

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

Schutz national wertvoller Kulturgüter durch
Einsatz gesättigter Salzlösungen in Vitrinen
zur Absorption anthropogener Luftschadstoffe

Kurztitel: SalzVit

DBU-Az. 38338/01



Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze

E-Mail: schuetze@lmt.uni-saarland.de

Universität des Saarlandes

Tel.: (0681) 302-4663

Lehrstuhl für Messtechnik

Fax: (0681) 302-4665

Campus A5 1

66123 Saarbrücken

Saarbrücken, 31. März 2025



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
I Zusammenfassung.....	5
II Bericht.....	6
II.1 Einführung/Motivation	6
II.2 Methodik/Vorgehensweise/Projektablauf	8
II.2.1 Gasmesstechnik/-analytik am Lehrstuhl für Messtechnik	8
II.2.2 Praxistest im Museum	9
II.3 Projektergebnisse.....	10
II.3.1 Messung der Schadstoffabsorption.....	10
II.3.1.1 Statische Messungen in einem präparierten Glas	10
II.3.1.2 Dynamische Messungen in einem präparierten Glas	13
II.3.1.3 Praxistest zur Schadstoffabsorption in einer Vitrine	18
II.3.2 Praktische Anwendungserprobung.....	23
II.3.2.1 Versuche in Coburg.....	23
Dokumentation & Voruntersuchung	23
Langzeitversuche: gesättigte Kaliumcarbonat - (GKCL) & Magnesiumnitrat- hexahydrat-Lösung (GMNL)	26
I. Carl-Eduard-Bau/Historische Glassammlung – GKCL.....	26
II. Steinerne Kemenate/Altdeutsche Sammlung – GMNL	27
III. Herzoginbau/Historische Jagdwaffen – GMNL.....	28

IV.	Hohes Haus/Depot – GKCL	29
Ergebnisse und Interpretation der Langzeitversuche: Kaliumcarbonat & Magnesiumnitrat-Hexahydrat		29
I.	Historische Glassammlung – GKCL	30
II.	Altdeutsche Sammlung – GMNL	31
III.	Historische Jagdwaffen – GMNL.....	32
IV.	Depot – GKCL	33
Fazit (Testreihen I, II, III)		34
Spezifische Versuchsreihen & Analysen: Kaliumcarbonat & Magnesiumnitrat-Hexahydrat.....		35
A) Kriechverhalten der Salze in diversen Behältnissen (Glas, Metall, PP, PE, PS)		35
B) Einflussfaktoren Klimatisierungsgeschwindigkeit: semipermeable Membran als Verschüttenschutz & Silikagel („Tandemsystem“)		36
C) Einflussfaktoren Schadstoffe I: Schwefel, Essigsäure, Chlorwasserstoff. 37		
II.3.2.2 Internationaler Ringversuch.....		40
Auswertung der Fragebögen		41
II.4 Vermittlung.....		49
II.4.1 Öffentlichkeitsarbeit.....		49
II.4.1.1 Tagespresse/Medien		49
II.4.1.2 Museumsaktivitäten.....		50
II.4.2 Informationen für die Fachwelt		51
II.4.2.1 Nachrichtenbeiträge für Restaurator:innen		51
II.4.2.2 Wissenschaftliche Veröffentlichungen		53
II.4.2.3 Vorträge auf Fachtagungen.....		53
II.4.2.3 Abschlusstagung und Folgeworkshops		54

II.5 Fazit/Ausblick	56
III Literaturangaben	58
IV Abbildungen, Tabellen und Diagramme, Abkürzungen	61
IV.1 Abbildungs-, Tabellen- und Diagrammverzeichnis.....	61
IV.2 Abkürzungen.....	64
V Anhang.....	65
V.1 Diagramme RH/T: Versuchsreihen Veste Coburg	65
V.1.1 Historische Glassammlung (GKCL)	65
V.1.2 Altdeutsche Sammlung (GMNL)	75
V.1.3 Historische Jagdwaffen (GMNL)	78
V.1.4 Hohes Haus/Depot (GKCL)	82
V.2 Tabellarische Zusammenfassung der Testreihen (Kunstsammlungen der Veste Coburg)	85
V.3 Merkblatt für Teilnehmende Institutionen (dt./en.)	87
V.4 Liste der teilnehmenden Institutionen und Personen	90
V.5 Vorschläge für eine Vitrine mit Klimafach für gesättigte Salzlösungen	91
V.5.1 Vorschläge	91
V.6 Presse- und Öffentlichkeitsarbeit (Ausstellung “Prima Klima”, Abschlusstagung Mai 2025).....	93
V.7 Fragebogen zur Evaluation des Ringversuchs	95

I Zusammenfassung

Anthropogene Luftschadstoffe verursachen nach wie vor Korrosion an wertvollem Kulturgut in Vitrinen. Häufig zur Regulierung der Luftfeuchte (RH) eingesetztes Silikagel eignet sich nicht sehr gut zu deren Absorption. Als alternative passive Klimatisierung statt regenerationsbedürftigen Silikagels oder stromverbrauchender, betreuungsintensiver und ausfallgefährdeter Klimageräte lassen sich gesättigte Salzlösungen einsetzen. Deren Einsatz ist weitgehend in Vergessenheit geraten (letzter Fachartikel dazu 1991) und wird in Deutschland nur noch in der Veste Coburg und wenigen anderen Sammlungen ausgeübt. Argumentativ ins Feld geführte Probleme wie Verschüttungsgefahr und Kriechen von Salzen über Behälterwände sind in der Anwendung gut beherrschbar. Das Projekt soll im Lichte der heute allgemein anerkannten Notwendigkeit der Energieeinsparung und Nachhaltigkeit zu einer Wiederbelebung des praktischen Einsatzes führen.

Von Magnesiumnitrat und Kaliumcarbonat gehen keine besonderen Umweltgefahren aus. In Vorarbeiten wurde bereits gezeigt, dass sie die Luftfeuchtigkeit praktisch unabhängig von der Raumtemperatur konstant halten. Thermodynamische Modellrechnungen und Oddy-Tests ergaben, dass die Lösungen selbst keine relevanten korrosiven Emissionen verursachen. Das Potential, auch Luftschadstoffe zu absorbieren, wurde bisher nie diskutiert. Testmessungen am Fraunhofer WKI Braunschweig mit Formaldehyd als Anwendungsbeispiel ergaben eine exzellente und schnelle Absorptionsfähigkeit der Lösungen aus unbewegter Testkammerluft.

Die Absorptionsfähigkeit von Salzlösungen wurde im ersten Projektjahr auch für alle anderen Luftschadstoffe mit objektschädigendem Potenzial (saure Gase, Säuren, Aldehyde) experimentell geprüft. Diese reagieren in Kaliumcarbonat-Lösung zu unproblematischen Anionen, es entsteht kein Sondermüll. Zur Messung von Spurengasen in der Testkammer bzw. Vitrinenluft wurde die hoch entwickelte Gassensorik am Lehrstuhl für Messtechnik der Universität des Saarlands eingesetzt.

Die bisher in der Technik (Konditionierung von Kunststoff nach DIN 483), aber noch nie in Vitrinen verwendete Kaliumcarbonat-Lösung zeigte als alkalische Lösung ($\text{pH} > 13$) besonders gute Ergebnisse. Die eingestellte Luftfeuchtigkeit (43 %) liegt innerhalb des üblichen Museumsbereichs von 40 - 60 % RH und ist für viele Materialien ideal. Auch Magnesiumnitrat ($\text{DRH} = 53 \%$) erwies sich für die meisten Luftschadstoffe (Ausnahme H_2S) als geeignet.

Im zweiten Projektjahr wurde der praktische museale Einsatz, insbesondere des innovativen Kaliumcarbonats, koordiniert von den Kunstsammlungen der Veste Coburg im eigenen Haus und in zahlreichen Sammlungen im In- und Ausland anwendungsreif erprobt. Der Einsatz hat sich rundum bewährt und wird auch zukünftig über einen aktualisierten Leitfaden, Vorträge und Fachartikel propagiert.

II Bericht

II.1 Einführung/Motivation

Hygroskopische Exponate benötigen eine konstante Luftfeuchtigkeit, um Dimensionsveränderungen durch Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebungsluft (Quellen/ Schwinden) und dadurch langfristig bedingte Schäden zu vermeiden. Der Einsatz von Klimaanlage – soweit überhaupt vorhanden – ist mit hohen Kosten für den laufenden Energieverbrauch und dadurch großen Auswirkungen für die Umwelt verbunden. Tendenziell werden derzeit zur Einsparung Klima-Anforderungen gelockert, ohne dass deren Verträglichkeit für alle empfindlichen Exponate empirisch abgesichert ist. Der Ausfall der Stromversorgung (Notstromaggregate nicht vorhanden oder nicht funktionstüchtig) hat in einigen Museen dazu geführt, dass jahrzehntelanger Aufwand zur Schadensvermeidung durch Klimatisierung an einem Wochenende zunichte gemacht wurde.

Als passive, ausfallsichere Methode zur Klimatisierung von Vitrinen ohne apparativen Aufwand und laufendem Energieverbrauch wurden seit 1957 an wenigen Stellen gesättigte Salzlösungen eingesetzt (Astrup & Stub 1990). Die gelösten Salze senken die Wasseraktivität in der Lösung. Statt 100 % relativer Luftfeuchte (RH) über reinem Wasser stellt sich im Gleichgewicht die sogenannte Deliqueszenzfeuchte (DRH) des jeweiligen Salzes ein. Oberhalb der DRH zieht das Salz Feuchtigkeit an und löst sich auf, unterhalb wird Wasser aus der Lösung abgegeben und Salz kristallisiert aus. Solange sowohl ungelöstes Salz als auch eine Salzlösung im Gleichgewicht (Sättigung) vorhanden sind, bleibt daher die relative Luftfeuchte (RH) im geschlossenen Luftraum der Vitrine konstant auf dem Wert der Deliqueszenzfeuchte (DRH), der abhängig von dem gewählten Salz ist.

In den 90er Jahren kamen vorkonditionierte Silikagel-Produkte (z.B. Artsorb®, PROSORB®) in den Fachhandel und verdrängten die Salzlösungen weitgehend. Der geringere Aufwand bei der Erstausrüstung von Vitrinen ließ die Anwender übersehen, dass wegen der geringeren Wasserkapazität öfter gewartet/nachkonditioniert werden muss und die eingestellte RH sich mit der Wasserbeladung verändert. Völlig vernachlässigt wurde der Einfluss von Luftschadstoffen. Nach längerem Einsatz müssten ggf. absorbierte Schadstoffe durch Ausheizen entfernt werden und das Silikagel wieder neu auf die Wunsch-RH konditioniert werden, was die Zeitersparnis beim Ersteinsatz bei weitem aufhebt (McGath et al. 2014: “...the methods used to condition silica gel pellets for reuse need to be re-examined in light of fact they trap VOC’s, especially as it was observed that VOC’s desorb from the silica gel pellets under ambient conditions”).

Als neuer Forschungsansatz wurde im Projekt die Schadstoffaufnahme von gesättigten Salzlösungen untersucht. Gasmoleküle sind in ständiger schneller Bewegung. Wenn sie auf die Lösungsoberfläche stoßen, treten sie in anziehende Wechselwirkung mit den Wassermolekülen. Da die Schadgase (außer H_2S) stark polar sind, sind die Anziehungskräfte groß. Im Gleichgewicht werden sich daher die meisten Schadgasmoleküle im Wasser aufhalten, die Gasphasen-Konzentration sinkt. So wird die Luft gereinigt. Vorab-Testmessungen mit Formaldehyd ergaben exzellente Ergebnisse (Eggert 2022). Dies wurde auf alle relevanten objektschädigenden Gase ausgeweitet: die Mineralsäuren HNO_3 (z. B. aus Cellulosenitrat) und HCl (z. B. aus PVC), saure Schadgase (SO_2 , NO_x), Carbonyl-Verbindungen (z. B. aus Holz), nämlich die organischen Säuren Ameisen- und Essigsäure und die zugehörigen Aldehyde (Form- und Acetaldehyd) sowie H_2S . Als Salzlösungen wurden Magnesiumchlorid (DRH = 33 %, seit über 30 Jahren für ‚kranke‘ Gläser auf der Veste Coburg im Einsatz) und Magnesiumnitrat (DRH = 53 %, Idealwert für organische Materialien) getestet. Erstmals kam auch Kaliumcarbonat (DRH = 43 %) zum Einsatz. Festes Kaliumcarbonat hatte sich bereits in Exsikkatorversuchen zur Verhinderung der Glas-induzierten Metallkorrosion durch Formaldehyd und Ameisensäure bewährt (Eggert und Fischer 2020). Als alkalische Lösung neutralisiert es Säuren und Aldehyde zu nichtflüchtigen Anionen, die dem Gleichgewicht mit der Luft entzogen sind.

Bewähren sich die Lösungen (Schadstoffabsorption und konstante Luftfeuchtigkeit in Einem) gegenüber Silikagel, sind sie für die Massenanwendung vorzuziehen. Dazu müssen im Projekt aber auch neue Erfahrungen im praktischen musealen Einsatz der Lösungen (insbes. mit Kaliumcarbonat) gesammelt und kommuniziert werden.

II.2 Methodik/Vorgehensweise/Projektablauf

II.2.1 Gasmesstechnik/-analytik am Lehrstuhl für Messtechnik

Die kontinuierliche Verfolgung der Spurengas-Konzentration in der Luft erfordert eine besondere Messtechnik. Der Lehrstuhl für Messtechnik der Universität des Saarlandes ist spezialisiert auf Gasmesstechnik mit mikrostrukturierten Halbleiter-Gassensoren (MOS-Sensoren) und dynamischer Betriebsweise, wie bspw. dem Temperatur-zyklischen Betrieb (engl. temperature cycled operation, TCO) (Baur, Schütze und Sauerwald 2015; Bur et al. 2015; Schütze et al. 2017) sowie der Datenauswertung mit Methoden des maschinellen Lernens (Bur et al. 2014; Schneider, Helwig und Schütze 2017; Robin et al. 2021). Zur Charakterisierung der Gassensoren wurden Gasmischanlagen (GMA) entwickelt, mit denen Gase sowie Feuchte- und Sauerstoffgehalt unabhängig und präzise eingestellt werden können (Helwig et al. 2014; Leidinger et al. 2017; Arendes et al. 2021). Die Reinheit und Genauigkeit der Anlagen wurde mehrfach über analytische Verfahren wie Gaschromatographie-Massenspektroskopie (GC/MS) verifiziert (Mull et al. 2017; Sauerwald et al. 2018). Die Laborkalibrierung der Sensoren wurde im Feld validiert und gegen die etablierte Referenzanalytik (Probennahme mit Anreicherungsröhrchen und GC/MS-Auswertung sowie GC-PID (Photoionisationsdetektoren)) getestet. Die Analytik mit GC/MS wurde dabei sowohl selbst zusammen mit wissenschaftlichen Partnern (u. a. BAM, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) als auch von akkreditierten Laboren (u. a. eco-Institut) durchgeführt. Die Ergebnisse von Sensorkalibrierungen in mehreren Laboren wurden ebenfalls in metrologischen Referenzinstituten verglichen (Mull et al. 2017; Bastuck et al. 2018; Sauerwald et al. 2018). Durch eine Kalibrierung von Metalloxid-Halbleiter-Gassensoren (engl. metal oxide semiconductor, daher MOS-Sensoren) im TCO mit randomisierten Gasangeboten (Baur et al. 2020) ist es möglich, selbst komplexe Anwendungen mit vertretbarem Aufwand im Labor nachzustellen. Dadurch können Sensorsysteme und robuste Regressionsmodelle realisiert werden, die bspw. flüchtige organische Verbindungen (engl. volatile organic compounds, VOC) im niedrigen ppb-Bereich auch in einer komplexen Matrix zuverlässig quantifizieren, insb. für Anwendungen wie der Innenraumlufthausqualität (Baur et al. 2021). Die Auflösung und Empfindlichkeit der MOS-Sensoren ist damit in einen Konzentrationsbereich vorgedrungen, der bis dato ausschließlich der Analytik vorbehalten war. Die Laborkalibrierung wurde im Feld validiert und gegen die etablierte Referenzanalytik (GC/MS sowie GC-PID) getestet. Auch die Erkennung von Atemgasen wie Aceton (Baur et al. 2018) ist mit MOS-Sensoren möglich.

Im Projekt wurde der Konzentrationsverlauf in der Luft über den Salzlösungen sowohl statisch nach einmaliger Zugabe als auch dynamisch bei laufendem Zustrom von Schadgasen verfolgt. Diese zeitaufgelöste Messung ist nur mit den beschriebenen MOS-Sensoren möglich.

II.2.2 Praxistest im Museum

Durch die Verdrängung gesättigter Salzlösungen durch Feststoffe (wie Silikagele) in den 90er Jahren wegen der vermeintlich einfacheren Handhabung und durch einen Generationswechsel von restauratorischem Personal sind viele praktische Erfahrungen des Einsatzes, da undokumentiert, verloren gegangen. In Deutschland verfügen lediglich die Kunstsammlungen der Veste Coburg über breite, 30-jährige Anwendungserfahrung (Klimatisierung ‚kranker‘ Gläser mit Magnesiumchlorid, DRH = 33 %). Der aktuelle Zustand dieser Gläser wurde im Rahmen des Projektes evaluiert. Durch Langzeitmessungen der RH an verschiedenen Stellen in der Vitrine und im Vergleich mit der RH des Ausstellungsraumes wurde die Effektivität der Einstellung der Luftfeuchte überwacht. Neben Magnesiumchlorid hat die Veste Coburg auch gesättigte Salzlösungen von Magnesiumnitrat und Kaliumcarbonat in 14 unterschiedlichen, mit Exponaten bestückten Vitrinen der Dauerausstellung und weiteren Vitrinen in dem Depotbereich unter Realbedingungen erprobt. Etwa 60 Testpartner wurden für einen internationalen Ringversuch (‚community science‘) über persönliche Kontakte und zahlreiche Nachrichtenbeiträge in Fachmedien (vgl. IV.2.1) gewonnen; ein entsprechendes Merkblatt für Teilnehmer (deutsch/englisch) zur Information wurde dazu auf aktuellem Stand des Wissens erstellt. Die Testpartner erprobten eine oder mehrere Salzlösungen unter ihren jeweiligen spezifischen Bedingungen über einen gesamten Jahreszyklus und dokumentierten kontinuierlich das Vitrinenklima und das jeweilige Raumklima mittels Datenloggern. Die Erprobung erstreckte sich über ein ganzes Jahr, um einen vollen Jahreszeiten-Klimazyklus abzudecken.

Zum Verhalten insbesondere des in der Museumsanwendung neuen Kaliumcarbonats sind Langzeitbeobachtungen der Lösungen notwendig, um praktische Fragen beantworten zu können:

- Wie lange dauert es, bis Wartung notwendig ist? (Bei gut abgedichteten Vitrinen sollte nach Modellrechnungen das Klima über ein Jahr stabil sein).
- Welche Behälterkonstruktion kann unbeabsichtigtes Verschütten verhindern?
- Welches Behältermaterial verhindert ‚Kriechen‘ der Salze?

- Wie groß muss die Oberfläche der Lösung zur schnellen Einstellung der Feuchtigkeit sein?
- Wie schnell stellt sich nach Schließen der Vitrine das Klima ein?
- Bietet eine Tandemklimatisierung (Kombination mit Silikagel-Granulat /-Platten) Vorteile (z. B. Geschwindigkeit der Gleichgewichtseinstellung nach Vitrinenöffnung)?
- Reicht die Diffusion in der Lösung aus, um Ungleichgewichte zu verhindern (absperrende Krusten auf der Lösung bzw. Entstehen verdünnter Lösungen)?
- Wirken die Lösungen als Staubbänger (Verdunkelung?)?

Ziel war die Erarbeitung einer optimierten Do-it-yourself Anleitung zur Implementierung der Salzlösungen in Museen.

II.3 Projektergebnisse

II.3.1 Messung der Schadstoffabsorption

Die Messung der Schadstoffabsorption wurde am Lehrstuhl für Messtechnik auf drei unterschiedliche Weisen getestet.

II.3.1.1 Statische Messungen in einem präparierten Glas

Der in Abbildung 1 dargestellte Versuchsaufbau wurde entwickelt, um die Absorptionsfähigkeit verschiedener Absorptionsmedien zu vergleichen. Ein Septum im Deckel der Flasche ermöglicht die Injektion von Gas mit einer Spritze. Der Deckel ist zudem mit einem Feuchte- und Temperatursensor (SHT35, Sensirion, Stäfa, Schweiz) sowie einem MOS-Gassensor (SGP40, Sensirion, Stäfa, Schweiz) bestückt. Beide Sensoren sind über eine luftdichte Kabeldurchführung mit der Elektronik verbunden. In diesem Setup diente eine leere Flasche als Referenzflasche, die lediglich mit Luft gefüllt war. Drei weitere Flaschen enthielten jeweils ca. 200 mL einer gesättigten Lösung von Kaliumcarbonat, Magnesiumchlorid oder Magnesiumnitrat. Zusätzlich wurde eine weitere Flasche mit 200 mL HPLC-Wasser befüllt. Alle Flaschen wurden in einer Laborumgebung bei einer konstanten Temperatur von ca. 21 °C platziert.

Die Exposition mit bspw. Essigsäure erfolgte durch die Injektion von Gas aus dem Headspace eines 20 mL-Vials, das mit 2 mL reiner Essigsäure gefüllt war. Das injizierte Volumen wurde basierend auf dem Dampfdruck der Flüssigkeit berechnet, wodurch nach

Verdünnung mit der Luft in der Flasche (ca. 2000 mL) eine Endkonzentration von etwa 10 ppm erreicht wurde.

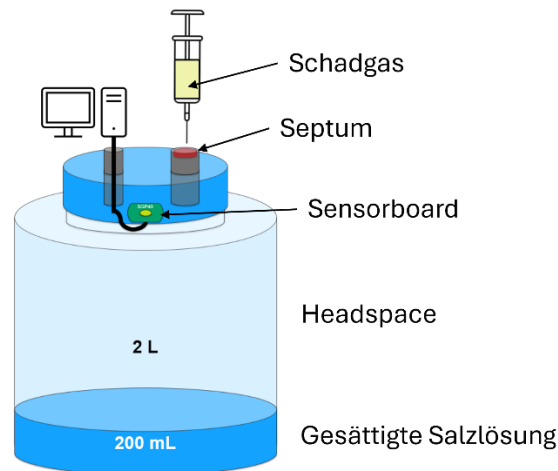


Abbildung 1: Schematischer Messaufbau zur qualitativen Absorptionsbestimmung von Schadstoffen in ges. Salzlösungen.

Vor der Injektion wurden die Sensoren für einen Tag im Headspace der Flasche ohne Injektion von Schadgasen betrieben, um sich an die Bedingungen im Headspace (insb. die Feuchte) anzupassen. Der SGP40 Sensor verfügt über vier verschiedene Sensorschichten, die jeweils auf separaten mikrostrukturierten Heizern integriert sind. Zur Steuerung und Auslesung des Sensors wurde eine hausinterne elektronische Plattform verwendet (Fuchs et al. 2022). Jeder Sensor wurde im temperaturzyklischen Betrieb (TCO) (Schütze und Sauerwald 2020) mit einem Temperaturzyklus von 30 Sekunden betrieben (Abbildung 2), wodurch alle 30 Sekunden ein Zyklus erfasst wurde. Aus einem Zyklus kann auf Basis der komplexen Kalibrierung die Konzentrationen mehrerer VOC sowie auch relevanter Permanentgase (CO, H₂) bestimmt werden. Die zyklische Temperaturvariation verbessert sowohl die Empfindlichkeit als auch die Selektivität der Sensoren und ermöglicht eine verbesserte Detektion und Differenzierung von Gasen (Schütze und Sauerwald 2020).

Die Ergebnisse des vorgestellten Versuchsaufbaus für die drei untersuchten Schadstoffe Essigsäure (acetic acid), Ameisensäure (formic acid) und Salzsäure (hydrochloric acid) sind in Abbildung 3 dargestellt. Zur Bewertung der Absorptionseigenschaften der gesättigten Salzlösungen, insb. zur Ermittlung der Zeitkonstante der Absorption, wurden die Sensorantworten mit einer e-Funktion gefittet, um die Zeitkonstante (T_{63}) zu bestimmen. Dabei wurde speziell die Zeitkonstante nach Erreichen des Maximalwerts und dem anschließenden Abfall untersucht. Die Zeitkonstanten für die untersuchten Schadstoffe und Salzlösungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Schadgase innerhalb weniger Minuten von den Salzlösungen absorbiert werden.

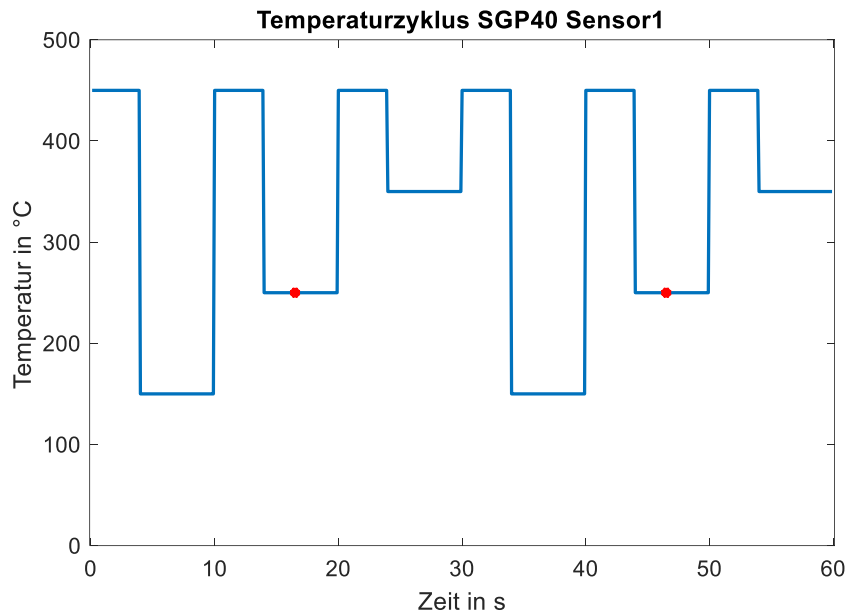


Abbildung 2: Temperaturzyklus des SGP40 mit einer Dauer von 30 s; gezeigt sind zwei Zyklen. Rot markiert: Quasistatischer Punkt bei der 16,5 s jedes Zyklus, entsprechend 250 °C.

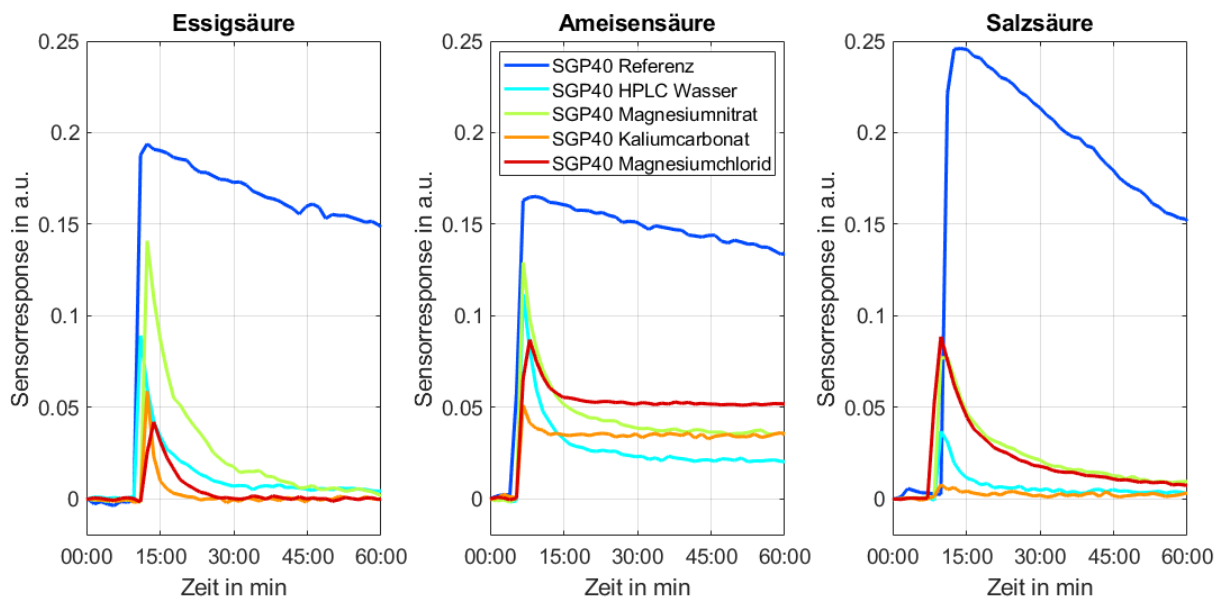


Abbildung 3: Verlauf der Sensorresponse nach Injektion der 3 verschiedenen Schadstoffe. Jede Farbe stellt eine Injektion in ein anderes Gefäß dar, wobei die blaue Kurve die Referenzmessung in einem leeren Gefäß abbildet.

Die Ergebnisse zeigen deutlich schneller abfallende Kurven für Gläser mit ges. Salzlösung oder HPLC-Wasser gegenüber der Referenz (leeres Glas ohne Salzlösung). Die weiteren im Projekt relevanten Schadstoffe konnten mit dem Aufbau aus Abb. 1 nicht untersucht werden, da die Reinsubstanzen nicht als Lösung bei Raumtemperatur vorliegen. Dennoch liefert der vorgestellte Aufbau ein erstes klares Indiz, dass gesättigte Salzlösungen Schadstoffe aus der Atmosphäre absorbieren.

Tabelle 1: Zusammenfassung der T_{63} -Werte aus Injektionsmessungen. Rot: fehlerhafter exponentieller Fit, da kaum eine Sensorreaktion gemessen werden konnte (vermutlich durch sehr schnelle Absorption).

	Referenz	HPLC Wasser	Magnesium-nitrat	Magnesium-chlorid	Kalium-carbonat
Essigsäure	60,69 min	6,79 min	8,97 min	4,04 min	1,84 min
Ameisensäure	118,50 min	4,64 min	5,90 min	3,16 min	2,45 min
Salzsäure	67,95 min	4,23 min	13,71 min	10,17 min	6,73 min

II.3.1.2 Dynamische Messungen in einem präparierten Glas

In dieser Arbeit wurde die Absorptionsfähigkeit gesättigter Salzlösungen gegenüber aller projektrelevanten Schadstoffen untersucht mit dem Ziel, deren Eignung zum Schutz empfindlicher Kulturgüter in Ausstellungsvitrinen zu bewerten (außer Salpetersäure, die nicht als Flaschengas lieferbar ist). In einer Messreihe wurden die drei gesättigten Salzlösungen (Kaliumcarbonat, Magnesiumnitrat und Magnesiumchlorid) sowie Squalan als Absorbens für unpolare Schadstoffe getestet.

Zur Untersuchung wurde ein Versuchsstand entwickelt, bei dem die zu prüfenden Salzlösungen jeweils in einem verschlossenen Glasbehälter mit definierter Luftfeuchtigkeit und kontinuierlich zugeführter Schadstoffkonzentration exponiert wurden (Abbildung 4). Die Schadstoffe wurden mittels einer Gasmischanlage (GMA) in definierter Konzentration und Zusammensetzung bereitgestellt. Die GMA ermöglichte eine präzise Kontrolle sowohl der Schadstoffanteile in der Deliqueszenzfeuchte der jeweiligen gesättigten Salzlösung, was für reproduzierbare Messbedingungen essenziell ist. Die aus der GMA erzeugte Gasatmosphäre wurde mit einem konstanten Volumenstrom durch den Headspace der Glasbehälter geleitet, wodurch die Salzlösung kontinuierlich mit Schadstoffen in Kontakt kam. Parallel dazu wurde mit einem Massenflussmesser (MFM) die Dichtigkeit des Systems überwacht.

