Qualität für Menschen

# LVR- Museumsheft
# Nr. 5

## Vermeidung von und Vorgehensweise bei Schimmelbefall

**Eine Handreichung der LVR-Museumsberatung**

Foto vorne J. Vogel, LVR-Landesmuseum Bonn

# Inhalt

**Vorwort** **1**

**Einleitung** **3**

**1. Schimmelpilze** **5**

**2. Pilzwachstum begünstigende Faktoren** **7**
2.1 Objekte 8
2.2 Lagerung 9
2.3 Gebäude 12
2.4 Klimaanlage, passive Klimatisierung und Heizung 17
2.5 Klimahandling 22
2.6 Planung 23

**3. Schimmelpilzbefall** **25**
3.1 Bestimmung des Befalls 27
3.2 Vorläufige Einschätzung der Gesundheitsgefährdung 29
3.3 Schutzmaßnahmen 30
3.4 Umgang mit verkeimtem Material 31
3.4.1 Allgemein 31
3.4.2 Umgang mit archäologischen Blockbergungen 33

**4. Wie kann man das Auftreten von Schimmel verhindern?** **35**
4.1 Objekt 36
4.2 Gebäude 38
4.3 Klimatechnik: Wartung, Revision und Reinigung 39
4.4 Untersuchung der Wirksamkeit einer Klimatisierung und deren Optimierung 40
4.5 Klimamonitoring 42
4.5.1 Klimamonitoring mittels Datenloggern zur Messung der Raumluftfeuchte und Lufttemperatur 42
4.5.2 Klimamonitoring mittels Pilzprüfplättchen 43

**5. Literatur** **45**

# Vorwort

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Projekt „Optimierung eines Museumsdepots und modellhafte Vorbereitung schimmelbelasteter Objekte aus musealen Beständen zur Einlagerung in geeignete Depoträume“ steht beispielhaft für die Art von Initiativen, die unserem Stiftungsauftrag und Leitbild entsprechen: innovative, modellhafte und lösungsorientierte Vorhaben zum Schutz der Umwelt und von Kulturgut.

In den vergangenen Jahrzehnten haben klimatische Veränderungen und die Energiekrise zu neuen Herausforderungen in der Konservierung und Restaurierung geführt. Sich änderndes Innenraumklima und damit einhergehende biologische Beeinträchtigungen durch Mikroorganismen in Sammlungshäusern führen bundesweit zu einem erhöhten Bedarf an Restaurierungs- und Erhaltungsmaßnahmen. Es sind daher zunehmend Maßnahmen notwendig, die ein tieferes Verständnis für die richtige Klimatisierung voraussetzen.

Vor diesem Hintergrund hatte das Projekt eine hohe Relevanz. Es bietet der musealen Gemeinschaft eine wertvolle Handlungsorientierung, um einen klimafreundlichen und nachhaltigen Museumsbetrieb zu gewährleisten. Schwerpunkte des Projektes waren alternative Dekontaminierungsmethoden für mikrobiell belastete Objekte, die Erprobung neuer giftfreier Methoden, der Abbau biogener Schadstoffe, die Reduzierung von Gefährdungen für Mitarbeitende und die Minimierung von Risiken bei der Handhabung durch unkalkulierbare Altlasten. Ein ganzheitliches Planungskonzept, welches Effizienz, Materialverträglichkeit und Klimaparameter berücksichtigt, vervollständigte die Projektziele.

Besonders hervorzuheben ist die vorliegende Handreichung für den Umgang mit schimmelkontaminierten Objekten, die im Rahmen dieses Projektes entwickelt wurde. Die Publikation dokumentiert die erarbeiteten Lösungsansätze und bietet wertvolle Einblicke für die praktische Umsetzung. Sie wird vielen kulturellen Einrichtungen von Nutzen sein und als wegweisendes Modell für zukünftige Arbeiten dienen. Die erzielten Ergebnisse sind wegweisend für Museumsdepots und tragen maßgeblich zur langfristigen Erhaltung von Kulturgütern bei, indem sie praxisnahe Lösungen für die Konservierung und Pflege von schimmelbelasteten Objekten bieten und somit einen bedeutenden Beitrag zum nachhaltigen Museumsbetrieb leisten.

Die DBU bedankt sich herzlich bei allen Projektbeteiligten für ihr engagiertes Mitwirken.

Constanze Fuhrmann
Leitung Referat Umwelt und Kulturgüterschutz,
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Mit den LVR-Museumsheften publiziert die LVR-Museumsberatung eine Schriftenreihe auf, die sich „großer Themen“ der Museumsarbeit im „kleinen Format“ annimmt. Sie sollen den rheinischen Museumsmitarbeiter*innen eine Hilfestellung im musealen Arbeitsalltag sein.

Mit der vorliegenden Handreichung Nr. 5 führt die LVR-Museumsberatung diese Publikationsreihe fort und widmet sich darin einem weiteren grundlegenden Thema der Museumsarbeit: dem langfristigen Erhalt von Kulturgütern, hier im Besonderen der Umgang mit und die Prävention von Schimmelpilzen.

Ihre LVR-Museumsberatung

# Einleitung

Selbst bei vermeintlich sachgerechter Unterbringung in Museen kommt es immer wieder zum Auftreten von Schimmel. Dies geschieht sogar bei Neubauten, deren Planung speziell auf die Einlagerung von Sammlungsgut ausgerichtet ist. Auch in Archiven und Kirchen sind immer wieder Befallssituationen – in den zurückliegenden Jahren verstärkt aufgrund des Klimawandels – zu beobachten, was sowohl ein erhöhtes Gesundheitsrisiko mit sich bringt als auch zur Gefährdung von Objekten und Gebäuden führt, bei denen in der Folge mit erheblichen Kosten durch Reinigung und Nachbesserung der jeweiligen Klimatisierung zu rechnen ist. Doch welche Gründe sind es, die dazu führen, dass sich Mikroorganismen ausbreiten, obwohl nach landläufiger Meinung alles dagegen unternommen wurde?

Der Befall ist häufig nicht monokausal zu erklären, sondern ist dem Zusammenwirken verschiedener Faktoren geschuldet. Dabei laufen z. B. einige Prozesse über Jahre hinweg langsam ab und können lange unerkannt bleiben (vor allem wenn keine Kontrollmöglichkeiten bestehen), bis sich pilzbegünstigende Zustände etabliert haben und der Befall offensichtlich wird.

Diese Handreichung, die im Zuge umfassender Untersuchungen eines Schimmelbefalls im Depot des LVR-LandesMuseums Bonn entstand, soll grundlegende Informationen zu Schimmelpilzen, -befall und dessen Rahmenbedingungen sowie zum Monitoring geben.

Auf spezifische Ausführungen zur Gesundheitsgefährdung wird an dieser Stelle verzichtet. Wir verweisen hier auf die jeweils aktuelle Ausgabe des „Schimmelpilzleitfadens“ sowie die entsprechenden Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA)
(https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRBA/TRBA.html)

um sich über spezifische Ausführungen zur Gesundheitsgefährdung zu informieren:

- Heinz-Jörn Moriske/Regine Szewzyk/Peter Tappler/Kerttu Valtanen, Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden (Dessau 2017).

Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe – ABAS (www.baua.de/abas)

- Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA) 466: Einstufung von Prokaryonten (Bacteria und Archaea) in Risikogruppen (2015). https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRBA/TRBA-466
- Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA) 240: Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit mikrobiell kontaminiertem Archivgut. In: Gemeinsames Ministerialblatt (GMBl) Nr. 29 (2015) 566–577.
- Handlungsanleitung BG Bau: C 323: Schimmelpilze bei der Gebäudesanierung (7/2019).

Weitere detaillierte Information über medizinische Befunderhebung und Bewertung siehe:

- Empfehlung des Robert Koch-Instituts: Schimmelpilzbelastung in Innenräumen – Befunderhebung, gesundheitliche Bewertung und Maßnahmen. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz, 50, 2007, 1308–1323. DOI 10.1007/s00103-007-0339-y. https://www.rki.de/DE/Content/Kommissionen/UmweltKommission/Archiv/Schimmelpilze.html

# 1. Schimmelpilze

Da Pilze keine Photosynthese betreiben und daher – anders als Pflanzen – nicht in der Lage sind, Kohlendioxid zum Aufbau ihrer Biomasse zu nutzen, sind sie auf den Abbau organischen Materials als Kohlenstoff- und Energiequelle in einem meist aeroben Prozess angewiesen. Es können sowohl Naturstoffe als auch synthetische Materialien verwertet werden, wie Kohlenhydrate, deren Verbindungen, Proteine und Fette, wobei die Verwertungsmöglichkeiten wegen unterschiedlicher Enzymausstattung artabhängig sind. So können z. B. Holz, Knochen, Leim, Papier, Leder und auch manche Kunststoffe als Substrat genutzt werden. Daher werden auch die meisten Materialien, die bei Restaurierungen zum Einsatz kommen, ebenfalls abgebaut. Selbst Staub eignet sich als Substrat, da Pilze sehr genügsam sind.

Schimmelpilze können sich in einem weiten Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit (65–90 %) und Temperatur (0–60 °C) artabhängig entwickeln. Niedrige Temperaturen verlangsamen das Wachstum. Für ihre Entwicklung benötigen sie eine Mindestmenge verfügbaren Wassers, die nicht zwingend flüssig vorliegen muss. Die benötigte Wassermenge ist artabhängig. Der aW-Wert der Wasseraktivität (freies Wasser) im Substrat sollte kleiner als 0,6 sein; unterhalb dieses Wertes ist ein Wachstum in der Regel nicht möglich.

Die Überdauerungs- und Verbreitungsstadien der Schimmelpilze (Konidien und Sporen) werden sehr zahlreich gebildet und sind überall in der Umgebungsluft verbreitet. Bei entsprechenden Bedingungen sind sie in der Lage, sehr lange zu überdauern und auf geeignete Bedingungen zu warten. Aufgrund ihrer Unempfindlichkeit sind sie meistens nur durch drastische Dekontaminationsmethoden abzutöten (z. B. UVC-Strahlung, Ethylenoxyd, Heißdampf unter Druck bei 121°C/20min – 134°C/5 min), welche bei musealen Objekten meist nicht anwendbar sind (Sterilisation und Sterilgut-Versorgung [ohne Jahr] 3).

Da einige Pilze in ihren Nahrungsansprüchen sehr bescheiden sind und in einem breiten Temperaturbereich wachsen können, **ist der begrenzende Faktor die Feuchtigkeit. Pilzsichere Bereiche liegen unterhalb 55 % relativer Luftfeuchte.** Doch muss das Ziel sein, die für Schimmelpilze verfügbare Feuchtigkeit so weit wie möglich zu reduzieren (wenn die eingelagerten Objekte dies zulassen) und zu kontrollieren. Einen gut verständlichen Überblick zur Thematik gibt:

Ulrich Kück/Minou Nowrousian/Birgit Hoff/Ines Engh, Schimmelpilze. Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung (Berlin/Heidelberg $^{3}$2009).

# 2. Pilzwachstum begünstigende Faktoren

Pilzwachstum begünstigende Faktoren sind **Feuchtigkeit und Verschmutzungen (Staub, Farbfassungen, Verpackungen aus organischem Material etc.)**. Sie treten in musealen Umgebungen in vielfältigen Formen auf und sind häufig auf den ersten Blick nicht zu erkennen. Entscheidend ist aber vor allem das jeweilige **Raumklima**.

Das Raumklima präsentiert sich nicht nur mit seinem Verhältnis aus Temperatur und relativer Luftfeuchte, die im günstigen Fall passend ist. Da Räume an unterschiedlichen Stellen im Gebäude liegen und variierend mit Einrichtungsgegenständen sowie Objekten gefüllt sein können, bilden sich jeweils individuelle Mikroklimate aus. Diese können sich wiederum förderlich auf einen Schimmelpilzbefall auswirken, obwohl an anderen Stellen des gleichen Raumes kein Wachstum möglich ist. Deswegen sollte bei der Planung von Depots/Ausstellungen und bei der Suche nach Ursachen für Schimmelpilzbefall versucht werden, die für einen möglichen Befall relevanten Faktoren zu identifizieren. Diese können dann nach Möglichkeit eliminiert oder vermieden werden. Ist das nicht möglich (z. B. bei bestehenden Gebäuden) können Gegenmaßnahmen ergriffen werden, wie z. B. das aktive Entfeuchten.

