

L. Klemm, Welserstr. 33, 81373 München

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

An der Bornau 2
49090 Osnabrück

iconyk GmbH München

Lars Klemm

Dipl.-Restaurator Univ.

Welserstr. 33

81373 München

Mobil 0172.1892271

Lars.klemm@iconyk.de

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

Projekt

Feasibility-Study: Adaptierung Kulturgutrettungscontainer und IPM-Notfallversorgungs-einsätze

Aktenzeichen

AZ37793/01

Verfasser*in

Lars Klemm

Firma

Iconyk GmbH
Welserstr. 33
81373 München

Projektbeginn

01.01.2022

Laufzeit

18 Monate

Ort

München

Jahr

4. Dezember 2023

Anhänge (separate Datei)

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Abschlussbericht DBU Projekt

Inhaltsverzeichnis

Abschlussbericht DBU Projekt	2
1 Kurzfassung	2
2 Bericht	3
2.1 Anlass und Zielsetzung	3
2.2 Inaktivierung von Schimmelpkulturen	7
2.3 Isolierung von Teststämmen von verschimmeltem Archivmaterial	7
2.4 Ozontests in der Kammer	8
2.5 Konservatorische Nachbehandlung mit und ohne Ozonbehandlung	10
2.6 Ozon Test im Container	17
2.7 Ergebnisse	19
2.8 Diskussion	20
2.9 Öffentlichkeitsarbeit	22
2.10 Fazit	22
3 Literatur	22

1 Kurzfassung

Im Januar 2022 wurde die Machbarkeitsstudie „Feasibility-Study: Adaptierung Kulturgutrettungscontainer und IPM-Notfallversorgungseinsätze“, in Kooperation zwischen der iconyk GmbH und dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik begonnen.

Ziel der Studie war es, die Möglichkeit einer Ozonbehandlung an Kulturgütern zu untersuchen, die durch eine Havarie oder Notfall mit Schimmel belastet sind. Weiterhin sollte untersucht werden, inwieweit sich diese Behandlung auch in größeren und mobilen Einheiten wie Containern realisieren lässt, um schnell und mobil größere Mengen an Kulturgütern versorgen zu können.

Die Studie hat gezeigt, dass durch Ozonbehandlungen Schimmelpkulturen inaktiviert werden können und somit einfachere und gefahrlosere konservatorische Nacharbeiten möglich sind.

Diese Behandlungen können auch in größerem Umfang in Containern durchgeführt werden, die dann mobil an unterschiedliche Einsatzorte gebracht werden können.

So können Restauratoren:innen in Zusammenarbeit mit Logistikern:innen im Notfall schnell eingreifen, um Kulturgüter zu retten. Die Container ermöglichen die Behandlung größerer Mengen von Kulturgut in kurzer Zeit (24h pro Containerdurchlauf).

2 Bericht

2.1 Anlass und Zielsetzung

Die Erhaltung von Kunstwerken des kulturellen Erbes auf organischen Trägern, die sehr empfindlich auf den Befall durch Mikroorganismen reagieren, ist in den letzten Jahrzehnten weltweit zu einem wichtigen Anliegen geworden, das immer mehr Spezialisten - Restauratoren, Konservatoren, Physiker, Biologen - auf den Plan ruft, die sich der Aufgabe widmen, die besten Methoden für die Erhaltung und Konservierung von Objekten des kulturellen Erbes zu finden. Der heftige und langanhaltende Befall durch Mikroorganismen, insbesondere Bakterien und Pilze, führt zu einer starken Schädigung des Trägermaterials (Cappitelli et al. 2006).

Nach (Misra et al. 2019) ist die Behandlung mit kaltem Plasma ein vielversprechendes Verfahren in der Lebensmittelverarbeitung, um die Produktsicherheit zu erhöhen und die Haltbarkeit zu verlängern. Die aktivierten chemischen Spezies des kalten Plasmas wie z. B. Ozon (Sarron et al. 2021) können bei Umgebungstemperaturen schnell gegen Mikroorganismen wirken, ohne chemische Rückstände zu hinterlassen.

Die Behandlung von durch Mikroorganismen befallenen kulturellem Erbe wie Fotografien und historischen Papieren mit Plasma und den aktivierten chemischen Spezies wurde erfolgreich im Labormaßstab u. a. von Ioanid et al. untersucht (Ioanid et al. 2010), (Ioanid et al. 2015) und (Ioanid et al. 2016).

Das Ziel des Vorhabens ist es, Schimmelsporen auf Archivmaterial (Aktenkonvolute mit Wasserschäden) mit Hilfe von Ozon abzutöten und damit einfacher und konservatorisch sicherer zu entfernen.

Dazu wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, inwieweit umgebaute Reefer CA Container für diese Behandlung verwendet werden können.

Hintergrund sind die im Zuge des Klimawandels immer häufiger auftretenden Schäden durch Unwetterereignisse, in deren Folge auch Kulturgüter stärker und öfter geschädigt werden können.

Die Grundidee der Machbarkeitsstudie ist es, Container schnell und mobil an einen bestimmten Ort zu bringen, um dort eine Schimmelbehandlung mit Ozon durchzuführen.