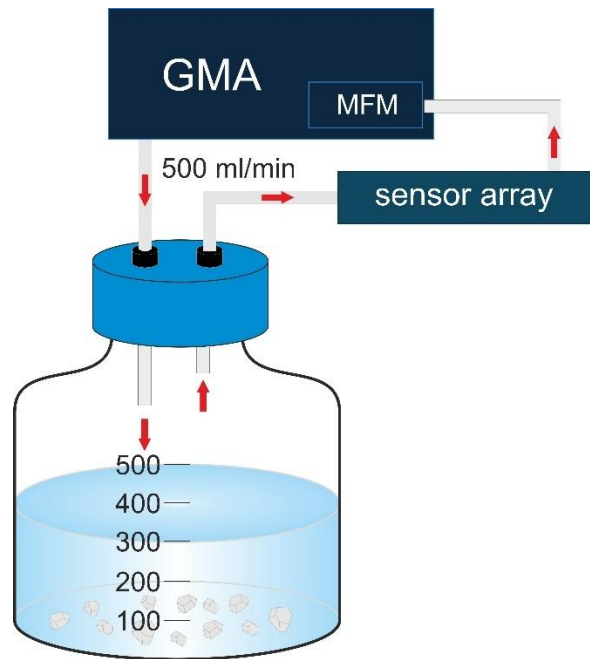


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Messaufbaus: Die Gasmischanlage (GMA) leitet das Schadgas mit vorgegebener Konzentration und einem definierten Volumenstrom durch eine 500 mL Duranflasche, die 300 mL einer gesättigten Salzlösung sowie etwa 200 mL Headspace enthält. Nach der Duranflasche analysiert das Sensorarray das Gasgemisch und der Volumenstrom wird über einen Massenflussmesser (MFM) überwacht.

Zur Analyse der Schadstoffkonzentrationen nach Interaktion mit dem Absorbens (Salzlösung, Squalan) kam ein Sensorarray zum Einsatz, das mit fünf verschiedenen Metalloxid-Halbleiter-Gassensoren (MOS-Sensoren) ausgestattet war:

- SGP40, Sensirion, Stäfa ZH, Schweiz – vier Sensorschichten
- ENS160, ScioSense, Eindhoven, Niederlande – vier Sensorschichten
- BME688, Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen, Deutschland
- ZMOD4410, Renesas, Tokio, Japan
- ZMOD4510, Renesas, Tokio, Japan

Diese Sensoren wurden ebenso im TCO betrieben, mit einem 144 s Zyklus (Abbildung 5).

Zusätzlich wurde mit einem SHT35, Sensirion, Stäfa ZH, Schweiz, jeweils Temperatur und Feuchte gemessen.

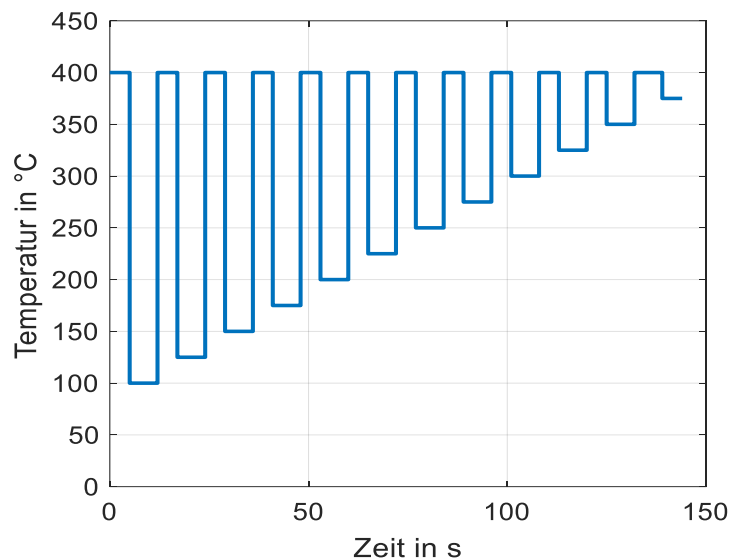


Abbildung 5: Temperaturzyklus der verwendeten MOS-Gassensoren.

Abbildung 6 zeigt das leitwertproportionale Signal eines solchen Zyklus für 600 ppb Ameisensäure, Essigsäure und Salzsäure. Die Form des Leitwertsignals ändert sich deutlich in Anwesenheit verschiedener Schadgase. Um die Formänderung zu erfassen wurde jeder Zyklus in 144 Ein-Sekunden-Intervalle unterteilt, aus denen Mittelwerte und Signalsteigungen als Merkmale extrahiert wurden. Die sich hier unterscheidenden Muster werden in eben diesen Steigungs- und Mittelwertsmerkmalen ausgewertet, um mit Hilfe von maschinellem Lernen ein Modell zu erstellen, dass eine Konzentrationsaussage für mehrere Gase möglich macht.

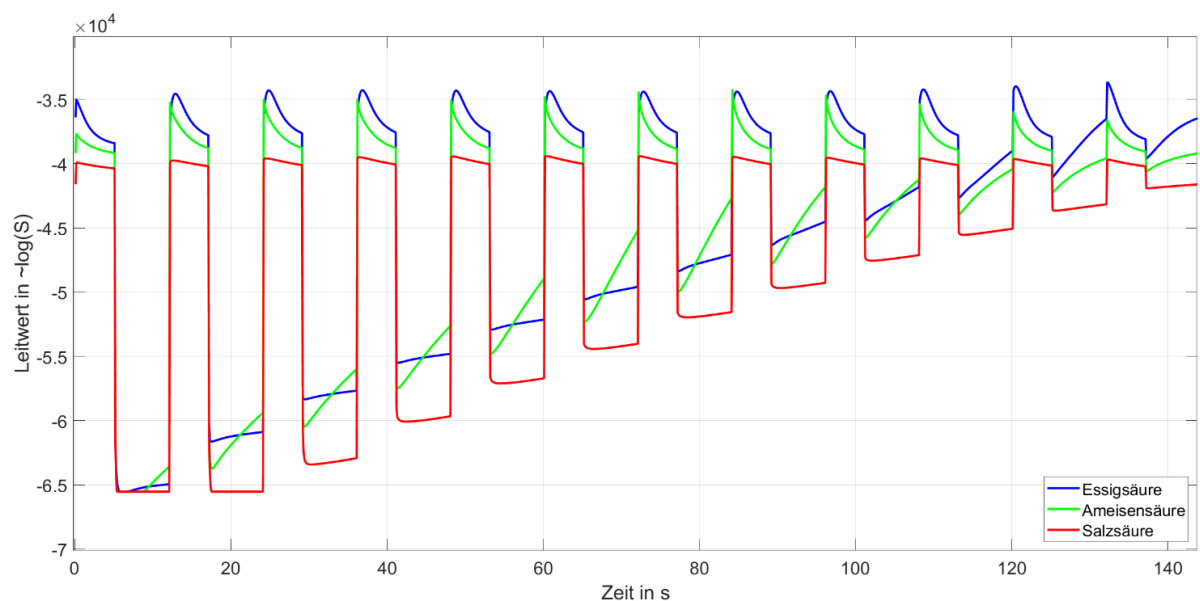


Abbildung 6: Dynamische Sensorreaktion des SGP40 Schicht 2 im Temperaturzyklus für jeweils 600 ppb Essigsäure, Ameisensäure und Salzsäure bei 43 % r.H..

So entstanden für jeden Zyklus insgesamt 3168 Merkmale (11 Sensorschichten mit jeweils 288 Merkmalen), die mithilfe einer Hauptkomponentenanalyse auf 50 Hauptkomponenten reduziert wurden. Anschließend erfolgte die Modellierung mittels Partial Least Squares Regression (PLSR), mit der aus den Sensorsignalen Konzentrationswerte abgeleitet werden konnten.

Zur Kalibrierung und Modellbildung diente eine Referenzmessung ohne Absorbens, bei der keine Absorption zu erwarten war. Die tatsächlich durch das Modell ausgegebene Konzentration im Vergleich zur eingestellten Sollkonzentration durch die GMA erlaubt Rückschlüsse auf die Absorptionseffizienz des untersuchten Absorbens (Abbildung 7).

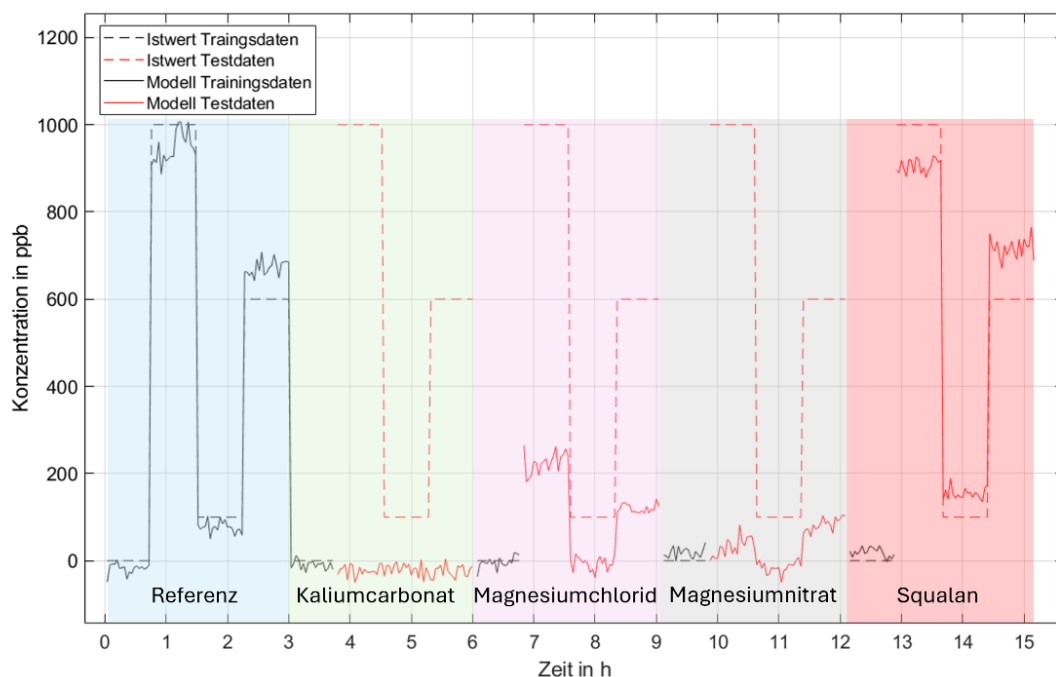


Abbildung 7: Gestrichelt schwarz/rot: Setpointkonzentrationen der Gasmischanlage. Schwarz: Modellausgabe für Ameisensäure der Trainingsdaten. Rot: Modellausgabe der Testdaten bei verschiedenen Ameisensäurekonzentrationen in Anwesenheit von gesättigten Salzlösungen.

In Abbildung 7 wird am Beispiel von Ameisensäure deutlich, dass die gesättigten Salzlösungen die Schadstoffe zuverlässig absorbieren. So folgt die Modellausgabe der Sensoren (schwarze durchgezogene Linie) für das Referenzglas den eingestellten Werten durch die GMA (schwarz gestrichelt). Für Kaliumcarbonat bleibt die Modellausgabe (rot durchgezogen) bei nahe Null, so dass davon auszugehen ist, dass die Salzlösung das Schadgas vollständig absorbiert. Für Squalan war im Beispiel keine Absorption zu erwarten, was die Messung auch widerspiegelt. Die Messergebnisse mit allen neun getesteten Schadstoffen sind in Tabelle 2 zusammengefasst, wobei ++ eine sehr gute Absorption beschreibt, und – auf keine Absorption hindeutet.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Absorptionsbeurteilung aller getesteten Absorbentien.

++ Schadstoffabsorption auf weniger als 30 % der angegebenen Konzentration

+ Schadstoffabsorption ist sichtbar

- Keine sichtbare Schadstoffabsorption

x Modellausgabe ist nicht eindeutig oder hardwarebedingter Messabbruch

Messreihe	Schadstoff	Kaliumcarbonat	Magnesiumnitrat	Magnesiumchlorid	Squalan
1	Schwefelwasserstoff	++	+	+	-
	Stickstoffdioxid	+	X	+	+
	Schwefeldioxid	++	+	+	X
2	Essigsäure	++	++	++	-
	Ameisensäure	++	++	++	-
	Salzsäure	X	X	X	X
3	Formaldehyd	++	+	++	-
	Acetaldehyd	++	++	++	X
	Carbonylsulfid	-	-	-	X

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere Kaliumcarbonat eine ausgeprägte Absorption für eine Vielzahl der getesteten Schadstoffe aufweist. Auch Magnesiumnitrat und Magnesiumchlorid zeigen eine erkennbare, wenn auch schwächere Absorptionswirkung. Im Gegensatz dazu konnte bei Squalan keine relevante Schadstoffaufnahme beobachtet werden, da die Löslichkeit der untersuchten Schadstoffe in Squalan sehr gering ist. Bei bestimmten Schadstoffen, etwa Salzsäure oder Schwefeldioxid, treten Reaktionsverläufe auf, die mit dem trainierten Sensor-Modell zu negativen oder nicht deterministischen Konzentrationsvorhersagen führt. Dies deutet auf mögliche Vorgänge hin, die nicht Teil der Modellbildung waren und somit von diesem auch nicht erfasst werden können. Damit ist die Absorption nicht grundlegend ausgeschlossen, aber mit dem hier verfolgten Aufbau nicht belegbar.

Besonders hervorzuheben ist, dass die Versuchsbedingungen gezielt kritisch gewählt wurden: Der Headspace der Duranflaschen wurde mindestens 120 min kontinuierlich mit der entsprechenden Konzentration des Schadstoffes bei einem Fluss von 500 mL/min Schadstoff gespült. In der praktischen Anwendung in einer Vitrine ist mit deutlich geringeren Konzentrationen und Emissionsraten der Exponate und damit wesentlich geringeren zu absorbierenden Stoffmengen zu rechnen, weshalb selbst eine unter Laborbedingungen als gering erscheinende Absorption in der Realität einen substanziellen Beitrag zur Luftreinigung leisten kann.

Während die statischen Messungen im präparierten Glas einen schnellen Kurztest erlauben, sind die Ergebnisse aus der dynamischen Messreihe sehr aussagekräftig. Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen, dass gesättigte Salzlösungen – insbesondere Kalium-

carbonat – ein vielversprechender Ansatz zur kombinierten Klimatisierung und Schadstoffreduktion in musealen Ausstellungsvitrinen sind. Die eingesetzte Methodik mit temperaturzyklisch betriebenen MOS-Gassensoren stellt darüber hinaus eine leistungsfähige und praxisnahe Alternative zu aufwändigen analytischen Methoden wie der Gaschromatographie-Massenspektrometrie dar, die zudem zeitaufgelöste Informationen liefert. Die Messungen zeigen aber auch Potential für weitere Forschung zur vertiefenden Analyse möglicher Reaktionsprodukte sowie der Langzeitstabilität der Absorptionsleistung, um so die Eignung dieser Systeme zur nachhaltigen Konservierung empfindlicher Kulturgüter noch umfassender zu bewerten.

In engem Austausch mit dem DBU-Projekt Az. 37734/01 “Dosis und Auswirkung anthropogener Schadstoffe in Vitrinen (DoAaSch)” wurde dort Kaliumcarbonat-Lösung in die zu testenden Absorptionsmittel aufgenommen. Deren GC/MS-Messungen mit Essigsäure bestätigten, dass Kaliumcarbonat-Lösung in ähnlichem Umfang absorbiert wie die getesteten Aktivkohlen.

II.3.1.3 Praxistest zur Schadstoffabsorption in einer Vitrine

In einem weiteren Versuchsaufbau wurden dem Projekt vier baugleiche Vitrinen der Fa. Hahn mit den Ausmaßen 0,8 m x 0,8 m x 2,0 m vom Archäologischen Landesmuseum Brandenburg zur Verfügung gestellt. Diese Vitrinen wurden mit Temperatur- und Feuchtesensoren sowie mit zwei MOS-Gassensoren (SGP 40) auf unterschiedlicher Höhe, einem selektiven Formaldehydsensor (SFA30, Sensirion, Stäfa ZH, Schweiz) und einem photoakustischen CO₂-Sensor (SCD41, Sensirion, Stäfa ZH, Schweiz) ausgestattet. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 7 dargestellt.

In einem ersten Test wurden diese Vitrinen auf etwa 3500 ppm CO₂-Konzentration gebracht, indem ein Druckbehälter mit CO₂ gefüllt wurde und dann in die Vitrine entlassen wurde. Der Konzentrationsabbau durch Undichtigkeiten wird mit dem CO₂-Sensor SCD 41 verfolgt. Trotz Baugleichheit ist die Dichtigkeit der Vitrinen nicht identisch. In drei von diesen Vitrinen wurde jeweils Behälter mit einer der ges. Salzlösungen (Kaliumcarbonat, Magnesiumchlorid bzw. Magnesiumnitrat) bestückt und eine Vitrine als Referenz leergelassen.

Das Sensorsystem für die Kaliumcarbonat bestückte Vitrine ist leider ausgefallen und wird daher nicht aufgeführt.

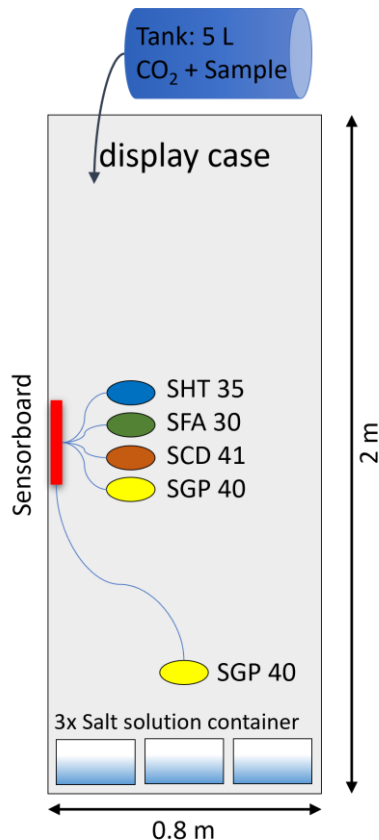


Abbildung 8: Schematischer Aufbau für die Untersuchung der Absorption von Schadstoffen in Vitrinen.

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Messreihe. Die undichteste Vitrine (dunkelrote CO_2 -Kurve in Abbildung 9) wurde nach der CO_2 -Messung als Referenzvitrine verwendet. Grund hierfür ist, dass die Absorptionskurven zwischen den Vitrinen verglichen werden. Wenn eine der Vitrinen, die mit ges. Salzlösung bestückt sind, eine schnellere Absorption als die undichtere Referenzvitrine zeigt, ist die Absorption des Schadstoffes durch die Salzlösung deutlich glaubwürdiger.

Alle Vitrinen wurden im nächsten Test gleich mit einer Mischung von Formaldehyd (Vitrine auf 400 ppb) und CO_2 (Vitrine auf 3500 ppm) geflutet. Da CO_2 praktisch nicht mit den gesättigten Salzlösungen interagiert, konnte so sichergestellt werden, dass die Undichtigkeit nicht der treibende Faktor der Konzentrationsreduktion ist. Der SFA30 ist eine selektive elektrochemische Zelle zum Messen von Formaldehyd. In der Abfallkurve ist zu sehen, dass Magnesiumnitrat und Magnesiumchlorid als ges. Salzlösungen das Schadgas bedeutend schneller absorbieren als die undichtere Referenzvitrine. Die Vitrine mit ges. Magnesiumchloridlösung (blaue Kurve) zeigt zu Beginn einen schnelleren Abfall des freigesetzten Formaldehyds, während die Vitrine mit ges. Magnesiumnitratlösung das Formaldehyd nachhaltiger absorbiert. Die Halbwertszeit für die Vitrinen mit ges. Salzlösung liegt unter 3 Stunden, während die Referenzvitrine eine Halbwertszeit von etwa 6 Stunden aufweist.

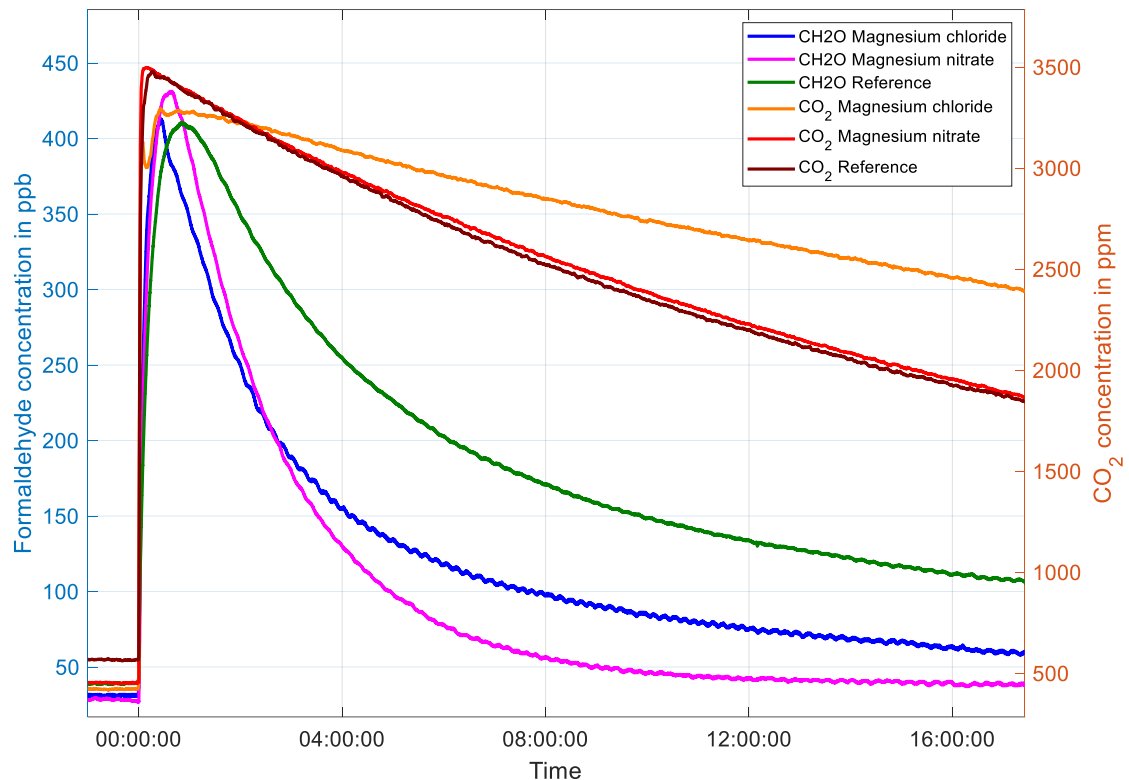


Abbildung 9: Stunden nach CO₂ und Formaldehyd-Freisetzung in einer Referenz-, einer mit Magnesiumnitrat- und einer mit Magnesiumchlorid-bestückten Vitrine. CO₂ Messungen mittels SCD41 und Formaldehydmessungen mittels SFA30.

Die Messreihe zeigt hier in einem sehr anwendungsnahen Szenario beispielhaft die Absorptionsfähigkeit für Formaldehyd. In der dynamischen Messung haben beide ges. Salzlösungen eine Absorption von Formaldehyd demonstriert, auch wenn hier die Absorption mit ges. Magnesiumchloridlösung effektiver war.

Weitere Tests beinhalteten:

- Verlauf der Luftfeuchtigkeit über die Höhe der Vitrine
- den Einfluss von Einlegeböden auf die Klimatisierung
- Bestimmung der Halbwertszeit zur konstanten Luftfeuchteinstellung

Da diese Ergebnisse nur exemplarisch für einen Vitrinentyp sind, wurden sie nicht weiter vertieft. Andere Ansätze, die nicht Teil der ursprünglichen Projektidee waren, zeigten sich gewinnbringender (siehe III.3.1.4).

II.3.1.4 Weitere Untersuchungen und Ergebnisse Im Rahmen des Projekts

Vitrinen in verschiedenen Museen von verschiedenen Herstellern sind unterschiedlich gut für die Anwendung geeignet. Dies zeigen Tests mit den Salzlösungen im Feld (siehe Praktische Anwendungserprobung). Für den Anwender ist es zunächst nicht offensichtlich, ob eine passive Klimatisierung in der vorliegenden Vitrine möglich ist und welche Menge ges. Salzlösung es benötigt. Aus diesem Grund wurden für ein paar vorliegende Vitrinendesigns die Diffusion durch die Verbindung des Technikfachs (der Raum, in dem die ges. Salzlösung untergebracht wird) zum Ausstellraum simuliert. Dies wurde am Beispiel der Diffusion von Wasser gemacht. Damit die Salzlösung eine konstante rel. Luftfeuchtigkeit entsprechend ihrer Deliqueszenzfeuchte im Ausstellungsraum herstellen kann, müssen beide Räume so gekoppelt sein, dass dies schneller geht, als Feuchte durch Undichtigkeiten in oder aus der Vitrine dringt. Abbildung 10 rechts zeigt diese Simulationsgeometrie mit einem Schlitz, wie er typisch für die Anwendung ist. In diesem Beispiel wurde die Luftfeuchtigkeit im Ausstellungsraum zum Start auf 23 % gesetzt. In diesem Anwendungsbeispiel ist ges. Magnesiumnitrat mit 53 % DRH auf einer deutlich höheren Luftfeuchte und versucht den Ausstellraum auf diese Konzentration zu heben. Abbildung 11 zeigt die Luftfeuchteverteilung nach 1/3/5 Tagen. An Tag 5 ist der gesamte Raum auf einer Luftfeuchtigkeit und damit die Klimatisierung auf einem stabilen Niveau. Eine Vitrine mit einer Dichtigkeit von bspw. 0,1 (ein kompletter Luftaustausch alle 10 Tage) würde somit durch die ges. Salzlösung klimatisiert werden können, da der Luftaustausch durch die Salzlösung schneller arbeitet als die Undichtigkeit.

Der vorgestellte Zusammenhang ist logisch, aber bei weitem nicht intuitiv oder offensichtlich. Es gibt eine Vielzahl von Vitrinen, deren Design, insbesondere bezogen auf die Dichtigkeit und Gasdurchlässigkeit zwischen Präsentationsraum und Technikfach, eine Klimatisierung durch Salzlösungen unmöglich machen.

Bei vorgegebener Luftaustauschrate kann mittels eines Excel-Tools zur Finite-Element-Simulation ermittelt werden, ob eine Vitrinenkonstruktion überhaupt für die Verwendung geeignet ist. Aus Vitrinenvolumen, der ges. Salzlösungsmenge und der äußeren Luftfeuchtigkeit lässt sich ein empfohlenes Wartungsintervall ableiten.

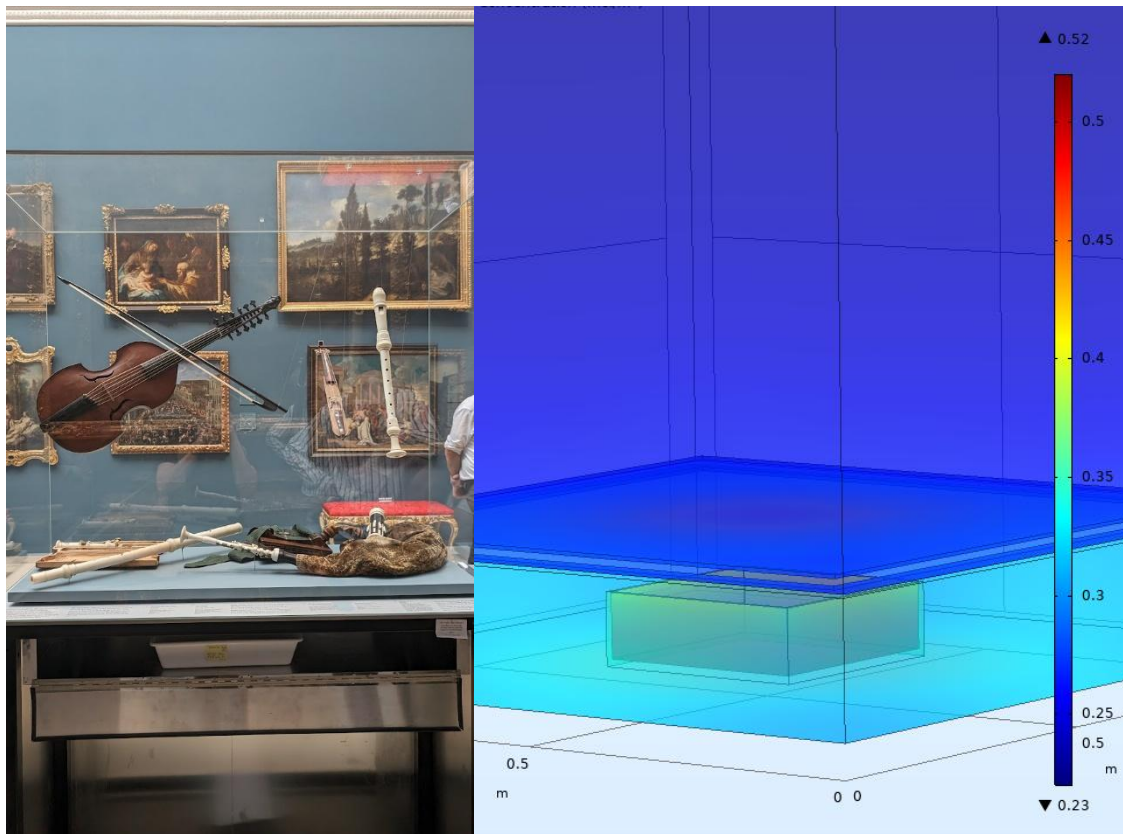


Abbildung 10: Links eine Vitrine mit der Klimatisierungskammer unter dem Ausstellraum des Kulturguts. Rechts Simulation der Kopplung von Klimatisierungsraum zum Ausstellraum. Der Schlitz, der die beiden Räume verbindet, ist entsprechend zur vorliegenden Vitrine mit verschiedenen Öffnungen simuliert worden. Die Farbskala zeigt den Luftfeuchtewert (25 % RH = 0.25).

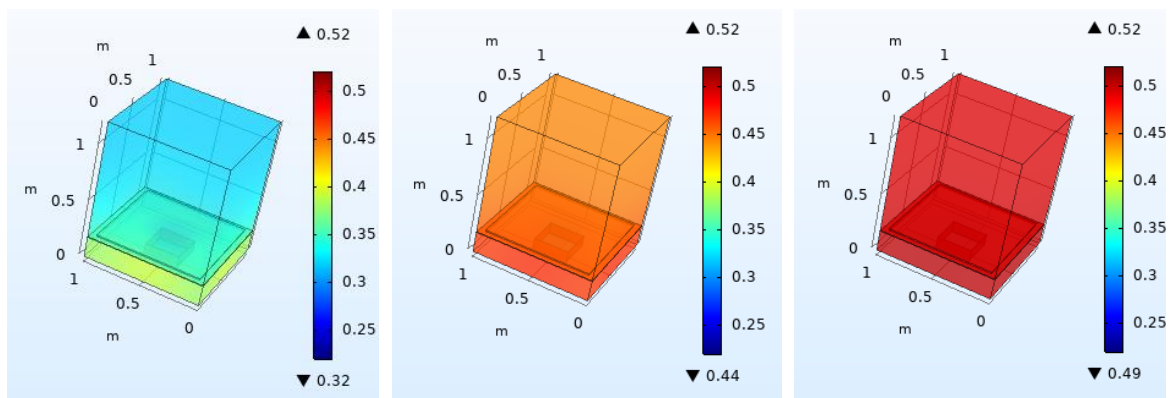


Abbildung 11: Ergebnis der Simulation für eine schematische Vitrine von links nach rechts in 1/3/5 Tagen. Über den Farbverlauf kann die relative Luftfeuchte ermittelt werden (25 % RH = 0.25).

II.3.2 Praktische Anwendungserprobung

II.3.2.1 Versuche in Coburg

Seit Oktober 2023 laufen verschiedene Testreihen, die die praktische Anwendung gesättigter Salzlösungen – hier Kaliumcarbonat (K_2CO_3 , DRH = 43,2 % bei 15-30 °C) und Magnesiumnitrat-Hexahydrat ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, DRH = 54,4 % bei 20 °C, 51,4 % bei 30 °C) – in der Museumspraxis evaluieren. In den Räumen der Kunstsammlungen der Veste Coburg sind neben der Bestückung von insgesamt 14 Vitrinen in den Ausstellungsräumen (I-III) mit Publikumsverkehr zwei weitere Vitrinen aus dem Depotbereich (IV) mit stark jahreszeitabhängigen Schwankungen des Raumklimas mit Salzlösungen ausgestattet.