Die zur Problematik beitragenden Aspekte, auf die im Folgenden eingegangen wird, sind:

Objekte:
- → Material der Objekte (Material verwertbar)
- → Zustand der Objekte: sauber oder verschmutzt (z. B. Staub oder Insekten)

Lagerung:
- → Lagerform (z. B. Rollregalanlage oder offen auf Regalen)
- → Möblierung des Lagers (Metallregale oder Holz)
- → Wasser sorbierendes Verpackungsmaterial (Holzkisten oder Kartonagen)

Gebäude: → Lage des Raumes im Gebäude (Außenwände oder innen, Dach, Keller)
→ Ausführung des Gebäudes (Wandaufbau, Bauwerksfeuchte)
→ Klimaanlage
→ Heizung

Handling: → Monitoring
→ Unterhalt, Reinigung
→ Nutzung

Menschliches: → Unterschätzung der Komplexität, Interessenkonflikte Aussteller / Restaurator versus Designer / Depotplaner).

## 2.1 Objekte

In aller Regel ist die Verwertbarkeit als Nahrungsquelle und damit das **Material** die Grundlage für einen Befall; selbst auf lackierten oder farbig gefassten Objekten kann dieser oberflächlich auftreten, wobei der Lack oder das Bindemittel der Farbe als Nahrungsquelle dienen können.

Auch in poröse Oberflächen eingedrungene Lebensmittel können zu Schimmelbefall führen (z. B. bei Mahlsteinen). Manchmal sind auch zur Restaurierung verwendete Materialien abbaubar.

**Abb. 1 und Abb. 2:** Staubbedeckte Papiertüten und Knochen (Abb. 1/links) und Keramikscherben (Abb. 2/rechts) mit weißen Pilzpusteln auf Staubschicht *(Aspergillus glaucus)* (Fotos G. Krüger).

Der **Zustand der Objekte** ist ebenfalls relevant. Sind die Gegenstände stark verstaubt, von Insekten befallen oder mit Erde verunreinigt, kann Schimmelbefall ermöglicht werden. Schimmelpilze und Insekten bilden Gemeinschaften, die einander begünstigen können. Zum Beispiel fressen Milben die Schimmelpilze und verbreiten die Konidien (Sporen); Kot und Chitinüberreste werden von den Pilzen verwertet. Staub stellt durch seine Verwertbarkeit und sein hervorragendes Feuchtebindevermögen einen guten Nährboden dar. Hier wird das eigentliche Objekt nicht befallen, sondern xerophile Pilze wachsen in erster Linie auf dem Staub. So können auch eigentlich inerte Materialien, wie Glas und Keramik, besiedelt werden.

Eine weitere Quelle für Schimmelpilze stellen archäologische **Blockbergungen** dar (siehe Punkt 3.4.2), da sie zum Schutz des noch Auszugrabenden feucht bleiben sollen. Somit ist in einem Block, der selber die Befallsorganismen bereits enthält, auch genügend Feuchte für deren Entwicklung vorhanden. Zudem erfolgt durch die Bergung die für das Schimmelwachstum erforderliche Sauerstoffversorgung.

## 2.2 Lagerung

Die **Art der Lagerung** hat insofern Einfluss auf das Schimmelwachstum, da bei Vollklimatisierung, die für eine Temperierung notwendig ist, die notwendige Durchlüftung be- oder gar verhindert werden kann. Eine Rollregalanlage in Verbindung mit schlecht gedämmtem Boden / Decken führt z. B. zu Auskühlung und stabilen, kalten Horizonten innerhalb eines Raumes, aber auch des Lagergutes. Hier steht der Wunsch nach optimaler Raumausnutzung (volle Beladung der Anlage) der Notwendigkeit einer guten Durchlüftung entgegen. Offene Regale, die mit Abstand fest installiert sind, gewährleisten sowohl eine gleichmäßigere Temperierung als auch die Durchlüftung.

Die **Lagermöbel** (Schränke oder Regale) aus Metall haben ein hervorragendes Wärmeleitvermögen und verursachen mit Wärmebrücken im Raum kalte Bereiche.

**Abb. 3:** Dicht befülltes Rollregal mit dicht gestapelten Holzkisten mit Staubauflage (Foto G. Krüger).

**Lagermaterial** aus Holz zeigt starkes Sorptionsvermögen und kann so erhebliche Mengen an Feuchtigkeit speichern und für die Pilze bereitstellen. Auf Kisten und Paletten aus rohem und sägerauhem Holz bleibt Staub und Schmutz haften und lässt sich nur schwer entfernen.

Im Vergleich zu mineralischen Baustoffen erhöht sich bei Holzwerkstoffen die Aufnahmefähigkeit von Wasser bei steigender Luftfeuchte zunehmend.

**Abb. 4:** Mit Cottonblue gefärbte Hyphen von *Aspergillus glaucus*-Pilz; Eindringtiefe bis 1 mm; Hyphen durchwachsen Tüpfel des Holzes senkrecht zur Zellrichtung (Foto G. Krüger).

Beim Heruntertrocknen nach Auffeuchtung folgt das Material einer Hysterese-Schleife. Dies bedeutet, dass beim Trocknen mehr Feuchtigkeit im Material verbleibt (1–2 %), als beim Auffeuchten bei gleicher Luftfeuchte enthalten war und diese erst bei wesentlich trockenerer Luft abgegeben wird (Engelund u. a. 2012, 156).

Meist nutzen die Pilze, wie z. B. *Aspergillus glaucus*, die im aufliegenden Staub gebundene Feuchte (Krüger 2015, 138).

**Abb. 5 und Abb. 6:** Schimmelpilze auf unbehandelter Holzkiste. Das Pilzwachstum folgt den Jahresringen. Der Pilz sitzt auf Frühholz mit großen Lumina (Abb. 5/links). An Wärmebrücken zum kalten Boden (Sockel aus Metall) bilden sich lokal höhere Luftfeuchten aus und der Pilz wächst dort (Abb. 6/rechts) (Fotos G. Krüger).

## 2.3 Gebäude

Weiterhin kann vom Gebäude eine Gefährdung ausgehen. Es ist zu berücksichtigen, wo im Gebäude die Ausstellungsräume / Lagerräume liegen (Erdgeschoß, Keller, Dachraum; mit Außenwand oder innen im Gebäude).

Besonders schimmelgefährdet sind Stellen im Gebäude, an denen die im Inneren befindliche feuchte Luft abkühlt. Es bilden sich dann unter Umständen stark von den Idealwerten der eingeleiteten Luft abweichende Mikroklimate. Diese werden durch die Ausführung des Gebäudes wie auch durch die – falls vorhanden – Lüftungsführung bedingt (Baumaterialien und Bauart). So fließt an Gebäudeecken mehr Wärme ab, da die abgebende Fläche größer ist als die wärmeaufnehmende (Pregizer 2003, 16). Bestimmte Raumbereiche können daher durch ihre Nähe zu Außenwänden, -ecken und/oder schlecht gedämmten Erdgeschoßböden auskühlen und weisen dadurch eine erhöhte relative Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche auf. Weiterhin hat die Möblierung des Raumes Einfluss auf die Ausprägung von Mikroklimaten. Um ein Schimmelwachstum zu ermöglichen, ist eine Taupunktunterschreitung mit Kondensation zu flüssigem Wasser dabei keineswegs erforderlich; schon dauerhafte Werte der relativen Luftfeuchte um 70 % sind ausreichend.

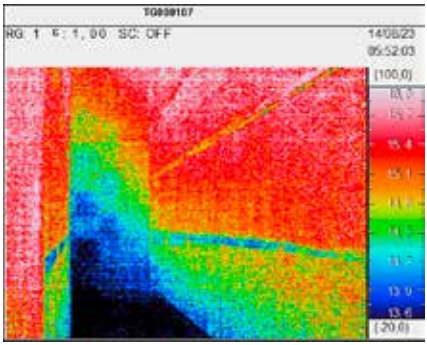



**Abb. 7 und Abb. 8:** Foto und Thermokameraaufnahme einer Rollregalanlage; Klimaanlage in Betrieb (März). Links: Außenwand, geradeaus: Innenwand. Direkt nach dem Aufschieben eines geschlossenen Regals: Boden deutlich ausgekühlt (13,6 °C). Die Wand wird nach innen zum Raum hin und nach oben wärmer. Das unterste Regalkompartiment und der Metallsockel sind ausgekühlt (14–14,5 °C), der metallische Zwischenboden ist als deutlich kälter sichtbar. Nach oben sind die Regaletagen wärmer (15,2–15,6 °C)
(Fotos G. Krüger).

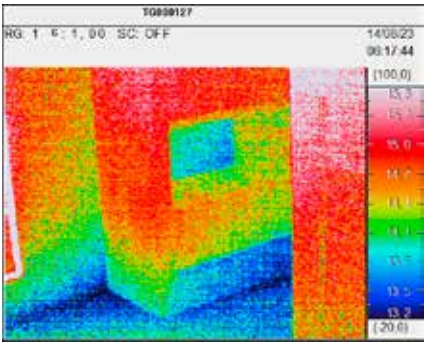



**Abb. 9 und Abb. 10:** Foto und Thermokameraaufnahme eines außenwandseitig montierten Regals; Klimaanlage in Betrieb (März): oben 15 °C; Boden 13,2 °C; Sockel 13,5 °C, Außenwand unten 13,6 °C; Kiste 14,5 °C. Die Kisten kühlen zum kalten Boden auf dem wärmeleitenden Metallsockel und zur Wand hin aus. Der Temperaturunterschied beträgt 1,5 °C zur zweiten Regaletage
(Fotos G. Krüger).

Schimmelwachstum kann dann nicht nur am Lagergut, sondern auch an inneren Gebäudeoberflächen (Wandbekleidungen wie z. B. Tapeten oder Anstrichen) und organischen Baumaterialien (Holz) auftreten.

**Wärmebrücken**, die ein besseres Wärmeleitungsvermögen als die Umgebung aufweisen, verursachen Wärmeabfluss. Dies können nicht regelgerecht ausgeführte Bauteile, z. B. bei Fensterlaibungen, Rollladenkästen, an Übergängen zwischen verschiedenen Bauteilen oder unterschiedlichen benachbarten Materialien sein (z. B. Mauerwerk, benachbart zu Betonstützen mit Armierung) (Pregizer 2003, 17–18).

Bei unzureichend gedämmten Böden / Wänden können Metallregale (Rollregalanlage) in den untersten Regalböden, oder wenn sie außenwandseitig montiert sind, auskühlen und dort zu Luftfeuchteerhöhung führen. Ebenso problematisch ist Bodenkontakt von Kisten. Bei laufender Klimaanlage wird in diesem Fall fortwährend Feuchtigkeit nachgeliefert.

Besonders vorteilhaft für Pilze sind **nicht von Luft umspülte Stellen.** Wird die Luft nicht bewegt, können sich stabile Feuchteschichtungen zu kalten Oberflächen bilden. Diese können sich in zugestellten Ecken von Außenwänden, hinter oder unter Schränken / Regalen oder in abgeteilten kleinen Verschlägen (Abseiten) bilden. Rollregalanlagen sind bei dichter Bestückung und im zusammengeschobenen Zustand gleichfalls praktisch nicht zu durchlüften. Dazu kommen dann noch dichte Deckel und Sockel, die ein Unterlüften verhindern. Die gelochten Frontwände der Regale haben nur dann einen Sinn, wenn sie vom Luftstrom direkt angeströmt werden und belüften nur die vorderen Kompartimente des Regals.