Das Fassungsvermögen eines Standard 40´Fuss Container High Cube mit den Innenmaßen Länge 11.588 mm, Breite 2.290 mm und Höhe 2.544 mm beträgt ca. 18 Europaletten (Abb.1).

Da ein solcher Container relativ einfach transportiert, entladen und in Betrieb genommen werden kann, eignen sich solche mobilen Einheiten sehr gut für die Notfallversorgung vor Ort.

Für die Machbarkeitsstudie wurden Ozongeneratoren in einen Kulturgut-Rettungscontainer der Firma iconyk GmbH eingebaut, um einen Praxistest unter realen Bedingungen durchführen zu können.

Parallel dazu wurden Versuche in einer 1m³ Versuchsklimakammer des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik durchgeführt, um mit diesen Erkenntnissen den Versuch im 67,5 m³ Kulturgut-Rettungscontainer zu unterstützen (Abb. 2).

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

Dazu muss Der Kulturgut-Rettungscontainer technisch umgerüstet werden. Drei Ozon-Generatoren werden in den Container eingebaut, die Steuerung und die technische Ausstattung des Containers werden für den Einsatz angepasst (Abb. 3).

Für die Generatoren muss eine Stromversorgung in den Innenraum gelegt werden, zusätzlich benötigt die Messtechnik der Ozonmessung Strom im Container. Gleichzeitig muss die Steuerung der Generatoren nach außen verlegt werden, so dass je nach Bedarf ein Generator, zwei oder alle drei Generatoren zugeschaltet werden können (Abb. 4).

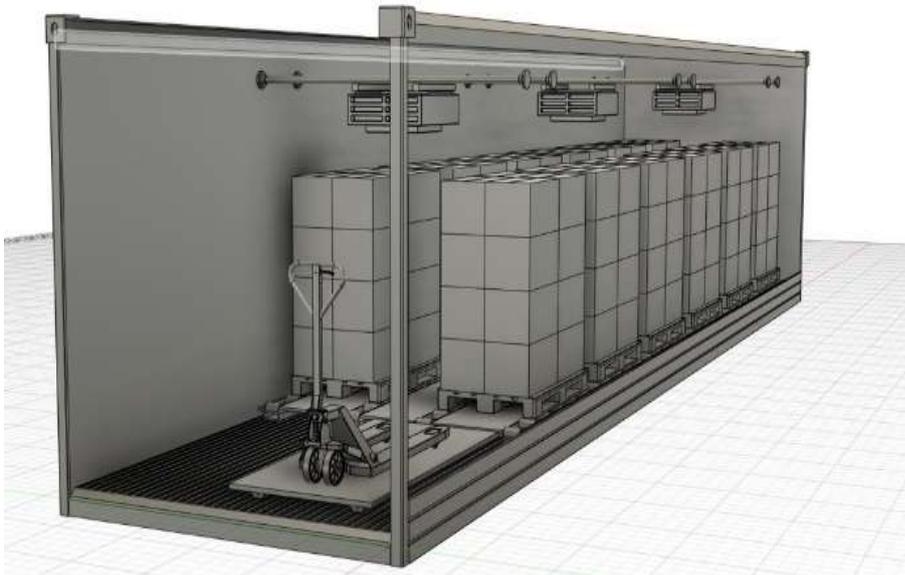


Abb. 1 Skizze für eine Umrüstung des Kulturgutrettungscontainers für den Schimmeleinsatz. Quelle iconyk GmbH 2022/Andreas Hofmann.



Abb. 2 Klimakammer für Ozonversuche am Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Quelle iconyk GmbH 2022.

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau



Abb. 3 Beginn der Umbauarbeiten im Container für den Schimmeleinsatz mit Ozongeneratoren.
Quelle: iconyk GmbH 2022.

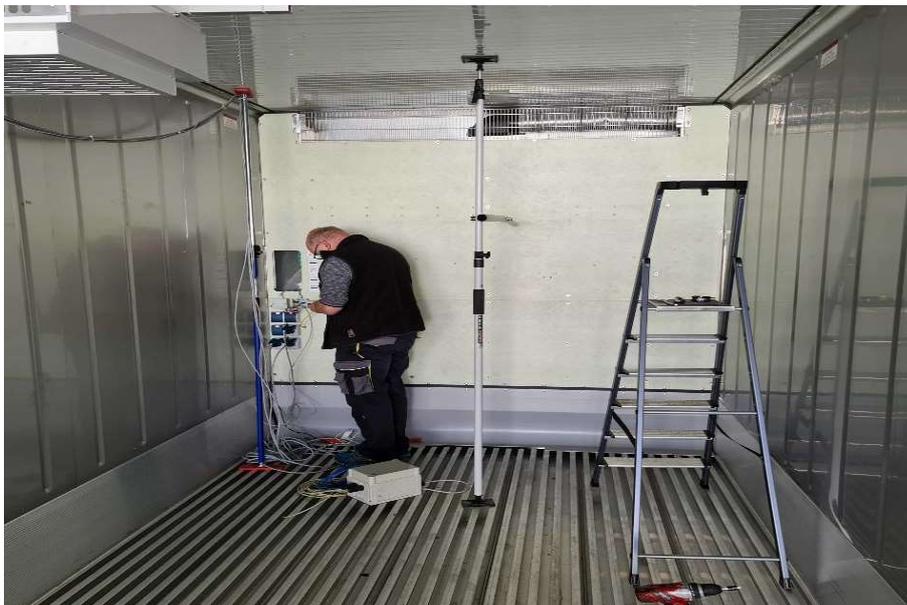


Abb. 4 Einbau der Stromversorgung und Regeltechnik im Containerinnenraum. Quelle: iconyk GmbH 2022.