Parallel zu diesen Langzeitversuche (min. 13 Monate) wurden kleinere Versuchsreihen und Analysen in den Labor-/Werkstatträumen der Veste Coburg (A-C) sowie am Institut für Anorganische und Angewandte Chemie (Arbeitsgruppe Prof. M. Steiger: Schädigungsmechanismen von Materialien in historischen und modernen Baustoffen, in Wandmalereien sowie in anderen Kunstgegenständen) an der Universität Hamburg (D-F) durchgeführt.

Dokumentation & Voruntersuchung

Essenziell für die Dokumentation und die Reproduzierbarkeit der erfassten Daten war die vorherige Ausarbeitung eines systematischen Dokumentationssystems (MS-Excel-basiert). Alle Vitrinen und Hauben, Datenlogger, Behälter und Räume wurden mit einer individuellen Identitätsnummer (ID) versehen (bei den Datenloggern von HOBO® und MostraLog® bereits von Herstellern vorgegeben) und in einer Excel-Tabelle dokumentiert. Diese ID-Nummern wurden ferner für die Benennung der Versuchsreihen verwendet. Beispielsweise beinhaltet der Dateiname *KuSa_CEB.I,3_NOK_46_K2CO3_21543816* folgende Informationen:

KuSa = Kunstsammlungen (der Veste Coburg); CEB = Carl-Eduard Bau (Gebäudeteil der Veste Coburg); .I,3 = 1. OG, 3.Raum; NOK = Nischenvitrine Oberlicht Klimafach; 46 = Vitrinennummer; K2CO3 = getestete Salzlösung (Kaliumcarbonat); 21543816 = ID des Datenloggers (HOBO® MX1101)

Weitere Abkürzungen von Dateinamen sind in Tabelle 3 aufgeführt:

Tabelle 3: Weitere Abkürzungen von Dateinamen

Kürzel	Beschreibung
KuSa	Kunstsammlungen der Veste Coburg
FB.III,1-10	Fürstenbau, 3. OG, Raum 1-10
CEB.I,0-6	Carl-Eduard-Bau, 1. OG., Raum 0-6
KEM.II,0-5	Steinerne Kemenate, 2. OG, Raum 0-5
HH.III,3	Hohes Haus, 3. OG, Raum 3
HB.I,1	Herzoginbau (Historische Jagdwaffen), 1. OG, Raum 1
H	Haube (Glas)
HS	Haube (Glas) mit Sockel (MDF, lackiert)
Hi	Historische Vitrine
NOK	Nischenvitrine (Einbauvitrine), Oberbeleuchtung, Klimafach
FOK	Freistehende Vitrine, Oberbeleuchtung, Klimafach
KOK	(Multidisplay-)Kompositivitrine, Oberbeleuchtung, Klimafach
FO	Freistehende Vitrine, Oberbeleuchtung, kein Klimafach
FOKGI	Freistehende Vitrine, Oberbeleuchtung, kein Klimafach, „krankes“ Glas

Nach diesem System wurde für jede durchgeführte Versuchsreihe eine entsprechende ID bzw. Dateiname angelegt.

Die ebenfalls nummerierten Behälter wurden jeweils nach Befüllen mit den ges. Salzlösungen gewogen. Dies ermöglicht nach Beendigung der Testphase die Ermittlung von Flüssigkeits-/Gewichtsverlust (Umgebung zu trocken) oder Flüssigkeits-/Gewichtszunahme (Umgebung zu feucht). Diese Auswertung steht noch aus.



Abbildung 12: Überprüfung der Abweichungen (Messungenauigkeit) der verwendeten Datenlogger.

Mit einer GKCL (DRH 43 %) konditionierte Exsikkatoren wurden mit allen für Lang- und Kurzzeitmessungen verwendeten Datenlogger bestückt (Abb. 12). Abweichungen von der zu erzielenden RH von 43 % wurden für jeden Logger dokumentiert. Bei allen Daten-

loggern muss technisch bedingt (Tabelle 4) mit einer gewissen Abweichung von den Realbedingungen gerechnet werden (Abweichung von der Soll-RH von 43 % sind jeweils in der Tabelle 5 dokumentiert). Bei 6 von 25 Dataloggern wurde ein RH-Wert von $43 \pm 0,5$ % festgestellt. Alle übrigen (19) zeigten eine Abweichung von ca. $+ 0,3-3,5$ % gemessen. Diese Abweichung ist bei der Interpretation der Messergebnisse einzubeziehen. Abweichungen der Absolutwerte verschiedener Messgeräte dürfen daher nicht überinterpretiert werden, relative Änderungen im Zeitverlauf werden aber gut erfasst.

Tabelle 4: Messparameter der verwendeten Datenlogger.

Gerät	Onset® HOBO® MX1101 (FCC ID: WXF-MX1101)	MostraLog® – The Museum Logger
Software	HOBOnnect®, Version 2.3.0, ©2025 Onset Computer Corporation	Mostralog Software (Open Source)
Kalibrierung	Neuankauf 2023, (werkseitiges Messprotokoll, eigene Kalibrierung)	2023
Messungenauigkeit (laut Hersteller)	$\pm 2,5$ %	$\pm 2,0$ %
Messintervall	5 Minuten	5 Minuten

Tabelle 5: Min. erreichter RH-Wert im Exsikkator.

Erreichter RH-Wert (%) in Exsikkator mit GKCL	Datenlogger ID
44,5	21540906
43,9	21540915
45,0	21543816
43,8	21543817
43,5	21543830
46,4	21543832
44,0	21543833
44,6	21543834
44,2	21543835
44,0	21543836
45,9	21543837
45,1	21543838
44,7	21543847
43,3	21543849
45,0	21543850
45,2	21543851
45,0	21543856
44,9	21543860
46,5	21543861
44,9	21632780
45,2	21632781
45,5	21632809
45,6	21632813
44,9	21632934
44,0	21632941

Langzeitversuche: gesättigte Kaliumcarbonat - (GKCL) & Magnesiumnitrat-hexahydrat-Lösung (GMNL)

I. Carl-Eduard-Bau/Historische Glassammlung – GKCL

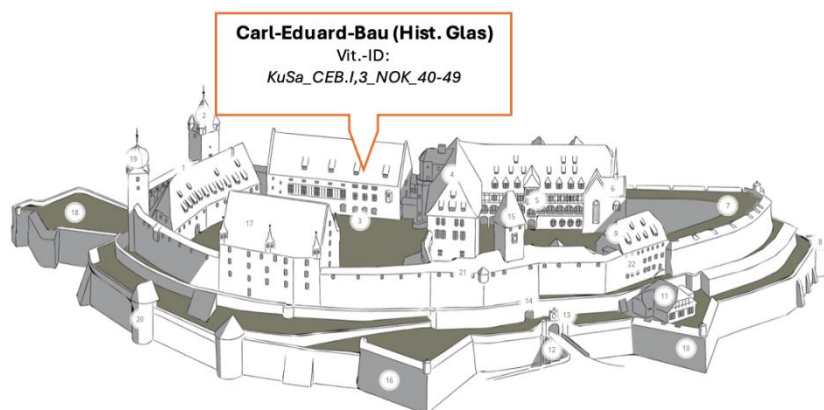


Abbildung 13: Einbauvitrine (2009) der hist. Glassammlung (NOK_40-49) mit separat zugänglichem Klimafach und Position (Carl-Eduard-Bau) innerhalb der Veste Coburg.

In der „Historischen Glassammlung“ sind 7 baugleiche Vitrinen (Baujahr 2009er, Abb. 13) mit GKCL in zwei unterschiedlichen Mengen (10 kg und 5 kg K_2CO_3) bestückt, aufgeteilt auf 9 oder 5 Behältnisse. Hier soll das Potential von Mengen und Oberflächen pro definiertem Vitrinenvolumen verglichen werden, d. h. welche Menge ges. Salzlösung ist für ein spezifisches Volumen notwendig und welche Rolle spielt die Anzahl und Verteilung dieser. Zusätzlich sind drei Referenzvitrinen eingerichtet, wobei zwei mit der vorherigen Klimatisierungsmethode (Magnesiumchlorid-Hexahydrat mit 33 % RH) und eine lediglich mit Silikagel (PROSORB® ca. 33 % RH) ausgestattet ist. Die Klimadaten werden jeweils mit zwei Datenloggern permanent mit einem Intervall von 5 Minuten auf unterschiedlichen Ebenen (Vitrinenboden und oberes Exponatboard) aufgezeichnet, um mögliche Gradienten der konditionierten Luft bestimmen zu können. Diese Vitrinen sind vom

gleichen Bautyp und ermöglichen somit vergleichende Messungen unterschiedlicher Mengen und Verteilung der gleichen Salzlösung. In jeder Vitrine wurden jeweils zwei Onset® HOBO® MX1101 auf unterschiedlichen Seiten und Ebenen platziert, um mögliche RH- und T-Gradienten messen zu können.

II. *Steinerne Kemenate/Altdeutsche Sammlung – GMNL*

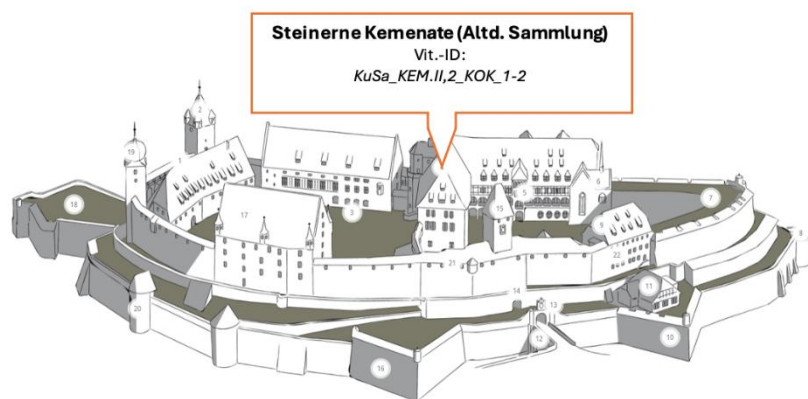


Abbildung 14: Multidisplayvitrine (KOK_1-2) in der Altdeutschen Sammlung mit überwiegend Kompositobjekten, separat zugänglichen Klimafächern. Position (Steinerne Kemenate) innerhalb der Veste Coburg.

Weitere vier Vitrinen überwiegend mit Kompositobjekten aus Metall und organischen Materialien („Altdeutsche Sammlung“ sowie „Historische Jagdwaffen“, Abb. 14) wurden mit GMNL (53 %) beladen. Innerhalb dieser Vitrinen wird neben der RH die Verteilung der konditionierten Luft beobachtet. Der Fokus bei der Vitrine in der „Altdeutschen Sammlung“ liegt neben dem generellen Potential und Verhalten der ges. Magnesiumnitratlösung auf der Vitrinenkonstruktion. Hierbei handelt es sich um eine neuartige (Baujahr 2014) Einbauvitrine/Multikammervitrine mit zwei separaten Exponat- und daran angeschlossenen Klimafächern. Während der untere Exponatraum die

klassische Anordnung mit darunter angeordnetem Klimaraum aufweist, befinden sich beim oberen Exponatraum zwei getrennte, sehr große Klimafächer jeweils links und rechts unterhalb des Exponatraums. Ist hier Luftaustausch, respektive eine adäquate Konditionierung möglich?

III. *Herzoginbau/Historische Jagdwaffen – GMNL*

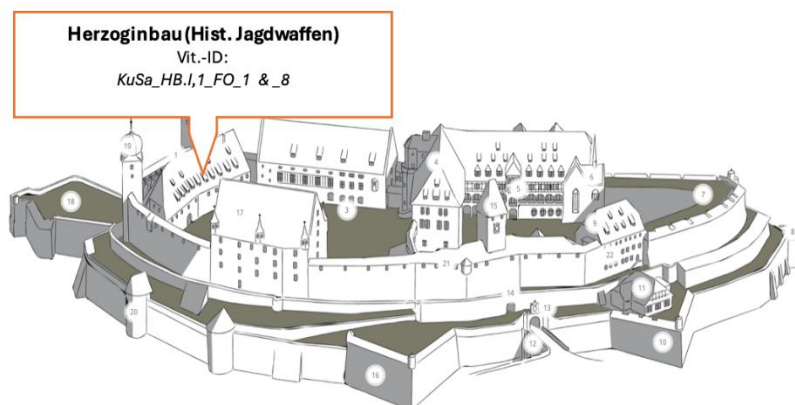


Abbildung 15: Freistehende Vitrienen (1960er Jahre) in der Sammlung der historischen Jagdwaffen. Die GSL befinden sich unterhalb der grauen Sockel. Position (Herzoginbau) innerhalb der Veste Coburg.

Zwei Vitrienen (Baujahr 1960er Jahre, Abb. 15) mit historischen Jagdwaffen aus einem Komposit aus u.a. Metall, Holz, Elfenbein, Perlmutter, wurden mit GMNL bestückt. Die 5 bzw. 7 Behälter mit ges. Salzlösung befinden sich jeweils unter einem extra angefertigten Sockel aus MDF, welcher auf der linken bzw. der rechten Seite der jeweiligen Vitrine positioniert ist. Durch ca. 1,5 cm hohe Standfüße bilden rundum laufende Schattenfugen, durch welche die konditionierte Luft in den Vitrienenraum diffundieren kann. Hier wird das Prinzip einer Vitrine verfolgt, die durch Um- bzw. Nachrüsten passiv mit ges. Salzlösungen klimatisiert werden kann.

IV. Hohes Haus/Depot – GKCL

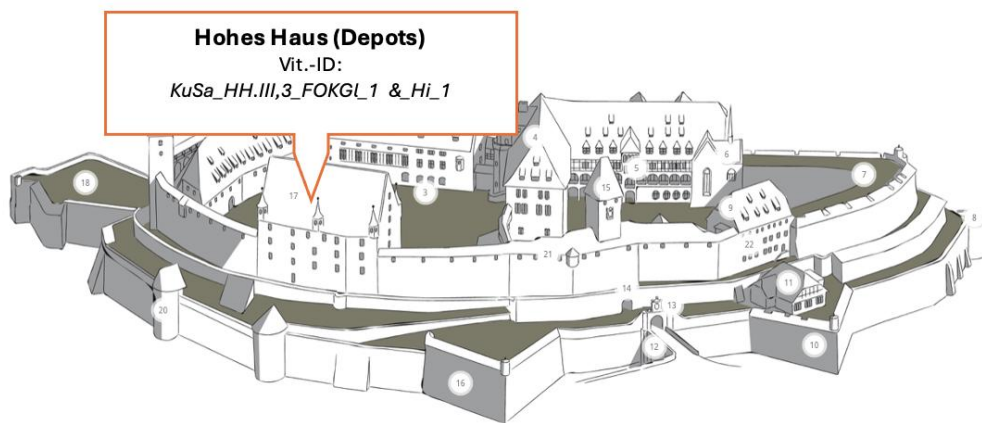


Abbildung 16: Freistehende Vitrine (1960er Jahre) und historische Vitrine (1880-1920) mit offen Behältern mit GSL im Depotbereich der Veste Coburg.

Zwei weitere Vitrinen unterschiedlichen Typs (Baujahr 1960er Jahre und historisch, ca. 1880-1920, Abb. 16), bestückt mit GKCL, befinden sich in den Depoträumen der Veste Coburg. Die dort stark fluktuierenden Klimawerte (RH, T) ermöglichen die Beobachtung der Klimadaten bzw. des Potentials der Salzlösungen bei mäßig dichten Vitrinen innerhalb extremerer Umgebungsbedingungen.

Ergebnisse und Interpretation der Langzeitversuche: Kaliumcarbonat & Magnesiumnitrat-Hexahydrat

Die Diagramme sowie weiterführende Klimadaten zu den im Folgenden besprochenen Jahres-Klimakurven finden sich im Anhang (V.1 & V.2).

I. Historische Glassammlung – GKCL

Tabelle 6: Übersicht der Parameter und eine Auswahl von Messdaten der Testreihe KuSa_CEB.I,3_NOK_40-49. Position der Datenlogger innerhalb des Exponatraums: L=links, R=rechts, O=oben, U=unten, F=Fensterseite, M=Mitte.

Vitrinen-Nr.	Vitrinen-Typ	Volumen (L)	Salz	Menge Salz (kg)	Menge H ₂ O (kg)	Anzahl Behälter	ID-Datenlogger (oben, unten)	Ø RH [%]	Differenz zu Soll RH [%]
KuSa_CEB.I,3_NOK_40	Einbau- vitrine Böhm Vitrinen GmbH / 2009	1587	K ₂ CO ₃	5	2,5	5	21632781_LOF	44,4	1,4
							21543861_RU	44,0	1,0
KuSa_CEB.I,3_NOK_41			K ₂ CO ₃	5	2,5	5	21632780_ROF	45,0	2,0
							21632934_LU	45,1	2,2
KuSa_CEB.I,3_NOK_42			ProSORB (RH 35 %)	4	-	2	21540906_MO	41,6	3,6
KuSa_CEB.I,3_NOK_43			MgCl ₂ * 6 H ₂ O	6	8	10	21543850_MO	37,2	4,2
KuSa_CEB.I,3_NOK_44			K ₂ CO ₃	5	2,5	9	21632941_RO	50,0	6,9
							21543847_LUF	46,4	3,4
KuSa_CEB.I,3_NOK_45			K ₂ CO ₃	5	2,5	9	21543860_ROF	47,4	4,4
							21543849_LU	43,7	0,7
KuSa_CEB.I,3_NOK_46			K ₂ CO ₃	10	4,5	9	21543837_RO	46,2	3,2
							21543816_LUF	45,5	2,5
KuSa_CEB.I,3_NOK_47			MgCl ₂ * 6 H ₂ O	12	1,6	20	21543856_MO	38,4	5,4
KuSa_CEB.I,3_NOK_48			K ₂ CO ₃	10	4,5	10	21543817_RO	43,6	0,6
							21540915_LUF	45,8	2,9
KuSa_CEB.I,3_NOK_49			K ₂ CO ₃	10	4,5	10	21543836_ROF	44,3	1,3
							21543851_LU	45,9	2,9
KuSa_CEB.I,3_NOK_Raum	Raum	-	-	-	-	-	21543834_O	44,6	-

Insgesamt liefern die über ein Jahr gesammelten Daten von 10 Einbauvitrinen der historischen Glassammlung der Veste Coburg Ergebnisse, die äußerst positiv bewertet werden können (Tabelle 6, Anhang V.1.1, V.2). Die durchschnittliche RH des Raumes betrug 44,6 % mit tageszeitlichen Schwankungen (August 2024) von ca. RH 10 %. Die angestrebte RH von ca. 43 % wurde nicht erreicht, jedoch beträgt die maximale Abweichung (gemessen am Jahresmittelwert) max. 4,1 % (ein Ausreißer 6,9 % ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht zu erklären). Hierbei sollten die Abweichungen der Datenlogger von + 0,3-3,5 % miteinbezogen werden. Die zwei Referenzvitrinen mit der vorherigen GMCL-Klimatisierung zeigen durchschnittlich deutlich höhere Abweichungen von der Soll-RH von 33 %. Ferner zeigt die mit PROSORB® (33 % vorkonditioniert) bestückte Vitrine einen kontinuierlichen Anstieg von RH 33 % auf ca. 45 % im Jahresverlauf. Die mit GKCL konditionierten Vitrinen Nr. 40, 41, 44, 45, 46, 48 und 49 hingegen weisen einen eher konstanten RH-Wert mit einer geringen Schwankung im Jahresverlauf sowie innerhalb von 24 h (August 2024) auf.

Grundsätzlich sind im oberen Bereich des Exponatraums höhere RH-Werte festzustellen als im Klimafach-nahen unteren Bereich. Dies bestätigt sich in 5/7 Fällen; die RH der näher am Fenster bzw. zur Außenmauer gelegene Seite der Vitrine scheint dadurch nicht beeinflusst zu sein. Hingegen sind im oberen Bereich (Datenlogger auf oberem Tablar platziert) grundsätzlich höhere Schwankungen innerhalb 24 h gemessen worden, als im unteren Bereich des Exponatraums (Datenlogger auf Vitrinenboden platziert). Diese

stärkere Fluktuation ebenso wie der RH-Gradient kann u. a. auf den größeren Abstand zum Klimafach, also einen größeren Einfluss der Außenluft als auch auf das Wärme-emittierende Beleuchtungssystem und eine nicht ausreichende Verteilung der konditionierten Luft zurückgeführt werden. Ebenso zeigt sich eine Tendenz zu etwas höheren täglichen Schwankungen in wärmeren und feuchteren Jahreszeiten (hier Mai bis September).

Einen geringen Unterschied des Konditionierungspotenzials nach Halbierung der Menge an ges. Salzlösung (Vitr.-Nr. 46, 48, 49: 10 kg K_2CO_3 + 4,5 L H_2O vs. Vitr.-Nr. 44, 45: 5 kg K_2CO_3 + 2,5 L H_2O) bei gleichbleibender Anzahl an Behältnissen (9) bzw. reaktiver Oberfläche scheint es zu geben. Alle Vitrinen mit der gleichen Anzahl an Behältern, aber geringer Lösungsmenge zeigen eine minimal stärkere Differenz zu der Soll-RH von 43 %. Unerwarteterweise weisen die Vitrinen mit halbierte Lösungsmenge Vitr.-Nr. 40, 41: 5 kg K_2CO_3 + 2,5 L H_2O) und halbierte Anzahl an Behältnissen (5) vergleichsweise geringere Abweichungen von der Soll-RH auf. Diese Beobachtung kann derzeit noch nicht begründet werden.

II. Altdeutsche Sammlung – GMNL

Tabelle 7: Übersicht der Parameter und eine Auswahl von Messdaten der Testreihe KuSa_KEM.II,2_KOK_1-2.

Vitrinen-Nr.	Vitrinen-Typ	Volumen (L)	Salz	Menge Salz (kg)	Menge H_2O (kg)	Anzahl Behälter	ID-Datalogger	Ø RH [%] Ø T [°C]	Differenz zu Soll RH
KuSa_KEM.II,2_KOK_1	Einbauvitrine	672,7 (2x 171,5 Klimafach)	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	6,25	2	10	21543838	55,4 19,3	1,4
KuSa_KEM.II,2_KOK_2	Böhm Vitrinen GmbH/2014	416,5		3,1	1	5	21632813	60,0 18,5	6,0
Raum	-	-	-	-	-	-	KEM.II,2 Altdt. Slg. großer Raum_40381346	53,3 18,94	-

Die zwei übereinanderliegenden Exponaträume der Multidisplay-Vitrine in der Altdeutschen Sammlung zeigen stark voneinander abweichende Durchschnittswerte der RH (Tabelle 7, Anhang V.1.2, V.2). Beide zeigen allerdings erstaunlich stabile und temperaturunabhängige RH-Werte; die täglichen Schwankungen der RH sind < 1 % (im August 2024). Während der obere Exponatraum eine konstante RH von durchschnittlich ca. 55 % über den gesamten Jahresverlauf aufweist, liegt die RH im unteren und kleineren Exponatraum fast durchgehend über 60 %. Für das geringere Volumen wurde entsprechend auch weniger GMNL verwendet (siehe Tabelle 7). Ein bedeutender Unterschied liegt hier in der Größe und Position der Klimafächer.

Hier muss noch die Dichtigkeit beider Vitrinenteile überprüft werden, denn auch dies kann zu einer Verschiebung der RH führen. Im August steigt die Temperatur innerhalb der Exponaträume auf ca. 25 °C, die Veränderung der RH ist dagegen nicht signifikant.

Generell ist bei GMNL qua DRH mit einer etwas stärkeren Temperaturabhängigkeit, respektive größeren Schwankungen im Jahres- und Tagesverlauf, zu rechnen.

III. Historische Jagdwaffen – GMNL

Tabelle 8: Übersicht der Parameter und eine Auswahl von Messdaten der Testreihe KuSa_HB.I,1_FO1, _8.

Vitrinen-Nr.	Vitrinen-Typ	Volumen (L)	Salz	Menge Salz (kg)	Menge H ₂ O (kg)	Anzahl Behälter	ID-Datalogger (oben, unten)	Ø RH [%] Ø T [°C]	Differenz zu Soll RH
KuSa_HB.I,1_FO_1	Standvitrine	1096,2	Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	4,4	1,75	7	21543830	50,1 19,6	-3,9
							21543833	51,8 18,8	-2,2
KuSa_HB.I,1_FO_8	Hahn Vitrinenbau/1960er			3,1	1,75	5	21543835	52,6 17,9	-1,43
							21632809	52,6 19,5	-1,44
Raum	-	-	-	-	-	-	HB.I,1 Jagdwaffen_40384324	51,5 18,0	-

Die RH-Daten des Jahresdurchschnitts beider Vitrinen zeigen eine tendenzielle negative Abweichung von der Soll-RH (54,8 % bei 20 °C) von ca. ± 3 %. Der Mittelwert der Vitrinen ist dem des Raumklimas ähnlich, was als eine stärkere Temperaturabhängigkeit bzw. Undichtigkeit interpretiert wird, wobei dennoch eine Verringerung der jahreszyklischen Schwankungen deutlich festzustellen ist (Tabelle 8, Anhang V.1.3, V.2). Die Vitrine KuSa_HB.I,1_FO_1 liegt näher an der Raumeingangstür und zeigt demnach eine stärkere Abweichung. Ein RH-Gradient innerhalb der Vitrinen ist bei beiden weniger deutlich, allerdings liegt die tägliche Fluktuation im oberen Bereich der Vitrine mit ± 3 % (mit Oberbeleuchtung) etwas höher als im unteren Bereich ± 2 % (nahe dem Sockel mit GMNL). Bemerkenswert ist allerdings, dass durch die Lichtquelle im ersten Quartal (Januar bis April) eine konstantere Temperatur im oberen Bereich der Vitrinen erzeugt wird, was wiederum zu einer gleichmäßigeren RH führt.

Da sich hier die GMNL unmittelbar im Exponatraum befindet, wurde ein stabilerer RH-Wert erwartet. Möglicherweise hätten weitere Schlitze im oberen Teil des Sockels (zusätzlich zu den Schattenfugen) zu einer effizienteren Konditionierung der Vitrinenluft beigetragen.

IV. Depot – GKCL

Tabelle 9: Übersicht der Parameter und eine Auswahl von Messdaten der Testreihe KuSa_III,3_FOKGL_1, Hi_1.

Vitrinen-Nr.	Vitrinen-Typ	Volumen (L)	Salz	Menge Salz (kg)	Menge H ₂ O (kg)	Anzahl Behälter	ID-Datalogger	Ø RH [%]	Differenz zu Soll RH
KuSa_HH.III,3_FOKGL_1	Standvitrine, Hahn Vitrinenbau/ 1960er	1096,2	K ₂ CO ₃	3,4	1,5	6	21543832	46,9	3,9
KuSa_HH.III,3_Hi_1	Historische Vitrine, 1880-1920	1728		4,5	2	8	1000158	48,3	5,3
Raum	-	-	-	-	-	-	1000181	54,7	-

Das Potential von GKCL zeigt sich insbesondere an der Vitrine KuSa_HH.III,3_FOKGL_1 in einem Depotraum im Hohen Haus der Veste Coburg. Der Raum weist jahreszeitenbedingt massive Schwankungen der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit auf, welche sich durch die Nähe zum Dach (obere Geschossdecke wenig gedämmt) unmittelbar auf die Vitrinen übertragen (Tabelle 9, Anhang V.1.4, V.2). Kurze Messungen der RH/T vor dem Einsetzen der GKCL in die Vitrine mit moderater Dichtigkeit (ca. 1960er Jahre) belegen dies anschaulich (Abb. 17). Das in der Vergangenheit für die Vitrine benutzte Feuchtekonstantgerät, zur Konstanthaltung der für instabiles (krankes) Glas angestrebten RH von ca. 33 % (Miniclima® EBC 10 Master), konnte keine adäquate Werte erzeugen bzw. aufrechterhalten. Nach dem Einsetzen von ca. 5 kg GKCL in den Exponatraum stabilisierte sich die RH auf angemessene Werte und blieb über 12 Monate nahezu temperaturunabhängig. Dies liegt im Vergleich zu den Testreihen in der Historischen Glassammlung, welche eine minimal stärkere Temperaturabhängigkeit zeigen, möglicherweise daran, dass sich die konditionierte Luft direkt im Exponatraum verteilen kann und nicht erst durch schmale Schattenfugen diffundieren muss. Dass die Größe und Art der Schattenfuge einen geringen Einfluss auf eine schnelle und gleichmäßige Konditionierung belegen die in Absatz III.3.1.4 besprochenen Simulationen.

Auch das Klima in der historische Holzvitrine, die sich im gleichen Depotraum befindet, kann minimal durch den Einsatz von GKCL reguliert werden. Die hohe Undichtigkeit (Schiebetüren mit großem Spaltmaß), das hygroskopische Material (offene Holzoberflächen) und die Größe der Vitrine setzen einer erfolgreichen Klimatisierung jedoch Grenzen.

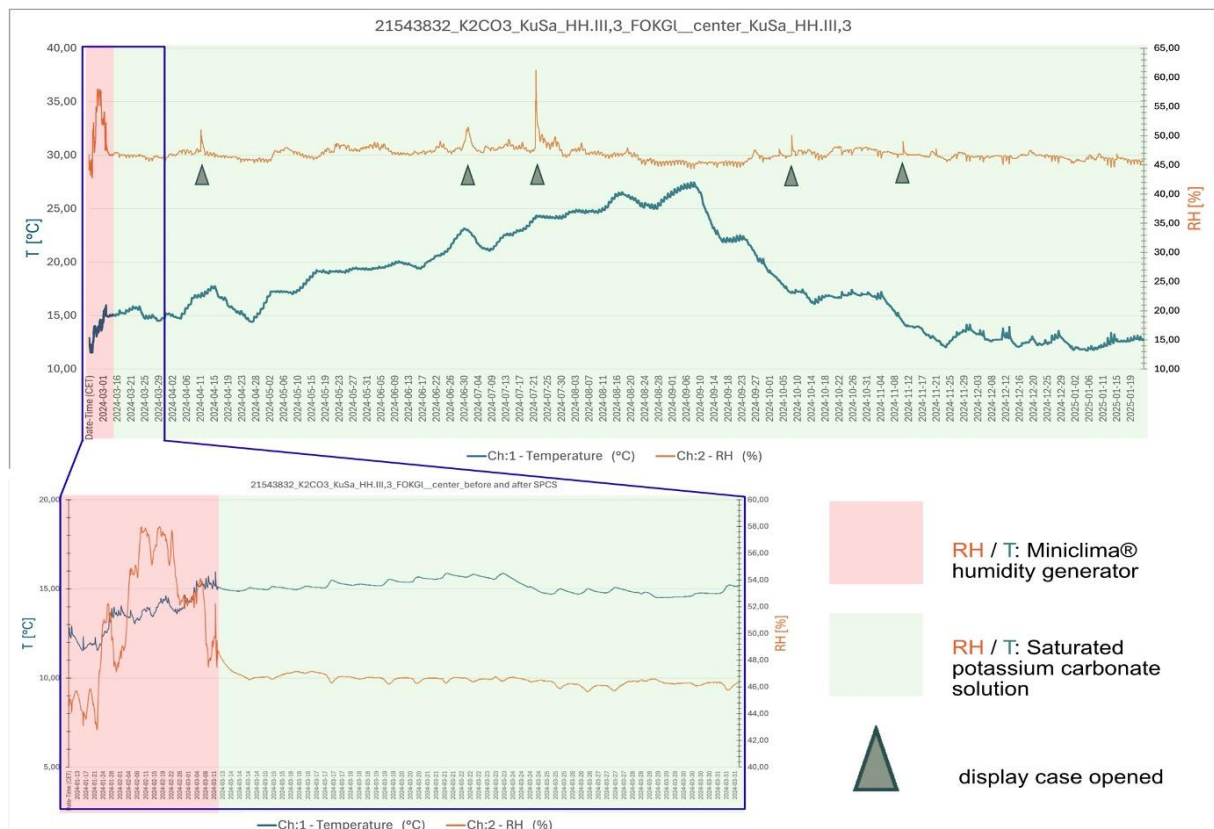


Abbildung 17: Diagramm/Klimakurve der von KuSa_HH.III,3_FOKGL_1 über 12 Monate. Detailansicht (unten) belegt signifikante Stabilisieren der RH nach Einsatz GKCL.