Entsprechende Anlagen sollten, wenn sie mit Klimaanlage betrieben werden, in Räumen stehen, in denen es kein Temperaturgefälle zum Boden / Außenwänden gibt (isotrope Räume). Bei passiver Klimatisierung mit langsamem Gleiten

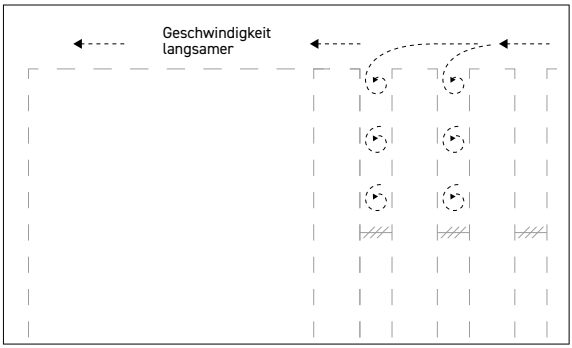
**Abb. 11:** Gefülltes Rollregal aus wärmeleitendem Metall: Dichter Deckel und dichter Sockel erzeugen einen blockhaften Zustand, wenn das Regal zusammengeschoben ist. Rechts über der Tür an Innenwand Auslass der Klimaanlage; Einlass gegenüber an der Außenwand, links im Mittelgang (Foto G. Krüger).

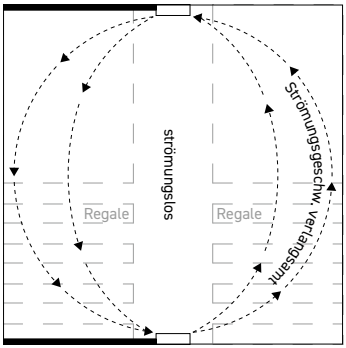
der Temperatur wird demgegenüber die Feuchtigkeit durch Entfeuchter im Raum aktiv entzogen und ein Temperaturabfall hat keinen pilzbegünstigenden Effekt, da es zu trocken ist.

Eine alle Bereiche durchspülende Luftführung im Raum ist von essentieller Wichtigkeit in allein durch Klimaanlagen temperierten Räumen und sollte vor Ort mit Beladung auf ihre Funktionalität geprüft werden.

Die hemmende Wirkung von Einrichtungsgegenständen auf die **Luftführung** zeigen Untersuchungen von Gabriele Krüger (Krüger 2015, 68) mittels Nebelgerät an einer mit Lagergut befüllten Rollregalanlage in einem klimatisierten Raum des Museumsdepots des LVR-LandesMuseums Bonn. Hier zirkulierte die Luft nur oberhalb der Regalblöcke. Beim Abkühlen sank sie unter Wirbelbildung langsam zwischen den Regalen nach unten. Da der Boden kalt war, bildete sich ein stabiler Kältehorizont ca. 1,2 m über dem Boden. Dieser wurde immer wieder von oben durch die Klimaanlage mit neuer Feuchtigkeit versorgt. Eine Durchströmung und ein effizientes Temperieren des Raumes war daher unmöglich und dies selbst, wenn die Regale auf Spalt stehen.

**Abb. 12 und Abb. 13:**
Rollregalanlage, Untersuchung des Strömungsverhaltens mit Nebelgerät.
**Abb. 12 / links:** Seitliche Ansicht; hier ist nur ein horizontaler Luftkreislauf oberhalb der Regalblöcke möglich, da der übrige Bereich durch die zusammengeschobenen Regale und eingelagertes Material versperrt wird. Ein- / Auslass liegen auf gleicher Höhe im Mittelgang. Abkühlende Luft sinkt bis auf den Kältehorizont herab.
**Abb. 13 / rechts:** Blick von oben auf das Rollregallager mit oberhalb der Lagerblöcke kreisender Luft (Krüger 2015, 68).



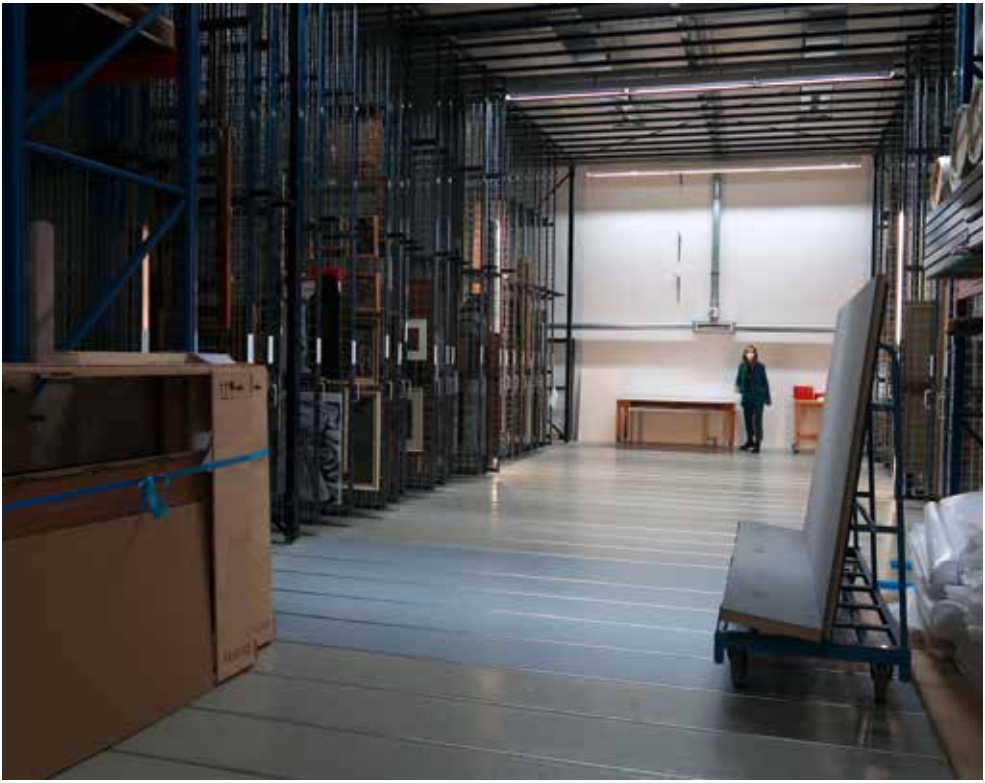



Auch auf Gittern hängende Gemälde wirken auf einen senkrecht zu ihnen stehenden Luftzug hemmend. Auch hier sollte die Belüftung gegenüber der maximalen Lagerdichte priorisiert werden.

Der Stärke des Luftzuges sind andererseits durch die gelagerten Objekte Grenzen gesetzt; sie dürfen nicht durch die Belüftung bewegt werden.

Problematisch ist häufig auch die zu geringe Dimensionierung der Verrohrung zur Belüftung für große und hohe Räume. Eine Temperierung lässt sich durch die oftmals zu geringen Luftmengen nicht erreichen.

**Abb. 14:** Großer Raum mit Vollklimatisierung und nur sehr kleinen Rohren. Der Durchlüftungsgrad reicht zur Temperierung nicht aus (Foto G. Krüger).



Bei neuerrichteten Gebäuden ist die zunächst noch vorhandene **Baufeuchte** zu berücksichtigen, die zwischen unterschiedlichen Materialien (Mauerwerk oder Beton) stark variieren kann. Für die Austrocknungsdauer ist dabei für Ziegelmauerwerk ca. 1 Jahr, für Betonbauteile ca. 3 Jahre (Heizperioden) zu veranschlagen (Pregizer 2003, 22). Häufig sind Klimaanlagen auf sehr geringe Luftwechselraten eingestellt und haben daher Probleme, große Mengen an Baufeuchte ausreichend schnell abtransportieren zu können (Kienzle 2023, 50). Die Austrocknung sollte darum durch den Einsatz von mobilen Entfeuchtern unterstützt und beschleunigt werden. Weiterhin könnte ein Trocknungsprozess des noch leeren Depots durch das Öffnen von Entrauchungsklappen im Winter an trockenen, kalten Tagen beschleunigt werden. **Die für die Trocknung erforderlichen Zeiträume sind im Bauzeitplan zu berücksichtigen.**

Eine zu schnelle Nutzung der Depoträume birgt Risiken, da in diesem Fall das Lagergut die Baufeuchte aus der Luft aufnimmt und das Gebäude austrocknet, was in der Konsequenz zu Schimmelbefall führen kann. Durch Klimamessungen ist festzustellen, ob das Gebäude für einen Bezug ausreichend ausgetrocknet ist.

### 2.4 Klimaanlage, passive Klimatisierung und Heizung

Für Museen sind sichere Klimakorridore in unterschiedlichen Publikationen definiert. Die IIC/ICOM-CC-Deklaration (Environmental Guidelines 2012) definiert 16–25 °C und 40–60 % relative Luftfeuchte als sicher; kurzzeitige Schwankungen sollten kleiner sein als ± 4 °C/ ± 5 % relative Luftfeuchte in 24 Stunden.

Der Europäische Standard EN 15757 (2010) gibt Grenzwerte für die relative Luftfeuchte und mechanische Zerstörung an; für unterschiedliche Objektgruppen gibt es sichere Zielbereiche, aber keine sichere allgemeine relative Luftfeuchte. ±10 % Schwankung der relativen Luftfeuchte im jährlichen Mittel wird als sicher angesehen. Das nordamerikanische ASHRAE-Handbook (Kap. 24) war in Europa für Dekaden einflussreich und definierte sichere relative Luftfeuchte / Temperaturbereiche beruhend auf der Annahme, dass enge Parameter eine stabile Klimasituation und damit zugleich das Vermeiden von Schimmelbefall bewirken würden. Also ging der Trend immer mehr in die Richtung komplexer und aufwendiger Anlagen, um den Klimaanforderungen zu genügen.[1]

[1] EN 16893, Conservation of Cultural Heritage (2018) ist der europäische Standard für Lagergebäude, Lage, Konstruktion, Modifikation von Gebäuden für die Lagerung von Kulturgut. Der Abschnitt 5.3.4 beschäftigt sich mit passiven oder Niedrigenergie-Gebäuden und gibt zusätzliche Informationen über den Gebrauch von Materialien und Installationen.

Tatsächlich sollte es jedoch im Interesse eines Museums liegen, die Stabilisierung des Museumsklimas so weit möglich unabhängig von einer Klimaanlage zu erreichen, da der Energiebedarf und die damit verbundenen Kosten erheblich sind.

Im Bemühen Kosten für die Museen zum Unterhalt von Depots zu verringern, ohne den Objekten zu schaden, wurde in Dänemark erfolgreich ein Konzept der passiven Klimatisierung verfolgt. Padfield u. a. (2018) untersuchten im Detail die bautechnischen und -physikalischen Bedingungen für Passiv-bauten. Dieses Konzept orientiert sich an der ‚Eigen-Klimatisierung', die durch thermisch besonders träge Baukörper bewirkt wird. Dazu gehört die Luftdichtheit des Gebäudes in Verbindung mit einer hohen thermischen Masse, die auf die Temperaturveränderung stark verzögernd wirkt. Die Feuchtekontrolle wird gegenüber der thermischen Kontrolle priorisiert. Ein langsames Gleiten der Temperatur über den Jahresgang zwischen 0–22 °C (je nach Konzept) wird dabei in Kauf genommen (Baars 2023, 32–33). Dabei können unterschiedliche Konzepte der Einflussnahme verfolgt werden (Larsen 2023, 38–39).

1. Gebäude ohne Heizung
   Typisch für umgenutzte Bestandsgebäude (ehemalige Lagerhallen, industrielle Gebäude) ohne eingebaute Heizung sind dicke Wände oder Decken mit hoher thermischer Masse. Die Isolation ist zu schlecht für eine Heizung; die Feuchte muss ständig kontrolliert (auf 50% relative Luftfeuchte) werden (Absorptions-Entfeuchter werden eingesetzt, da niedrige Temperaturen [< 15 °C] vorliegen). Es wird empfohlen, den Entfeuchter außerhalb des Gebäudes anzubringen und die trockene Luft durch Kanäle im Gebäude zu verteilen. Eine sehr hohe Luftdichtigkeit des Gebäudes ist die Voraussetzung für das Funktionieren. Das Gebäude folgt der Umgebungstemperatur, allerdings sehr langsam zwischen 0–20 °C.

2. Temperaturpufferung mit Entfeuchtung
Bestimmt für Lagerräume, bei denen das Gebäude ein gedämmtes Dach und Wände besitzt und so die Schwankung der Umgebungstemperatur dämpft. Keine Dämmung zum Fußboden: der Boden ist ein zusätzlicher Puffer für ein langsames Gleiten der Temperatur. Das Gebäude ist im Sommer kühler, im Winter wärmer als die Umgebungstemperatur. Entfeuchtung auf 50 % relative Luftfeuchte im Sommer ist erforderlich; Solarzellen geben den Strom für den Entfeuchter. Fensterlos und mit sehr geringem Luftaustausch (Austauschrate < 0,05 Raumvolumen/h).