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

Für die Durchführung der Machbarkeitsstudie wurden folgende Partner gewonnen:

Tab. 1 Partner für die Machbarkeitsstudie und fachliche Zuständigkeit

Partner	Bearbeitungsschwerpunkt
Fraunhofer-Institut für Bauphysik	Biologie, Schimmelbeimpfung Probematerial, Versuche Klimakammer, Ozonmessung Klimakammer
MonaLisi GbR	Konservatorische Betreuung für Reinigung, Beurteilung des Bearbeitungsaufwand mit und ohne Ozonbehandlung, Schadensbeurteilung Ozonbehandlung
Krah & Grote Messtechnik	Bearbeitung der Messtechnischen Erfassung der Ozonkonzentrationen, Umbau Container für Steuer- und Regeltechnik Ozongeneratoren
Container-Service Friedrich Tiemann & Sohn GmbH & Co. KG	Umbau Kulturgutrettungscontainer Boden, Gerüst Montage Ozongeneratoren, Rampen

Zu Beginn der Studie wurde eine Auftaktveranstaltung (Kick-Off-Meeting) mit allen Partnern durchgeführt, um den zeitlichen Ablauf und die Abstimmung der Verantwortlichkeiten zu klären (Abb. 5).



Abb. 5 Kick Off Treffen am Fraunhofer-IBP Holzkirchen. Quelle: iconyk GmbH 2022.

Für den Beginn der Voruntersuchung wurde Probematerial aus dem Gleimhaus, Museum der deutschen Aufklärung Halberstadt verwendet, bei dem es sich um ältere Buchbestände mit inaktivem Schimmelbefall handelte.

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

2.2 Inaktivierung von Schimmelpkulturen

Um die Durchführbarkeit einer Plasma- bzw. Ozonbehandlung von durch Schimmel kontaminiertem Archivmaterial zu testen, wurden am Fraunhofer-IBP verschiedene mikrobiologische Untersuchungen durchgeführt.

2.3 Isolierung von Teststämmen von verschimmeltem Archivmaterial

Zunächst sollten Aktenkonvolute mit Wasserschäden und Schimmelbewuchs herangezogen werden, um Teststämmen für die Untersuchungen zu gewinnen. Für die Isolierungsversuche ausgewählte Papierabschnitte (5 x 5 cm) zeigten deutlichen Schimmelaufwuchs (Abb. 6). Um die Pilzsporen vom befallenen Papier abzulösen, wurde dieses in ein Schwemmmittel (10 ml; Zusammensetzung: 0,9% NaCl, 0,1% TWEEN 80) überführt, eine Stunde bei 300 rpm geschüttelt und anschließend in einer Verdünnungsreihe auf Selektivmedien ausplattiert (Samson et al. 2020). Insgesamt wurden 10 repräsentative Proben bearbeitet. Die Isolierungsversuche waren nicht erfolgreich, nahezu keine Kolonien wuchsen an (mit Ausnahme einzelner Bakterienkolonien). Es ist anzunehmen, dass die Pilze und deren Sporen auf den befallenen Archivmaterialien bereits abgestorben sind. Das kann bedeuten, dass sie bereits zu lange gelagert waren oder einer Pilz-abtötenden Behandlung ausgesetzt waren.