Fazit (Testreihen I, II, III)

Anhand der ausgewerteten RH/T-Daten der 17 getesteten Vitrinen in den Räumen der Kunstsammlungen der Veste Coburg zeigt sich deutlich das große Potential von GKCL und GMNL zur Klimatisierung von Vitrinen und – vor allem – zur deutlichen Reduzierung von objektschädigenden Schwankungen der RH. Innerhalb der Vitrinen entstehende Gradienten der RH (u.a. auch durch Beleuchtungssysteme und entsprechenden Temperaturanstieg ausgelöst) sind vernachlässigbar und liegen im Toleranzbereich von max. $\pm 3 \text{ \%}/24 \text{ h}$. Veränderungen an den Objekten konnten nicht festgestellt werden. Auch bei dem internationalen Ringversuch wurde keine Neubildung von Korrosionsprodukten beobachtet, so dass Dr. Andrea Fischer (SABK Stuttgart) keine Proben analysieren musste.

Die Dichtigkeit bzw. die Luftaustauschrate (AER) jeder Vitrine ist dabei einer der entscheidenden Faktoren. Dies kann insbesondere bei einem Vergleich zweier unterschiedlich dichter Vitrinentypen, hier der Multidisplay Vitrine in der Altdeutschen Sammlung (GMNL, KuSa_KEM.II,2_KOK_1 & _2) mit außergewöhnlich stabilen, kaum fluktuierenden RH-Werten und den freistehenden Vitrinen aus den 1960er Jahren (GMNL,

KuSa_KEM.II,2_FO_1 & _8), die weniger dicht zu sein scheinen und sich der RH-Wert jeweils an den des Raumes annähert.

Vergleiche der gesättigten Salzlösungen deuten auf ein höheres Potential von Kaliumcarbonat und Magnesiumchlorid hin, da stets eine stabilere und temperaturunabhängigere RH als bei Magnesiumnitrat erzeugt werden konnte. Silikagel kann zwar zunächst einen konstanten RH-Wert erzeugen, der dann aber langsam anstieg. Anders als bei den gesättigten Salzlösungen mussten diese im Laufe eines Jahres erneut konditioniert werden.

Auch die Menge der eingesetzten Salzlösungen scheint keinen signifikanten Unterschied zu machen. Wie theoretisch zu erwarten, ist die Oberfläche und eine gleichmäßige und möglichst großflächige Verteilung der GSL entscheidend. Wie anhand der Testreihen in den Vitrinen (ca. 1600 L Volumen) historischen Glassammlung nachzuvollziehen ist, stellt sich die Gleichgewichtsfeuchte sowohl bei der maximal eingesetzten Menge an GKCL (ca. 15 kg) als auch bei der Hälfte GKCL (7,5 kg) ein. Nur die Halbierung der Behälteranzahl (von 9 auf 5), respektive der Reaktionsoberfläche macht einen minimalen Unterschied: im oberen Bereich der Vitrine scheinen die täglichen Schwankungen um ca. 1 % RH größer zu sein als bei den Vitrinen mit 9 Behältern (Tabelle 6).

Spezifische Versuchsreihen & Analysen: Kaliumcarbonat & Magnesiumnitrat-Hexahydrat

A) *Kriechverhalten der Salze in diversen Behältnissen (Glas, Metall, PP, PE, PS)*

Vorläufige Versuche zum Kriechverhalten der getesteten Salzlösungen wurden im Labor der Veste Coburg durchgeführt. Dabei scheinen Behältnisse aus Polyethylen (PE) am ehesten geeignet, denn auch bei Behältern aus PP konnte Kriechen von Magnesiumnitrat festgestellt werden. Ein entscheidender Faktor hierbei ist die RH des umgebenden Raumes; sinkt die RH und zwingt die gesättigte Salzlösung zur Abgabe von Wasser, steigt durch das Auskristallisieren das Potenzial des Kriechens. Diese Beobachtung wurde u. a. auch von einigen Teilnehmenden des internationalen Ringversuches dokumentiert. Zum Spezifizieren entscheidender Parameter müssen die Testreihen unter konstanten und reproduzierbaren Bedingungen in geeignetem Rahmen wiederholt werden (angemeldete Dissertation von Katja Siebel zum Thema der Klimatisierung von Vitrinen mit gesättigten Salzlösungen).

B) Einflussfaktoren Klimatisierungsgeschwindigkeit: semipermeable Membran als Verschüttenschutz & Silikagel („Tandemsystem“)



Abbildung 18 a-b: Glashauben mit Versuchen zum „Tandemsystem“ und mit semi-permeabler Membran (Tyvek®).

Das Kriechen und Verschütten von Salzlösungen wurden im Vorfeld häufig als ein entscheidendes Problem genannt. Die Verwendung von (semi-)permeablen Abdeckungen (Abb. 18b), wie etwa perforierte PE-Folien, können ein Verschütten und Kriechen verhindern. Die Geschwindigkeit der Einstellung der Gleichgewichtsfeuchte wird allerdings durch eine semi-permeable Membran (PE) stark herabgesetzt (Tabelle 10). Dies belegen Testreihen, welche im Labor der Veste Coburg durchgeführt wurden.

Ebenfalls wurde das in Coburg seit 30 Jahren verwendete „Tandemsystem“ getestet, eine Methode, die gesättigte Salzlösungen in Verbindung mit vorkonditioniertem Silikagel (PROSORB®) verwendet (Abb. 18a).

Der Testlauf wurde in Vitrinen mit jeweils GKCL und GMNL neben einer leeren Vitrine und einer nur mit PROSORB®) bestückten als Referenz, durchgeführt. Verwendet wurden baugleiche Glashauben (H) (Volumen = 48 l).

Die RH wurde auf ca. 70 % eingestellt. Die gesättigten Salzlösungen (GSL) wurden mit entsprechenden Modifikationen (nur GSL, mit Membran, mit PROSORB®) eingestellt und die Zeit, bis zum Erreichen der jeweilige Soll-RH [%] wurde gemessen (Min., T [°C]).

Tabelle 10: Modifikation von GKCL: Geschwindigkeit, bis Soll-RH von GKCL erreicht ist.

Salz	Modifikation	H ₂ O (g)	Salz (g)	ID-Datenlogger	Zeit (Min.) bis Soll-RH
K ₂ CO ₃	non	250 (x2)	512 (x2)	1000157	801
K ₂ CO ₃	500 g PROSORB® (RH 43 %)	250 (x2)	512 (x2)	1000159	98
K ₂ CO ₃	Membran	250 (x2)	512 (x2)	1000159	1298
PROSORB® (40 %)	500 g PROSORB® (40 %)	250 (x2)	512 (x2)	1000159	153
non	non	0	0	1000157	1708

Die Verwendung einer semi-permeablen Membran senkt die Geschwindigkeit der Einstellung der Gleichgewichtsfeuchte deutlich. Dies stimmt mit Messungen von Piechota und Piechota (2024) überein, die jüngst über ihre Jahrzehnte-lange Erfahrung mit Magnesiumnitrat berichteten. Hingegen kann der Einsatz von zusätzlichem und entsprechend auf die Soll-RH vorkonditioniertes Silikagel die Gleichgewichtsfeuchte beschleunigen. Reines Silikagel ohne GSL benötigt etwas mehr Zeit (153 Min.) als das „Tandemsystem“ (98 Min.). Mit großem Abstand von 801 Min (etwa 13 h) hat sich auch der Soll-RH-Wert bei der reinen GKCL eingestellt. Etwa 21 h benötigte das Einstellen der Gleichgewichtsfeuchte mit Membran.

C) Einflussfaktoren Schadstoffe I: Schwefel, Essigsäure, Chlorwasserstoff

Um das Adsorptionspotential von Kaliumcarbonat gegenüber verschiedenen Schadstoffen, wie beispielsweise Schwefelverbindungen in Demonstrationsversuchen didaktisch zu veranschaulichen, wurden jeweils zwei identische Vitrinen mit zuvor gereinigten Silberobjekten Silber (Ag)- sowie Kupfercoupons (Cu) und einer Schale mit reinem Schwefel bestückt (Sublimationsdampfdruck $S_8 = 1,38$ ppb bei 20 °C) (Abb. 19). In eine der beiden Vitrinen wurde zusätzlich GKCL platziert. Die finale visuelle Auswertung steht noch aus. Bisher zeigen sich jedoch nur minimale Unterschiede zwischen beiden Vitrinen. Die Silberobjekte in der Vitrine ohne GKCL schienen minimal intensiver angelaufen zu sein, der Kupfercoupon in der Vitrine ohne GKCL ist leicht angelaufen, das Gegenstück hingegen blank.



Abbildung 19: (links) Zwei Vitrine bestückt mit Schwefel, Silberobjekten und Kupfercoupons, eine davon zusätzlich mit GKCL. (rechts) Demonstrationsversuch zur Schadstoffabsorption durch GKCL, Universität Hamburg.

Der Einfluss von Essigsäure und Chlorwasserstoff auf Silber (Ag) und Kupfer (Cu) wurde in Versuchen im Exsikkator an der Universität Hamburg untersucht (Abb. 20; Tabelle 11). Die Ergebnisse können als eindrucklich bezeichnet werden. Verwendet wurde jeweils eine 25%ige Essigsäure-, Chlorwasserstoff- und Schwefelsäurelösung. Die Veränderung der Cu-Coupons in der Essigsäure- sowie Chlorwasserstoffatmosphäre mit GKCL unterscheiden sich signifikant von den Coupons ohne GKCL. Ein frisches, hartgekochtes Hühnerei, welches rund 4000 ppb H_2S erzeugen kann (Jo et al. 2013), diente als Schwefelwasserstoffquelle. Bei den Ag-Coupons ließ sich keine Veränderung feststellen.

Restaurator:innen ist die Korrosion von Kupfer durch Essigdämpfe zumindest theoretisch als historische Herstellung von Grünspan wohlbekannt. Daher ist der erarbeitete Demonstrationsversuch zur Schadstoffabsorption durch GKCL für mehrtägige Workshops besonders geeignet.

Tabelle 11: Demonstrationsversuch: Einfluss von Essigsäure und Chlorwasserstoff auf Silber (Ag) und Kupfer (Cu)
Demonstrationsversuch.

25%ige Essigsäure, 1 Woche Laufzeit → ohne GKCL (links) → mit GKCL (rechts)	
Hühnerei (H₂S), 2 Woche Laufzeit → ohne GKCL (links) → mit GKCL (rechts)	
25%iger Chlorwasserstoff, 1 Woche Laufzeit → ohne GKCL (links) → mit GKCL (rechts)	

II.3.2.2 Internationaler Ringversuch

Zielsetzung

Die erfassten Daten sind zum jetzigen Zeitpunkt auf einer Makroebene ausgewertet. Daraus ergibt sich ein Stimmungsbild, ob und wie sich die gesättigten Salzlösungen im musealen Alltag bewährt haben. Entsprechend können weitere Forschungsfragen formuliert werden und Folgeprojekte zum Thema angestoßen werden, wobei die generierten Klimadaten weiterhin als Grundlage dienen können. Beispielsweise können Fragestellungen zur Dichtigkeit von Vitrinen, respektive die Korrelation von Vitrinen-Innen- und Außenklima gezielter und mit einer großen Bandbreite an Daten zur RH und T ausgewertet werden. Diese Mikroebene bleibt in diesem Bericht unbeachtet.

Kommunikation & Dokumentation

Die Akquise von potenziellen Testteilnehmer:innen fußte überwiegend auf persönlichem Kontakt und dem direkten Ansprechen von Kolleg:innen. Ferner wurde der Aufruf zum Projekt über die in der Konservierung und Restaurierung gängigen Verbände und Plattformen (VDR – Verband der Restauratoren, RestauRO, Newsletter, Global Conservation Forum etc.) verbreitet und auf Fachkonferenzen beworben (siehe IV Öffentlichkeitsarbeit).

Der Aufruf stieß auf enormes Interesse: Über 60 Museen aus dem und Institutionen deutschsprachigen und internationalen Raum meldeten sich bis September 2023 zur Teilnahme an zum internationalen Ringversuch zur Klimatisierung von Vitrinen mit gesättigten Salzlösungen an.

Als Handreichung zu den Anforderungen der Testreihen wurde ein Merkblatt für Testteilnehmer:innen (bzw. eng. „Guidline for Participants“, siehe Anhang) auf deutsch und englisch herausgegeben. Diese Handreichung beinhaltete die grundlegenden Informationen zum Projekt, Zielsetzungen und Fragestellungen sowie der Art der Datenverarbeitung und Speicherung (Datenlogger Daten im .xlsx-Format) einer genauen Anleitung zur Mischung entsprechender gesättigter Salzlösungen.

Die Kommunikation erfolgte überwiegend per E-Mail, vereinzelt per Telefon. Insbesondere zu Beginn (Oktober 2023 bis Januar 2024) sowie zum Projektende (September 2024 bis Dezember 2025) intensivierte sich die Kommunikation mit den Testteilnehmer:innen durch Häufungen von Nachfragen. Vor Projektende wurde ein Fragebogen ausgearbeitet, welcher den Teilnehmenden zugesendet wurde. Dieser diente

der Bewertung und einheitlichen Dokumentation der relevanten Daten und Erfahrungen und diente als Grundlage für eine vergleichbare Auswertung.

Auswertung der Fragebögen

Stand Ende März 2025 haben insgesamt 28 Institutionen sowohl die Daten der Testreihen als auch die dazugehörigen Fragebögen zur Auswertung abgegeben. Davon sind 18 Museen aus dem deutschsprachigen und 10 aus dem internationalen Raum. Auch wenn der Rücklauf bisher (evtl. kommen noch Nachzügler) deutlich unter den Anmeldungen blieb, reicht er für ein umfassendes Gesamtbild aus. Die insgesamt 78 Versuchsreihen belegen das große Interesse und Engagement der Teilnehmenden.

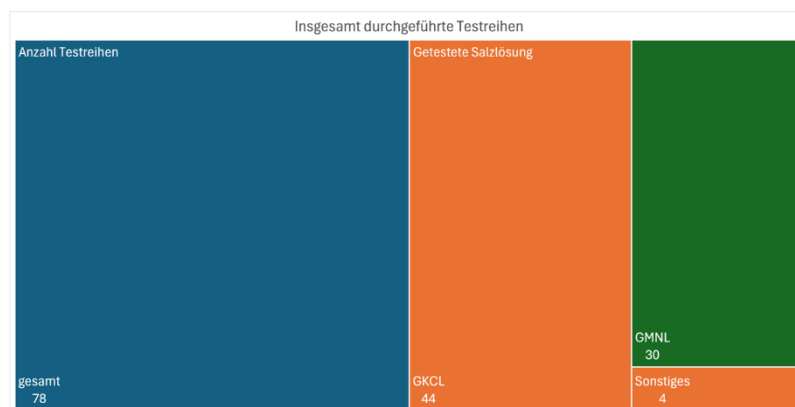


Diagramm 1: Durchgeführte Testreihen mit jew. GSL.

Verwendete Vitrintypen, darunter Standvitrinen, Einbauvitrinen, historische Vitrinen, Boxen/Behälter etc., variieren ebenso stark, wie die Größe (Volumen, l) und Standorte, an denen die Testreihen durchgeführt wurden (Diag. 2, 3, 4). Von den insgesamt 78 Testreihen wurden 44 mit GKCL und 30 mit GMNL durchgeführt (Diag. 1). Bei vier Testreihen wurden andere Materialien, wie etwa Bentonit, Kaliumcarbonat oder Mischungen verwendet (Diag. 1). Dies ermöglicht die Betrachtung einer großen Varietät an realen Verhältnissen in Museen und musealen Sammlungen, schränkt allerdings die Vergleichbarkeit ein. Nur wenigen war die Dichtigkeit (AER/Luftaustauschrate) bekannt. Die Wahl des zu testenden Salzes stand den teilnehmenden Institutionen frei; etwas häufiger wurde GKCL verwendet.

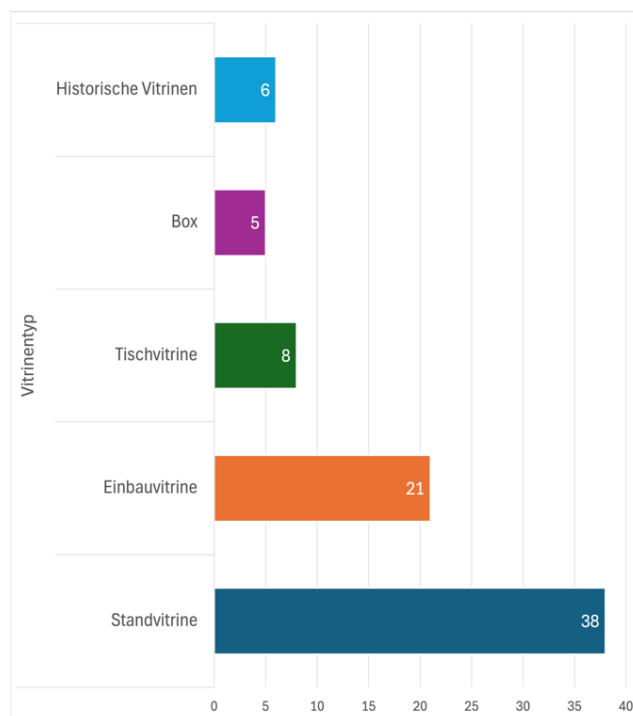


Diagramm 2: Verwendete Vitrinentypen.

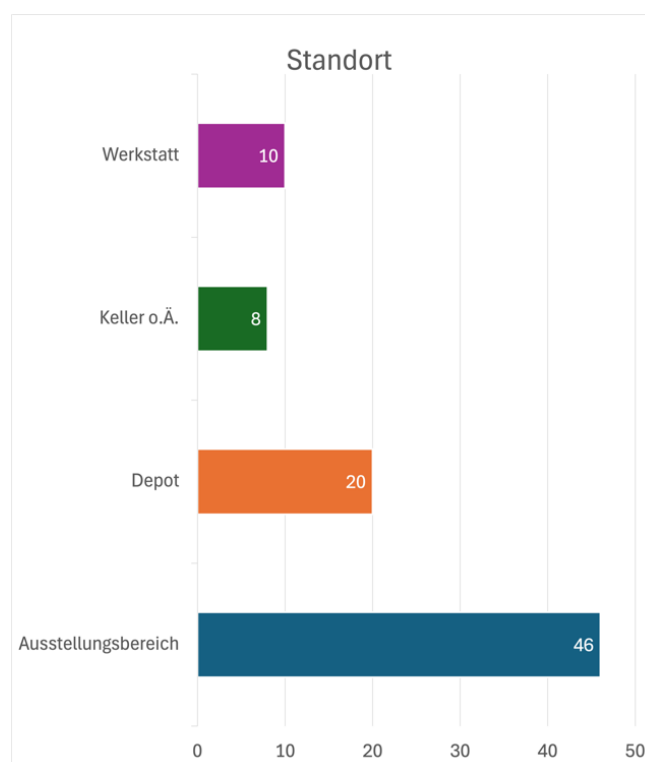


Diagramm 3: Standort der Testvitrinen.

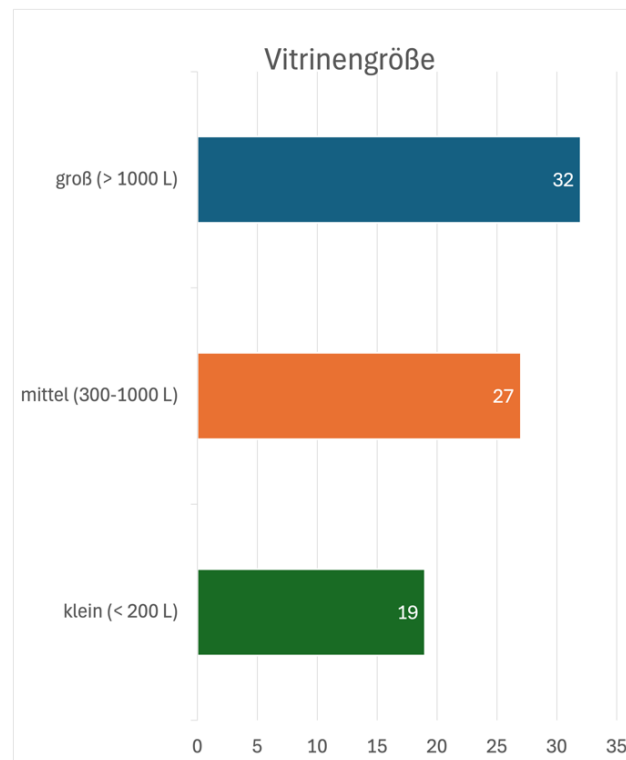


Diagramm 4: Anzahl der jew. Größe der Testvitrinen.

Zu Beginn der Testphase Ende 2023 gab es einige Rückfragen bezüglich der notwendigen Qualität/des Reinheitsgrades der Salze, des Anmischens der gesättigten Lösungen, der Mischungsverhältnisse und erforderlichen Mengen an GSL für ein spezifisches Volumen. Einige Teilnehmende berichteten von einer Bildung von harten Salzklumpen beim Mischen von Kaliumcarbonat mit Wasser, weitere von einer stark exothermen, andere von einer endothermen bzw. keiner thermischen Reaktion bei Kaliumcarbonat. Die Klumpen konnten schließlich durch einen höheren Wasseranteil gelöst werden, sodass sich eine Lösung mit Festkörperanteil in Form eines breiartigen Bodensatzes und einer Schicht Flüssigkeit einstellte. In einem Versuchsaufbau wurde aufgrund einer hohen Umgebungs-RH trockenes Kaliumcarbonat ohne Wasser verwendet, mit dem Ziel die Vitrinenluft zu entfeuchten. Weder die Entfeuchtung noch die Einstellung der Gleichgewichtsfeuchte um 43 % gelang. Das liegt vermutlich daran, dass die Auflösung zunächst über eine kinetisch behinderte Festkörperumwandlung zum Hemihydrat erfolgt. Um die entsprechende Gleichgewichtsfeuchte einzustellen, muss nach thermodynamischen Gesetzen ein Wasseranteil, d.h. eine gesättigte Lösung vorhanden sein (Mazur et al 2022; Sögütöglu et al. 2021). Andere verwendeten zu viel Flüssigkeit, sodass kein Bodensatz übrigblieb, was in einzelnen Fällen zum Anstieg der RH über den entsprechenden Toleranzbereich führte. Die Zugabe von weiterem Salz konnte in den meisten Fällen die RH wieder entsprechend der DRH senken.

Die abweichenden thermischen Reaktionen beruhen auf dem unterschiedlichen Wassergehalt der Salze: Bei Auflösung des Hemihydrats (dem Salz im Gleichgewicht mit wässriger Lösung) wird in kürzerer Zeit mehr Lösungswärme frei als beim wasserfreien.

Einige Teilnehmer:innen haben den Versuchsaufbau ausgeweitet und Exponate und/oder Testkörper (z.B. Kupfercoupons) vorbereitet, um mögliche Veränderungen feststellen zu können. Bis auf eine Institution wurden keine Veränderungen dokumentiert. Dass die Veränderungen an den Probekörpern auf die GSL bzw. Deren Aerosole zurückzuführen ist, kann aufgrund der bisherigen Forschungslage ausgeschlossen werden.

Analog zu den Coburger Testreihen, können wir sowohl bei einer GKCL als auch bei einer GMNL von einem hohen Potential als passives Klimatisierungsmittel ausgehen. Bei über der Hälfte der Testreihen wurde die Soll-RH erreicht (Diag. 5). Bei einem Anteil von 42 % wurde die gewünschte RH nicht erreicht; hier brachte eine detaillierte Auswertung entsprechender Daten Aufklärung. Sowohl bei GKCL als auch bei GMNL belief sich die durchschnittliche Abweichung von der Soll-RH auf unter 3 % RH (Diag. 6). Bei GKCL liegt lediglich 1/3 der Durchschnittswerte bei über 3 % RH-Abweichung. Bei GMNL liegt die Abweichung von > 3% RH bei etwas mehr als der Hälfte (ca. 57 %), wobei in drei Fällen auch eine Abweichung von > 10 % RH zu verzeichnen ist.

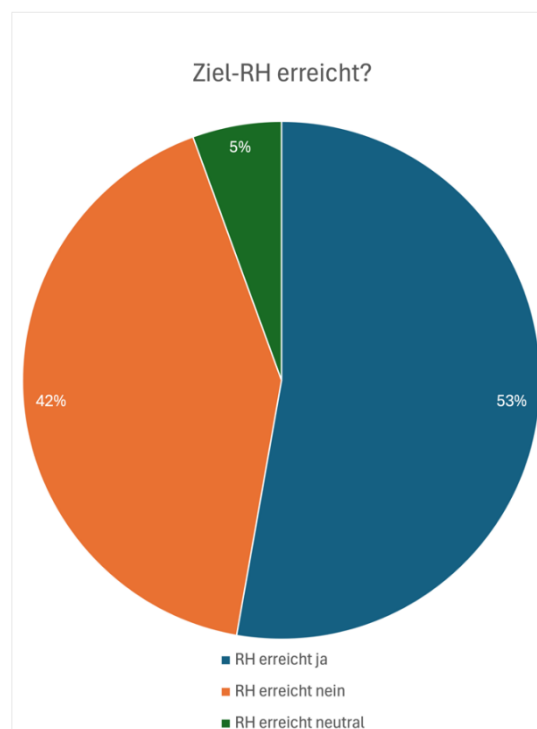


Diagramm 5: Wurde die Soll-RH (43 % und 53 %) erreicht?

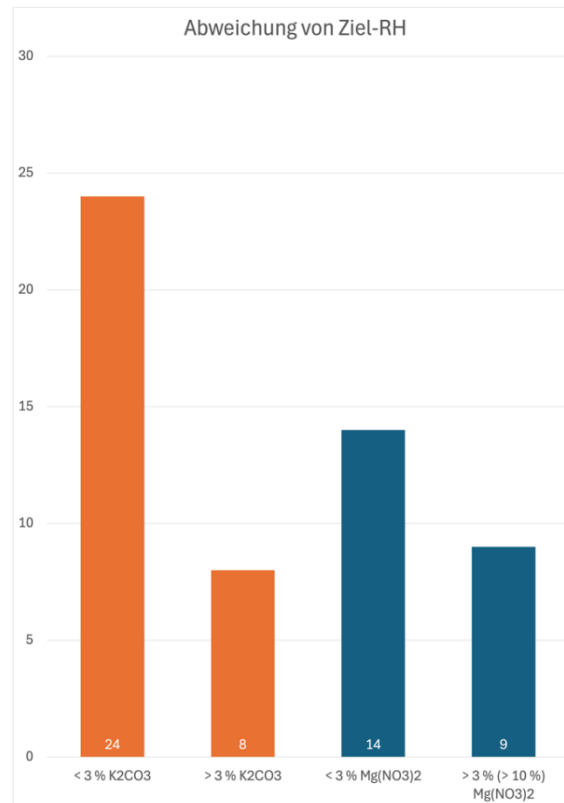


Diagramm 6: Anzahl der jew. Abweichung zur Soll-RH (43 % und 53 %).

Neben einer technisch bedingten Standardabweichung bzw. Messungenauigkeiten der Datenlogger (je nach Herstellerangaben von $\pm 2,5$ % RH) können die hier dokumentierten Abweichungen auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden:

- Vitrine undicht und RH der Umgebung > 43 % bzw. 54 %
- Salz-Flüssigkeits-Verhältnis: zu hoher Flüssigkeitsanteil
- Salz-Flüssigkeits-Verhältnis: keine Flüssigkeit, nur trockenes Salz
- Messungenauigkeit

Bei hohen Abweichungen von über 10 % RH, was ausschließlich bei GMNL zu beobachten war, kann derzeit von einem zu hohen Flüssigkeitsanteil innerhalb der Lösung ausgegangen werden, der sich u.a. durch eine konstant zu hohe RH im Außenbereich ($\emptyset$ RH 50-60 %) und/oder einem falschen Mischverhältnis (Salz:Flüssigkeit = 5:4; 2:0,5; 2:1; 3:1, empfohlen ist ein Verhältnis von 2,5:1) bei den Vorbereitungen ergeben kann. Ebenso trat dies eher bei kleinen Vitrinen (< 400 L) auf, die möglicherweise nicht viel an GMNL zur Einstellung der gewünschten RH brauchen.

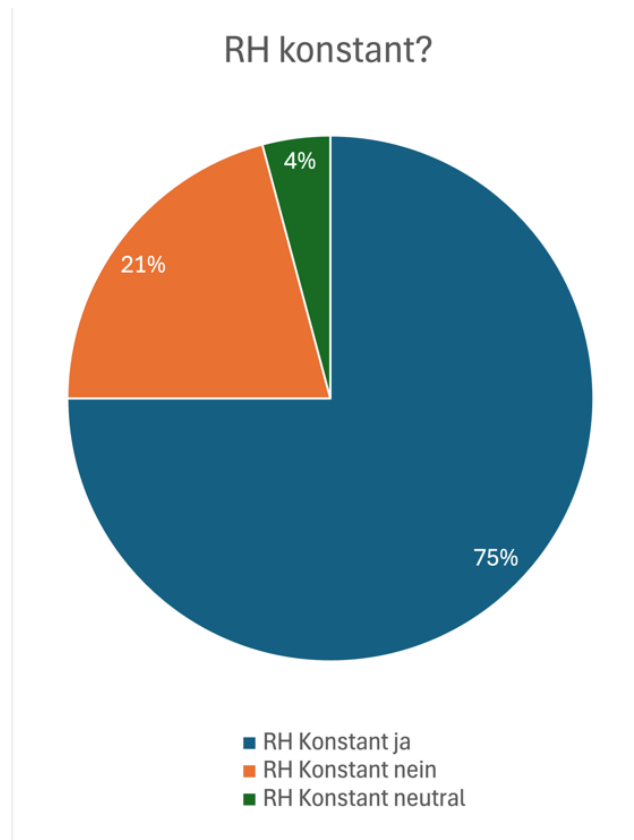


Diagramm 7: Blieb die RH über 12 Monate konstant?

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Soll-RH einstellte, lag laut Datenlage zwischen zwei Stunden und einer Woche je nach Größe, Dichtigkeit und Inhalt in der Vitrine. Eine entscheidende Resonanz betrifft die Fragestellung, ob der RH-Wert über den Jahreszyklus konstant blieb; über 75 % konnten dies bestätigen (Diag. 8).

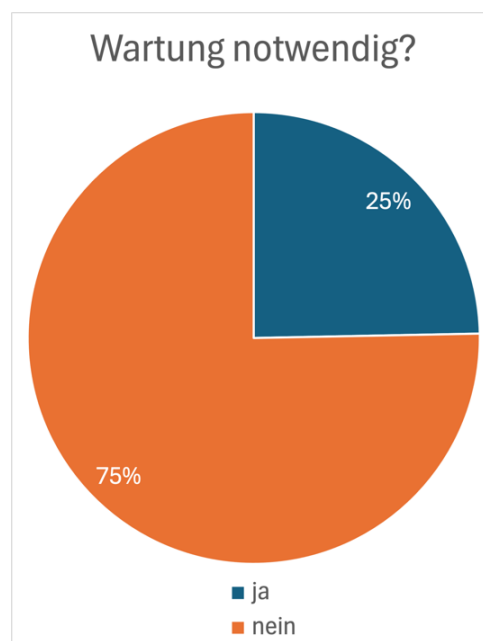


Diagramm 8: War Wartung innerhalb von 12 Monaten notwendig?

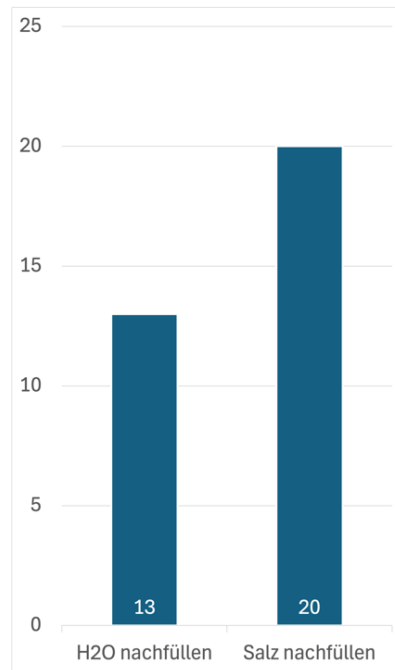


Diagramm 9: Anzahl der Wartungen bei dem Salz oder Flüssigkeit nachgefüllt werden musste.