3. Das Konzept des ‚**Conservation Heating**' (Christoffersen 1995; Kienzle 2023, 47; Larsen 2023, 40–41) ist praktisch, wenn der Lagerraum Teil eines auf eine konstante Temperatur geheizten Gebäudes (z. B. Museum) ist. Dabei ist die Isolierung zum warmen Gebäude größer als zur Außenwand. Man geht davon aus, dass ein dichter Baukörper mit einem hohen thermischen Isolationsvermögen die äußerlichen Temperaturschwankungen so stark abpuffert, dass sich innen ein objektverträgliches Gleitklima mit nur sehr langsamen Temperaturänderungen ergibt (Temperatur zwischen 14–23 °C) (Padfield u. a. 2018). Problematische Abkühlung im Winter, die eine unzulässige Erhöhung der relativen Luftfeuchte bewirkt, wird mit unterstützender Heizung angeglichen. Zusätzlich haben die Wände eine **hohe hygroskopische Kapazität**, um Feuchtigkeit zwischenzupuffern. Sie sind mit Ca-Silikat-platten oder Lehm bekleidet. Die Klimatisierung wird mit lediglich einem Minimum an mechanischem Aufwand realisiert: minimal unterstützende Heizung (am besten eine Wandheizung) an den Außenwänden und ständiger Betrieb von **Luftentfeuchtern**, die auf 50 % relative Luftfeuchte eingestellt sind und im Umluftbetrieb laufen. Sie heizen die Luft nur im Bedarfsfall auf. Das Gebäude selber ist klimadicht; Feuchtigkeit von außen dringt nicht unkontrolliert ein. Die Lüftungsanlage zieht Außenluft nur dann, wenn diese für die Kontrolle der Luftfeuchtigkeit passend ist **(Kontrolle der relativen Luftfeuchte auf maximal 55 % ganzjährig)**.

4. Ziel einer **Vollklimatisierung** ist die ganzjährige Einhaltung einer Temperatur von 16–18 °C und einer Feuchtigkeit von < 55 % relativer Luftfeuchte. Dabei stellen sich durch die Regeltechnik ständige kurzzeitige Temperatur- und Feuchteoszillationen bis zu 4 °C und bis zu 10 % relativer Luftfeuchte ein. Die Feuchte- und Temperaturwerte schwanken ständig abrupt. Dieses Konzept ist am energieaufwendigsten.

Gibt es eine **Klimaanlage**, ist die Art der Anlage und die Performance entscheidend. Stabile Klimatisierung ist ein technisch sehr aufwendiger Komplex und will wohlüberlegt sein. Dabei gilt der Grundsatz: So wenig Technik wie möglich einsetzen. Komplizierte Regelkreisläufe sind teuer, schwer zu beherrschen, fehleranfällig und erzeugen dauernde, nicht zu vernachlässigende Folgekosten (Betrieb, Unterhalt, Kontrolle). Es sollte daher im Zuge einer Planung genau überlegt werden, wo eine Klimatisierung gebraucht wird oder ob nicht bei unempfindlicheren Materialien (Keramik, Steine, Putze, etc.) auf eine Klimatisierung verzichten werden kann und eine passive Klimatisierung mit langsamem Temperaturgleiten und Feuchtekontrolle ausreichend ist (Kienzle 2023, 45).

Es empfiehlt sich bei der Errichtung eines Neubaus in der Ausschreibung festzulegen, dass ein Klimamonitoring mit ausreichender Loggerbestückung und aussagekräftiger Positionierung der Logger mindestens für ein Jahr erfolgen muss. Dies gibt die Möglichkeit, die Leistung der Anlage von Anfang an zu prüfen. Im Vorfeld sollten verschiedene Fragen beantwortet werden:

- Wie genau und wie schnell lässt sich die Anlage regulieren?
- Gibt es Möglichkeiten unterschiedliche Tag/Nacht-Programme zu fahren?
- Gibt es die Möglichkeit, automatisch auf die Wetterlage zu reagieren?
- Gibt es einen hohen Anteil an Luftrückführung/Wärmerückgewinnung?
- Ist die Anlage ausreichend dimensioniert (hier sind die sich durch den Klimawandel abzeichnenden Bedingungen zu berücksichtigen), um die benötigte Luftmenge mit passender Feuchtigkeit auch bei widrigen Umständen (z. B. sehr warm und sehr feucht) liefern zu können (eine Anlage, die die eingestellten Werte nicht erreicht, befeuchtet unter Umständen)?

- Versorgt eine Anlage alle Räume mit der gleichen Luft?
- Sind alle Räume gleich ausgestattet und dimensioniert? Gibt es im Raum Anisotropien (kältere Zonen)?
- Wie und wo wird die Luft in die zu klimatisierenden Bereiche eingebracht und wo strömt sie wieder aus (dabei muss darauf geachtet werden, dass eine **gute Durchströmung** gewährleistet ist und keine ‚toten Zonen' entstehen. Die Luft sollte am Boden eingeleitet und oben abgesaugt werden. Eine Austrittsöffnung in einem großen Raum ist zu wenig)?
- Wie sehen die Luftströme mit Beladung der Räume aus?
- Können in der Anlage **Hygieneprobleme** auftreten?
- Gibt es **Filter**, die Keime von außen fernhalten (ein Verkeimen der Klimaanlagenzuleitungen kann durch Staubansammlungen in den Rohren entstehen. Die Anlage bläst dann Sporen in die Räume hinein)?
- Wo und an wie vielen Stellen wird die Temperatur / Feuchte der **einströmenden / ausströmenden Luft** geprüft (ein Auffinden von ‚Sorptionslöchern' und Ecken mit Kondensation ist nur möglich, wenn auch die aus den Räumen ausströmende Luft geprüft wird)?
- Gibt es außer der Klimaanlage noch andere Heizelemente (normale Heizkörper, Bauteiltemperierung, Sockelheizung), die für eine Verhinderung von Kältezonen sorgen? Sind diese an den richtigen Stellen angebracht und funktional?
- Gibt es feuchtepuffernde Einbauten wie Ca-Silikatplatten oder Lehmputz an den Wänden?

Unter bestimmten Umständen, z. B. für Depots, hat sich **passive Klimatisierung** (Larsen 2023, 38–41) als praktikabel erwiesen, wobei hier die **Dichtigkeit der Bauhülle** besonders an den Zugängen (Schleusen), von zentraler Bedeutung ist, damit feuchte Außenluft nicht eindringen kann. Im Inneren wird bei einer passiven Klimatisierung durch Entfeuchtung im Sommer und minimale Heizung im Winter eine geeignete Luftfeuchte hergestellt. Die Temperatur gleitet langsam über den Jahresgang; die Grundfläche des Gebäudes wirkt dabei als Puffer.

### 2.5 Klimahandling

Das Klima in einem Raum ist mittels eines einzelnen Datenloggers / Fühlers in der Raummitte nicht ausreichend zu erfassen und gibt möglicherweise einen falschen Eindruck von der eigentlichen Klimasituation des gesamten Raumes; denn in Ecken und an Außenwänden kann es möglicherweise deutlich feuchter sein. **Messfühler an und in der Klimaanlage sind für eine Raumüberwachung nicht ausreichend.** Auch durch die Bestückung des Raumes stellen sich häufig unterschiedliche Mikroklimate an den verschiedenen Oberflächen ein, da die Temperatur nicht überall gleich ist. Daher ändert sich dort auch die relative Luftfeuchte. Auf diese Weise können scheinbar „gleiche Räume" ein abweichendes Klima aufweisen. Erst nach Durchlauf eines kompletten Jahreszyklus besitzt man Aufschluss über die Entwicklung der Temperatur / Luftfeuchte. Es sollte also jeder Raum mit mehreren Loggern an unterschiedlichen Stellen überwacht werden. Bei bestehendem Monitoringverfahren sollte hinterfragt werden, ob dieses tatsächlich die Realität abbildet. Folgende Fragen stellen sich:

- Gibt es Datenlogger, die Temperatur und Luftfeuchte registrieren? Werden alle Räume erfasst?
- Wie viele Logger gibt es und wo sind diese angebracht?
- Geben diese ein repräsentatives und damit aussagekräftiges Bild?
- Sind sie kalibriert?
- Wie und wie häufig werden die Messwerte erfasst?
- Wer beurteilt die Ergebnisse und gibt Rückmeldungen?
- An wen werden diese Ergebnisse gemeldet (Kompetenzen)?
- Gibt es einen Notfallplan, wenn etwas nicht funktioniert?

Die beste Messung nützt nichts, wenn sie nicht in ein Gesamtbild gesetzt und bewertet wird. Dafür ist es nötig, Zeit (Arbeitskosten) einzuplanen.

### 2.6 Planung

Falsches Feuchtigkeitsmanagement verursacht nicht ‚nur ein wenig Schimmel', sondern ist ein operatives Risiko für den Betrieb eines Museums: es können dadurch erhebliche Reinigungs- und Restaurierungskosten entstehen. Betroffene Objekte können nicht ausgestellt oder ausgeliehen werden. Der Ruf eines Museums kann Schaden nehmen, sollte ein ausgeliehenes Objekt durch die Klimaentgleisungen beschädigt und dadurch Zusagen an den Leihgeber verletzt werden (Versicherungsfall).

Bei Neuplanungen oder grundlegenden Umstrukturierungen von Sammlungen sind die mit den Objektbedingungen betrauten Fachleute (Restaurator*innen, Ausstellungsarchitekt*innen) von Anfang an in die Planung mit Bauherr*innen, Architekt*innen, Bauphysiker*innen und Fachplaner*innen einzubeziehen, damit das entsprechende Knowhow von Anfang an eingebracht wird. Interessenkonflikte, Unterschätzung der Komplexität verbunden mit einem zu großen Vertrauen in die technische Machbarkeit, Genauigkeit, Steuerbarkeit bergen Risiken.
Dabei sind grundlegende Aspekte zu berücksichtigen:

- Bei der Planung nie nur die einzelnen Teile sehen, sondern ein Gesamtkonzept schaffen.
- Vorhaben und Ziele für die Nutzung deutlich formulieren; Prioritäten setzen.
- Das, was Priorität hat, muss auch im Resultat funktionieren.
- Klimabedingungen müssen klar benannt werden; dabei sollten die Grenzwerte lösungsorientiert fixiert werden.
- Überprüfung, ob die Ziele zu den Klimabedingungen passen.
- Konsequenzen für die einzelnen Aspekte sind von allen Seiten zu durchdenken und es ist etappenweise zu kontrollieren, ob die Ziele mit der Planung erreicht werden können.
- Bei Planungsänderungen immer die Folgen auf das Raumklima bedenken.
- Einbeziehung einer Fachplanung für Depotbauten / Museen.
- Von Anfang an aussagekräftige Kontrollmöglichkeiten (genügend Datenlogger an unterschiedlichen Stellen und Langzeitmonitoring) einplanen.

- Nicht nur die Gestellungskosten, sondern auch die laufenden Betriebskosten (Energie, Unterhalt, Reparatur) über eine längere Zeit betrachten. Anfangs preiswertere Lösungen können sich längerfristig als kostspielig erweisen.
- Es muss gesichert sein, dass für die Bedienung der Technik und deren Kontrolle im laufenden Betrieb ausreichend Personal vorhanden ist.
- Ist eine Klimaanlage wirklich erforderlich (wo ist sie nötig/wo nicht)?
- Low Tech bevorzugen, wo möglich (passive Klimatisierung) mit massiven Wänden zur Temperaturregulierung und feuchtepuffernden Putzen wie Ca-Silikatplatten oder Lehmputz und Entfeuchtern. Wandheizungen sind optional (Kienzle 2023, 52).
- Neubau: Baufeuchte erst ausreichend entfernen (genügend Zeit bzw. Bautrockner einplanen); nicht vorschnell einziehen (mit Datenloggern lässt sich Trocknungsfortschritt feststellen).
- Bei der Planung der Lüftungsanlage nicht an der Anzahl der Messfühler und der Steuerung sparen, damit genügend Informationen vorliegen (Kienzle 2023, 52).
- Mögliche Nutzungsänderungen möglichst vorausschauend mitbedenken.