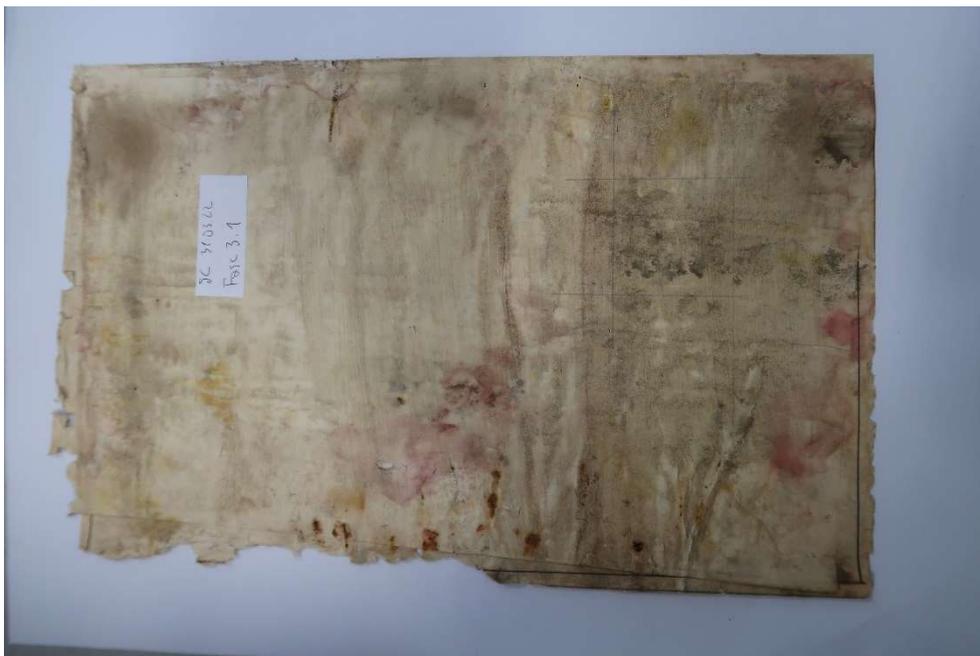


Abb. 6 Beispiel eines Archibogens, der stark verschimmelt ist.

Da vom vorhandenen Archivmaterial keine Pilzstämmen isoliert werden konnten wurde eine Literaturstudie von wissenschaftlichen Arbeiten (Reviews und Originalarbeiten) über Pilze an Archivmaterialien durchgeführt, wobei mehr als 600 unterschiedliche Pilzformen gefunden wurden, die bei Untersuchungen von Archivmaterial genannt wurden (z.B. Samson & Hoekstra 1994; Michaelsen et al. 2010; Sterflinger 2010; Borrego et al. 2015; Pietrzak et al. 2016; Sequeira 2016; Skóra & Gutarowska 2016; Mallo et al. 2017; Sklenář et al. 2017; Pinheiro et al. 2019; Kosel & Ropret 2021). In Sinne des Projekts wurde besonderes Augenmerk auf die häufigen Schimmelpilze an Archivmaterialien gelegt. In Abstimmung mit der institutseigenen

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

Sammlung Bauteil relevanter Mikroorganismen BRMO konnten die folgenden repräsentativen Testpilze, die häufig bei mikrobiellen Schäden an Archivmaterialien beobachtet werden, ausgewählt werden (Tabelle 2).

Tab. 2 Ausgewählte Schimmelpilze für die Versuche zur Inaktivierung durch Ozon (HOKI: Stammnummer in BRMO; DSM: Stammnummer an der Deutschen Sammlung für Mikroorganismen und Zellkulturen DSMZ)

Schimmelspezies	Risikogruppe nach TRBA 460
<i>Alternaria alternata</i> HOKI F00303 (DSM 62010)	1
<i>Aspergillus flavus</i> HOKI F00292	2
<i>Aspergillus niger</i> HOKI F00269*	2
<i>Aspergillus versicolor</i> HOKI F00300	1
<i>Chaetomium globosum</i> HOKI F00218	1
<i>Cladosporium cladosporioides</i> HOKI F00168	1
<i>Epicoccum nigrum</i> HOKI F00211	1
<i>Penicillium chrysogenum</i> HOKI F00152 (DSM 844)	0 (nicht eingestuft)
<i>Penicillium glabrum</i> HOKI F00121	0 (nicht eingestuft)
<i>Stachybotry chartarum</i> HOKI F00159	0 (nicht eingestuft)

*Artenkomplex; enthält zum Teil noch nicht als eigene Art beschriebene Gruppen zu denen kaum epidemiologische Daten vorliegen bzw. die noch nicht eingestuft sind.

2.4 Ozontests in der Kammer

Für die Machbarkeitsstudie wurden zunächst durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik Reinkulturen der ausgewählten Testpilze in Petrischalen angelegt. Von Schalen mit guter Sporulation wurden mittels 20 ml Schwemmmittel die Sporen geerntet und zu einer Sammelsuspension vereinigt. Von dieser Sammelsuspension wurden jeweils 50 µl auf zwei unterschiedliche Papierarten (Streifen von 2 x 10 cm), einmal auf ein Papier einer historischen Kanzleikladde ohne Schimmelbefall „P16“ und einmal auf ein frisches Filterpapier Whatman (Schleicher & Schuell) 2589C aufgeimpft. Damit die Pilzsporensuspension einziehen konnte wurde dazu ein Zeित्रahmen von 30 min gesetzt. Anschließend wurde ein Teil der beimpften Papierstreifen entweder unter der Sterilwerkbank gelagert, oder mit unterschiedlichen Ozonkonzentrationen in der Klimakammer behandelt (Abb. 7). Dabei wurden sowohl die Konzentrationen als auch die Dauer der Behandlung variiert. Um eine gleichmäßige Ozonkonzentration zu gewährleisten, mussten bei jedem Durchgang/Lauf die Apparatur kalibriert sowie die Konzentrationen zeitaufwändig aufgebaut werden. Alle Ansätze wurden 5-fach ausgeführt. Insgesamt wurden 7 Durchgänge/Läufe dieser Ozontests ausgeführt.

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau



Abb. 7 Beimpfte Papier-Teststreifen von Lauf 4, die entweder mit Ozon behandelt wurden, oder dieselbe Zeit unter der Sterilwerkbank lagerten.