Ein weiterer, für den beruflichen Alltag relevanter Aspekt betrifft die Wartung der GSL. Da zeitliche, personelle und finanzielle Ressourcen rar sind, sollten die GSL innerhalb eines Jahres wenig, im besten Fall keine Wartung (Nachfüllen von Flüssigkeit und/oder Salz) benötigen (Diag. 9). 75 % der Teilnehmer:innen mussten im Testjahr 2023-2024 weder Salz noch Flüssigkeit nachfüllen, respektive keine Zeit und Material für die Wartung aufbringen. Wo Salz oder Flüssigkeit nachgefüllt werden musste, war entweder die Vitrine sehr undicht und das Raumklima entsprechend zu feucht oder trocken oder – hier überwiegend – das anfängliche und empfohlene Mischungsverhältnis nicht eingehalten worden. Insbesondere dort, wo Flüssigkeit nachgegeben werden musste, berichteten einige, dass die Salze gekrochen seien. Bei genauerer Analyse der Daten, ist nach jetzigem Stand davon auszugehen, dass das Kriechen von Salzen u.a. dann auftritt, wenn sich der Flüssigkeitsspiegel durch eine durchschnittlich zu trockner Umgebung und undichte Vitrinen absenkt. Rückstände von auskristallisierten Salzen im Klimafach bzw. im Vitrinenraum fallen in die gleiche Kategorie, können hier aber ausschließlich auf unsauberes Handling, also Verschütten der Lösung oder auf nachträgliches Bewegen der Vitrine zurückgeführt werden. Ein weiteres Vorkommen von gekrochenen Salzlösungen kann eindeutig auf die Verwendung von zwei unterschiedlichen GSL innerhalb einer Vitrine zum Versuch der Einstellung eines RH- Mittelwertes zurückgeführt werden. Hier wurde eine GKCL und eine GMNL in eine Vitrine platziert, was zu einer Austrocknung der GMNL führte, welche daraufhin auskristallisiert ist.

Nur wenige berichteten von einer farblichen Veränderung bzw. einer Verdunklung der GSL nach einem Jahr. Auch bei den Coburger Versuchen sind in einigen Behältern mit GSL dunkle Staubpartikel zu sehen, was darauf hindeutet, dass die Lösungen auch Staub binden.

Zum Abschluss des Ringversuchs kann zusammengefasst werden, dass die Verwendung von GSL nicht nur bei den teilnehmenden Institutionen äußerst positiv bewertet wurde, sondern zudem in der Community über das Potential befürwortend gesprochen wird.

Einige teilnehmende Institutionen wollen die Versuche weiterführen oder planen die Bestückung einzelner oder mehrerer Vitrinen mit ges. Salzlösungen. Zudem sind viele Museen und Institutionen auf das Projekt aufmerksam geworden. Ein großes Interesse besteht an den Auswertungen der breit gefächerten Testreihen der nationalen und internationalen Teilnehmer:innen. Noch vor Ende des Projektes nahm die Nachfrage nach Erfahrungen und Möglichkeiten des Einrichtens in diversen Sammlungen oder Sammlungsbereichen zu. Anhand der Fragebögen lässt sich allerdings auch zusammenfassen, dass ein Fehlen von adäquaten Vitrinen mit entsprechend großen und separat zugänglichen Klimafächern ein Hindernis ist, dass Museen und Sammlungen GSL nutzen. Als Anstoß haben wir in Coburg gezeigt, dass auch das Umrüsten von alten Vitrinen den Einsatz von GSL möglich macht – beispielsweise durch eine Sockellösung, unter denen die GSL platziert werden können.

Außerdem wurde eine Liste mit Vorschlägen für die Konstruktion solcher Vitrinen erstellt (siehe Anhang) und Vitrinenherstellern (Glasbau Hahn, Fa. Reier) zur Verfügung gestellt.

87 % der Teilnehmer:innen bewerteten den praktischen Umgang und die Methode insgesamt positiv und niemand negativ. Damit hat sich der Einsatz von GSL als zeitgemäße und nachhaltige Klimatisierungsmethode für Vitrinen bewährt.

II.4 Vermittlung

II.4.1 Öffentlichkeitsarbeit

II.4.1.1 Tagespresse/Medien

Während des Projektes wurde zahlreiche Anlässe genutzt, um in der Tagespresse und mit einem TV-Beitrag die Öffentlichkeit zu informieren.

- „Wie einfache Salzlösungen wertvolle Museumsexponate vor Luftschadstoffen schützen“. Pressemitteilung Uni Saarland/IdW vom 31.1.2023. <https://idw-online.de/en/news808506>
- „Lohnende Lösung im Saarland: Salz und Wasser sollen Kunstwerke schützen“. BILD Saarland vom 31.1.2023.
- „Salze als Wundermittel in Museumsvitrinen?“ Saarbrücker Zeitung vom 26.2.2023
- Tag der Restaurierung 2023:
„Tiefe Einblicke“. Süddeutsche Zeitung vom 13.10.2023.
„Coburger Modell: Was macht das Salz in der Vitrine?“, Neue Presse Coburg vom 13.10.2023.
- Tag der Restaurierung 2024:
„Salz in der Vitrine ist gut fürs Klima“, Thüringische Landeszeitung Eisenach vom 19.10.2024
- 3Sat TV-Beitrag im Magazin ‚nano‘ vom 20.2.2024
<https://www.3sat.de/wissen/nano/240220-sendung-nano-100.html> (ab min. 18:45).
- Ausstellungsberichte Studioausstellung:
„Wie Salz Restauratoren hilft“, Neue Presse Coburg vom 25.10.2024.
„Prima Klima in Coburg: Salzlösung als Hilfe im Museum“, Fränkischer Tag vom 25.10.2024.
„Blog #7: Prima Klima“ (H. Grieb und K.F. Siebel) <https://veste.kunstsammlungen-coburg.de/primaklima/>

II.4.1.2 Museumsaktivitäten

Die Kunstsammlungen der Veste Coburg nutzten auch ihre musealen Mittel zur Projektinformation.

- 15.10.2023: 6. Europäischer Tag der Restaurierung, Sonderführung Salzlösungen zur Vitrinenklimatisierung (H. Grieb).
- 20.10.2024: 7. Europäischer Tag der Restaurierung, Previewführungen zur Studioausstellung um 13 und 15 Uhr (H. Grieb).
- 25.10.2024-25.5.2025: Studioausstellung zum Forschungsprojekt „Prima Klima – Das Museum wird umweltfreundlicher“ (H. Grieb, K.F. Siebel)

<https://veste.kunstsammlungen-coburg.de/primaklima/>

II.4.2 Informationen für die Fachwelt

Der Einsatz von Salzlösungen zur Vitrinenklimatisierung hängt von ihrer Bekanntheit und Akzeptanz ab. Nachrichtenbeiträge in restauratorischen Medien dienen der Akquise von Teilnehmern am internationalen Ringversuch. Darüber hinaus wurde auf die Information der Fachwelt durch wissenschaftliche Veröffentlichungen, Beiträge zu Fachtagungen und Workshops besonderer Wert gelegt.

II.4.2.1 Nachrichtenbeiträge für Restaurator:innen

- „Salz in der Vitrine‘: Neues Forschungsprojekt startet“ RESTAURO 7/2022, S. 36-39.
- “Two at a time: climatisation and pollutant absorption.” News in Conservation 93(2022): 12-15. (IIC Newsletter)
<https://www.iiconservation.org/news-conservation-issue-93-december-january-2023>
- „Merkblatt erschienen: Einsatz von Salzlösungen in Vitrinen.“ VDR vom 13.1.2023.
<https://www.restauratoren.de/merkblatt-erschienen-einsatz-von-salzloesungen-in-vitrinen/>
- “‘Test it, it’s marvelous!’: A revival for saturated salt solutions in display cases”. Posting im Global Conservation Forum vom 17.1.2023.
- “Constant RH and pollutant absorption in display cases by simple means: Time to register now for testing”. Posting im Global Conservation Forum vom 18.7.2023.
- „Was ist besser für gute Luft in der Vitrine – Silikagel oder Salzlösungen?“. VDR-Homepage vom 26.7.2023.
<https://www.restauratoren.de/was-ist-besser-fuer-gute-luft-in-der-vitrine-silikagel-oder-salzloesungen/>
- ‚Impromptu Meeting‘ für Teilnehmer der 20th ICOM-CC Triennial Conference in Valencia (Spanien) am 20.9.2023 zum Forschungsprojekt.
- “From Oslo 1957 to Boston 2024: RH control for organic finds by saturated salt solutions stands the test of time”. ICOM-CC Wet Organic Archaeological Materials Newsletter No. 64 (May 2024), S. 11-12.
- “Fideliter et Constanter’: How Saturated Salt Solutions Saved the ‘Sick’ Ducal Glasses in Coburg for 30 years”. ICOM-CC Glass and Ceramics Working Group Newsletter No. 29 (August 2024), S. 8-11.

- „Ausstellung ‚Prima Klima‘ informiert zu Salzlösungen für Museumsvitrinen“. VDR vom 10.1.2025.

<https://www.restauratoren.de/ausstellung-prima-klima-informiert-zu-salzloesungen-fuer-museumsvitrinen/>

- „Abschlussstagung „Salz in der Vitrine“ in der Veste Coburg“. Newsletter der nichtstaatlichen Museen Bayerns 3/2025.

<https://newsletter.museumsberatung-bayern.de/m/15963675/0-181d425b7efcb2d1ac105411fcd3874b3dde5701212644f73ce22cb72c3e81951aa7190b4b6c79482ee71701a3d583b0>

II.4.2.2 Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Brieger, O., M.S. Marschibois, G Eggert, A Schütze & C Bur. 2023. MOS Sensors Characterizing Gas Absorption Dynamics for Art Conservation. 2023 IEEE SENSORS, Vienna, Austria, 2023, S. 1-4. DOI: 10.1109/SENSORS56945.2023.10324921

Brieger, O., R.A. Pfeifer, A. Schütze & C. Bur. 2024. Charakterisierung der Absorption von Luftschadstoffen durch gesättigte Salzlösungen zum Schutz wertvoller Kulturgüter. In: 17. *Dresdner Sensor-Symposium 2024*, 148-153. DOI: 10.5162/17dss2024/P24.

Eggert, G., & A. Schütze. 2023. Zwei auf einen Streich: Klimatisierung und Schadstoffabsorption in Vitrinen durch gesättigte Salzlösungen. *METALLA Sonderheft 13*: 108-110.

Eggert, G., O. Brieger, M.S. Marschibois, D. Becker, C. Bur, K.F. Siebel & H. Grieb. 2024. Sustainable and Beneficial: Pollutant Absorption and Relative Humidity Control in Display Cases by Saturated Salt Solutions. *Studies in Conservation* **69**(sup 1): 72-80. DOI: 10.1080/00393630.2024.2339727

Grieb, H., K.F. Siebel und G. Eggert. 2025. Klima und Glas – die Suche nach der Ideallösung. *Jahrbuch der Coburger Landesstiftung 2025*, in Vorbereitung.

Siebel, K.F., H. Grieb, O. Brieger, R. Pfeifer, C. Bur & G. Eggert. 2025. Pollutants? Potassium carbonate! A new solution for a healthy atmosphere in metal display cases. *Proceedings Metal 2025, Cardiff (Wales)*, 1-5. Sept. 2025, zur Veröffentl. angen.

Siebel, K.F., H. Grieb, O. Brieger, R. Pfeifer, C. Bur & G. Eggert. 2026. From Oslo to the world: Air conditioning in display cases with nitrate solutions. *ICOM-CC 21st Triennial Conference Preprints, Oslo (Norwegen)*, 14. bis 18. September 2026, Extended Abstract eingereicht.

II.4.2.3 Vorträge auf Fachtagungen

- G. Eggert et al.: Kaliumcarbonat – Die Lösung. „Sauber und luftig?“ Tagung der VDR-FG Präventive Konservierung, FH Potsdam, 1. bis 3. Juli 2022.
- G. Eggert: Pollutants? Potash! Indoor Air Quality 2022. National Museum Ljubljana (Slowenien), 14. bis 16. Sept. 2022.
- G. Eggert und A. Schütze: Zwei auf einen Streich: Klimatisierung und Schadstoffabsorption in Vitrinen durch gesättigte Salzlösungen. Jahrestagung „Archäometrie und Denkmalpflege 2023“, Reiss-Engelhorn Museen Mannheim, 28. bis 31. März 2023.

- H. Grieb und K.F. Siebel: Prima Klima?! Klimatisierung von Vitrinen mit gesättigten Salzlösungen am Beispiel Magnesiumchlorid, Kaliumcarbonat und Magnesiumnitrat. Festcolloquium an der Staatl. Akademie der Bild. Künste Stuttgart am 26.10.2023.
- O. Brieger et al. MOS Sensors Characterizing Gas Absorption Dynamics for Art Conservation. IEEE Sensors 2023, Wien 29. Okt. bis 1 Nov. 2023 (Poster).
- K.F. Siebel et al.: Sustainable and Beneficial: Pollutant Absorption and Relative Humidity Control in Display Cases by Saturated Salt Solutions. „Sustainable Solutions for Conservation: New Strategies for New Times“, IIC Congress Lima (Peru), 23. bis 27. Sept. 2024.
- O. Brieger et al.: Charakterisierung der Absorption von Luftschadstoffen durch gesättigte Salzlösungen zum Schutz wertvoller Kulturgüter. 17. Dresdner Sensor-Symposium Dresden, 25. bis 27. Nov. 2024 (ausgezeichnet als bestes Poster).
- K.F. Siebel et al.: Dicke Luft? Pottasche! Ein wiederbelebter Ansatz zur Klimatisierung von Museumsvitrienen. Jahrestagung „Archäometrie und Denkmalpflege 2025“, HfBK Dresden, 19. bis 21. März 2025. (im Block mit Vortrag DBU-Projekt DoAaSch)
- K.F. Siebel et al. Pollutants? Potassium carbonate! A new solution for a healthy atmosphere in metal display cases. Metal 2025, Cardiff University (Wales), 1. bis 5. September 2025, als Vortrag angenommen.
- K.F. Siebel et al. From Oslo to the world: Air conditioning in display cases with nitrate solutions. ICOM-CC 21st Triennial Conference, Oslo (Norwegen), 14. bis 18. September 2026, Extended Abstract eingereicht.

II.4.2.3 Abschlusstagung und Folgeworkshops

Zentrales Thema der Tagung am 22. und 23. Mai 2025 auf der Veste Coburg werden Hinweise für den Gebrauch gesättigter Salzlösungen im Museumsalltag sein, auf der Auswertung fußend, die die zahlreichen national und international teilnehmenden Institutionen im Jahresverlauf 2023/2024 gesammelt haben. Die passive Klimatisierungsmethode wird mit aktiver Klimatisierungstechnik, der Verwendung von Silikagel-Produkten und anderen Systemen verglichen. Neben einer konstanten Luftfeuchtigkeit steht die große Absorptionsfähigkeit der Salzlösungen für korrosive Luftschadstoffe im Fokus. Aktuelle Fallbeispiele werden das Thema veranschaulichen. Geplant sind 11 Referate an zwei Tagen mit zusätzlichen Führungen durch die Sonderausstellung, die Glassammlung und die Depots der Kunstsammlungen (Programm im Anhang).

Am 24. Mai geht ein Workshop: “Praktischer Umgang mit gesättigten Salzlösungen zur Klimatisierung von Vitrinen” den Fragen nach: “Wie funktionieren Salzlösungen? Wie kann ich sie selbst einsetzen?”

Ein weiterer Workshop “How to use saturated salt solutions in display cases for a sustainable, stable and pollution-free environment“ wird am 31.8.2025 für die Teilnehmer der internationalen Konferenz zur Metallrestaurierung „Metal 2025“ an der Cardiff University angeboten werden (<https://www.metal2025.org/fees-and-registration>).

Grundlage für beide Workshops ist der optimierte Einsatz-Leitfaden.

II.5 Fazit/Ausblick

Klimatisierung von Vitrinen ist zum Schutz wertvollen, unersetzlichen Kulturguts unerlässlich. Die Vorteile passiver Methoden gegenüber aktiven sind evident: keine teuren Apparate, kein laufender Energieverbrauch, daher unabhängig vom Stromnetz und ausfallsicher.

Als passive Methoden haben Salzlösungen gegenüber Silikagel folgende Vorteile:

- Sie absorbieren korrosive Luftschadstoffe, wie im Projekt erfolgreich nachgewiesen wurde. Silikagele hingegen können, wenn nicht ausgeheizt (was in der Literatur vernachlässigt und daher praktisch nicht durchgeführt wird), zu Verschleppungen führen (Sharma et al. 2022, McGath et al. 2014). Ihre Funktion als Schadstoffabsorber ist nicht zuverlässig (Schieweck 2020: 13), es wurden auch Gasdurchbrüche in Laborversuchen beobachtet.
- Die Wasserkapazität ist pro kg Material bei Salz deutlich höher (ca. 3x) als bei Silikagel. Damit sind längere Wartungsintervalle möglich und das Vitrinenklima wird durch weniger Vitrinenöffnungen gestört.
- Rechnet man den Aufwand für Ausheizen und anschließendes Re-Konditionieren für einen Neueinsatz mit ein, erscheint der Einsatz von Silikagel deutlich arbeitsaufwändiger als bisher angenommen.
- Die Luftfeuchte bleibt konstant, solange Salz und Lösung im Gleichgewicht vorliegen. Bei den getesteten Salzen ist sie auch praktisch temperaturunabhängig. Bei Silikagel hingegen gibt es je nach Wasserbelegung und Temperatur Verschiebungen in der eingestellten Luftfeuchte.
- Der Umgang mit den Salzen bringt – ebenso wie der mit Silikagel – keine besonderen Gefährdungen im Arbeitsschutz mit sich. Im Haushalt wird Kaliumcarbonat (Pottasche) als Backpulver und Magnesiumnitrat als Gartendünger verwendet.

Damit ist die Überlegenheit der Salzlösungen evident. Die Methode ist für Sammlungen jeglicher Größe anwendbar. Viele Vorträge auf einschlägigen Konferenzen und Fachartikel zu den Projektergebnissen sollen der Methode zur internationalen breiten Anwendung verhelfen. Die geplanten Workshops zur Do-it-yourself Implementierung in Museen und ein überarbeiteter Leitfaden können dabei Hilfestellung geben. Die Teilnehmer des internationalen Ringversuchs werden dabei als Multiplikatoren ihre eigenen Erfahrungen in die Fachwelt einbringen. Über das Projektende hinaus stehen die beteiligten Restaurator:innen Dipl.-Rest. Heiner Grieb und Katja F. Siebel M.A. zur Beratung zur Verfügung. Das Konzept der Studio-Ausstellung steht interessierten Häusern zu Adaption mit eigenen Korrosions- und Vitrinenbeispielen zur Verfügung.

Die Forschungsergebnisse können direkt in die museale Praxis umgesetzt werden und so die Umweltauswirkungen der Klimatisierung von Vitrinen deutlich reduzieren. Damit konnte das Projektziel (besseres Vitrinenklima mit weniger Aufwand) vollinhaltlich erreicht werden.

III Literaturangaben

- Arendes, D., H. Lensch, J. Amann, A. Schütze & T. Baur. 2021. P13.1 - Modular design of a gas mixing apparatus for complex trace gas mixtures. 15. *Dresdner Sensor-Symposium 2021*, 326–331.
doi: 10.5162/15DSS2021/P13.1.
- Astrup E.E. & K.E.H. Stub. 1990. Saturated salt solutions for humidity control of showcases: conditions for a successful system. In: Grimstad K, editor. ICOM Committee for Conservation 9th triennial meeting: Dresden, 26-31 August 1990: preprints. Paris: ICOM-CC. 1990. p. 577-82.
Download: <https://www.icom-cc-publications-online.org/> (30 Jan. 2025).
- Bastuck, M., T. Baur, M. Richter, B. Mull, A. Schütze & T. Sauerwald. 2018. Comparison of ppb-level gas measurements with a metal-oxide semiconductor gas sensor in two independent laboratories. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **273**, 1037–1046. doi: 10.1016/J.SNB.2018.06.097.
- Baur, T., A. Schütze. & T. Sauerwald. 2015. Optimierung des temperaturzyklischen Betriebs von Halbleitergassensoren, *Technisches Messen*, **82**(4),187–195. doi: 10.1515/TEME-2014-0007.
- Baur, T., C. Schultealbert, A. Schütze & T. Sauerwald. 2018c. Quantifizierung von Aceton mit MOS Sensoren für die Atemgasanalyse. In Sensoren und Messsysteme. 19. *ITG/GMA-Fachtagung 26.-27.6.2018, Nürnberg*. Berlin: VDE
Download: <https://www.vde-verlag.de/proceedings-de/454683135.html> (30. Jan. 2025)
- Baur, T., M. Bastuck, C. Schultealbert, T. Sauerwald & A. Schütze. 2020. Random gas mixtures for efficient gas sensor calibration. *Journal of Sensors and Sensor Systems* **9**(2), 411–424.
doi: 10.5194/JSSS-9-411-2020.
- Baur, T., J. Amann, C. Schultealbert & A. Schütze. 2021. Field Study of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors in Temp. Cycled Operation for Selective VOC Monitoring in Indoor Air. *Atmosphere* **2021**, **12**(5), 647.
doi: 10.3390/ATMOS12050647.
- Bur, C., M. Bastuck, A.L. Spetz, M. Andersson & A. Schütze. 2014. Selectivity enhancement of SiC-FET gas sensors by combining temperature and gate bias cycled operation using multivariate statistics, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, **193**, 931-940.
doi: 10.1016/j.snb.2013.12.030.
- Bur, C., M. Bastuck, D. Puglisi, A. Schütze, A.L. Spetz & M. Andersson. 2015. Discrimination and quantification of volatile organic compounds in the ppb-range with gas sensitive SiC-FETs using multivariate statistics. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, **214**, 225-233.
doi: 10.1016/j.snb.2015.03.016.
- Eggert, G. 2022. Saturated salt solutions in showcases: humidity control and pollutant absorption. *Heritage Science*, **10**:54.
doi: 10.1186/s40494-022-00689-3.
- Eggert, G., & A. Fischer. 2020. Glas-induzierte Metallkorrosion auf Museums-Exponaten (GIMME) – Ein Leitfaden für die restauratorische Praxis. *Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut* 2/2020, 105-122.
- Fuchs, C., H. Lensch, O. Brieger, T. Baur, C. Bur & A. Schütze. 2022. Concept and realization of a modular and versatile platform for metal oxide semiconductor gas sensors: A Versatile Platform to Measure Analog and Digital Gas Sensors. *Technisches Messen*, **89**(12), 859-874, 2022.
doi: 10.1515/teme-2022-0046
- Helwig, N., M. Schüler, C. Bur, A. Schütze & T. Sauerwald. 2014. Gas mixing apparatus for automated gas sensor characterization. *Measurement Science and Technology* **25**(5):055903.
doi: 10.1088/0957-0233/25/5/055903.

- Jo, S.-H., K.-H. Kim, Y.-H. Kim, M.-H. Lee, J.-H. Ahn, J.E. Szulejko, J.R. Sohn, C.E.-Y. Ryu, A.Y.-H. Kim. 2013. Study of odor from boiled eggs over time using gas chromatography. *Microchemical Journal*, 110, 517-529. doi: 10.1016/j.microc.2013.05.011.
- Leidinger, M., C. Schultealbert, J. Neu, A. Schütze & T. Sauerwald. 2017. Characterization and calibration of gas sensor systems at ppb level—a versatile test gas generation system. *Measurement Science and Technology*, **29**(1):015901. doi: 10.1088/1361-6501/AA91DA.
- Mazur, N., H. Huinink, H. Fischer, O. Adan. 2022. Impact of Atmospheric CO₂ on Thermochemical Heat Storage Capabilities of K₂CO₃, *Energy & Fuels* 2022, **36**(23), 14464-14475. doi:10.1021/acs.energyfuels.2c02886
- McGath, M., B. McCarthy & J. Bosworth. 2014. Environmental Monitoring of Volatile Organic Compounds Using Silica Gel, Zeolite and Activated Charcoal. In *Materials Issues in Art and Archaeology X*, Symposium held December 1-6, 2013, Boston. Cambridge: University Press, 51-72. doi: 10.1557/opl.2014.812.
- Mull, B., T. Sauerwald, C. Schultealbert, W. Horn, D. Brödner & M. Richter. 2017. Reproducibly emitting reference materials for volatile and semi-volatile organic compounds —using finite element modeling for emission predictions. *Air Quality, Atmosphere and Health*, **10**(10), 1237–1246. doi: 10.1007/S11869-017-0508-6/FIGURES/8.
- Piechota, D., & J.D. Piechota, 2024. Thirty Years of Sustainable Control of Relative Humidity. *WAAC Newsletter*, **46**(1), 9-19.
- Robin, Y., J. Amann, T. Baar, P. Goodarzi, C. Schultealbert, T. Schneider & A. Schütze. 2021. High-Performance VOC Quantification for IAQ Monitoring Using Advanced Sensor Systems and Deep Learning. *Atmosphere*, **12**(11), 1487. doi:10.3390/ATMOS12111487.
- Sauerwald, T., T. Baur, M. Leidinger, W. Reimringer, L. Spinelle, M. Gerboles, G. Kok, & A. Schütze. 2018. Highly sensitive benzene detection with metal oxide semiconductor gas sensors – An inter-laboratory comparison. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, **7**(1), 235–243. doi: 10.5194/JSSS-7-235-2018.
- Schieweck, A. 2020. Adsorbent media for the sustainable removal of organic air pollutants from museum display cases. *Heritage Science*, **8**:12. doi: 10.1186/s40494-020-0357-8
- Schneider, T., N. Helwig, N. & A. Schütze. 2017. Automatic feature extraction and selection for classification of cyclical time series data. *Technisches Messen*, **84**(3), 198–206. doi: 10.1515/TEME-2016-0072.
- Schultealbert, C., T. Baur, A. Schütze, S. Böttcher & T. Sauerwald. 2017. A novel approach towards calibrated measurement of trace gases using metal oxide semiconductor sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **239**, 390–396. doi: 10.1016/J.SNB.2016.08.002.
- Schütze, A., T. Baur, M. Leidinger, W. Reimringer, R. Jung, T. Conrad & T. Sauerwald. 2017. Highly Sensitive and Selective VOC Sensor Systems Based on Semiconductor Gas Sensors: How to? *Environments*, **4**(1):20. doi:10.3390/ENVIRONMENTS4010020.
- Schütze, A., & T. Sauerwald. 2020. Dynamic operation of semi-conductor sensors, in: R. Jaaniso and Ooi Kiang Tan (eds.): *Semiconductor Gas Sensors*, 2nd ed. Cambridge (UK): Woodhead Publishing, 385-412. doi: 10.1016/B978-0-08-102559-8.00012-4,

Sharma, D., K. Schmidt-Ott, U. Rothenhäusler, E. Hildebrand, S. George, E. Joseph & T. Lombardo. 2022. Multi-Modal Analysis of Transparent Glass to Detect Early Signs of Volatile Organic Compounds-Induced Corrosion Due to Contaminated Silica Gel." In: Recent Advances in Glass and Ceramics Conservation, R. Gridley & V. Schussler (eds.). Paris: ICOM, 195-204.

Download: <https://www.icom-cc-publications-online.org/5842> (30. Jan. 2025)

Sögütöglü, L.-C., F. Birkelbach, A. Werner, H. Fischer, H. Huinink, O. Adan. 2021. Hydration of salts as a two-step process: Water adsorption and hydrate formation. *Thermochimica Acta*, Vol **695**.
doi.org/10.1016/j.tca.2020.178819.

Download: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040603120307346> (29. Nov. 2024).