# 3. Schimmelpilzbefall

Wird im Museum oder den Depots ein mikrobiologischer Befall vermutet, sollte zunächst abgeklärt werden, ob es sich wirklich um Schimmelpilze handelt. Manchmal lässt sich ein Befall mit bloßem Auge wahrnehmen. Indizien für einen Befall können sein:

- Muffiger erdiger ‚Kellergeruch' durch die Stoffwechselprodukte der Mikroorganismen
- Fleckige Verfärbungen
- Erhabene, plüschige Kolonien im Streiflicht an der Oberfläche
- Unter Umständen sich bei UV-Licht zeigende leuchtende Flecken, die mit den beobachteten Veränderungen korrelieren

Schimmelpilze bilden ein Geflecht (Mycel) fadenartiger Zellen (Hyphen) im oder auf dem Substrat. Die Vermehrung erfolgt meist über sehr zahlreich an der Oberfläche gebildete sog.

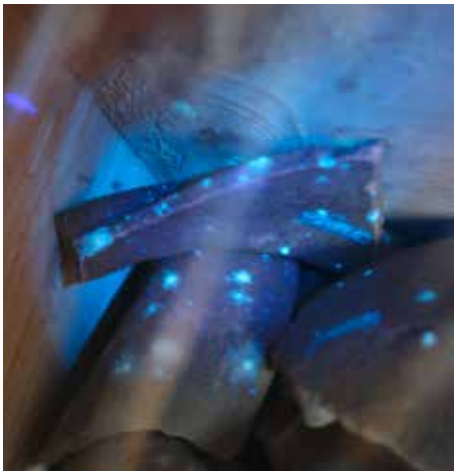


**Abb. 15/links:** *Aspergillus glaucus*, anamorphe (ungeschlechtliche Form): Konidiophor mit Konidien (ca. 400-fache Vergrößerung). **Abb. 16/rechts:** Unter UV-Licht fluoreszierende Pilzkolonien (Fotos G. Krüger).

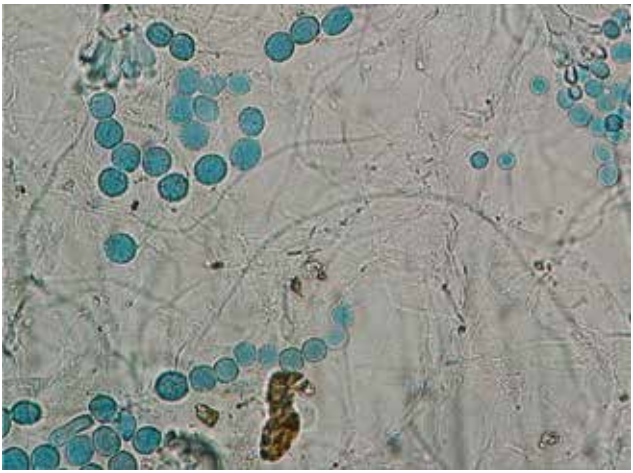


**Abb. 17:** Anfärbung eines Schimmelpilzes der *Aspergillus glaucus* Gruppe mit Cotton Blue: anamorphe *Aspergillus*-Fruchtform mit Konidien: Vesikel mit großen rauen Sporen an flaschenförmigen Phialiden (400-fache Vergrößerung) (Foto G. Krüger).

‚Sporen', bzw. Konidien, teilweise auch abgebrochene Teile des Mycels. Die Sporen sind sehr klein und können gut über die Luft weiterverbreitet werden. Im Verbreitungs- und Überdauerungsstadium sind sie sehr unempfindlich und können eine lange Zeit auf zuträgliche Bedingungen warten.

**Abb. 18:** Ausgeblühte Salze auf Putz (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ausbl%C3%BChungen.JPG Foto: Mateus2019).

### 3.1 Bestimmung des Befalls

Neben der Inaugenscheinnahme kann eine weitere Untersuchung und Spezifizierung mittels folgender Maßnahmen durch **geschulte Laien** geschehen:

- **Klebefilmproben:** Dazu wird mit einem Stück Klebefilm (z. B. Tesa crystal clear verwenden) von der Oberfläche vorsichtig eine Probe abgezogen und diese mikroskopisch nach Anfärben untersucht. Auf diese Weise lassen sich der Befall und die Arten nachweisen. Eine Bestimmung kann durch einen Mikrobiologen erfolgen.
- **Anfärben der Klebefilmprobe:** Organisches Material (Pilzhyphen und manche Fasern) wird angefärbt (z. B. mit Cotton Blue). Die Pilzhyphen und Sporen sind in aller Regel gut bei einer 400-fachen Vergrößerung zu erkennen und auch von geschulten Laien von anderen Strukturen, wie z. B. Fasern, zu unterscheiden.
- **Unterscheiden Salze / Pilze:** Manche Ausblühungen (vor allem auf Wänden) können mineralischer Art sein und sehen durch ihr wolliges oder faseriges Äußeres wie Pilzkolonien aus. Mineralische Salze zeigen unter dem Mikroskop kristalline Formen und werden durch die Färbemittel nicht gefärbt. Weiterhin lösen sich manche Salze (z. B. Nitrate, die oft eine ‚nadelartige' Form besitzen) in Wasser auf; d. h. unter dem Mikroskop ist nichts mehr zu sehen.
- **Aktivität prüfen:** Mittels ATP (Adenosintriphosphat)-Test lässt sich die biologische Aktivität prüfen (sind die Phänomene tatsächlich auf Mikrobiome zurückzuführen und wie aktiv ist der Befall aktuell).

Weitere Untersuchungen sollten durch **Mikrobiolog*innen** erfolgen.

- **Luftkeimmessungen:** Bestimmung der Menge der Organismen und der Arten in den Räumen durch Luftkeimmessungen. Dazu wird ein bestimmtes Luftvolumen über unterschiedliche Nährböden gezogen. Die Anzahl und Art der wachsenden Kolonien wird als KBE/$m^3$ (Kolonie bildende Einheit) festgestellt. Im Vergleich mit einer Probe der Außenluft können Schimmelquellen im Innenraum lokalisiert werden. Auch lässt sich mittels Luftkeimmessungen der Erfolg einer Reinigungsmaßnahme kontrollieren.

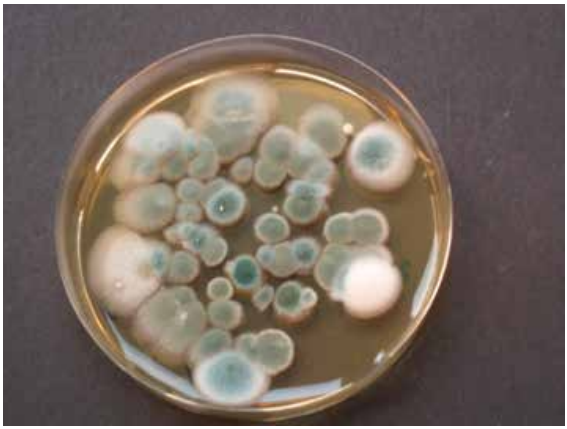


**Abb. 19 und Abb. 20:** Luftkeimsammelgerät und Luftkeimprobe auf Agarboden (Fotos G. Krüger).

- **Partikelmessung in der Raumluft:** Die Bestimmung der Anzahl von Partikeln (Staub oder Sporen) in der Luft gibt Auskunft über Schadkeime, die sich unter Umständen auf Nährböden nicht anziehen lassen. Alter Befall / Staub kann Pilzsporen enthalten, die nicht mehr keimfähig sind. Eine große Anzahl von nicht keimfähigen Sporen einer Art in der Partikelsammlung – im Gegensatz zu wenigen angezogenen Kolonien dieser Art bei der Luftkeimmessung – weist auf nicht keimfähigen Altbefall hin. Ein bestimmtes Luftvolumen wird über eine klebrige Oberfläche gezogen und mikroskopisch analysiert.
- **Anzuchtversuche:** von Stempelproben und Abstrichen auf unterschiedlichen Nährböden ermöglichen die Bestimmung der Arten.

Wird der Verdacht eines Schimmelpilzbefalls bestätigt, sollte die Untersuchung sicherheitshalber auch auf weitere ähnlich gelagerte Räume des Gebäudes ausgedehnt werden, um weiteren, bisher unentdeckten, Befall abklären zu können.

### 3.2 Vorläufige Einschätzung der Gesundheitsgefährdung

Ein Kontakt mit verkeimtem Material kann ein gesundheitliches Risiko darstellen. Dieses geht von verschiedenen Pilzen bzw. deren Bestandteilen aus (siehe weiterführend: Schimmelpilzbelastung 2007):

Die Stoffwechselprodukte einiger Schimmelpilzarten können giftig beim Einatmen, Verzehren oder Berühren sein. Diese sog. **Mycotoxine** haben ein breitgefächertes Schadpotential und können krebserregend, nieren- oder lebergiftig, neurotoxisch, immunsuppressiv, mutagen, allergen oder haut- und schleimhautschädigend wirken.

Bekannt im Innenraum ist z. B. Stachybotrys, ein Schwarzschimmel, der besonders gut auf feuchten zellulosehaltigen Materialien, wie z. B. Raufasertapeten oder Gipskartonplatten, gedeiht und häufig Toxine bildet.

- Einige wenige Schimmelpilze sind **thermotolerant** (über 37 °C) und können sich deshalb im menschlichen Körper entwickeln (Haut, Lunge, Fingernägel). Bekannt ist z. B. *Aspergillus fumigatus*, der die Lunge befallen kann.
- Wird verkeimtes Material ausgepackt, bewegt oder gereinigt, wird Staub aufgewirbelt, in welchem sich Sporen, Mycele und Mycotoxine der Pilze befinden können. Diese können eingeatmet werden oder in Kontakt mit der Haut kommen und im Körper zu Krankheitserscheinungen führen.
- Selbst wenn die Pilze nicht direkt toxisch sind, können ihre Zellbestandteile (hier die **Glucane**) zu Allergien führen. Dieses äußert sich z. B. in Husten, Niesen, verstopfter Nase, Kopfschmerzen, tränenden Augen.
- Besonders bei archäologischen Blockbergungen (siehe Punkt 3.4.2) können auch Bakterien z. B. **Aktinomyceten**, durch oberflächliche Verletzungen in die Haut eindringen und zu Krankheitserscheinungen führen.
- Alle Personen, die mit verkeimtem Material in direkten Kontakt kommen oder sich in den Räumen mit diesem Material längere Zeit aufhalten, sind angehalten sich entsprechend zu schützen (siehe Punkt 3.3).

Das von den Organismen ausgehende gesundheitliche Risiko für die Belegschaft kann durch Mikrobiologen genauer beurteilt werden, die die angetroffenen Pilze bestimmen.

### 3.3 Schutzmaßnahmen

Da eine spezielle Untersuchung nicht immer erfolgen kann, sollte man auf jeden Fall im Sinne des Eigenschutzes handeln. Zweck ist dabei, den unmittelbaren Kontakt mit der Haut bzw. die Gefahr des Einatmens von Sporen zu verhindern bzw. einzuschränken. Deshalb sollten sich alle Personen vorsichtshalber schützen, die mit biologisch befallenem Material in direkten Kontakt kommen oder sich in den Räumen mit verkeimtem Material längere Zeit aufhalten. Ein persönlicher Schutz kann erfolgen durch:

- Staubdichte FFP2 / FFP3 Maske
- Einweghandschuhe (vorzugsweise Nitril)
- Einweg-Körperschutz (Tyvek-Anzug), wenn ein Hantieren mit größeren, stark verkeimten Blöcken nötig ist
- Das Tragen eines Laborkittels schützt die eigene Kleidung vor Kontamination
- Eine valide Tetanus-Impfung sollte vorliegen, falls mit bakteriell betroffenem Erdmaterial gearbeitet wird (Risiko einer Tetanusinfektion)
- Bei offenen Verletzungen an den Händen ist besondere Vorsicht geboten
- Nach dem Kontakt mit kontaminiertem Material ist gründliches Händewaschen ein Muss (trotz vorher getragener Handschuhe)
- Das Verwenden eines Hand-Desinfektionsmittels (70 % Ethanol / Wasser-Gemisch) vermindert die Keimbelastung

### 3.4 Umgang mit verkeimtem Material

Voranzustellen ist hier, dass sich die erforderlichen Schutzmaßnahmen auch nach den auszuführenden Tätigkeiten richten müssen.