Tab. 3 Durchgeführte Ozontests in der Kammer zur Ermittlung der wirksamen Ozonkonzentration

Laufnummer	Ozonkonzentration [ppp]	Laufzeit [h]
1	4000	1
2	2000	1
3	1000	1
4	4000	4
5	4000	2
6	ca. 10000	4
7	ca. 8000	4

Nach Behandlung wurden die beimpften Bereiche der Papierstreifen (ozonbehandelt oder Raumbedingungen ausgesetzt) abgenommen, in 10 ml Schwemmmittel je Probenkollektiv (je 5 Streifen) für 30 min 300 rpm geschüttelt und anschließend in Verdünnungsreihe (0, 10x, 100x) ausplattiert. Es wurden jeweils 5 Schalen Kulturen auf MEA (Malzextrakt-Pepton-Medium) mit je 100 µl Suspension aus der Verdünnungsreihe mittels Trigalsky Spatel beimpft und bei kontrollierten Bedingungen inkubiert (dunkel bei 25°C).

Die ermittelte Mindest-Konzentration zur Inaktivierung von Pilzsporen beträgt 8.000 ppb für eine Dauer von mindestens 60 Minuten (Abb. 8).

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

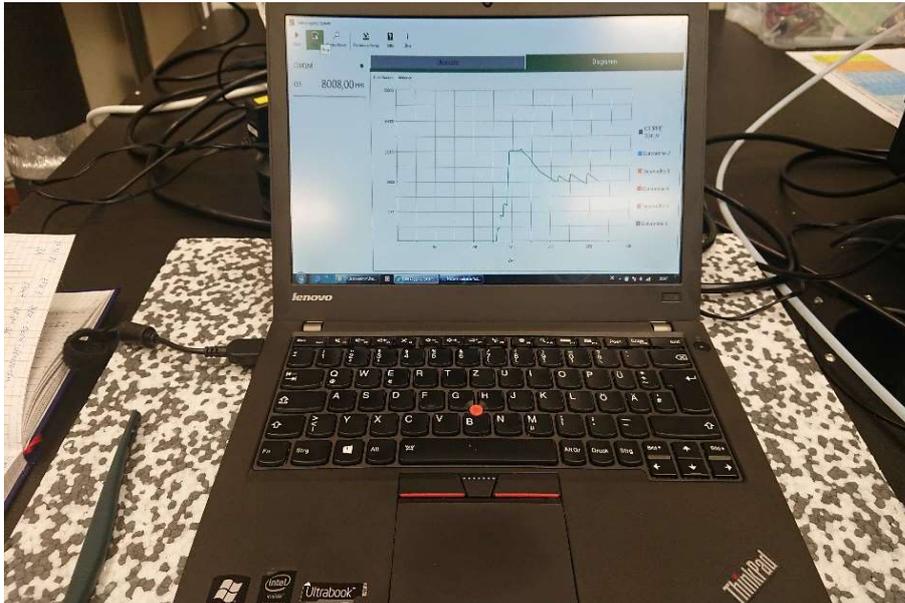


Abb. 8 Messung der Ozonkonzentration in der Klimakammer Fraunhofer IBP. Quelle: Julia Nastke 2023.

2.5 Konservatorische Nachbehandlung mit und ohne Ozonbehandlung

Um die Unterschiede in der konservatorischen Reinigung von Papieren mit und ohne Ozonbehandlung zu untersuchen, wurden verschiedene Papiersorten mit Keimsuspensionen beimpft (Abb. 9).

Bei diesen Versuchen wurden die folgenden Testpilze verwendet. Es wurden bewusst Pilzarten ausgewählt, die dunkle Pigmente erzeugen und daher deutlicher auf dem Papier sichtbar sind.

Tab. 4 Ausgewählte Pilzstämme (biologische Arbeitsstoffe) für die Versuche zur konservatorischen Nachbehandlung

Pilzstamm
<i>Alternaria alternata</i> HOKI F00303 (DSM 62010)
<i>Aspergillus niger</i> HOKI F00269
<i>Cladosporium cladosporioides</i> HOKI F00168
<i>Epicoccum nigrum</i> HOKI F00211
<i>Penicillium glabrum</i> HOKI F00121

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

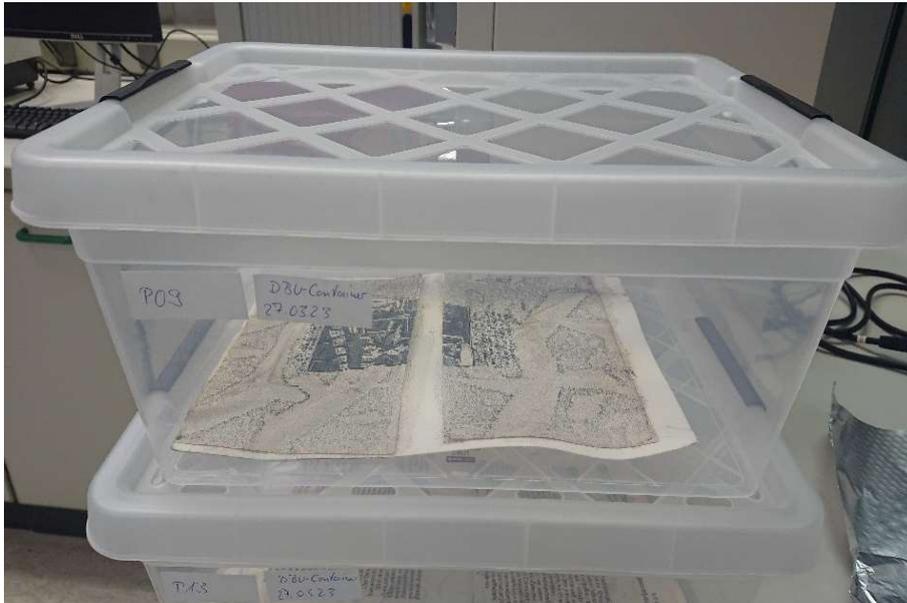


Abb. 9 Deckelgefäße mit geimpften Papierproben. Quelle: Julia Nastke 2023.

