusätzliche Lüftungsregelung mit einem maximalen Luftwechsel von $0,1 \text{ h}^{-1}$ für eine Stunde täglich ist empfehlenswert, damit im Depot eine gewisse Luftspülung gewährleistet werden kann.

4 Diskussion und Zusammenfassung

Klimastabilität im Depotbereich ist ein wichtiger Faktor zur Erhaltung von Kulturgütern. Im Rahmen der hier erläuterten Untersuchungen wird gezeigt, wie durch bauliche und passive Maßnahmen vorgegebene Klimakorridore im Depot- und Archivräumen energiesparend eingehalten werden können. Ergebnisse einer Sanierungsmaßnahme bzw. eines Erweiterungsbau von bestehenden Archiven sowie des Neubaus eines Museumsdepots werden dargestellt und bewertet.

Bei der Sanierung des Bestandsgebäudes für Depotnutzung umfassen beide Sanierungsvarianten eine Außendämmung mit vorgehängter Fassade. Variante 1 weist eine

komplette zusätzliche Innenausmauerung der Außenwand auf, bei Variante 2 werden nur die Fensterauschnitte der Bestandsfenster ausgemauert. Beide Maßnahmen bewirken in erster Linie eine thermische Stabilisierung des Raumklimas und damit verbunden auch eine Verringerung der Schwankungen der relativen Feuchte. Die täglichen Schwankungen der Luftfeuchte und der Lufttemperatur werden soweit reduziert, dass sie der Norm DIN ISO 11799 voll entsprechen. Die jahreszeitlich bedingten Höchsttemperaturen übersteigen zwar die in [DIN ISO 11799:2005] geforderte maximale Temperatur. Die Lufttemperatur- und -feuchteänderungen im Innenraum gehen jedoch nur sehr langsam vonstatten. Durch die Sanierungsmaßnahmen wird auch eine Verringerung des Heizenergiebedarfes um ca. 70% erreicht. Der Unterschied zwischen den beiden Sanierungsvarianten ist diesbezüglich sehr gering. Gemäß den Berechnungen ist eine Erhöhung der Luftwechselrate über einen Wert von $0,1 \text{ h}^{-1}$ hinaus nicht zu empfehlen, da dadurch das Innenraumklima starken kurz- und langfristigen Schwankungen unterliegt.

Bei einer Sanierung sollte immer der Aspekt der eingebrachten Baufeuchte und deren Wirkung auf das Archivgut und das Raumklima berücksichtigt werden. Gerade bei Gebäuden mit hohen Anforderungen an die Raumklimastabilität und an die Einhaltung bestimmter Grenzen der relativen Feuchte kann es infolge der eingebrachten Baufeuchte nach baulichen Veränderungen infolge der Sanierung dazu kommen, dass die Gebäude für längere Zeit nicht nutzbar sind (vor allem auch aufgrund der geforderten niedrigen Luftwechselrate), da zu hohe relative Feuchten im Innenraum herrschen. Die betrachtete Sanierungsvariante 2, nur mit der Ausmauerung der Fenster, ist diesbezüglich die günstigere Variante, da hierdurch die Baufeuchte auf ein Minimum reduziert werden kann.

Bei dem zweiten betrachteten Berechnungsfall handelt es sich um einen Erweiterungsbau eines Depotgebäudes. Hierbei werden ebenfalls die zu erwartenden Innenraumtemperaturen und relativen Feuchten der Aufstockungsvarianten verglichen. Die Ergebnisse der beiden ausgewählten hochgedämmten Konstruktionen zeigen, dass bei einer Belegung mit 40% Archivgut sowohl die geforderten maximalen täglichen Temperatur- wie auch die Feuchteschwankungen eingehalten werden. Aus energetischer Sicht sind die hochgedämmten Konstruktionen

ebenfalls empfehlenswert, da der Heizenergieverbrauch im Vergleich zu einer ungedämmten Variante um ca. 80% reduziert werden kann.

Das dritte Gebäude ist ein neues und energieeffizientes Museumsdepot. Aufgabenstellung hierbei ist, mit möglichst wenig Gebäudetechnik ein stabiles Raumklima zu erhalten. Als einer der wichtigsten Punkte bei der Umsetzung des neuen Museumsdepots sollte eine dichte Bauweise mit sehr geringem Infiltrationsluftwechsel von max. $0,05 \text{ h}^{-1}$ angestrebt werden. Mit einer geringen Absenkung der Raumtemperaturen in der kalten Jahreszeit, hier von 18°C auf 15°C , kann ein Absinken der relativen Feuchte unter 40% r. F. vermieden werden. Des Weiteren führt die Reduzierung der Mindesttemperatur zu einer weiteren Energieeinsparung.