Simone Böer (Böer 2004) konnte so belegen, dass Mykotoxine beim Einsatz organischer Lösungsmittel sowie bei der Nutzung membranaktiver Biozide verstärkt aus den Zellen freigesetzt werden und zudem je nach Lösungsmittel und Toxin dabei in die Raumluft abgegeben werden, dies gilt auch für die Allergenfreisetzung (Knobbe 2005, 232).

Hieraus erfolgt die Notwendigkeit bei derartigen Tätigkeiten auch auf lösungsmitteldichte Masken zurückzugreifen.

**Grundsätzlich:** Aufgrund der Kleinheit und leichten Verschleppung der Keime gilt es darauf zu achten, sauberes Material nicht zu kontaminieren.

#### 3.4.1 Allgemein

Für den Umgang mit dem verkeimten Material gilt:

- Idealerweise gibt es einen Quarantänebereich (u. a. auch wegen Papierfischchen), in dem neues Material eingeliefert und gelagert wird. Diese Räume sollten von übrigen Depot-/Arbeitsräumen getrennt sein. Dort kann überprüft werden, ob eine Kontamination mit Insekten/Pilzen vorliegt.
- Essen und Trinken in Räumen mit mikrobiell befallenem Material ist strikt verboten.
- Auspacken und bearbeiten sollte, wenn möglich, unter einer mikrobiologischen Werkbank mit Absaugung und HEPA-Filter stattfinden.
- Ist ein Objekt zu groß für eine Werkbank, sollte nach Möglichkeit auf mobile Absaugung oder begehbare Digestorien zurückgegriffen werden.
- Kleine Partikel oder abgefallene Reste auf dem Boden sind mit einem Staubsauger mit HEPA-Filter aufzusaugen.

- Vor und nach dem Arbeiten unter der Werkbank ist der Boden der Werkbank mit einem Papiertuch mit 70 % Ethanol / Wasser-Gemisch abzuwischen (das Tuch ist in einem verschließbaren Mülleimer zu entsorgen).
- Zur Verminderung der Keimbelastung (teilweise Dekontamination) kann ein 70 % Ethanol / Wasser-Gemisch verwendet werden. Höhere %-Werte sorgen eher für eine Konservierung; niedrigere töten die Zellen nicht ab und können den Mikroorganismen als Nährstoff dienen. Aber selbst ein Einlegen verkeimten Materials in eine entsprechende Alkohollösung ist keine Gewähr für die Abtötung der Sporen.
- Gebrauchte Pinsel und Gerätschaft sind unbedingt zu reinigen (auswaschen und autoklavieren [Dampfsterilisation unter Druck]). Daher sollten nur Arbeitsmittel eingesetzt werden, die Temperaturen von 121 °C aushalten. Durch diese Maßnahme werden die Keime weitgehend entfernt und verbleibende Zellen abgetötet. In einer konventionellen Waschmaschine sind entsprechende Temperaturen nicht zu erreichen, da sie drucklos arbeitet.
- Plastikkisten können in einer Geschirrspülmaschine gereinigt werden. Werden sie per Hand gereinigt, sind sie nach dem Auswaschen mit Seifenlauge und Abspülen zusätzlich mit einem 70 % Ethanol / Wasser-Gemisch auszusprühen und mit einem Tuch abzuwischen, was zu einer weitgehenden Keimreduktion führt.
- Laborkittel sind häufig zu waschen (Kochwaschgang), um ein Verteilen von Sporen zu vermeiden.
- Beim Verlassen von Räumen mit dem kontaminierten Material verbleiben Handschuhe und Schutzanzug / Kittel im Raum.
- Nach dem Kontakt mit kontaminiertem Material ist gründliches Händewaschen ein Muss.
- Das benutzte Einweg-Schutzmaterial ist nach dem Gebrauch zu wechseln (Masken und Anzug 1 × pro Tag; Handschuhe nach Bedarf) und in einem dicht schließenden Mülleimer zu entsorgen.

### 3.4.2 Umgang mit archäologischen Blockbergungen

Blockbergungen bergen ein besonders hohes Schimmelrisiko, da sie bodenfeucht eingelagert werden, um empfindliche Funde nicht zu zerstören. Zur Verhinderung des Austrocknungsprozesses wird häufig Stretchfolie verwendet, während Gipsbinden und OSB-Platten als Umverpackung dienen. Der Gips selber ist feucht, da regelhaft mehr Wasser als zum Aushärten nötig ist, zugegeben wird. Da die Umhüllung nicht luftdicht ist, dringt Feuchte aus dem Block in die Umhüllung ein und kann dort zum Schimmelbefall des Holzes und der Gipsumhüllung (Gips und Cellulose-Binden) führen. Hier ist die Gefahr eines gesundheitsgefährdenden Schimmelbefalls besonders hoch.

Wird eine Blockbergung angeliefert, ist zu entscheiden, ob sie direkt bearbeitet oder zunächst eingelagert wird. Daraus ergeben sich zwei Vorgehensweisen:

Sofort zu bearbeiten:

- Holzumhüllung und anderes Verpackungsmaterial entfernen, dabei persönliche Schutzausrüstung tragen (Handschuhe, Maske und Tyvek-Anzug)
- Bearbeitung unter Absaugung
- Achtung bei den obersten Zentimetern der Oberfläche. Dort sitzen die evtl. gebildeten Pilze, die an der Oberfläche Sporen bilden

Blockbergung, die nicht sofort bearbeitet werden kann:

- Nach Möglichkeit Einlagerung in einem Kühlraum
- Entfernen der Holzverschalung, dabei persönliche Schutzausrüstung tragen (Handschuhe, Maske und Tyvek-Anzug)
- Umsetzen auf ein anderes Material als Holz (z. B. Polyethylen-Platten)
- Sauerstoff durch geeignete Maßnahmen entziehen (s. u.)
- Einfrieren
- Verkeimtes Verpackungsmaterial umgehend aus dem Gebäude entfernen

Schimmelbildung kann **durch Entzug des Sauerstoffs** aus der das feuchte Objekt umgebenden Luft verhindert werden:

- **Einschweißen:** Wenn die Dimension des Objektes es zulässt, kann nach Möglichkeit ein Verschweißen in einer Plastik-Sackware erfolgen.
- Zusätzlich besteht grundsätzlich die Möglichkeit, ein **luftdichtes** Zelt zu bauen, in dem der Sauerstoff durch eine Spülung mit Stickstoff entfernt wird.

Nach Möglichkeiten sollten bereits bei der Bergung **PE-Platten** statt des üblichen OSB-Materials verwendet werden, über die passende Plastikkisten gestülpt werden.

# 4. Wie kann man das Auftreten von Schimmel verhindern?

Schimmelsporen sind allgegenwärtig und sehr resistent gegen Abtötungsversuche. Zur Verhinderung eines Schimmelbefalls ist zwischen einer Hemmung und einer Abtötung zu unterscheiden. Ein Abtöten der Sporen ist durch Autoklavieren (Dampfsterilisation: Erhitzen bis 121 °C unter Druck, Dauer 20 Minuten), Ozon oder UVC-Strahlung möglich. Diese Methoden sind bei musealen Objekten in aller Regel nicht anwendbar. Daher gilt es, die Menge an vorhandenen Sporen zu reduzieren und den Pilzen die Rahmenbedingungen zu entziehen, die ein Gedeihen ermöglichen. **Luftfeuchtigkeit unterhalb 55 % relativer Luftfeuchte wird als sicher erachtet.**

Neben den Möglichkeiten, die man zur Einflussnahme auf Materialgegebenheiten hat, ist es erforderlich, im Museum arbeitendes Personal für die Risiken zu sensibilisieren. Die Möglichkeit, mittels Technik einen künstlichen Zustand zu erzeugen und zu überwachen, spart nicht unbedingt Personal ein. Die präventive Konservierung nimmt hier eine zunehmend wichtigere Rolle ein. Sie ist eine pflegerische Tätigkeit, die einen komplexen Bereich zwischen Technik und Material abdeckt. Dafür sollte Personal eingeplant werden.

Die oben dargelegten Problematiken zeigen, dass

1. ein **sehr genaues Hinsehen** erforderlich ist
2. mit **Kompetenz ausgewertet / bewertet** werden muss
3. daraus Strategien und **Handlungskonzepte z. B. Handlungsanweisungen**, zusammen mit den Nutzern entwickelt und
4. **Ergebnisse kommuniziert** sowie
5. Mitarbeiter*innen regelmäßig mittels **Schulungen** informiert werden müssen.

In **Schulungen** sollten vermittelt werden:

- Grundlegende mikrobiologische Begriffe und Zusammenhänge bezüglich der Pilze
- Grundlegende Begriffe der Klimatisierung (Zusammenhang Luftfeuchtigkeit – Raumtemperatur – Objekttemperatur – Taupunkt)
- Materialspezifische Eigenheiten (z. B. Hygroskopizität) verschiedener Materialien und Gefahrenpotentiale für mikrobiologische Besiedelung
- Informationen zur Entstehung von Mikroklimaten; Baukörper- und einrichtungsbedingte Aspekte; Sensibilisierung für bautechnische Probleme und Mängel
- Anregungen zur Verbesserung ungünstiger Situationen
- Techniken zum aussagekräftigen Monitoring des Klimas
- Anweisungen im Umgang mit Befallssituationen

### 4.1 Objekt

Schimmelpilze benötigen Sauerstoff, ausreichend Wasser und eine gemäßigte Temperatur zum Gedeihen. Sind die Bedingungen ungünstig, verharren die Sporen in einer Ruhephase und warten auf eine Verbesserung der Umstände:

- Beim **Einfrieren** werden die mikrobiologischen Vorgänge lediglich unterbrochen. Wasser ist gefroren und die niedrige Temperatur verhindert Stoffwechselvorgänge. Nach dem Auftauen können diese wieder fortschreiten. Diese Methode kann für die Lagerung von feuchtem organischem Material (Bücher, Textilien, Leder, Blockbergung) bis zur Trocknung bzw. Aufarbeitung angewendet werden.
- Durch **Herabsetzung der relativen Luftfeuchtigkeit** (auf max. 55 % relative Feuchte) kann ein Auskeimen der Sporen verhindert werden. Es ist dann zu trocken, um Pilzwachstum zu ermöglichen. Der Grenzwert liegt bei ca. 65 %, sollte aber niedriger gewählt werden, um bei Temperaturschwankungen (Auskühlung) noch im sicheren Bereich zu sein.
- Das **Entfernen von feuchtebindenden Staubauflagerungen** entzieht Nährboden und Feuchtigkeit.

- Ein erneutes Verstauben der Objekte sollte durch **Abdeckungen** auf den Kisten (bei Stapelung oberste Kiste) bzw. übergehängte Papiere / Folien verhindert werden. Eine Verpackung der Objekte in Folienbeutel erfolgt bei Bedarf.
- Bei **unempfindlichen Materialien** (z. B. Scherben), und sehr großen Mengen kann eine Verminderung von oberflächlichem Staub, Schmutz und Schimmelpilzen/Sporen auch durch den Einsatz einer Industriespülmaschine (65 °C ohne Reinigungsmittel, sehr kurze Behandlungsdauer von 3 min, trocknen bei 80° C) erfolgen. Als unempfindliches Material wird neuzeitliche Keramik, Terra Sigillata und hochgebrannte Keramik (Steinzeug und Porzellan) angesehen. Die Methode dient nur der Entfernung oberflächlicher Verschmutzung und nicht der Sterilisierung. Sind naturwissenschaftliche Untersuchungen an Scherben geplant, sollte Probenmaterial zurückgehalten werden.
- **Entfernen sorbierenden Lagermaterials** (Holz / Pappe) dafür Lagerung der Objekte in gelochten **Polyethylenkisten**.
- Die **Lagerdichte** sollte **nicht zu hoch** sein, auch wenn das Möbel dies zulässt; daher Regale nicht ganz vollstellen, damit eine Durchlüftung gewährleistet ist.
- Die Objekte sollten **nach Materialien sortiert** sein und in materialgerechten Lagerungsräumen aufbewahrt werden (z. B. für Metall).
- Bei Einlagerung neuer Objekte ist neben der Reinigung eine **Vorkonditionierung** auf die im Depot herrschende relative Feuchte / Temperatur sinnvoll. Feuchtes Material ist zu trocknen, um einen Eintrag von Feuchtigkeit in das Depot zu vermeiden. Bei einem Umzug großer Mengen an Objekten ist zu beachten, ob nicht Feuchtigkeit mit den Objekten aus u. U. feuchten, vorherigen Lagerorten eingeschleppt wird, obwohl die Objekte trocken erscheinen. Sofern eine Vorkonditionierung nicht möglich ist, sollte mit zusätzlichen mobilen Entfeuchtern in den Räumen die Entfeuchtung unterstützt werden (Kienzle 2023, 51). Eine Vollklimaanlage sollte dann zeitweise abgeschaltet werden, um nicht gegen diese anzutrocknen.
- Unempfindliches Material (z. B. Scherben), können auf 40 % relative Feuchte herabgetrocknet werden.
- **Feuchte Hölzer** können mittels **Sauerstoffabsorbern** in sauerstoffdichten Folienbeuteln eingeschweißt werden und werden kühl gelagert.