Die Vorgehensweise gliederte sich in folgende Arbeitsschritte:

1. Beimpfen der verschiedenen Papierproben mit den biologischen Arbeitsstoffen und Verschließen in Deckelgefäßen.
2. Trocknung der inokulierten Papiere im Labor unter Vermeidung von Staubentwicklung in einem Trockenschrank (24 h bei 60 °C).
3. Die zu behandelnden Serien von inokulierten Papieren wurden in den im Labor verschlossenen Deckelgefäßen in die Inkubationskammer gebracht, in der die Ozonanlage sicher installiert ist.
4. Für die Versuche wurden die Deckelgefäße in der Kammer geöffnet und für bestimmte Zeit der Ozoneinwirkung ausgesetzt (Kammer war geschlossen, Sicherheitsbestimmungen für Ozons wurden eingehalten).
5. Nach der Ozonbehandlung wurden die behandelten und unbehandelten Papiere einer restauratorischen Reinigung unterzogen. Die Wirksamkeit der Reinigung wurde mit Hilfe eines Stereomikroskops dokumentiert.

Nach der Dokumentation wurden die kontaminierten Arbeitsmaterialien entsorgt (Autoklav).

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

Für die Dokumentation der Veränderungen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

Tab. 5 Detektierbare Veränderungen während der gesamten Untersuchung

Untersuchung	Beschreibung der Methode
Visueller Eindruck ohne Hilfsmittel und Auflicht, gesamte Probe	Beschreibung: Farbliche Veränderung, Oberflächenveränderung, Festigkeit/"Lappigkeit" Eingrenzung z.B Unterscheidung von Probe A/B
Mikroskopische Untersuchung im Auflicht, 2 Bereiche, bei Unterscheidung 3	Beschreibung: Farbliche Veränderung, Oberflächenveränderung Eingrenzung z.B Unterscheidung von Probe A/B
Mikroskopische Untersuchung im Streiflicht, 2 Bereiche, bei Unterscheidung 3	Beschreibung: Oberflächenveränderung Eingrenzung z.B Unterscheidung von Probe A/B

Die Abreinigung der Proben erfolgte in vier verschiedenen Techniken (Abb. 10).



Abb. 10 Reinigung der Papierproben im Digestorium Fraunhofer IBP. Quelle: iconyk GmbH 2023.

Als Hilfsmittel dienten ein Flachpinsel, ein Staubsauger mit Baumwolltuchaufsatz und Naturkautschukschwamm.

Für die Reinigung wurde die ca. DIN A5 großen Papierproben in vier Teilbereiche aufgeteilt. Auf diesen wurden vier Techniken angewendet, um die Schimmelpilzkontamination zu entfernen bzw. zu reduzieren.

1. Technik 1: In diesem Bereich wurde ein flacher Pinsel mit 4 streifenden Bewegungen über die Oberfläche geführt.
2. Technik 2: In diesem Bereich wurde ein flacher Pinsel mehrmals mit insgesamt 10 Streichbewegung (5 vertikal und 5 horizontal) über die Probe geführt.

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

3. Technik 3: In diesem Bereich wurde der Staubsauger (Saugfläche mit einem Baumwolltuch umwickelt) mit insgesamt 10 Streichbewegung (5 vertikal und 5 horizontal) über die Probe bewegt.
4. Technik 4: In diesem Bereich wurde ein Naturkautschukschwamm mit insgesamt 10 Streichbewegung (5 vertikal und 5 horizontal) flach über die Probe bewegt.

Die Nachuntersuchung und Dokumentation der Reinigungsergebnisse erfolgte unter dem Stereomikroskop (Abb. 11).



Abb. 11 Untersuchung der Proben nach der Reinigung auf Schäden/Veränderungen. Quelle: iconyk GmbH 2023.