IV Abbildungen, Tabellen und Diagramme, Abkürzungen

IV.1 Abbildungs-, Tabellen- und Diagrammverzeichnis

Abbildung	Bildunterschrift	Seite
Abb. 1:	Schematischer Messaufbau zur qualitativen Absorptionsbestimmung	11
Abb. 2:	Temperaturzyklus des SGP40 mit einer Dauer von 30 s; gezeigt sind zwei Zyklen. Rot markiert: Quasistatischer Punkt bei der 16,5 s jedes Zyklus, entsprechend 250 °C.	12
Abb. 3:	Verlauf der Sensorresponse nach Injektion	12
Abb. 4:	Schematische Darstellung des Messaufbaus mit GMA	14
Abb. 5:	Temperaturzyklus der verwendeten MOS-Gassensoren	15
Abb. 6:	Dynamische Sensorreaktion des SGP40, Schicht 2 im TCO	15
Abb. 7:	Gestrichelt schwarz/rot: Setpointkonzentrationen der Gasmischanlage. Schwarz: Modellausgabe für Ameisensäure der Trainingsdaten. Rot: Modellausgabe der Testdaten bei verschiedenen Ameisensäurekonzentrationen in Anwesenheit von gesättigten Salzlösungen.	16
Abb. 8:	Schematischer Aufbau für die Untersuchung der Absorption von Schadstoffen in Vitrinen	19
Abb. 9:	Stunden nach CO ₂ und Formaldehyd-Freisetzung in einer Referenz, einer mit Magnesiumnitrat- und einer mit Magnesiumchlorid-bestückten Vitrine. CO ₂ Messungen mittels SCD41 und Formaldehydmessungen mittels SFA30.	20
Abb. 10:	Links eine Vitrine mit der Klimatisierungskammer unter dem Ausstellraum des Kulturguts. Rechts Simulation der Kopplung von Klimatisierungsraum zum Ausstellraum. Der Schlitz, der die beiden Räume verbindet, ist entsprechend zur vorliegenden Vitrine mit verschiedenen Öffnungen simuliert worden. Die Farbskala zeigt den Luftfeuchtwert (25 % RH = 0.25).	22
Abb. 11:	Ergebnis der Simulation für eine schematische Vitrine von links nach rechts in 1/3/5 Tagen. Über den Farbverlauf kann die relative Luftfeuchte ermittelt werden (25 % RH = 0.25).	22
Abb. 12:	Überprüfung der Abweichungen (Messungenauigkeit) der verwendeten Datenlogger	24
Abb. 13:	Einbauvitrine (2009) der hist. Glassammlung (NOK_40-49) mit separat zugänglichem Klimafach und Position (Carl-Eduard-Bau) innerhalb der Veste Coburg.	26
Abb. 14:	Multidisplayvitrine (KOK_1-2) in der Altdeutschen Sammlung mit überwiegend Kompositobjekten, separat zugänglichen Klimafächern. Position (Steinerne Kemenate) innerhalb der Veste Coburg.	27

Abb. 15:	Freistehende Vitrinen (1960er Jahre) in der Sammlung der historischen Jagdwaffen. Die GSL befinden sich unterhalb der grauen Sockel. Position (Herzoginbau) innerhalb der Veste Coburg.	28
Abb. 16:	Freistehende Vitrine (1960er Jahre) und historische Vitrine (1880-1920) mit offen Behältern mit GSL im Depotbereich der Veste Coburg.	29
Abb. 17:	Diagramm/Klimakurve der von KuSa_HH.III,3_FOKGL_1 über 12 Monate. Detailansicht (unten) belegt signifikante Stabilisieren der RH nach Einsatz GKCL.	34
Abb. 18a-b:	Diagramm/Klimakurve der von KuSa_HH.III,3_FOKGL_1 über 12 Monate. Detailansicht (unten) belegt signifikante Stabilisieren der RH nach Einsatz GKCL.	36
Abb. 19:	(links) Zwei Vitrine bestückt mit Schwefel, Silberobjekten und Kupfercoupons, eine davon zusätzlich mit GKCL. (rechts) Demonstrationsversuch zur Schadstoffabsorption durch GKCL, Universität Hamburg.	38

Tabelle	Tabellenüberschrift	Seite
Tabelle 1:	Zusammenfassung der T_{63} -Werte aus Injektionsmessungen.	13
Tabelle 2:	Zusammenfassung der Absorptionsbeurteilung.	17
Tabelle 3:	Weitere Abkürzungen von Dateinamen.	24
Tabelle 4:	Messparameter der verwendeten Datenlogger.	25
Tabelle 5:	Min. Erreichter RH-Wert im Exsikkator.	25
Tabelle 6:	Übersicht der Parameter und eine Auswahl von Messdaten der Testreihe KuSa_CEB.I,3_NOK_40-49. Position der Datenlogger innerhalb des Exponatraums: L=links, R=rechts, O=oben, U=unten, F=Fensterseite, M=Mitte.	30
Tabelle 7:	Übersicht der Parameter und eine Auswahl von Messdaten der Testreihe KuSa_KEM.II,2_KOK_1-2.	31
Tabelle 8:	Übersicht der Parameter und eine Auswahl von Messdaten der Testreihe KuSa_HB.I,1_FO1, _8.	32
Tabelle 9:	Übersicht der Parameter und eine Auswahl von Messdaten der Testreihe KuSa_III,3_FOKGL_1, Hi_1.	33
Tabelle 10:	Modifikation von GKCL: Geschwindigkeit, bis Soll-RH von GKCL erreicht ist.	37
Tabelle 11:	Demonstrationsversuch: Einfluss von Essigsäure und Chlorwasserstoff auf Silber (Ag) und Kupfer (Cu) Demonstrationsversuch.	39
Tabelle 12:	Tabellarische Zusammenfassung der Testparameter und Hauptergebnisse (Kunstsammlungen der Veste Coburg).	85
Tabelle 13:	Liste der teilnehmenden Institutionen und Personen.	90

Diagramm	Diagrammunterschrift	Seite
Diagramm 1:	Durchgeführte Testreihen mit jew. GSL.	41
Diagramm 2:	Verwendete Vitrintypen.	42
Diagramm 3:	Standort der Testvitrinten.	42
Diagramm 4:	Anzahl der jew. Größe der Testvitrinten.	43
Diagramm 5:	Wurde die Soll-RH (43 % und 53 %) erreicht?	44
Diagramm 6:	Anzahl der jew. Abweichung zur Soll-RH (43 % und 53 %).	45
Diagramm 7:	Blieb die RH über 12 Monate konstant?	46
Diagramm 8:	War Wartung innerhalb von 12 Monaten notwendig?	46
Diagramm 9:	Anzahl der Wartungen bei dem Salz oder Flüssigkeit nachgefüllt werden musste.	47
Diagramm 10:	21543834_K2CO3_KuSa_CEB.I,3_NOK_Raum.	66
Diagramm 11:	21543861_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_40_bottom_13M.	66
Diagramm 12:	21632781_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_40_top_13M.	67
Diagramm 13:	21632934_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_41_bottom_13M.	67
Diagramm 14:	21632780_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_41_top_13M.	68
Diagramm 15:	21540906_PROSORB35_KuSa_CEB.I3_NOK_42_top_13M.	68
Diagramm 16:	21543850_MgCl2_KuSa_CEB.I3_NOK_43_top_13M.	69
Diagramm 17:	21543847_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_44_bottom_13M.	69
Diagramm 18:	21543841_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_44_top_13M.	70
Diagramm 19:	21543849_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_45_bottom_13M.	70
Diagramm 20:	21543816_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_46_top_13M.	71
Diagramm 21:	21543837_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_46_bottom_13M.	71
Diagramm 22:	21543856_MgCl2_KuSa_CEB.I3_NOK_47_top_13M.	72
Diagramm 23:	21540915_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_48_bottom_13M.	72
Diagramm 24:	21543817_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_48_top_13M.	73
Diagramm 25:	21543851_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_49_bottom_13M.	73
Diagramm 26:	21543836_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_49_top_13M.	74
Diagramm 27:	21543836_K2CO3_KuSa_CEB.I3_NOK_49_top_13M	76
Diagramm 28:	21543838_Mg(NO3)2_KuSa_KEM.II2_KOK_1_bottom_13M.	76
Diagramm 29:	21632813_Mg(NO3)2_KuSa_KEM.II2_KOK_2_bottom_13M.	77
Diagramm 30:	HB.I,1_Jagdwaffen_Raum_12M.	79
Diagramm 31:	21543833_Mg(NO3)2_KuSa_HBI1_FO_1_bottom_12M.	79
Diagramm 32:	21543830_Mg(NO3)2_KuSa_HBI1_FO_1_top_12M.	80
Diagramm 33:	21543835_Mg(NO3)2_KuSa_HBI1_FO_8_bottom_12M.	80
Diagramm 34:	21632809_Mg(NO3)2_KuSa_HBI1_FO_8_top_12M.	81
Diagramm 35:	21543832_K2CO3_KuSa_HH.III,3_FOKGI_1_11M.	83
Diagramm 36:	1000157_K2CO3_KuSa_HH.III,3_Hi_1_bottom.	83
Diagramm 37:	1000158_K2CO3_KuSa_HH.III,3_Hi_1_top.	84

IV.2 Abkürzungen

aw	Wasseraktivität
DRH	relative Deliqueszenzfeuchte (deliquescence relative humidity)
FEM	Finite-Elemente-Methode
GC/MS	Gaschromatographie/Massenspektrometrie
GC-PID	Gaschromatographie mit Photoionisations-Detektor
GKC	gesättigte Kaliumcarbonat-Lösung
GMA	Gasmischanlage
GMNL	gesättigte Magnesiumnitrat-Lösung
GSL	gesättigte Salzlösung
LMT	Lehrstuhl für Messtechnik
MFM	Massenfluss-Messgerät
ppb	Teile pro Milliarde (10^{-9}) (parts per billion)
ppm	Teile pro Million (10^{-6}) (parts per million)
MOS	Metalloxid-Halbleiter (metal oxide semiconductor)
RH	relative Luftfeuchte
T	Temperatur
TCO	Temperatur-zyklischer Betrieb (temperature cycled operation)
VOC	flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds)

Weitere Abkürzungen zur Platzierung von Messtellen auf der Veste Coburg siehe S. 35.

V Anhang

V.1 Diagramme RH/T: Versuchsreihen Veste Coburg

V.1.1 Historische Glassammlung (GKCL)

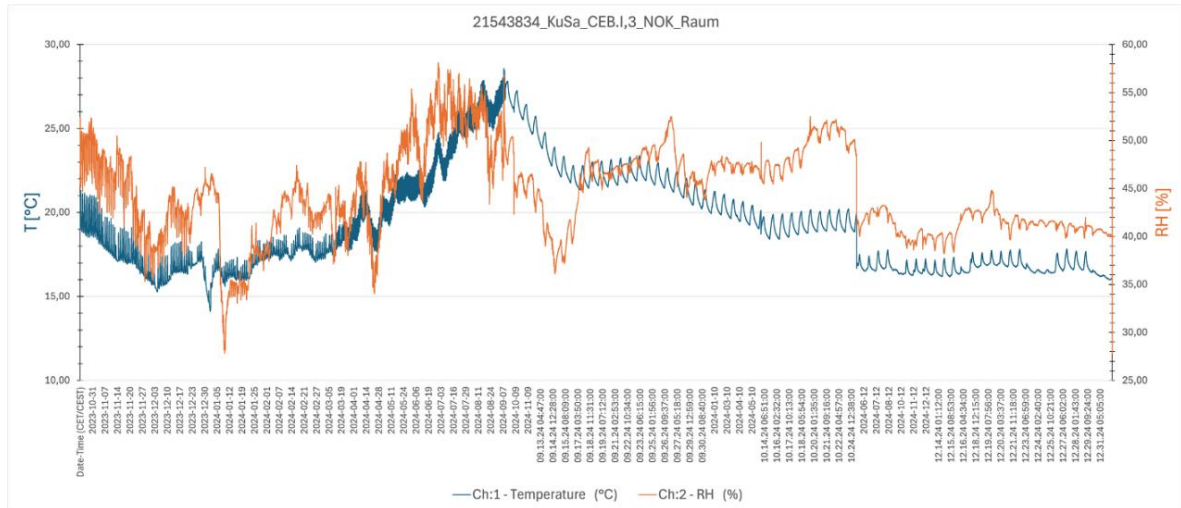


Diagramm 10: 21543834_K2CO3_KuSa_CEB.I,3_NOK_Raum.



Diagramm 11: 21543861_K2CO3_KuSa_CEB.I,3_NOK_40_bottom_13M.

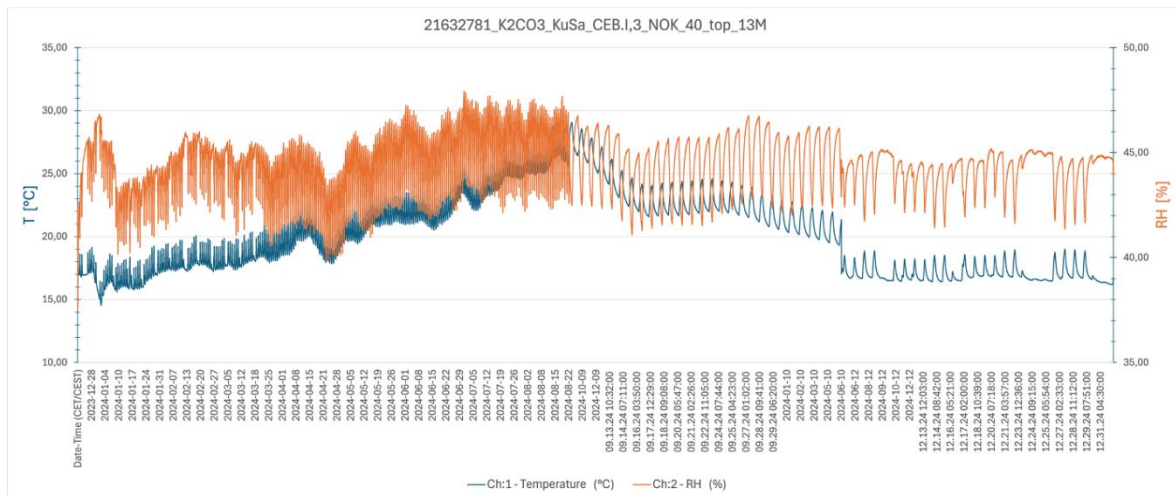


Diagramm 12: 21632781_K2CO3_KuSa_CEBI3_NOK_40_top_13M.

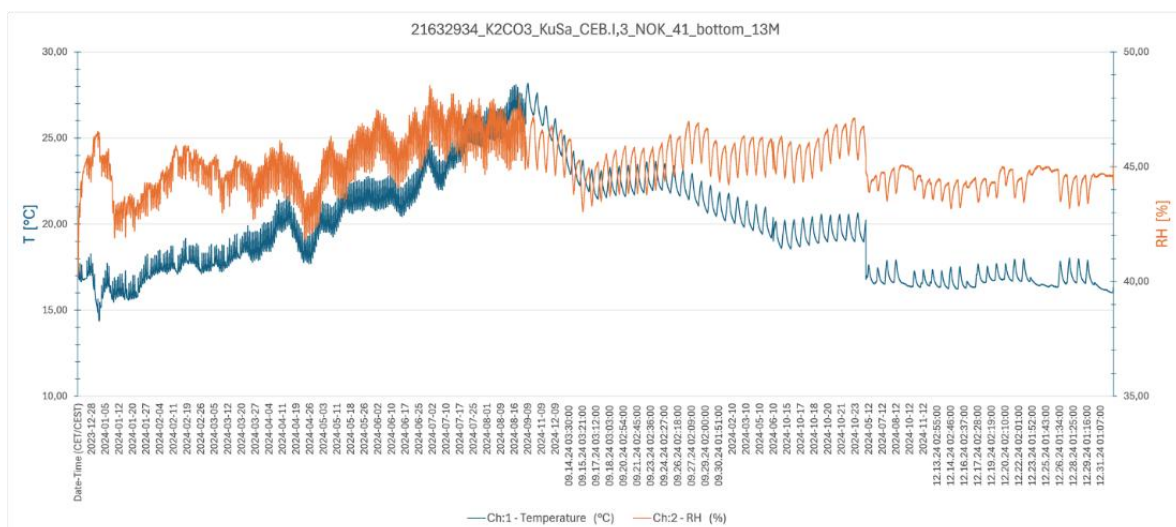


Diagramm 13: 21632934_K2CO3_KuSa_CEBI3_NOK_41_bottom_13M.

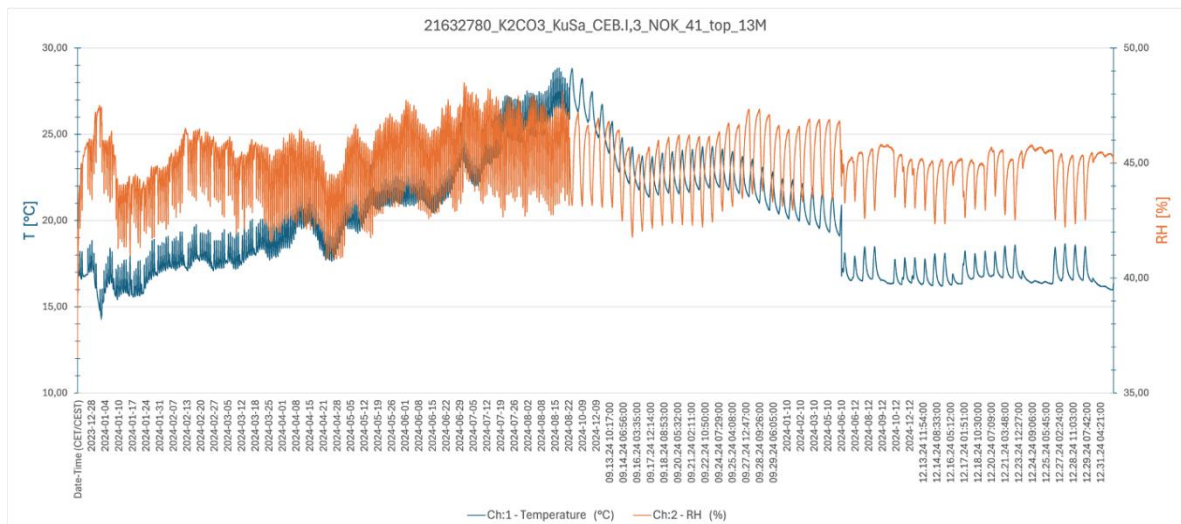


Diagramm 14: 21632780_K2CO3_KuSa_CEB.I,3_NOK_41_top_13M.

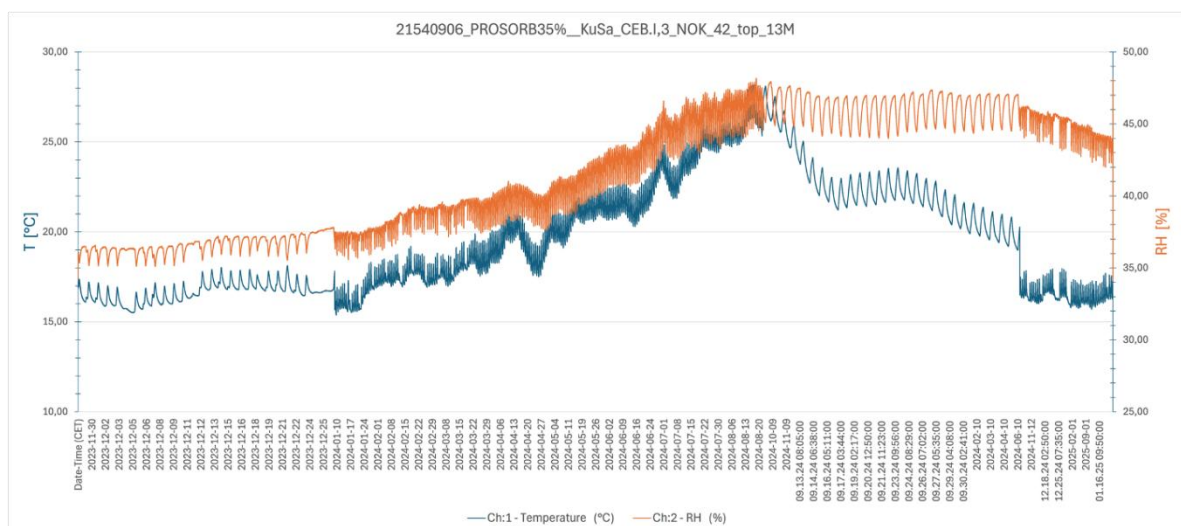


Diagramm 15: 21540906_PROSORB35_KuSa_CEB.I,3_NOK_42_top_13M.

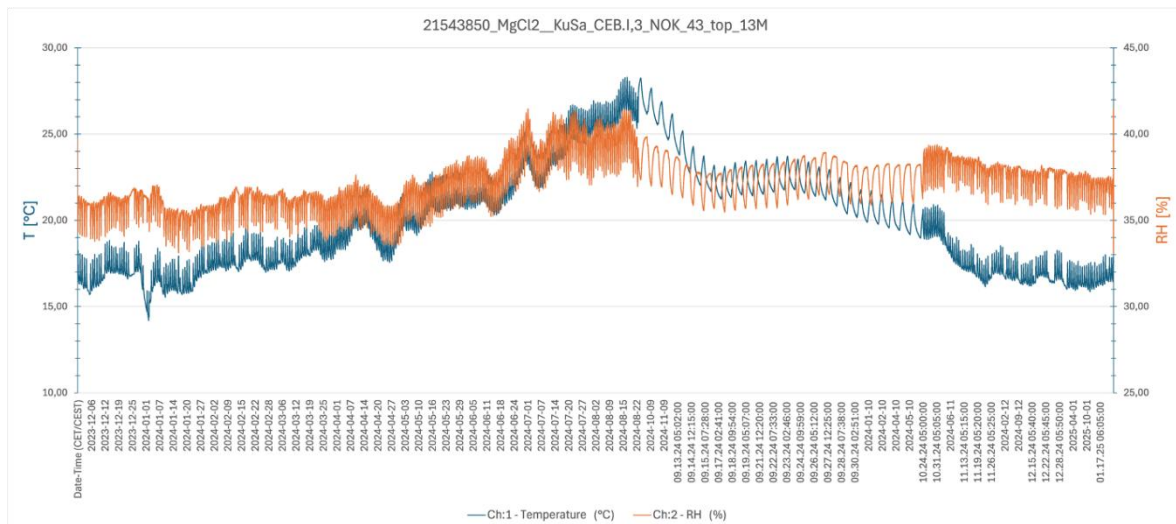


Diagramm 16: 21543850_MgCl2_KuSa_CEB.I,3_NOK_43_top_13M.

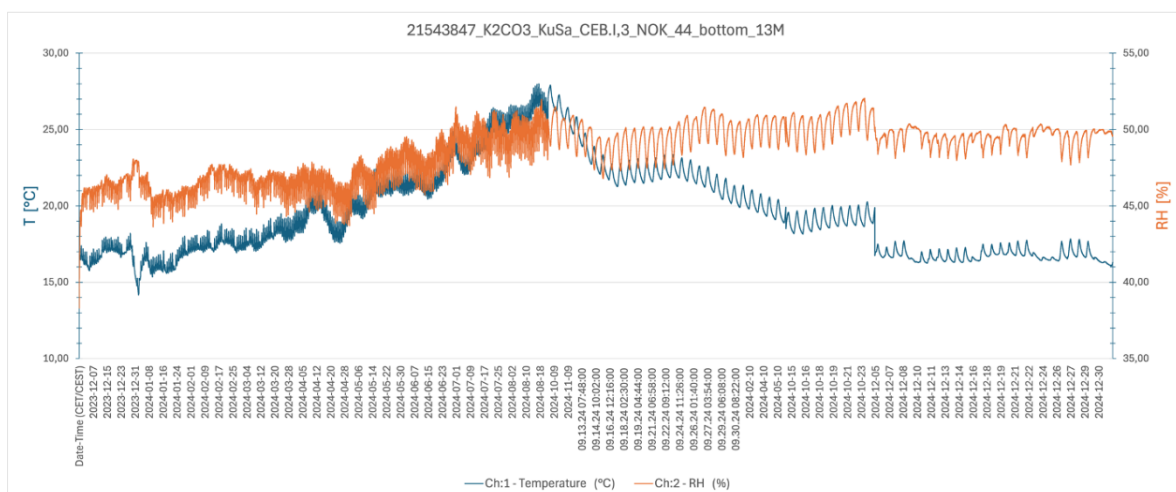


Diagramm 17: 21543847_K2CO3_KuSa_CEB.I,3_NOK_44_bottom_13M.

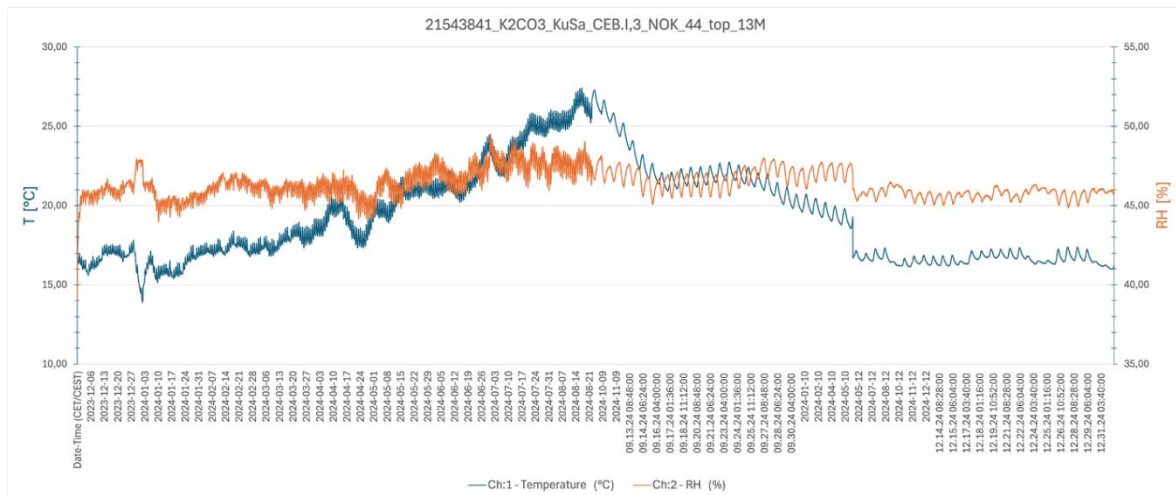


Diagramm 18: 21543841_K2CO3_KuSa_CEB.I,3_NOK_44_top_13M.

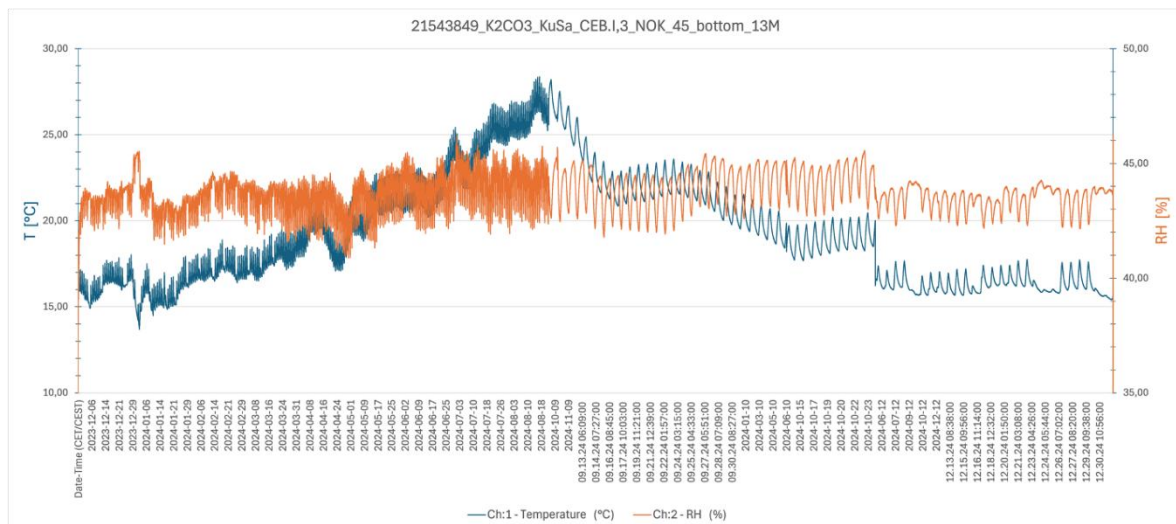


Diagramm 19: 21543849_K2CO3_KuSa_CEB.I,3_NOK_45_bottom_13M.

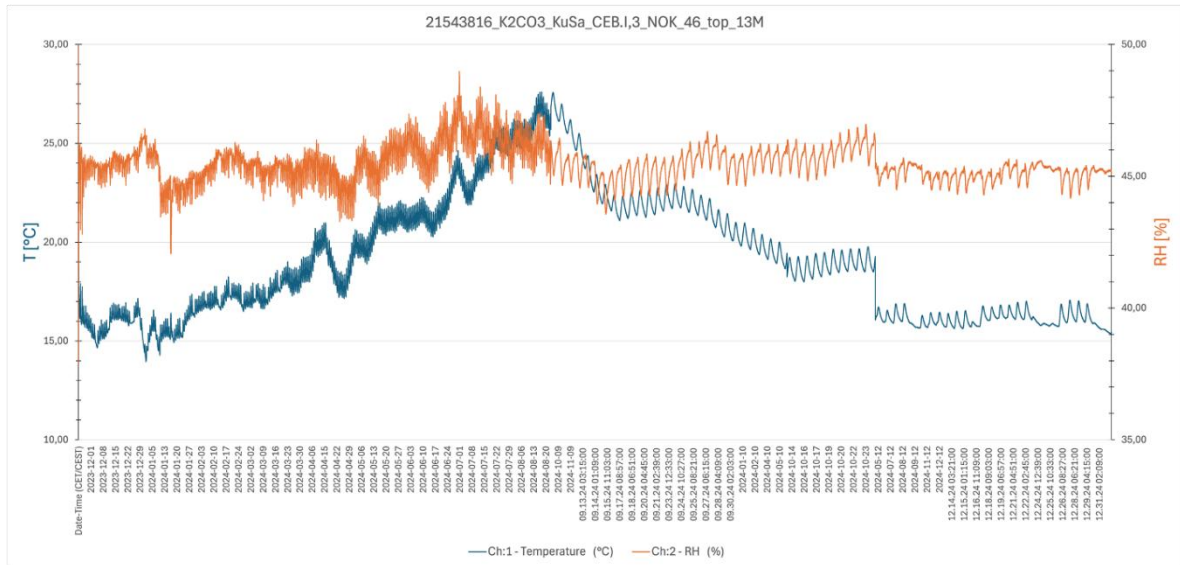


Diagramm 20: 21543816_K2CO3_KuSa_CEBI3_NOK_46_top_13M.

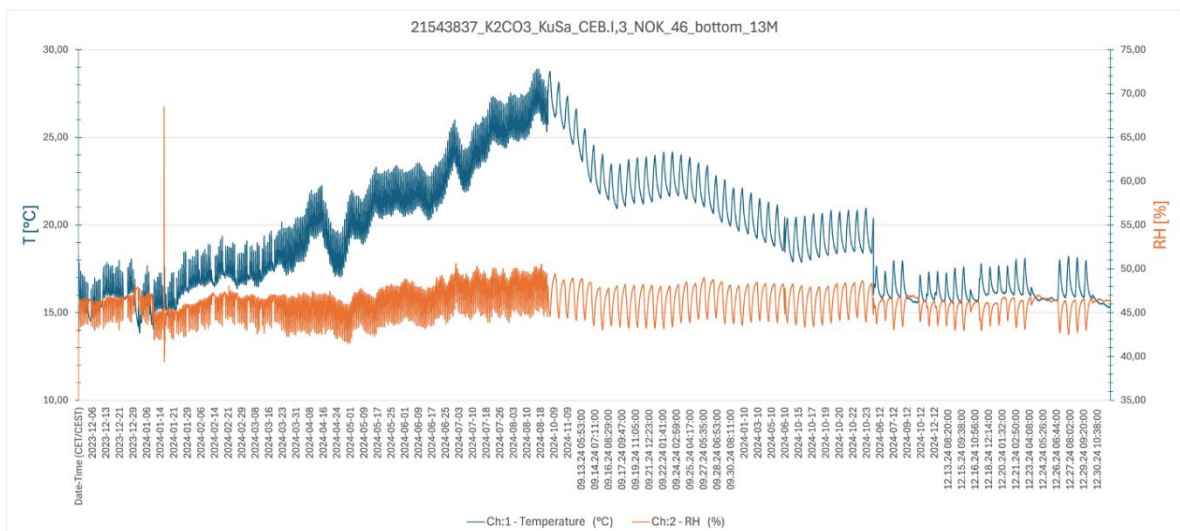


Diagramm 21: 21543837_K2CO3_KuSa_CEBI3_NOK_46_bottom_13M.21

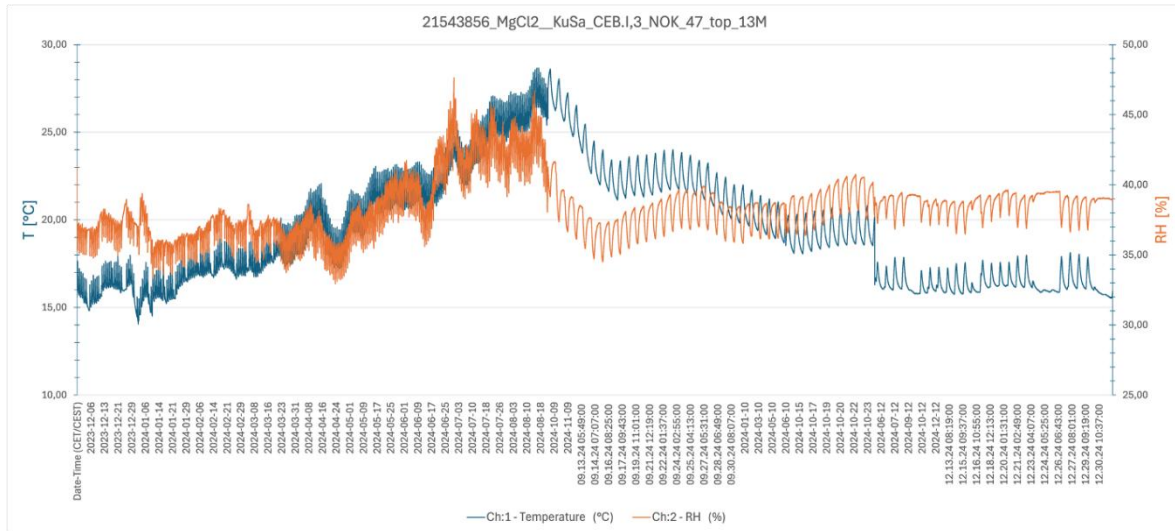


Diagramm 22: 21543856_MgCl2_KuSa_CEB.I,3_NOK_47_top_13M.

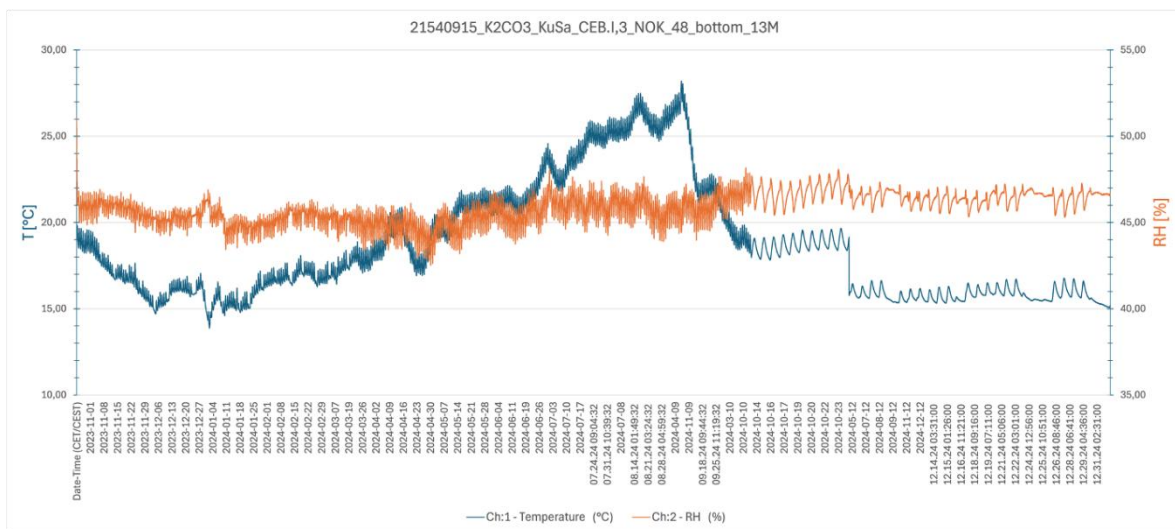


Diagramm 23: 21540915_K2CO3_KuSa_CEB.I,3_NOK_48_bottom_13M.