- Größere Hölzer können **unter Wasser gelagert** werden, wobei darauf zu achten ist, dass die Objekte ständig vollständig von Wasser bedeckt sind.
- Zur Erhaltung des sauberen Zustandes der Depots und der Objekte ist die **Reinigung des Bodens und Überprüfung des ‚Verstaubungszustandes'** der Objekte in regelmäßigen Intervallen notwendig.
- Regelmäßige **Kontrollen** sind unerlässlich.

### 4.2 Gebäude

Wird Schimmelpilzbefall an Objekten festgestellt, ist zu untersuchen, ob der Befall durch externe Feuchtequellen im bzw. am Gebäude ermöglicht wird.

Gebäude im Äußeren:

- Dachdichtigkeit
- aufsteigende Bodenfeuchtigkeit (ungenügende Abdichtung / Dämmung der Bodenplatte; fehlende Horizontalabdichtung; anstehender Grund außen ist höher als innen)
- Durchfeuchtung von Außenwänden durch: überlaufende Fallrohre (undicht, verstopft); schadhaften, rissigen Putz; dichte Farbschichten; Hydrophobierungen
- Wasserableitung der Fallrohre im Boden undicht / nicht vorhanden
- undichte Fenster
- Fensterbänke ermöglichen das Zurücklaufen von Wasser ins Gebäude
- Falsches Lüftungsmanagement, wodurch warme, feuchte Außenluft in kühlere Gebäudebereiche eindringt und dort an kalten Oberflächen kondensiert bzw. oberflächennah zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit führt (häufig im Sommer)
- Luftundichtigkeit der Gebäudehülle

Möglicher Wassereintrag im Inneren:

- undichte Heizleitungen oder Wasserleitungen
- undichte, eingebaute Fallrohre
- undichte Kanalisationsrohre

- Wassereintrag durch Atemfeuchte (Mitarbeiter*innen; Bearbeiter*innen).
- Wassereintrag durch zu feuchte Reinigung
- Zu geringer Luftwechsel (mangelndes Lüften oder zu dichte Fenster) bei aufsteigender Bodenfeuchte führt zu Auffeuchtung der Raumluft

Weitere eingehende Informationen liefert:

Vereinigung der Landesdenkmalpfleger (VDL), Vorsorge, Pflege, Wartung. Empfehlungen zur Instandhaltung von Baudenkmälern und ihrer Ausstattung. Berichte zur Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland 10 (Melsungen 2016). https://www.vdl-denkmalpflege.de/fileadmin/dateien/Ver%C3%B6ffentlichungen/Arbeitsheft_10_Vorsorge_Pflege_Wartung_WEB.pdf

### 4.3 Klimatechnik: Wartung, Revision und Reinigung

Um die Umgebung für Pilze dauerhaft unattraktiv zu machen, bedarf es einer regelmäßigen Wartung der Klimatechnik und Reinigung des Gebäudes.

- Regelmäßige Kontrolle der Lüftungskanäle auf Verkeimung
- Wechsel von Filtern gegen Sporen aus der Außenluft
- Reinigung der Kanäle mit Hilfe von Ozon
- Regelmäßige Reinigungsintervalle der übrigen Räume (trocken saugen mit HEPA-Sauger)
- Feuchtreinigung (Hygienereiniger) in stark belaufenen Bereichen, ohne dass Wasser verbleibt

### 4.4 Untersuchung der Wirksamkeit einer Klimatisierung und deren Optimierung

Ist eine Klimaanlage vorhanden, gilt es deren Funktionalität und die Erfassung aller Bereiche durch umfassende Klimamessungen zu überprüfen (ausreichende Dimensionierung; Luftführung; Vorhandensein von Kontroll- und Regelmöglichkeiten).

Die Wirksamkeit einer Klimatisierung kann durch **Wärmebrücken** in der Gebäudehülle, die zu Feuchtekondensation / Auffeuchtung führen, z. T. erheblich beeinträchtigt werden. Das Aufspüren entsprechender Wärmebrücken ist mit einer **Thermokamera** möglich, die die Temperaturverteilung im Raum farblich anzeigt. So lassen sich kalte Ecken, dünnere Wandteile oder schlecht gedämmte Böden erkennen. Im Falle des Nachweises kalter Stellen im Raum stellt die Klimaanlage einen Risikofaktor dar, da sie als ‚Wasserpumpe' funktioniert. Neue Feuchte wird über die Anlage ständig in den Raum eingebracht, die an den kalten Zonen gegebenenfalls kondensiert.

Zur Überprüfung der Klimagüte sollte das von der Anlage gelieferte Klima mit **Datenloggern** an **verschiedenen Stellen** in den Räumen überwacht werden (siehe Punkt 4.5). Mittels **Nebelgerät** kann die Durchmischungseffektivität und das Luftströmungsverhalten in Räumen geprüft werden. Mittels eines **Strömungsmessers** lässt sich die Stärke der Luftströmung messen.

Resultiert eine Befallssituation aus einer Kondensation an kalten Flächen, gibt es folgende Möglichkeiten:

- Eine **Bauteiltemperierung** kann hier gegebenenfalls am Sockel oder den Außenwänden Abhilfe schaffen. Eine elektrische Anlage ist reaktionsschneller und besser steuerbar und birgt nicht das Risiko von Rohrbrüchen. Es eignen sich auch elektrische Infrarotheizkörper in Form von Metallplatten oder Heizsteinen. Die Stromversorgung muss ausreichend und für einen guten Brandschutz / -meldung muss gesorgt sein (Naumović 2023, 67).
- Bei Räumen mit einer **passiven Klimatisierung** kann mittels mobiler **Luftentfeuchter** auf die Luftfeuchte korrigierend eingewirkt werden, so dass die relative Luftfeuchte an den kalten Stellen auf 50 % reduziert werden kann. Auf diese Weise ist es möglich die Feuchtigkeit im Sommer auf unkritische Werte herabzusetzen, während sie im Winter wieder schrittweise angehoben werden kann. In Ausstellungen können mobile Luftentfeuchter die von den Besuchende eingetragene Feuchte entziehen. Abhängig von der Temperatur können Kondensationsentfeuchter (bis mindestens 15 °C) oder Adsorptionsentfeuchter (1–15 °C) verwendet werden. Zu berücksichtigen ist die hohe Wartungsintensität (ständiges Entleeren der Gefäße) (Naumović 2023, 71).

- Für **Räume ohne Klimaanlage** ermöglichen feuchtepuffernde Einbauten wie Ca-Silikatplatten oder Lehmputz an den Wänden einen Ausgleich von Feuchtespitzen. Für einen Ausgleich des Puffers muss durch kontrollierte Lüftung oder Entfeuchter gesorgt werden (Kienzle 2023, 50).
- Im **Fall einer Vollklimaanlage** sollten kalte Bereiche nicht zur Lagerung verwendet werden. Werden kalte Zonen in den Räumen festgestellt, die sich nicht beseitigen lassen, dürfen diese nicht zugestellt werden; Regale zu Außenwänden sollten in diesem Fall nicht mit empfindlichem Lagergut belegt werden. In unteren Regalzonen oder an Außenwänden lassen sich unempfindliche Plastikmaterialien lagern, um den Lagerplatz dennoch nutzen zu können.
- Gute Luftdurchströmung durch weniger dichte Lagerung ermöglichen.
- Durch ein automatisches System am Ende des Tages die Rollregale auf gleich_ mäßigen Spalt auffahren, damit die Blockbildung verhindert wird (Kienzle 2023, 48).
- Ist die Durchlüftung der Räume zur Temperierung zu schwach, ist die Nachbesserung der Belüftung, z. B. durch Verrohrungen mit größeren Querschnitten oder höherem Lufteintrag, erforderlich.
- Klimaanlage insgesamt trockener fahren, um auch an ungünstigen Stellen pilzsichere Zustände zu schaffen.
- Das Oszillationsverhalten der Klimaanlage berücksichtigen: durch Regelvorgänge schwankt die von der Anlage ausgegebene Luftfeuchtigkeit um den eingestellten Mittelwert. Dies ist bei der Klimatisierung zu berücksichtigen, so dass der obere Oszillationswert die angestrebte Luftfeuchte nicht überschreitet.
- Erweist sich die Klimaanlage als zu schwach dimensioniert, kann eine Verbesserung durch **Zusatzgeräte**, die ein eigenes Klima im Raum schaffen oder ganze Raumbereiche separat klimatisieren, erreicht werden.

## 4.5 Klimamonitoring

### 4.5.1 Klimamonitoring mittels Datenloggern zur Messung der Raumluftfeuchte und Lufttemperatur

Um einen aussagekräftigen Überblick über die Temperatur- und Feuchteverteilung im Raum zu erhalten, sind mehrere **Datenlogger** notwendig, die an unterschiedlichen Stellen im Raum positioniert werden. Denn regelhaft reichen die Dokumentationen, die Klimaanlagen liefern, nicht für eine verlässliche Bestimmung des Raumklimas aus. Es gibt Geräte, die über mehrere Eingänge für Sensoren an Kabeln verfügen, so dass mit einem Gerät Werte an mehreren Punkten z. B. über dem Boden und in 1,9 m Höhe direkt an der Wand gemessen werden können. Ob Geräte bei Abweichungen vom Sollwert Warnmeldungen herausgeben, hängt vom Gerät und von der Messsituation ab (Depotraum oder Ausstellung).

Die Geräte müssen kalibriert sein. Die Messwerte sollten möglichst alle 15 Minuten erhoben werden. Die interne Datenspeicherung des Klimaloggers sollte ein Volumen von wenigstens ein, besser zwei Jahren betragen. Die Messwerte sind kurz nach Inbetriebnahme der Logger und im Abstand von drei Monaten zu sichern, um die Funktion der Datenlogger sicherzustellen. Es ist daran zu denken, dass die Akkus / Batterien der Geräte von Zeit zu Zeit aufgeladen / getauscht

**Abb. 21:** An einer Außenwandoberfläche montierter Datenlogger mit Sensor für Luftfeuchtigkeit und Temperatur zur Messung der Wandtemperatur/-feuchte; daneben Pilzprüfplättchen nach Abe (Diarähmchen) bzw. mit Staub und Pilzsporen beimpfte Keramik- und Holzplättchen (Foto G. Krüger).

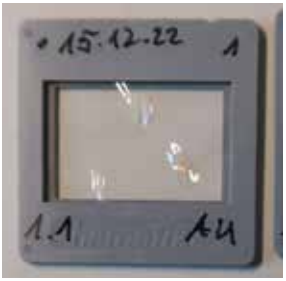


**Abb. 22 bis Abb. 24:**
Pilzprüfplättchen nach Abe (1996): Diarähmchen mit Zellophanfolie mit drei unterschiedlichen Pilzen beimpft **(Abb22 / oben, Abb. 23 / Mitte).** Keramik- und Holzproben mit Staub und Pilzen beimpft **(Abb. 24 / unten)** (Fotos G. Krüger).

werden müssen. Die Ergebnisse sollten idealerweise **monatlich, spätestens vierteljährlich ausgewertet werden**, um bei Fehlfunktion und Klimaentgleisung schneller eingreifen zu können.