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

Tab. 6 Dokumentation der Reinigungsergebnisse und Schadensuntersuchung Probe 11

Probenbezeichnung	Ergebnisse und Beobachtungen	Ergebnisse nach Kontamination, nach Kontamination und Abreinigung
Probe 11 Sehr festes Papier Hadern		Plasma-Ozon-Behandlung und Abreinigung (b)
Inhomogener Befall, dunkle Flecken auf dem Faservlies		
1 Pinsel einfach	Wenig Abnahme	Sichtbar leichte Abnahme, teilweise Einreiben in das Papiervlies
2 Pinsel	Leichte Abnahme sichtbar	Sichtbar Abnahme, teilweise Einreiben in das Papiervlies
3 Staubsauger mit Baumwollauflaufsatz	Leichte Abnahme sichtbar Baumwolltuch hat dunkel Rückstände	Sichtbar leichte Abnahme, Auflagen «fleckig» noch stark sichtbar, leichte Rückstände am Baumwolltuch.
4 Kautschuk-Schwamm	Abnahme sehr gut sichtbar, Reinigungseffekt, Kautschuk dunkel verfärbt/Rückstände	Sichtbare sehr gute Abnahme, kaum Rückstände/Auflagen, Rückstände auf Schwamm sehr gut erkennbar.
Anschließende Mikroskop Untersuchung	Kein Unterschied zw. behandelt und nicht behandelt. Kleine Pigmente sichtbar.	

Tab. 7 Dokumentation der Reinigungsergebnisse und Schadensuntersuchung Probe 09

Probenbezeichnung	Ergebnisse und Beobachtungen	Ergebnisse nach Kontamination, nach Kontamination und Abreinigung
Probe 09 Hadern		Plasma-Ozon-Behandlung und Abreinigung (b)
«Ausgeprägter Schimmelrasen», Kolonien aufliegend?		
1 Pinsel einfach	Abnahme nur bedingt sichtbar, beim Abkehren «Staubbildung», starkes Einreiben ins Papiervlies, eher Verteilung des Befalls	Abnahme nur bedingt sichtbar, Staubbildung, Verteilung des Befalls, Einreiben in das Papiervlies
2 Pinsel	Abnahme nur bedingt sichtbar, beim abkehren «Staubbildung», starkes Einreiben ins Papiervlies, eher Verteilung des Befalls	Abnahme sichtbar, Verteilung des Befalls und Einreiben in das Papiervlies, Staubbildung, wie bei 1
3 Staubsauger mit Baumwollauflaufsatz	Reinigungserfolg sichtbar, Intensität der Reinigung durch den Sogeffekt besser, Baumwolltuch ist auch verfärbt, reibt aber Partikel bei Kontakt eher ins Vlies ein.	Abnahme sichtbar, sehr unregelmässig, Einreiben in das Papiervlies, Baumwolltuch zeigt Rückstände
4 Kautschuk-Schwamm	Gute Reinigung, starke Verfärbung durch den Kautschuk-Schwamm	Gute Reinigungswirkung, Abnahme gut sichtbar und Verfärbung/Einreiben weniger stark.
Mikroskop	Kein Unterschied zu erkennen optisch. Auflicht und Streiflicht.	

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

Tab. 8 Dokumentation der Reinigungsergebnisse und Schadensuntersuchung Probe 06

Probenbezeichnung	Ergebnisse und Beobachtungen	Ergebnisse nach Kontamination, nach Kontamination und Abreinigung
Probe 06 Zeitung Papier 1923		Plasma-Ozon-Behandlung und Abreinigung (b)
Zeigt wenig Schimmelpilzwachstum		
1 Pinsel einfach	Reinigungserfolg nicht sichtbar	Abnahme ist sichtbar
2 Pinsel	Reinigungserfolg nicht sichtbar	Abnahme sichtbar, fast keine Auflagen mehr zu sehen
3 Staubsauger mit Baumwollauflaufsatz	Leicht sichtbare Reinigungserfolg, leichte Verfärbung des Baumwolltuchs	Abnahme sichtbar, leichte Rückstände/Auflagen
4 Kautschuk-Schwamm	Leicht sichtbarer Reinigungserfolg, Rückstände sichtbar auf dem Schwamm	Abnahme sichtbar, keine Auflage mehr zu sehen, Rückstände auf Schwamm gut sichtbar
Mikroskop	Kein Unterschied zu erkennen optisch. Auflicht und Streiflicht.	

Tab. 9 Dokumentation der Reinigungsergebnisse und Schadensuntersuchung Probe 13

Probenbezeichnung	Ergebnisse und Beobachtungen	Ergebnisse nach Kontamination, nach Kontamination und Abreinigung
Probe 13 Buchdruck		Plasma-Ozon-Behandlung und Abreinigung (b)
Hadern, kein starker Befall		
1 Pinsel einfach	Leichte Abnahme	Kein Reinigungserfolg
2 Pinsel	Abnahme sichtbar, keine Auflage mehr sichtbar	Kaum/ leichter Reinigungserfolg, minimal
3 Staubsauger mit Baumwollauflaufsatz	Mittelmäßiger Reinigungserfolg, Abnahme sichtbar, Auflagen vereinzelt noch vorhanden	Sichtbare Abnahme, leichte Rückstände auf dem Baumwolltuch
4 Kautschuk-Schwamm	Guter Reinigungserfolg, wie 2	Sichtbare Abnahme, leichte Rückstände
Mikroskop	Kein Unterschied zu erkennen optisch. Auflicht und Streiflicht.	

Bei den insgesamt 8 Proben, die wie beschrieben, gereinigt wurden, konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den 4 nicht vorbehandelten Proben mit Schimmelpilzbefall und den 4 Proben mit 4-stündigen Plasma-Ozon-Behandlung, festgestellt werden.