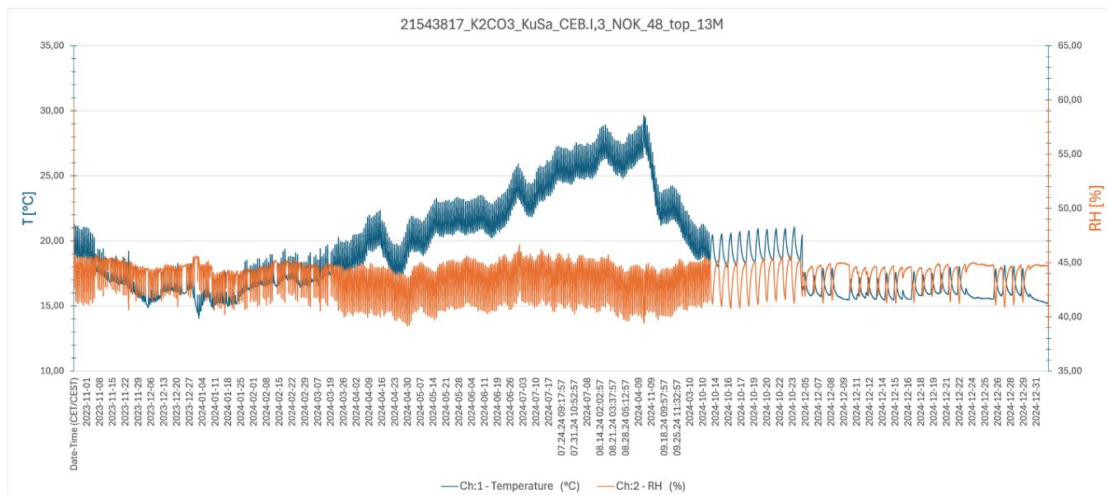


Diagramm 24: 21543817_K2CO3_KuSa_CEB.I,3_NOK_48_top_13M.



Diagramm 25: 21543851_K2CO3_KuSa_CEB.I,3_NOK_49_bottom_13M.

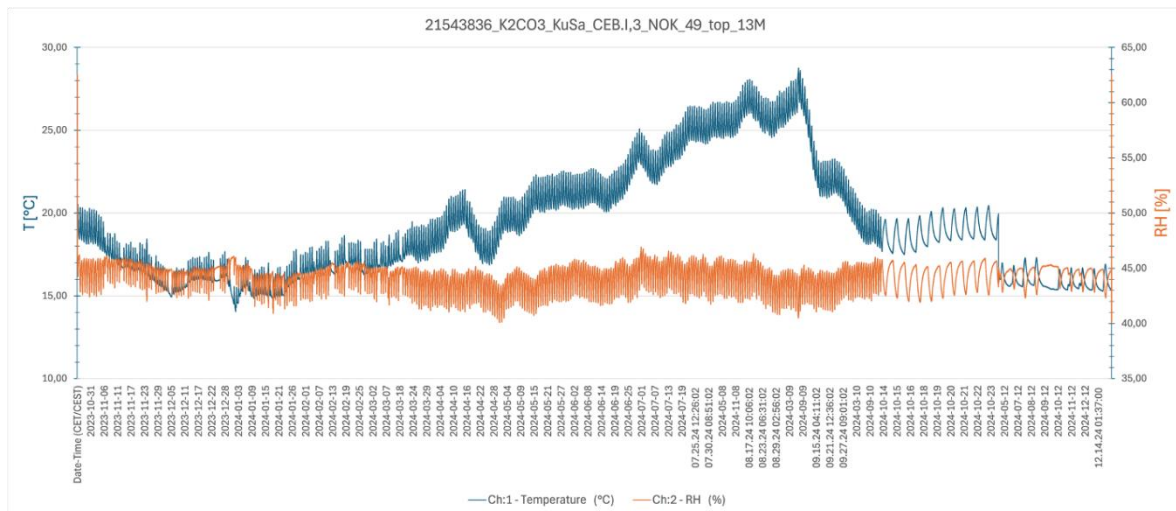


Diagramm 26: 21543836_K2CO3_KuSa_CEBI3_NOK_49_top_13M.

V.1.2 Altdeutsche Sammlung (GMNL)

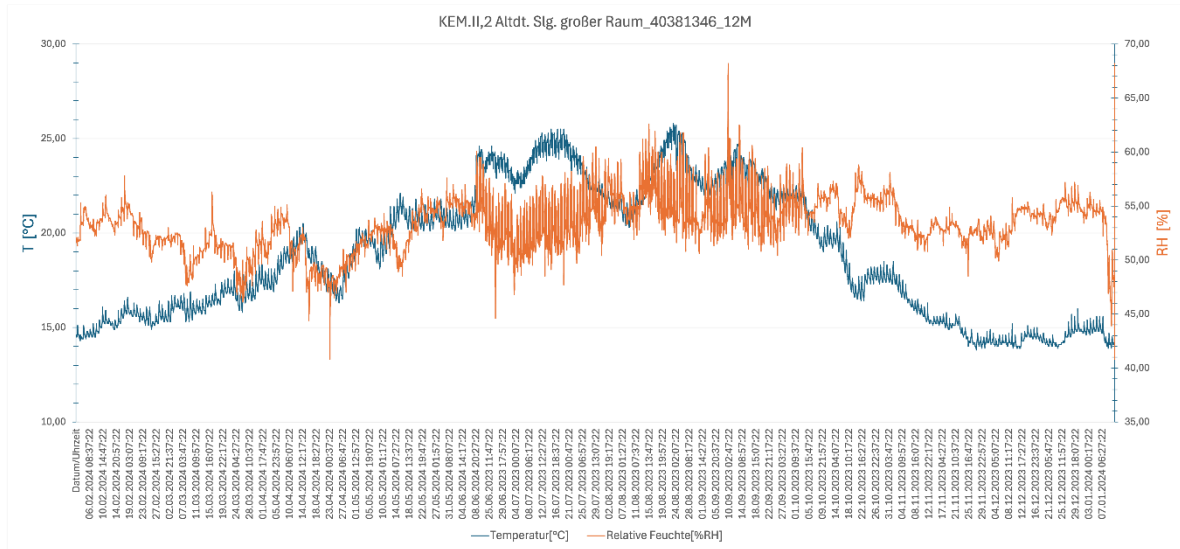


Diagramm 27: KEM.II,2 AltdtSlg_großer Raum_40381346.

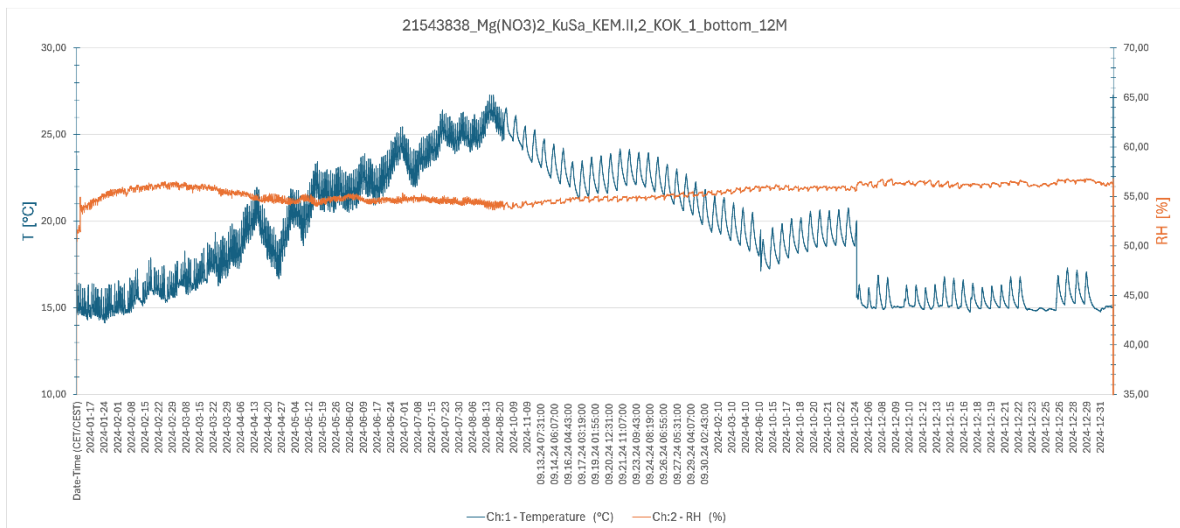


Diagramm 28: 21543838_Mg(NO3)2_KuSa_KEMII2_KOK_1_bottom_13M.

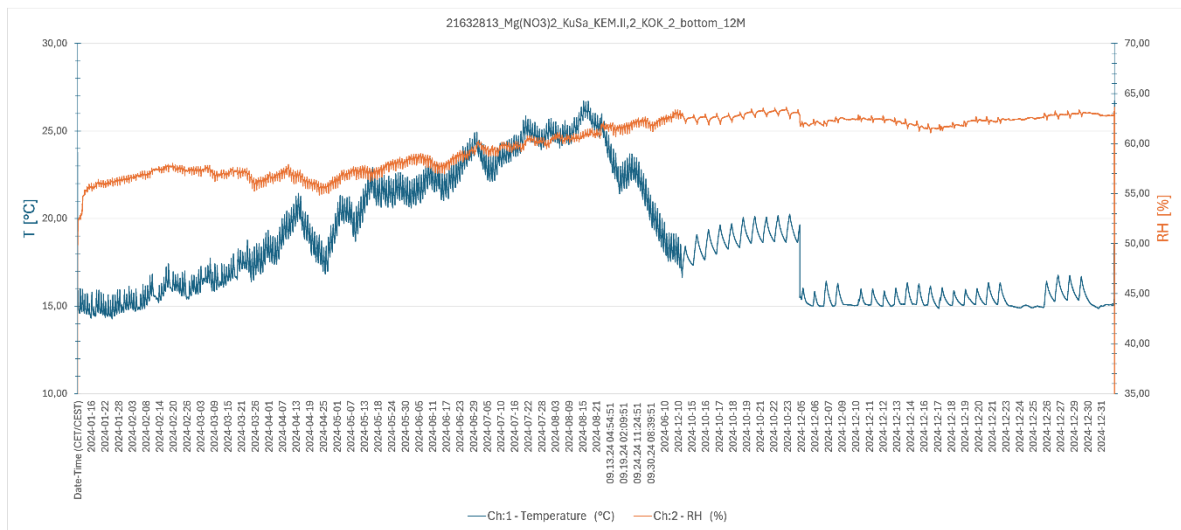


Diagramm 29: 21632813_Mg(NO3)2_KuSa_KEMII2_KOK_2_bottom_13M.

V.1.3 Historische Jagdwaffen (GMNL)

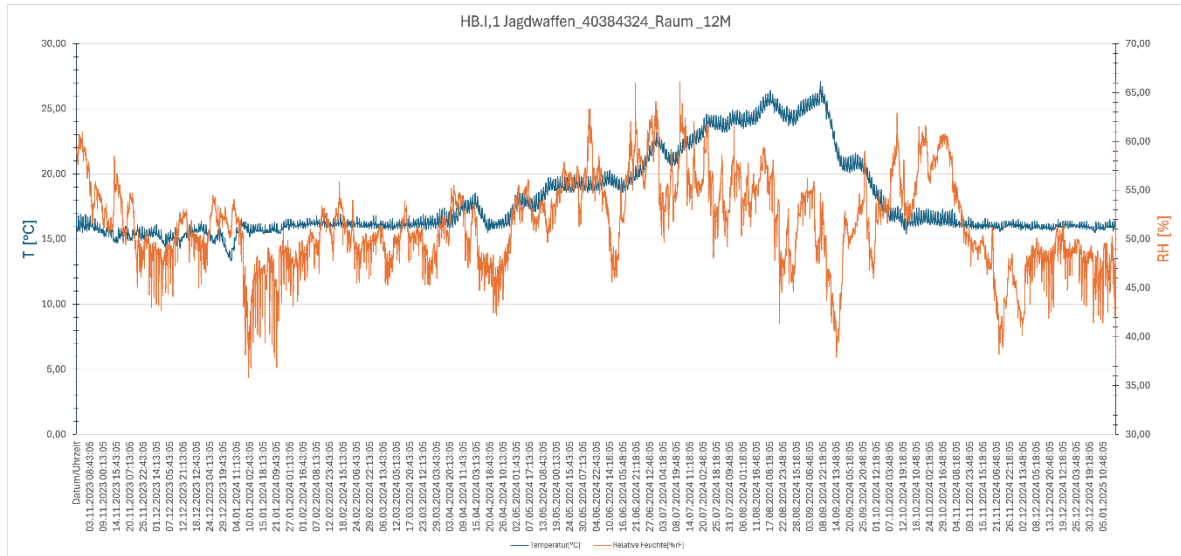


Diagramm 30: HB.I,1_Jagdwaffen_Raum_12M.

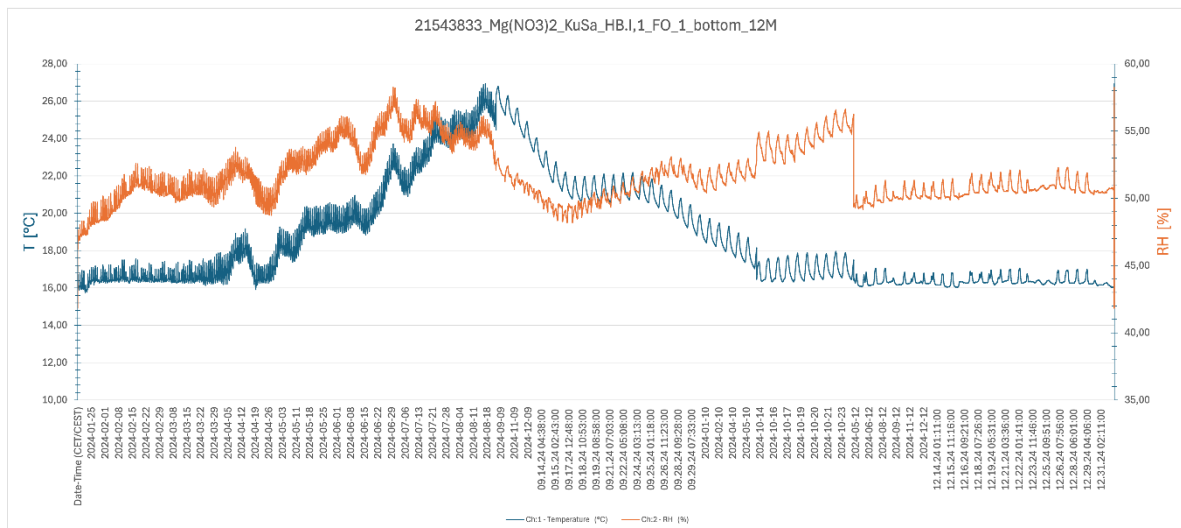


Diagramm 31: 21543833_Mg(NO3)2_KuSa_HB11_FO_1_bottom_12M.

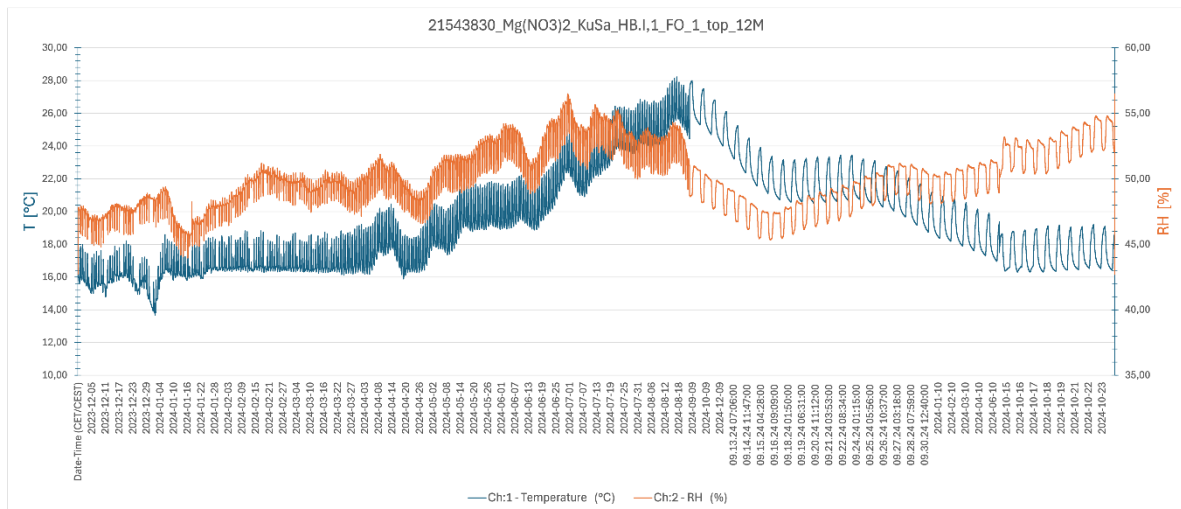


Diagramm 32: 21543830_Mg(NO3)2_KuSa_HB.I.1_FO_1_top_12M.

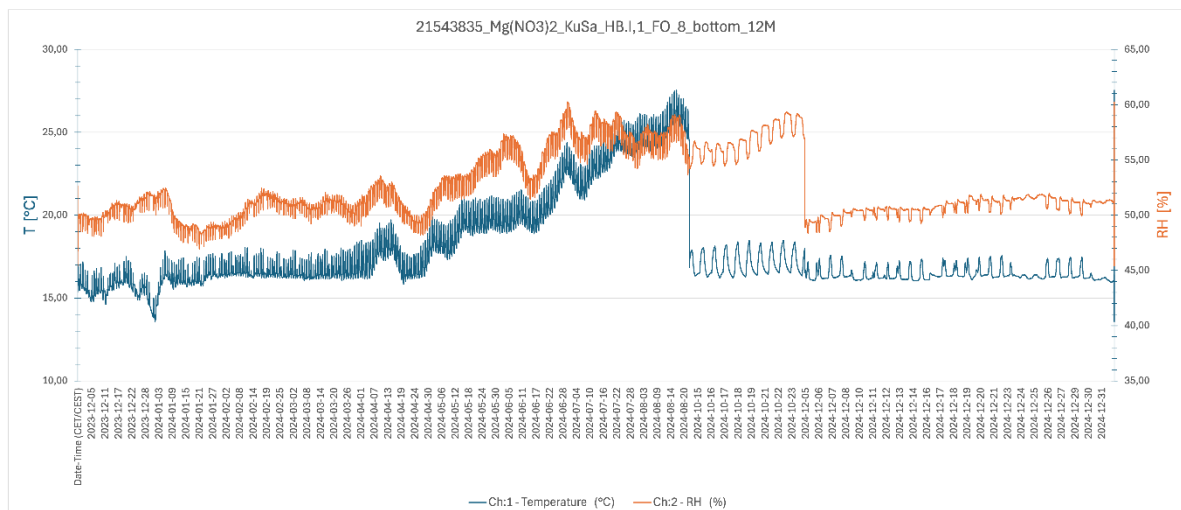


Diagramm 33: 21543835_Mg(NO3)2_KuSa_HB.I.1_FO_8_bottom_12M.

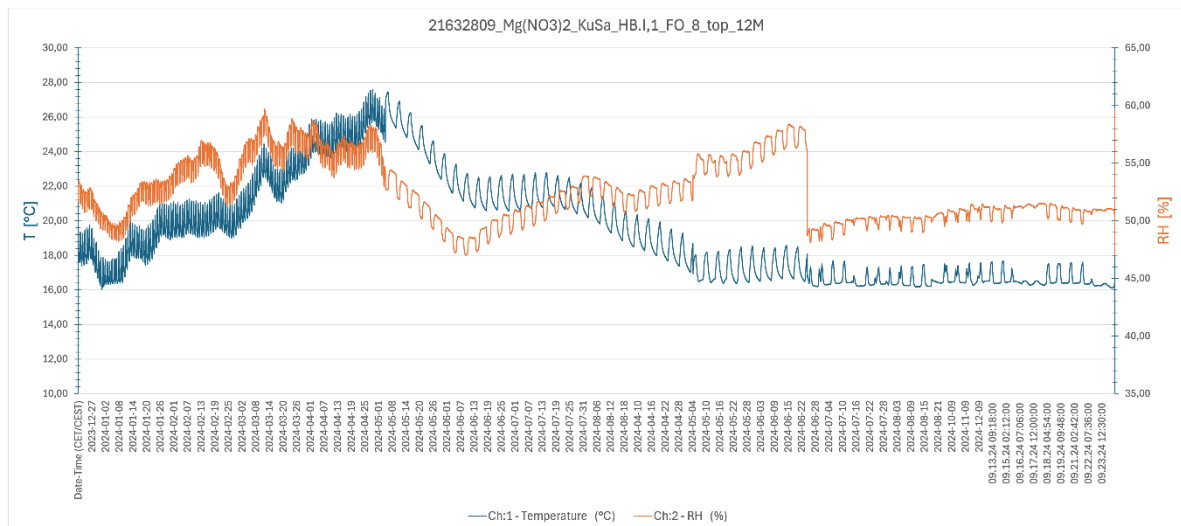


Diagramm 34: 21632809_Mg(NO3)2_KuSa_HB.I.1_FO_8_top_12M.

V.1.4 Hohes Haus/Depot (GKCL)

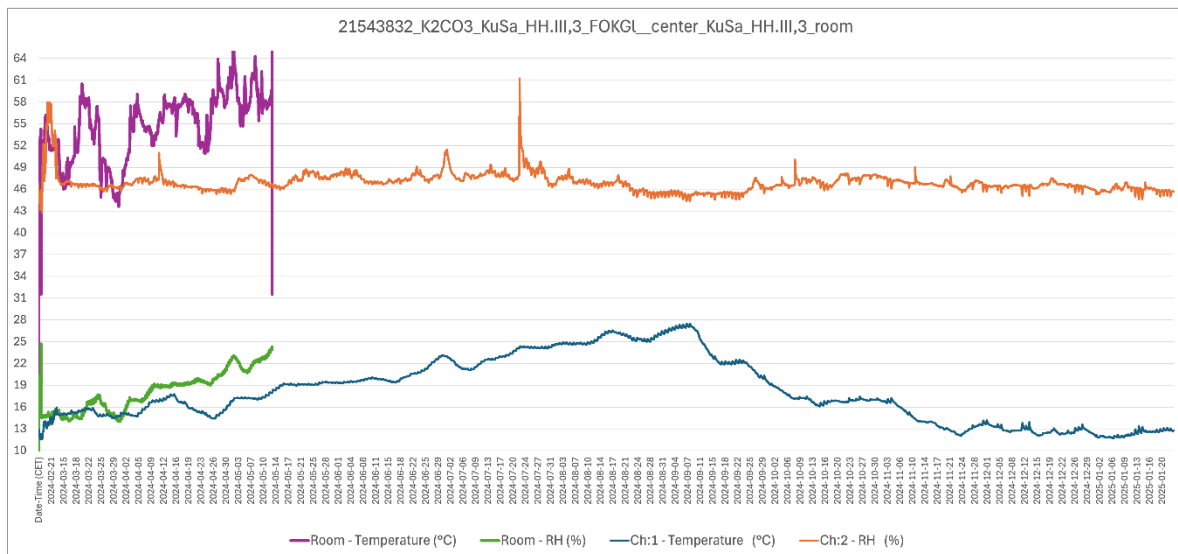


Diagramm 35: 21543832_K2CO3_KuSa_HH.III,3_FOKGL_1_11M.

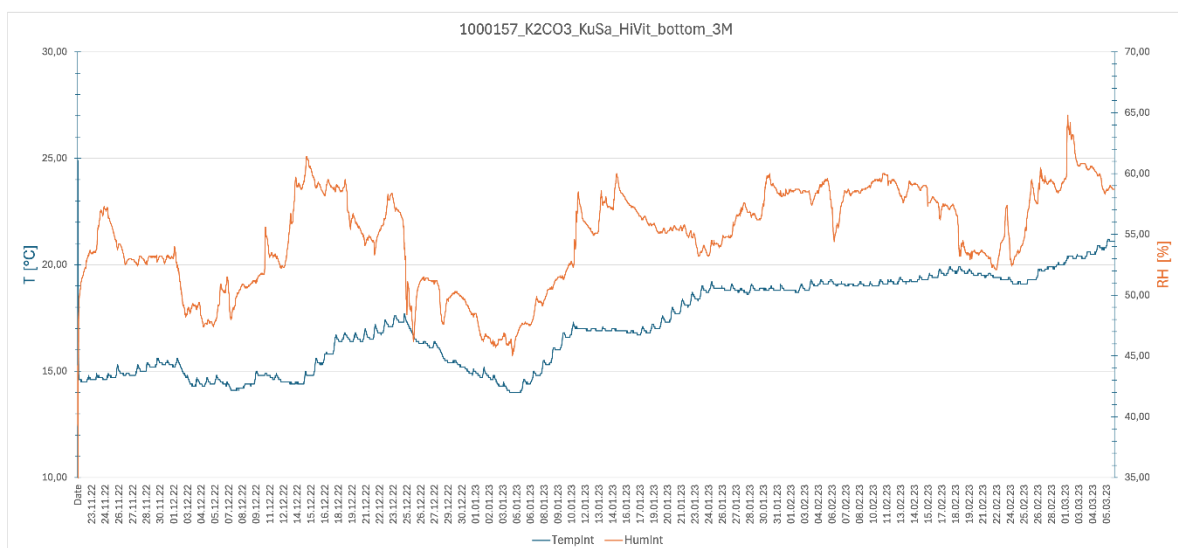


Diagramm 36: 1000157_K2CO3_KuSa_HH.III,3_Hi_1_bottom.

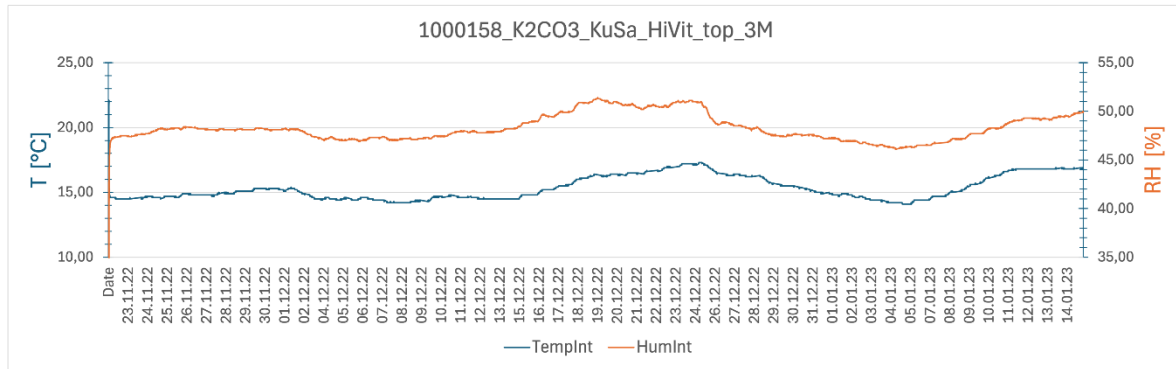


Diagramm 37: 1000158_K2CO3_KuSa_HH.III,3_Hi_1_top.

V.2 Tabellarische Zusammenfassung der Testreihen (Kunstsammlungen der Veste Coburg)

Tabelle 12: Tabellarische Zusammenfassung der Testparameter und Hauptergebnisse (Kunstsammlungen der Veste Coburg).

Vitrine		Salz			Behälter		Datenlogger			RH-Daten				
ID	Volumen (l)	Typ	Menge Salz (kg)	Menge H ₂ O (l)	Anzahl	Abweichung	ID unten	Abweichung	ID oben	Ø RH Raum	Ø RH unten	Ø RH August 2024 + Min./Max. in 24 h	Ø RH oben	Ø RH August 2024 + Min./Max. in 24 h
KuSa_CEB.I,3_NOK_40	1587	K ₂ CO ₃	5	2,5	5	46,5	21543861 R	45,2	21632781 LF	44,6 Min. 27 Max. 58,0	43,9 Min. 36,2 Max. 46,9	45,4 Min. 44,4 Max. 45,9	44,4 Min. 37,5 Max. 47,9	45,5 Min. 42,6 Max. 47,0
KuSa_CEB.I,3_NOK_41	1587	K ₂ CO ₃	5	2,5	5	44,9	21632934 L	44,9	21632780 RF	44,6 Min. 27 Max. 58,0	45,1 Min. 40,2 Max. 48,5	46,6 Min. 44,9 Max. 47,4	45,0 Min. 36,5 Max. 48,5	45,9 Min. 43,2 Max. 47,4
KuSa_CEB.I,3_NOK_42	1587	non	PRO SORB*	-	0	-	-	44,5	21540906 M	44,6 Min. 27 Max. 58,0	-	-	41,6 Max. 48,2 Min. 34,1	46,3 Min. 44,2 Max. 47,7
KuSa_CEB.I,3_NOK_43	1587	MgCl ₂ * 6 H ₂ O	6	0,8	10	-	-	45,1	21543850 M	44,6 Min. 27 Max. 58,0	-	-	37,2 Min. 33,1 Max. 41,5	39,60 Min. 36,9 Max. 40,3
KuSa_CEB.I,3_NOK_44	1587	K ₂ CO ₃	5	2,5	9	44,73	21543847 LF	44,0	21632941 R	44,6 Min. 27 Max. 58,0	48,6 Min. 38,3 Max. 52,0	49,9 Min. 48,0 Max. 50,1	46,4 Min. 39,2 Max. 49,5	47,7 Min. 46,3 Max. 48,2
KuSa_CEB.I,3_NOK_45	1587	K ₂ CO ₃	5	2,5	9	43,34	21543849 RF	44,9	21543860 L	44,6 Min. 27 Max. 58,0	43,7 Min. 32,7 Max. 46,2	44,1 Min. 42,4 Max. 45,2	47,4 Min. 32,2 Max. 52,3	48,3 Min. 44,8 Max. 51,0
KuSa_CEB.I,3_NOK_46	1587	K ₂ CO ₃	10	4,5	9	45,88	21543837 R	45,0	21543816 LF	44,6 Min. 27 Max. 58,0	45,5 Min. 37,9 Max. 52,1	46,2 Min. 44,7 Max. 46,7	46,2 Min. 34,0 Max. 68,5	47,9 Min. 44,5 Max. 49,7
KuSa_CEB.I,3_NOK_47	1587	MgCl ₂ * 6 H ₂ O	12	1,6	20	-	-	45,0	21543856 M	44,6 Min. 27 Max. 58,0	-	-	38,4 Min. 32,9 Max. 47,7	42,8 Min. 38,1 Max. 49,7
KuSa_CEB.I,3_NOK_48	1587	K ₂ CO ₃	10	4,5	10	43,85	21540915 LF	43,8	21543817 R	44,6 Min. 27 Max. 58,0	45,8 Min. 42,5 Max. 51,1	46,1 Min. 44,7 Max. 47,1	43,6 Min. 39,1 Max. 59,9	43,5 Min. 40,1 Max. 45,0
KuSa_CEB.I,3_NOK_49	1587	K ₂ CO ₃	10	4,5	10	45,12	21543851 L	44,0	21543836 RF	44,6 Min. 27 Max. 58,0	45,9 Min. 42,6 Max. 51,1	44,4 Min. 45,4 Max. 46,9	44,3 Min. 40,0 Max. 62,5	44,3 Min. 41,7 Max. 45,8
KuSa_CEB.I,3_NOK_Raum	-	non	-	-	-	-	-	44,6	21543834	44,6 Min. 27 Max. 58,0	-	-	-	52,9 Min. 43,4 Max. 53,5

KuSa_HB.I.1_FO_1	1096,2	Mg(NO ₃) ₂ * 6H ₂ O	4,4	1,75	7	43,97	21543833	43,5	21543830	51,5 Min. 35,8 Max. 66,1	51,8 Min. 41,8 Max. 58,3	54,5 Min. 52,1 Max. 54,3	50,1 Min. 42,7 Max. 56,5	52,4 Min. 49,2 Max. 52,9
KuSa_HB.I.1_FO_8	1096,2	Mg(NO ₃) ₂ * 6H ₂ O	3,1	1,75	5	45,5	21632809	44,2	21543835	51,5 Min. 35,8 Max. 66,1	52,6 Min. 47,0 Max. 59,7	56,3 Min. 52,9 Max. 56,7	52,6 Min. 45,4 Max. 60,3	57,0 Min. 53,6 Max. 57,6
KuSa_HB.I.1_FO_Raum	-	non	-	-	-	-	-	-	-	51,5 Min. 35,8 Max. 66,1	-	54,6 Min. 41,4 Max. 54,1	-	-
KuSa_KEM.II, 2_KOK_1	672,7 (2x 171,5)	Mg(NO ₃) ₂ * 6H ₂ O	6,25	2	10	45,14	21543838	-	-	53,3 Min. 40,8 Max. 68,2	-	-	55,4 Min. 28,9 Max. 56,8	54,3 Min. 53,8 Max. 54,5
KuSa_KEM.II, 2_KOK_2	416,5	Mg(NO ₃) ₂ * 6H ₂ O	3,1	1	5	45,6	21632813	-	-	53,3 Min. 40,8 Max. 68,2	-	-	60,0 Min. 30,2 Max. 63,6	60,7 Min. 60,5 Max. 61,5
KuSa_KEM.II, 2_KOK_Raum	-	non	-	-	-	-	1000180	-	-	53,3 Min. 40,8 Max. 68,2	-	-	-	55,9 Min. 52,5 Max. 59,8
KuSa_HH.III,3_FOKGL_1	1096,2	K ₂ CO ₃	3,4	1,5	6	-	-	46,4	21543832	54,8 Min. 31,5 Max. 66,2	-	-	46,9 Min. 42,8 Max. 52,2	46,9 Min. 44,1 Max. 47,2
KuSa_HH.III,3_Hi_1	1728	K ₂ CO ₃	4,5	2	8	-	1000157	-	1000158	54,8 Min. 31,5 Max. 66,2	-	-	48,3 Min. 34,6 Max. 51,4	54,8 Min. 30,0 Max. 64,8
KuSa_HH.III,3_FOKGL_Raum	-	non	-	-	-	-	-	-	1000181	54,8 Min. 31,5 Max. 66,2	-	-	-	59,2 Min. 56,4 Max. 65,3

V.3 Merkblatt für Teilnehmende Institutionen (dt./en.)