Für die Steuerung einer Klimaanlage wären Logger zweckmäßig, deren Messwerte direkt von einer Zentrale einsehbar sind, damit die Klimaanlage entsprechend nachreguliert werden kann.

Falls kein Außenklimalogger zur Verfügung steht, sollten Daten des Deutschen Wetterdienstes verwendet werden.

### 4.5.2 Klimamonitoring mittels Pilzprüfplättchen

Im Depot können nach Keiko Abe u. a. (1996, 959) speziell mit xerophilen Pilzen präparierte Plättchen ausgelegt werden, mit denen sich eine mögliche Entgleisung der Feuchtewerte durch Auskeimen nachweisen lässt.

Es eignen sich Diarähmchen, in die Zellophanfolie eingesteckt wird. Diese wird mit einer Nährlösung, die die Pilzsporen enthält, geimpft. Nach Trocknen können die Plättchen in Diamagazinen an den zu prüfenden Orten ausgestellt werden.

Für manche Befallssituation sind diese jedoch nicht geeignet. Hier können besser mit gesiebtem, sterilisiertem Staub präparierte, mit Schadorganismen beimpfte Keramikplättchen zum Einsatz kommen. Die Kontrolle auf Hyphen- und Konidienbildung erfolgt dann in der Auflichtmikroskopie bzw. nach Anfärbung einer Tesafilmprobe im Durchlicht.

Die Orte erhöhter Gefährdung befinden sich, wie oben beschrieben, an Außenwänden und dicht am Boden, wo Auskühlung stattfinden kann. Zum Vergleich kann eine Stelle gewählt werden, die als sicher erachtet wird. Eine Sichtkontrolle empfiehlt sich im **vierteljährlichen Rhythmus**. Die Endkontrolle kann halb- bzw. jährlich unter dem Mikroskop stattfinden. Neue Plättchen müssen dann präpariert und ausgelegt werden.

# 5. Literatur

Abe u. a. 1996
Keiko Abe/Yoshiko Nagao/Tetsuzan Nakada/Syouzou Sakuma, Assessment of indoor climate in an apartment by use of a fungal index. Applied and environmental Microbiology 62(3), 1996, 959–963. DOI: 10.1128/aem.62.3.959-963.1996

Baars 2023
Christian Baars, Less energy input = better collections care outcome? Practical elements of climate change mitigation and resilience in museums. In: Drachenberg 2023, 26–36.

Böer 2004
Simone Böer, Untersuchung der Mykotoxinfreisetzung aus ausgewählten Schimmelpilzen (unpubl. Diplomarbeit, Carl v. Ossietzky Universität, Oldenburg 2004).

Brakhage/Jahn/Schmidt 1998
Axel Brakhage/Bernhard Jahn/Axel Schmidt (Hrsg.), Contributions to Microbiology. Vol. 2: *Aspergillus fumigatus*. Biology, Clinical Aspects and Molecular Approaches to Pathogenicity (Basel 1998).

BG Bau 2022
Berufsgenossenschaft Bau (Hrsg.), Gesundheitsgefährdungen durch Biostoffe bei der Schimmelpilzsanierung
DGUV Information 201-028
Abrufnummer (BG BAU): 201-028
Ausgabe: 11/2022

BG Bau 2019
Berufsgenossenschaft Bau (Hrsg.), Schimmelpilze bei der Gebäudesanierung. Baustein – Arbeitsverfahren C 323 (7/2019).
https://www.bgbau.de/service/angebote/medien-center-suche/medium/schimmelpilze-bei-der-gebaeudesanierung

Christoffersen 1995
Lars D. Christoffersen, Zephyr: passive climate controlled repositories: storage facilities for museum, archive and library purposes
(Lund 1995).

Drachenberg 2023
Thomas Drachenberg (Hrsg.), Energiebedarf und Kulturguterhalt.
Beiträge des 16. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin / Brandenburg am 17. Nov. 2023 im Paulikloster in Brandenburg an der Havel. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums 66 (Petersberg 2023).

EN 15757 2010
EN 15757, Conservation of Cultural Property – Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials (Brüssel 2010).

EN 16893 2018
EN 16893, Conservation of Cultural Heritage – specifications for locations, construction and modification of buildings or rooms intended for the storage or use of heritage collections (Brüssel 2018).

Engelund u. a. 2012
Emil Tang Engelund/Lisbeth Garbrecht Thygesen/Staffan Svensson/Callum A. S. Hill, A critical discussion of the physics of wood-water interactions. Wood Science and Technology 47, 2012 (2013), 141–161. DOI 10.1007/s00226-012-0514-7, published online, 14 October 2012 (Berlin/Heidelberg 2012).

Environmental Guidelines 2012
Environmental Guidelines IIC and ICOM-CC Declaration. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works (September 2014).
https://www.icom-cc.org/en/environmental-guidelines-icom-cc-and-iic-declaration

Kempe ²2001
Klaus Kempe, Dokumentation Holzschädlinge: holzzerstörende Pilze und Insekten an Bauholz (Berlin ²2001).

Kienzle 2023
Peter Kienzle, Keep it simple – Ein Low-Tech-Magazin für die Funde aus der Römerzeit. In: Drachenberg 2023, 44–52.

Knobbe 2005
Gabriele Knobbe, Gesundheitsgefährdung durch Schimmelpilze am Arbeitsplatz – Erkennung und Vorsorge. In: Angelika Rauch/Silvia Miklin-Kniefacz/Anne Harmssen (Hrsg.), Schimmel, Gefahr für Mensch und Kulturgut durch Mikroorganismen, Verband der Restauratoren (Stuttgart 2005), 232-236.

Krüger 2015
Gabriele Krüger, Holz als Werkstoff im Depot – feuchtetechnische Eigenschaften und deren Einfluß auf mikrobielle Besiedelung (unpubl. Masterarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim 2015).

Kück u. a. ³2009
Ulrich Kück/Minou Nowrousian/Birgit Hoff/Ines Engh, Schimmelpilze. Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung (Berlin/Heidelberg ³2009).

Moriske u. a. 2024
Heinz-Jörn Moriske/Regine Szewzyk/Peter Tappler/Kerttu Valtanen, Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden (Dessau 2017).

Larsen 2023
Poul Klenz Larsen, Sustainable museum storage – experience from Denmark. In: Drachenberg 2023, 37–43.

Larsen u. a. 2012
Poul Klenz Larsen/Morten Rhyl-Svendsen/Lars Aasbjerg Jensen/
Benny Bøhm/Tim Padfield, Konstantes Raumklima und niedriger Energieverbrauch – kein Widerspruch. Zehn Jahre Erfahrung mit energieeffizienter Klimatisierung in Archiven und Museumsmagazinen. Restauro 7/2012, 53–60.

Naumović 2023
Tina Naumović, Vom Kaltschloss zur Vollklimaanlage und zurück: Konzepte zur Klimakonditionierung im Vergleich – Praxisbeispiele aus der Bayerischen Schlösserverwaltung. In: Drachenberg 2023, 61–72.

Padfield u. a. 2018
Tim Padfield/Morten Ryhl-Svendsen/Poul Klenz Larsen/Lars Aasbjerg Jensen, A review of the Physics and the Building Science which underpins Methods of Low Energy Storage of Museum and Archive Collections.
Studies in Conservation, 63:sup1, 2018, 209–215.
DOI: 10.1080/00393630.2018.1504456

Pregizer 2003
Dieter Pregizer, Schimmelpilzbildungen in Gebäuden, Bautechnische Maßnahmen zur Vorbeugung und Instandsetzung (Heidelberg 2003).

Rasmussen 2007
Michael Højlund Rasmussen, Evaluation of the climate in a new shared storage facility using passive climate control. In: T. Padfield/K. Borchersen (Hrsg.), Museum Microclimates. Contributions to the conference in Copenhagen, 19–23. November 2007 (Hivdovre 2007).

Schimmelpilzbelastung 2007
Schimmelpilzbelastung in Innenräumen – Befunderhebung, gesundheitliche Bewertung und Maßnahmen. Mitteilung der Kommission „Methoden und Qualitätssicherung in der Umweltmedizin“, Empfehlung des Robert Koch-Instituts: Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz 2007 50:1308–1323 DOI 10.1007/s00103-007-0339-y Online publiziert:
5. Oktober 2007 © Springer Medizin Verlag 2007.

Sterilisation und Sterilgut-Versorgung (ohne Jahr)
Sterilisation und Sterilgut-Versorgung:
https://www.gesundheitsamt-bw.de/fileadmin/LGA/_DocumentLibraries/SiteCollectionDocuments/01_Themen/Hygiene/Sterilisation.pdf (Stuttgart, ohne Jahr).

Weiterhin:

Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe – ABAS – www.baua.de/abas

Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA) 466, Einstufung von Prokaryonten (Bacteria und Archaea) in Risikogruppen (2015).
https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRBA/TRBA-466

Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA) 240: Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit mikrobiell kontaminiertem Archivgut. In: Gemeinsames Ministerialblatt (GMBl) Nr. 29 (2015) 566–577.
https://fragdenstaat.de/dokumente/241085-gmbl-nr-29-2015/?page=1

Vereinigung der Landesdenkmalpfleger (VDL), Vorsorge, Pflege, Wartung. Empfehlungen zur Instandhaltung von Baudenkmählern und ihrer Ausstattung. Berichte zur Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland 10 (Melsungen 2016).
https://www.vdl-denkmalpflege.de/fileadmin/dateien/Veröffentlichungen/Arbeitsheft_10_Vorsorge_Pflege_Wartung_WEB.pdf

# Impressum

**Herausgeber:**
Landschaftsverband Rheinland
LVR-Dezernat Kultur
LVR-Fachbereich Regionale Kulturarbeit / Museumsberatung
Gürzenich-Quartier
Augustinerstraße 10–12, 50667 Köln

**Verantwortlich:**
Dr. Corinna Franz – LVR-Dezernentin für Kultur

**Redaktionsanschrift:**
Landschaftsverband Rheinland
LVR-Fachbereich Regionale Kulturarbeit/Museumsberatung
Gürzenich-Quartier
Augustinerstraße 10–12, 50667 Köln
www.museumsberatung.lvr.de
museumsberatung@lvr.de

**Redaktion:**
Antje Schünemann, Michael Schmauder, Thilo Martini

**Gestaltung und Technische Umsetzung:**
Martin Pütz, LVR-Landesmuseum Bonn

**Druck:**
N.N.

**Aufbereitung des Dokuments für sehbehinderte und blinde Menschen:**
N.N.

**Titel:**
N.N.

**Autor*innen:**
Gabriele Krüger
gabriele.krueger3@hawk.de

Die Handreichung entstand im Rahmen des von der DBU geförderten Projekts Optimierung eines Museumsdepots und modellhafte Vorbereitung schimmelbelasteter Objekte aus musealen Beständen zur Einlagerung in geeignete Depoträume – Entwicklung eines „integrated pestmanagements“ bezogen auf mikrobiellen Befall, DBU 35615/01-45

Den Abschlussbericht zum Projekt finden Sie auf der Seite der DBU:
https://www.dbu.de/projektdatenbank/35615-01/

**Beteiligte Institutionen und Personen:**

LVR-Landesmuseum Bonn (Hauptantragsteller)
Christiane Dirsch / Ute Knipprath / Prof. Michael Schmauder
LVR-Landesmuseum Bonn
Rheinisches Landesmuseum für Archäologie, Kunst- und Kulturgeschichte
Colmantstr. 14–16, 53115 Bonn

Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst –
Hildesheim/Holzminden/Göttingen (Mitantragsteller)
Gabriele Krüger M. A./ Dr. Petra Möhlenhoff / Prof. Dr. Karin Petersen
Bismarkplatz 10–11, 31135 Hildesheim

**Kooperationspartner:**

Dr. Stephanie Kusch
CologneAMS – Centre for Accelerator Mass Spectrometry
Molecular Archaeology & Biogeochemistry Lab
Bernhard-Feilchenfeld Str. 11, 50969 Köln

Prof. Sylviane Scharl
Universität zu Köln
Institut für Ur- und Frühgeschichte
Weyertal 125, 50931 Köln

Köln, Januar 2025

**Landschaftsverband Rheinland**
Kennedy-Ufer 2
50679 Köln

Telefon: 0221 809-0
Fax: 0221 809-2200
E-Mail: post@lvr.de

**www.lvr.de**