Allgemein ist ein geringer Luftwechsel der zentrale Faktor, um mit passiven Maßnahmen eine hohe Klimastabilität zu erreichen (siehe auch [Kilian 2013]). Ist ein Gebäude dicht gebaut, wird das Interieur sich sowohl bezüglich der Reduktion der Temperatur- als auch der Feuchteschwankungen noch einmal extra positiv auf das Innenraumklima auswirken. Bei Planungen zur Beheizung und Klimatisierung von Gebäuden – Punkte, die im Museumsbereich und bei Archiven einen wesentlichen Anteil der jährlichen Betriebskosten verursachen – sollten daher die Energiekosten bereits zwingend mitberücksichtigt werden.

Ein weiterer, maßgeblicher Vorteil der vorgestellten Simulationen ist auch die verständliche Aussagekraft, mit denen sich bestimmte Sanierungs- oder Neubauvorzugsvarianten für Bauherr, Planer und Nutzer plausibel und transparent machen lassen. Insbesondere bei strittigen Fragen zu einer geeigneten Umsetzung sind oft Simulationsergebnisse ein geeigneter Weg zur Klärung einer Umsetzungsvariante.

Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen sind Teil des Förderprojekts „EnOB – Plusenergie depot. Energieoptimiertes Bauen: Energieminimierte Depot- und Archivgebäude zur Aufbewahrung von Kulturgütern mit Plusenergiekonzepten“, das durch die Bundesrepublik Deutschland mit dem Zuwendungsgeber Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] *Derlyn, H., Janssen, H.* et al: Hygroscopic behavior of papers and books. IEA Annex 41 Working meeting. 25–27 October, 2006 Lyon, Frankreich.
- [2] [DIN ISO 11799:2005] DIN ISO 11799: 2005 – 06: Information und Dokumentation – Anforderungen an die Aufbewahrung von Archiv- und Bibliotheksgut (ISO 11799:2003). Beuth Verlag. (2005).
- [3] *Holl, K.*: Der Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext. Untersuchung des Schadensrisikos anhand von restauratorischer Zustandsbewertung, Laborversuchen und Simulation, Dissertation. München 2016.
- [4] *Kilian, R.*: „Klimastabilität historischer Gebäude – Bewertung hygrothermischer Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung“. Dissertation. Universität Stuttgart. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2013.
- [5] *Klenz-Larsen, P., Broström, T.*: Climate Control in Cultural Heritage Buildings in Denmark. In: Kilian, R.; Vyhldal, T.; Broström, T. (Ed.): “Developments in Climate Control of Historic Buildings”. Proceedings from the international conference “Climatization of Historic Buildings – State of the Art”, Schloss Linderhof, December 2nd 2010, Fraunhofer IRB, Stuttgart 2011.
- [6] *Klenz-Larsen, P., Ryhl-Svendsen, M., Aasbjerg Jensen, L., Bøhm, B., Padfield, T.*: Konstantes Raumklima und niedriger Energieverbrauch – kein Widerspruch. Zehn Jahre Erfahrung mit energieeffizienter Klimatisierung in Archiven und Museumsmagazinen. *Restauro* 7/2012.
- [7] *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.

Autoren dieses Beitrages:

Kristin Lengsfeld, kristin.lengsfeld@ibp.fraunhofer.de
 Doris Rösler, Holzkirchen, doris.roesler@ibp.fraunhofer.de
 Martin Krus, martin.krus@ibp.fraunhofer.de
 Kristina Holl, kristina.holl@ibp.fraunhofer.de
 Stefan Bichlmair, stefan.bichlmair@ibp.fraunhofer.de
 Ralf Kilian, ralf.kilian@ibp.fraunhofer.de

Alle:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen
 Fraunhoferstraße 10
 83626 Valley

Lars Klemm, klemm@moduldepot.de
 ModulDepot, Holzkirchen
 ModulDepot GmbH
 Fraunhoferstraße 10
 83626 Valley



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Stuttgart

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

Holzkirchen

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen

Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

www.ibp.fraunhofer.de