DBU-Forschungsprojekt ‚Salz in der Vitrine‘

Merkblatt für Testteilnehmer:innen

Herzlichen Dank für Ihr Interesse, sich am Test von Salzlösungen zu beteiligen! Zahlreiche Museen im In- und Ausland haben schon ihre Teilnahme zugesagt.

Der Test dient dazu, praktische Erfahrungen im Umgang mit Salzlösungen in Vitrinen zu sammeln und der Fachwelt zugänglich zu machen. Gesättigte Salzlösungen wurden in den 70er und 80er Jahren hier und dort zur Einstellung eines festen Werts der Luftfeuchte in Vitrinen genutzt. Danach wurden sie durch Silikagel-Produkte verdrängt, obwohl diese geringere Kapazität haben, öfter regeneriert werden müssen und als Schadstoffabsorber nicht verlässlich sind. Das Schweizerische Nationalmuseum hat sogar das Ausgasen korrosiver Schadstoffe aus Proben direkt aus dem Handel publiziert.

Bisher unberücksichtigt blieb das Potential von Salzlösungen, auch Luftschadstoffe in den Vitrinen zu absorbieren. Testmessungen mit Formaldehyd am WKI-Fraunhofer-Institut Braunschweig brachten hervorragende Ergebnisse. Im DBU-Projekt ‚Salz in der Vitrine‘ wird dies jetzt für andere relevante korrosive Luftschadstoffe am Lehrstuhl für Messtechnik der Universität des Saarlands getestet. Die ersten Ergebnisse sind sehr viel versprechend.

Parallel dazu sollen in zahlreichen Museen des In- und Auslands der praktische Umgang mit Salzlösungen erprobt und Erfahrungen auf breiter Basis für einen Praxisleitfaden gesammelt werden.

Weitere Infos

Der wissenschaftliche Hintergrund wurde 2022 in *Heritage Science* frei zugänglich publiziert: <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00689-3>

Das Projekt selbst wurde in *RESTAURO* 7/2022, S. 36-39, dargestellt (Kopie auf Anfrage).

Testsalze

Kaliumcarbonat und Magnesiumnitrat-hexahydrat sollen getestet werden. Beide Salze müssen keine (teure) Analysenqualität (p.a.) haben. Es reichen die preiswerteren Qualitätsstufen ‚rein‘ (purum), ‚reinst‘ (purissimum) oder 98% etc., aber nicht darunter.

Kaliumcarbonat wird als Pottasche im Haushalt als Backpulver verwendet. Seine gesättigte Lösung stellt eine Luftfeuchtigkeit von 43,2 % ein, egal ob bei 15 oder 30 °C. Es eignet sich daher besonders für Objekte, die eher etwas trockener klimatisiert werden sollen. Die Lösung ist stark alkalisch (pH > 13). Deshalb eignet sie sich besonders gut zur Schadstoffabsorption, weil sie mit Säuren/sauren Gasen und Aldehyden chemisch zu nichtflüchtigen Anionen reagiert. 1 l Wasser können 1,12 kg wasserfreies Kaliumcarbonat lösen. Setzt man die doppelte Masse (2,24 kg) auf 1 l an, so enthält diese Mischung von Salz und Lösung 1 l Wasser zum Befeuchten, kann aber auch 1 l weiteres Wasser beim Entfeuchten aufnehmen. Wird

aufgrund des Außenklimas im Raum erwartet, dass beide Funktionen gleichermaßen benötigt werden, sollte dieses Mischungsverhältnis eingesetzt werden. Sollte es eher auf Entfeuchten ankommen, ist der Salzanteil zu erhöhen.

Magnesiumnitrat wird als Pflanzendünger verwendet. Die neutrale Lösung stellt bei 25 °C in einem abgeschlossenen Luftraum eine Luftfeuchtigkeit von 52,9 % ein (54,4 % bei 20 °C, 51,4 % bei 30 °C), also ein ideales Klima für gemischte Sammlungen. 1,25 kg lösen sich in 1 l Wasser. Bei gemischtem Klima außen (mal trockener, mal feuchter) empfiehlt sich, die doppelte Menge, also 2,5 kg je Liter Wasser anzusetzen. Wenn es im Jahresmittel eher um Befeuchten geht, kann die Wassermenge auf 1,5 l erhöht werden.

Zum Ansetzen sollte entmineralisiertes Wasser verwendet werden. Da sich die Temperatur der Lösungen beim Lösevorgang ändert, sollten die Gemische Lösung/Salz in verschlossenen Laborflaschen aus Borosilikat aufbewahrt werden, damit sie bis zum Erreichen der Raumtemperatur kein Wasser mit der Umgebung austauschen.

Behälter

Schalen aus hydrophilen Materialien (z.B. Edelstahl, Glas) sollten nicht verwendet werden, da sie zum ‚Kriechen‘ der Salzlösungen neigen. Behälter aus Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) sind geeignet.

Um einen schnellen Feuchteausgleich zu gewährleisten, sollte die Oberfläche der Salzlösungen möglichst groß sein, also die ganze Bodenfläche der Vitrine weitestmöglich ausgenutzt werden. Die Sichtabdeckung der Schalen muss möglichst gasdurchlässig sein. Statt wenige große Behälter, die höheres Verschüttungsrisiko haben, sollten viele kleinere Behälter genutzt werden. Größere Bewegungen der Lösung in der Schale sollten beim Einbringen vermieden werden, um Aerosolbildung zu vermeiden. Ebenso sollte ausreichend Platz für ggf. aufzunehmendes Wasser beim Entfeuchten eingezeichnet werden, sodass der maximale Füllstand des Behältnisses nicht überschritten wird und keine Lösung überläuft.

Kontrolle der Luftfeuchtigkeit

Das Klima im Raum und in der Vitrine soll möglichst über einen ganzen Jahreszyklus mit Dataloggern beobachtet werden. Messungen sollten in einem vernünftigen Abstand gemacht werden. Coburg misst alle 5 bis 15 min. Je nach Dichtigkeit der Vitrine kann es Abweichungen der relativen Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit vom Außenklima geben. Wichtig ist auch zu beobachten, wie schnell sich nach Öffnen der Vitrine der alte Sollwert wieder einstellt?

Vitrinenauswahl

Wählen Sie die Vitrinen für den Test frei aus, es gibt keine idealen Vitrinen. Sehr dichte Vitrinen aus inertem Material sind genauso geeignet wie historische mit viel Holz - es sollen eben Erfahrungen auf breiter Basis gesammelt werden. Vitrinen können sowohl in der Ausstellung als auch in Depots stehen, mit Exponaten oder leer. Die Standorte müssen nicht unbedingt klimatisiert sein, das Raumklima sollte aber mitgemessen werden.

Bei flachen Pultvitrinen reicht ein Datalogger innen. Bei hohen, nicht völlig dichten ‚Turm‘-Vitrinen sollten mindestens zwei Datalogger in unterschiedlicher Höhe angebracht werden. Datalogger sollten nach Möglichkeit kalibriert werden. Bei Tests in einem Exsikkator mit entsprechender Salzlösung sollten die theoretischen Luftfeuchtigkeitswerte erreicht werden.

Wartung

Sobald die Luftfeuchtigkeit in der Vitrine sich nach Erreichen eines konstanten Wertes einpendelt, braucht nichts weiter unternommen zu werden. Erst wenn klare Abweichungen auftreten, müssen die Salzlösungen gewartet werden. Wenn es draußen lange feuchter war (und die Werte in der Vitrine ansteigen), kann der Vorrat an festem Salz aufgelöst sein, dann muss weiteres Festsalz zugegeben und gerührt werden. War es draußen trocken (Werte innen zu niedrig), könnte der Wasservorrat in den Lösungen aufgebraucht sein. Dann muss Wasser nachgegeben und gerührt werden.

Ist es draußen trockener und muss daher der Innenraum nach Schließung befeuchtet werden, lässt sich aus dem Vitrinenvolumen, dem Feuchtigkeitswert im Raum und dem Sollwert innen, die fehlende Wassermenge aus Tabellen ermitteln. Diese Menge kann man in eine Petrischale geben und einen umgedrehten Faltenfilter einstellen. Dann wird der Sollwert schnell wieder erreicht (Erfahrung im Landesmuseum Württemberg).

Worum wir Teilnehmer bitten

Beim Start

Bitte melden Sie sich verbindlich als Testteilnehmer an und teilen Sie uns Details mit:

- Welche Lösungen sollen in welchen Vitrinen an welchem Standort getestet werden? [Beschreibung der Vitrinen, deren Maße, Baumaterialien, spezielle Charakteristika (z.B. Dichtigkeit), Hersteller, gerne mit Foto, sowie Beschreibung des Standorts]
- Welche Datalogger sollen eingesetzt werden? [Angabe des Geräts und ggf. Zusatzkomponenten wie externe Fühler]. Wurden sie kalibriert?
- Dürfen wir später ggf. in Vorträgen bzw. Publikationen auf Ihre Erfahrungen Bezug nehmen und Sie bzw. Ihr Haus als Testteilnehmer mitaufführen?

Während des Tests

Falls wider Erwarten Auffälligkeiten oder Besonderheiten auftreten, teilen Sie uns diese umgehend mit.

Nach Ende des Tests

Nach einem vollständigen Jahreszyklus bitten wir Sie, uns Ihre Klimamessungen außerhalb und innerhalb der Vitrinen zur Verfügung zu stellen (Tabellen und Grafik). Bitte reichen Sie die Ergebnisse möglichst früh ein (möglichst bis Sept./Okt. 2024); **auch bei einem späteren Teststart (Nov./Dez. 2023) bitten wir um die Zusendung der Daten bis Oktober 2024, in Ausnahmefällen auch später (hierzu bitte Kontakt zu Katja Siebel aufnehmen)**. Nur so können sie im Abschlussbericht des Projekts berücksichtigt werden.

- Welche Beobachtungen haben Sie gemacht?
- Wurden die Vitrinen geöffnet? [Wann? Warum? Bitte protokollieren Sie jeden Vorgang wie Vitrinenöffnung, Batteriewechsel, Salzwechsel etc.]
- Blieben die Lösungen im Gleichgewicht? (oben keine verdünnte Schicht nach langer Wasseraufnahme mit höherer Gleichgewichtsfeuchte in der Vitrine; keine Salzkrusten mit behinderter Gleichgewichtseinstellung nach langer Befeuchtung)
- Erscheinen die Lösungen nach einem Jahr dunkler („Staubfänger“)?
- Empfinden Sie den Umgang mit Salzlösungen als problematisch?
- Können Sie den Einsatz weiterempfehlen?
- Werden Sie in Ihrem Haus weiter Salzlösungen verwenden?

Kontakt

Generelle Fragen:

Prof. Dr. Gerhard Eggert, Institut für Konservierungswissenschaften Stuttgart
profeggert@gmail.com, Tel. vorm. 9 - 11 Uhr: 02642/981118

Praktische Fragen, Testkorrespondenz:

Katja Siebel M.A., Veste Coburg, katjasiebel@googlemail.com
Dipl.Rest. Heiner Grieb, Veste Coburg, H.Grieb@kunstsammlungen-coburg.de

Wir drei freuen uns auf die Zusammenarbeit und sind auf Ihre Ergebnisse gespannt!

Stuttgart, Sept. 2023

Gerhard Eggert

Testing Saturated Salt Solutions in Display Cases

Guide for Participants

Thank you very much for your interest in participating in the test of saturated salt solutions in display cases! We're delighted that a number of museums in Germany and abroad already started tests.

Aim of the project is to gather practical experience in the handling of such solutions in display cases and make it available to the whole conservation community. In the 70s and 80s, saturated solutions were used here and there to achieve a constant value of the relative humidity (RH). Later they were mostly replaced by silica gel products, although these have lower capacity and need regeneration, they are not reliable as pollutant absorbers. The Swiss National Museum even reported the emission of corrosive pollutants from a sample fresh from the supplier.

Hitherto unnoticed was the potential of salt solutions to absorb air pollutants in display cases. Test measurements with formaldehyde at the WKI Fraunhofer Institute gave excellent results. This is currently tested for other relevant corrosive pollutants in a DBU funded research project at the Lab of Measurement Technology of Saarland University. First results are very promising.

In parallel, the use of salt solutions shall be tested in many institutions to collect experience on a broad base for comprehensive practical application guidelines.

Further Information

The scientific background has recently been published (open access):

<https://doi.org/10.1186/s40494-022-00689-3>

The new project has been presented in the IIC-Newsletter 'News in Conservation' no. 93 (Dec 22/Jan 23), p. 12ff. Download from <https://www.iiconservation.org/publications/nic>

Salts to be Tested

Potassium carbonate and magnesium nitrate-hexahydrate shall be tested. Both salts do not have to be of (expensive) analytical grade, pure or reagent grade (but not less) are sufficient. Potassium carbonate is used as potash in the household as a baking powder. The saturated solution adjusts the RH in a closed volume to 43.2 % regardless of temperature. The RH is useful for objects that shall be stored a little drier than normal. On preparation, the solution is getting very hot so should be prepared in borosilicate laboratory glass bottles. The solution is strongly alkaline (pH > 13). Therefore, it is particularly useful as an absorber for corrosive pollutants like acids/acid gases and aldehydes, which react to non-volatile anions in the

solution. 1l water dissolves 1.12 kg of anhydrous potassium carbonate. If one takes the double mass (2.24 kg) for a litre, then this mixture (saturated solution and undissolved salt) contains 1l water for humidifying but can also absorb another litre on dehumidifying. If one, based on the average room climate, expects both functions to be needed equally, this mixing ratio should be used. If more emphasis is on dehumidifying, the amount of salt can be increased.

Magnesium nitrate is known as fertiliser in everyday use. The neutral saturated solution adjusts the RH to 52.9 % at 25 °C (54.4 at 20 °C; 51.4 % at 30 °C), an ideal climate for mixed (multi-material) collections. 1l water dissolves 1.25 kg of magnesium nitrate hexahydrate. In a climate varying around 53 %, one should use the double mass (2.5 kg) for one litre of water. If the annual average RH in the room is drier, one could increase the amount of water to 1.5 l.

Demineralised water should be used for the solutions. As the temperature of the liquid changes on dissolution, the mixtures of solution + undissolved salt should be produced a day before they are put into display cases and should be kept in closed borosilicate glass bottles to reach the room temperature and not exchange water with the air in the room overnight.

Container

Don't use open basins made from hydrophilic materials (stainless steel, glass), as precipitated salts tend to 'creep' over the walls. Containers made of polythene (PE) or polypropylene (PP) are suitable.

To ensure fast equilibration of humidity, the surface of the solution should be as large as possible. Thus, use the whole bottom area of the display cases as much as possible. The coverage to hide the solutions visually should be as gas permeable as possible. Instead of using a few large containers that are more difficult to handle safely without spilling, use many smaller containers. Movement of the solution on placement in the cases should be avoided to not produce aerosols. Sufficient space should also be provided for any water to be absorbed during dehumidification to ensure that the maximum filling level of the container is not exceeded, and that no solution can overflow.

Control of Humidity

The climate in the room as well as in the display cases needs to be recorded using dataloggers over a full annual cycle. Measurements should be taken at reasonable intervals, Coburg takes 5 - 15 min. Depending on the air tightness of display cases and the room climate, some deviations of the RH in the cases from the theoretical values for the salts are possible. Please observe how fast the old RH values are achieved again after opening and closing the case (e.g., for maintenance).

V.4 Liste der teilnehmenden Institutionen und Personen

Tabelle 13: Liste der teilnehmenden Institutionen und Personen.

Institutionen deutschsprachiger Raum
Deutsches Ledermuseum, Offenbach
Friedenstein Stiftung Gotha
Germanisches Nationalmuseum, Nürnberg
Geschichtsmuseum der Stadt Lüdenscheid
Grassi Museum für Angewandte Kunst, Leipzig
Klassik Stiftung Weimar
Kunstsammlungen Bistum Regensburg
Kunstsammlungen der Veste Coburg
Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt/Landesmuseum für Vorgeschichte
Landesmuseum Württemberg, Stuttgart
Landessammlungen Niederösterreich, Österreich
Leibniz-Zentrum für Archäologie (LEIZA), Mainz
LVR-LandesMuseum Bonn
Museum für Kunst & Gewerbe Hamburg
Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim
Restaurierungszentrum der Landeshauptstadt Düsseldorf (RED)
Salzburg Museum GmbH
Stiftung Deutsches Historisches Museum, Berlin
Institutionen international
Langelands Museum, DK
Australian Museum, Sydney, AUS
Canadian Museum of History, CAN
CultuurForum Aardenburg (Maickel van Bellegem), NL
Fiske Center, Anthropology Department, UMass Boston, USA (Dennis Piechota)
Harvard Museum of Ancient Near East, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA (Dennis Piechota)
Metropolitan Museum of Art, USA
Nationaalarchief, NL
Perth Art Gallery, UK
Seattle Art Museum, USA
The Israel Museum, ISR
The National Museum of Slovenia, SVN
The Powell-Cotton Museum, UK

V.5 Vorschläge für eine Vitrine mit Klimafach für gesättigte Salzlösungen

Vorbemerkung: Auf allgemeine konstruktive Details (DIN EN 15999-1) bzw. auf die Qualität der Vitrine (mechanischer und Diebstahlschutz, Beleuchtung, ästhetische Verblendung des Technikfachs etc.) wird hier nicht eingegangen. Die verwendeten Materialien müssen emissionsfrei und BEMMA- bzw. Oddy-getestet sein. Hier werden nur Aspekte gelistet, die im Zusammenhang mit der Klimatisierung mittels gesättigter Salzlösungen eine Rolle spielen. Die einzelnen Punkte fassen unsere bisherigen Erfahrungen aus der langen Verwendung in Coburg bzw. dem DBU-Forschungsprojekt zusammen. Sie sollten als Anregung für einen gemeinsamen Dialog gesehen werden. Zukünftige Modifikationen sind denkbar.

V.5.1 Vorschläge

- Bauweise so **luftdicht** wie irgend möglich
- **Separat** zugängliches Technik-/Klimafach (Kontrolle und Wechsel des Salzes ohne Öffnung des eigentlichen Präsentationsraums.
- „**luftdichtes**“ **Abdeck-/Schließsystem** (Klappe) an Klimafach inkl. Dichtungen. Wenn umsetzbar, wäre eine Sichtkontrolle auf die Behälter wünschenswert (eine der Klappen aus durchsichtigem Material mit abnehmbarer ästhetischen Verkleidung)
- Grundfläche des **Klimafachs** sollte nahezu der **gesamten Grundfläche** der Vitrine entsprechen, sodass die Salzlösungen möglichst gleichmäßig und über eine möglichst große Fläche verteilt werden können (viel Oberfläche für guten Feuchteaustausch)
- **Schubladensystem** innerhalb des Klimafachs, für komfortable Platzierung/Entnahme der Salzlösungen und Nutzung der gesamten Grundfläche (kann gleichzeitig als Auffangwanne für ggf. verschüttete Salzlösungen fungieren), ggf. auch mehrere kleine Schubladen
- Der Abstand zwischen Salzlösungen und Übergang zum Präsentationsraum sollte nicht zu groß sein, aber ausreichend Raum für ein sicheres Handling der Behälter mit den Salzlösungen haben (je nach Bauart bis ca. 100 mm)
- **Abdeckung des Technikfachs** so luftdurchlässig wie möglich, z. B. Lochblech mit großer Gesamtlochfläche. Alternative: 4-seitige, möglichst breite Schattenfuge zwischen Technikfach und Präsentationsraum
- **Korrosionsbeständiges** Material für Klimafach (insbesondere bei K_2CO_3 kein Aluminium, da stark alkalisch)
- **Einlegeböden** müssen an alle Seiten Platz für eine ausreichende Luftzirkulation lassen und dürfen keine Klimabarriere darstellen

- Grundsätzlich sind schlanke, hohe Turmvitrinen bei Undichtigkeiten schlechter klimatisierbar als liegende, kompakte, da sich im Präsentationsraum ein Klimagradient bilden kann.

Klima im Präsentationsraum bei Wartung

Bei dichten Vitrinen wird lediglich einmal im Jahr eine Kontrolle der Lösung notwendig. Ggf. muss Wasser oder Salz nachgefüllt werden. Damit bei Öffnung des Technikfachs das Klima im Präsentationsraum nicht fluktuiert, sollte die Öffnung nur bei einem passenden Außenklima erfolgen (max. +/-5 % RH im Vergleich zur Salzlösung). Dazu kann vor oder nach der Heizperiode ein passender Tag abgewartet werden. Anderenfalls kann auch mit mobilen Luftbe- und -entfeuchtern im Ausstellungssaal ein passendes Klima für die Öffnung/Wartung erzeugt werden.

Nur wo dies im Ausnahmefall nicht möglich ist (z.B. ungeheizte, feuchte Kirche) sollte ein Schott als gasdichte Absperrung zwischen Technikfach und Präsentationsraum vorgesehen werden, damit das Klima im Präsentationsraum auch bei Öffnung des Technikfachs erhalten bleibt.

Fehlt ein Schott, kann durch Einbringen von konditioniertem Silikagel neben den Salzlösungen für eine schnellere Wiederherstellung des Klimas gesorgt werden (‚Tandemklimatisierung‘). Diese ist auch sinnvoll, wenn Vitrinen wegen Zugriff auf Exponate häufig geöffnet werden müssen.

V.6 Presse- und Öffentlichkeitsarbeit (Ausstellung “Prima Klima”, Abschlusstagung Mai 2025)



#7 Hintergründe zur Ausstellung “Prima Klima – Das Museum wird umweltfreundlicher”

Salz in der Vitrine? Was erst einmal ungewöhnlich klingen mag, hat durchaus Vorteile.

Wie Salze klimafreundlich Schadstoffe in Vitrinen binden und für konstante Luftfeuchtigkeit sorgen, untersuchen Dipl. Restaurator Heiner Grieb und Katja Siebel, Restauratorin M.A.

In der aktuellen Ausstellung im STUDIO stellen sie ihr Projekt vor, das zusammen mit der Universität des Saarlandes, der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart und über 60 Museen im In- und Ausland auf seine Museumstauglichkeit getestet wurde. Alle Hintergründe zu dem Projekt und wie die Ausstellung aufgebaut ist, erfahren Sie hier.



Wie kam es zu der Idee für diese Ausstellung?

(Heiner Grieb) Seit zwei Jahren läuft das Forschungsprojekt, das nun mit dieser Ausstellung vorgestellt wird. Das Jahresende ist gleichzeitig auch das Projektende, und wir werden die Ergebnisse der teilnehmenden Institutionen auswerten, aber jetzt schon können wir ein positives Fazit ziehen. Das wollen wir in der Ausstellung vermitteln. Wir haben zusammen mit der Universität des Saarlandes untersucht, wie gut gesättigte Salzlösungen zum Klimatisieren von Museumsvitrinen geeignet sind und gleichzeitig wollten wir ihr Potential zum Absorbieren von schädlichen Gasen testen. Während die Absorption der Schadgase in den Labors der Universität getestet wurden, war Coburg für den praktischen Teil verantwortlich, im Sinne eines „Feldversuchs“. Als in der Museums-Jahresplanung die Idee aufkam, die Restaurierung zum Thema einer Ausstellung zu machen, war es klar, dass dieses spannende Projekt vorgestellt werden sollte. Ein glücklicher Zufall, eigentlich war die Ausstellung im Projektantrag gar nicht vorgesehen.

(Katja Siebel) In der Regel arbeiten wir Restauratorinnen immer eher versteckt – „Hinter den Kulissen“ sozusagen – doch ein Museum besteht aus so viel mehr, als nur Exponaten an Wänden und in Vitrinen. Dass also ein nicht-klassisches Ausstellungsthema, hier die „Arbeit Hinter den Kulissen“ auch mal in den Fokus einer musealen Ausstellung gerät, ist also eher ungewöhnlich, nimmt aber in den letzten Jahren immer mehr zu. Insbesondere wenn ein Forschungsprojekt wie dieses, wo es um die Erprobung von „neuen“, nachhaltigen und Ressourcen-schonenden Maßnahmen zur Klimatisierung von Exponaten und um die Absorption von Schadstoffen aus der Vitrinenumluft geht, direkt am und im Museum stattfindet, ist es auch wert, dass einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen und diese vielleicht auch für die Komplexität eines Museums zu sensibilisieren.



Die Restauratoren Katja Siebel und Heiner Grieb



V.7 Fragebogen zur Evaluation des Ringversuchs



TESTERGEBNISSE / TEST RESULTS

DBU-FORSCHUNGSPROJEKT ,SALZ IN DER VITRINE‘

DBU-RESEARCH PROJECT ,TESTING SATURATED SALT SOLUTIONS IN
DISPLAY CASES‘

⊕

Institution / *institution*

Kontaktperson & Kontaktdaten /
contact person & contact details

Start- & Enddatum der Messungen / Start
start & end date of measurements End

□

TEST-VITRINEN / TESTED DISPLAY CASES

Hier bitte die jeweiligen Vitrinen-Daten mit jeweiliger gesättigter Salzlösung eintragen /

Please enter the data for each display case with the tested saturated salt solution here

⊕

Vitrine incl. Baujahr, Materialien, Konstruktion (Stand-, Einbau-, Tischvitrine etc.) / <i>display case incl. year of manufacture, materials, construction (free- standing, built-in, table display case, etc.)</i>	Standort / <i>location</i>	Maße & Volumen (hxbxt & m³) / <i>dimensions & volume (hxxwd & m³)</i>	Salz (incl. Hersteller, Best. Nr., Reinheitsgrad) / <i>salt (incl. supplier, order no., grade)</i>	Menge Salz (kg) + Menge Wasser (l) / <i>amount of salt (kg) + amount of water (litres)</i>	Maße Behälter(hxbxt) & Füllhöhe / <i>dimensions container(hxxwd) & fill level</i>	Anzahl & Position der Behälter / <i>number & position of containers</i>	Zugehörige Messdaten (Dateiname) / <i>associated data (file name)</i>

□

Seite 95 von 100

BEOBSACHTUNGEN / OBSERVATIONS

Welche Beobachtungen haben Sie gemacht? / *What observations have you made?*

Notieren Sie grob Tagesverläufe (Beleuchtung, Veränderung Tageslicht, Besucher:innenverkehr etc.), Auffälligkeiten, Störungen (Öffnen, Reinigung, Stromausfall, Erdbeben etc.) / *Note rough daily patterns (lighting, changes in daylight, visitor traffic, etc.), anomalies, faults (opening, cleaning, power failure, earthquake, etc.).*

Kennen Sie die Luftaustauschrate (AER) Ihrer Vitrinen oder haben Sie sie gemessen? / *Do you know/have you measured the air exchange rate (AER) of your display cases?*

☐ ja / *yes*

☐ nein / *no*

Welche Beobachtungen konnten Sie beim Anmischen der Salzlösungen machen? Konsistenz breiartig, Klumpenbildung? / *What observations did you make when preparing the salt solutions? Consistency pulpy, lump formation, endothermic or exothermic reactions?*

Hat sich die gewünschte RH eingestellt? Wie schnell? blieb die RH konstant? / *Has the desired RH been achieved? How fast? Did the RH remain constant?*

☐ ja / *yes*

☐ nein / *no*

Seite 96 von 100

Mussten Sie Flüssigkeit oder Salz nachfüllen? Wann? / *Did you need to top up with liquid or salt? When?*

☐ ja / *yes*

☐ nein / *no*

Wurden die Vitrinen geöffnet? (Welche? Wann? Warum?) / *Were the display cases opened? (Which? When? Why?)*

☐ ja / *yes*

☐ nein / *no*

Wie ist die Verbindung zwischen Klimafach und Vitrinenraum konstruiert (Lochblech, Schlauchverbindung etc.)? Bitte notieren Sie die Größe der Durchlassfläche (in % bei Lochblech, Anzahl und Größe (cm) bei Schattenfugen, Durchmesser bei Schlauchverbindungen) / *How is the junction between the climate control compartment and the display case designed (perforated sheet, hose connection, etc.)? Please note the size of the passage area (in % for perforated sheets, number/position and size (cm) for slots/shadow gaps, diameter for hose connections).*

Haben Sie Veränderungen an Objekten feststellen können? / *Have you noticed any changes to objects?*

☐ ja / *yes*

☐ nein / *no*

Wie sieht die Lösung nun aus (Bildung einer absperrenden Salzkruste oder verdünnt)? Blieben die Lösungen im Gleichgewicht? / *What does the solution look like now (formation of a covering/ barrier salt crust or diluted)? Did the solutions remain in equilibrium?*

Seite 96 von 100

Ist die Lösung „gekrochen“? Wenn ja, wie hoch über die ursprüngliche Oberfläche der Lösung, bei welchem Salz und welches Behältermaterial? / *Did the solution "creep"? If so, how high above the original surface of the solution, with which salt and which container material was used?*

☐ ja / yes

☐ nein / no

☐

Erscheinen die Lösungen nach einem Jahr dunkler oder verschmutzt („Staubfänger“)? / *Do the solutions appear darker or soiled ('dust catchers') after a year?*

☐ ja / yes

☐ nein / no

☐

Empfanden Sie den Umgang mit Salzlösungen als problematisch? / *Did you find handling salt solutions cumbersome, dangerous or problematic?*

☐ ja / yes

☐ nein / no

☐

Hat sich die Methode bewährt? Werden Sie sie weiterempfehlen? Werden Sie weiter Salzlösungen verwenden und weiterempfehlen? / *Has this method proved its worth? Will you recommend it to others? Will you continue to use salt solutions?*

☐ ja / yes

☐ nein / no

☐

Seite 97 von 100

ABBILDUNGEN / PHOTOS

KONTAKT / CONTACT

Generelle Fragen / GENERAL QUESTIONS

Prof. Dr. Gerhard Eggert, Institut für Konservierungswissenschaften Stuttgart

prof.dreggert@gmail.com, Tel. vorm. 9 - 11 Uhr: 02642/981118

Praktische Fragen, Testkorrespondenz / PRACTICAL TESTS

Katja Siebel M.A., Veste Coburg, katjasiebel@googlemail.com Tel. +491714861446

Dipl.Rest. Heiner Grieb, Veste Coburg, H.Grieb@kunstsammlungen-coburg.de

Wir drei freuen uns über die Zusammenarbeit und sind auf Ihre Ergebnisse gespannt!