Bei der Reinigung erwies sich der Naturkautschukschwamm als das beste Reinigungsmittel. Es ist jedoch möglich, dass ein Staubsauger mit einstellbarer Saugleistung und ein Pinselaufsatz ähnliche Ergebnisse erzielen. Stark pigmentierte Schimmelpilze werden mit dieser Technik besser entfernt und ein Einreiben von pigmentierten Bestandteilen ist das ohnehin schon angegriffene Papiervlies kann vermieden werden. Ein solches Gerät stand für die Untersuchung leider nicht zur Verfügung, wird aber für die Massenbehandlung empfohlen (Abb. 12).



Abb. 12 Reinigung der Papierproben. Quelle: Julia Nastke 2023.

Die Untersuchung im Auf- sowie im Streiflicht mit dem Stereomikroskop ergab ebenfalls keine Unterschiede zwischen den behandelten und unbehandelten Proben. Die Cellulosefasern zeigen keine Anzeichen von Beschädigungen oder Oberflächenabrieb. Während der Untersuchung wurden jedoch immer wieder Schimmelpilzstrukturen (Sporen, Sporangiothore, Hyphen) sichtbar, was nochmals verdeutlicht, dass durch die Reinigung eine Kontamination zwar reduziert, aber nicht vollständig entfernt werden kann.

Die Untersuchung zeigte, dass die Proben durch die Plasma/Ozon-Behandlung optisch nicht geschädigt oder verändert wurden.

Durch die Inaktivierung der Kontamination wird das gesundheitliche Risiko/die gesundheitliche Belastung bei einer nachfolgenden Reinigung deutlich reduziert.

Durch die Trocknung bzw. Stabilisierung des Papiers auf eine relative Luftfeuchte von 50 % und die Inaktivierung des Befalls ist das Papier besser für die manuelle Reinigung in der Nachbereitung vorbereitet.

Eine Untersuchung von mit Ozon/Plasma behandelten Probepapieren hinsichtlich der Veränderung von Cellulosekettenlänge (mittlerer Polymerisationsgrad) oder der Falzbruchkraft (Bansa/Hofner) soll im weiteren Verlauf der Studie untersucht werden. Dies betrifft insbesondere die in der DIN ISO 9706 empfohlenen Angaben:

1. Mindestfestigkeit, ermittelt durch die Prüfung des Durchreißwiderstandes
2. Mindestgehalt an säurebindenden Substanzen (z. B. Calciumcarbonat), bestimmt als Alkalireserve
3. Höchstgehalt an leicht oxidierbaren Stoffen, bestimmt als Kappa-Zahl
4. maximaler und minimaler pH-Wert eines Kaltwasserextraktes des Papiers

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

2.6 Ozon Test im Container

Um die guten Ergebnisse aus der Klimakammer auch im Container zu erreichen, wurde dort ein Ozon Test durchgeführt. Dazu wurden die drei Ozongeneratoren in Betrieb genommen und mehrere Stunden mit voller Leistung betrieben.

Außerhalb des Containers wurde mit gleichem Messgerät, mit dem die Ozonkonzentration in der Klimakammer gemessen wurde, die Ozonkonzentration im Container erfasst (Abb. 13).



Abb. 13 Messaufbau Ozon Test am Container. Quelle: iconyk GmbH 2023.

Die Ergebnisse des Ozonversuchs im Container zeigen, dass die erforderliche Konzentration in einem überschaubaren Zeitraum erreicht werden kann.

Zur besseren Handhabung der Generatoren und zur schnelleren und sicheren Beladung der Container mit den geschädigten Kulturgütern wurde ein Container mit einem Aluminiumgerüst ausgestattet. Dies erleichtert die Befestigung der Generatoren und der Messtechnik. Zusätzlich wurden ein Lochblechboden sowie eine Rampe eingebaut (Abb. 13).

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

Die verwendeten drei Generatoren vom Typ Clean Air Sky der Firma oxytec© benötigen ca. 4 Stunden, um die Konzentration von 8.000 ppb zu erreichen (Abb. 14).



Abb. 14 Generator Clean Air Sky vom Hersteller oxytec©. Quelle: www.oxytec.com

Die Ergebnisse des Ozonversuchs im Container zeigen, dass die erforderliche Konzentration in einem überschaubaren Zeitraum erreicht werden kann.

Zur besseren Handhabung der Generatoren und zur schnelleren und sicheren Beladung der Container mit den geschädigten Kulturgütern wurde ein Container mit einem Aluminiumgerüst ausgestattet. Dies erleichtert die Befestigung der Generatoren und der Messtechnik. Zusätzlich wurden ein Lochblechboden sowie eine Rampe eingebaut (Abb. 15).



Abb. 15 Einbau des Aluminiumgestell, Lochblechboden und Rampe. Quelle: Sven Hoppe 2023.

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

2.7 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Behandlung größerer Mengen von schimmelbefallenen Kulturgütern mit Ozon in einem umgebauten Container durchführbar ist. Durch die Behandlung mit Ozon können die Arbeitsbedingungen für die Restauratoren vereinfacht werden, indem die Schimmelpilze inaktiviert wird.

Die erforderliche Ozon-Konzentration kann im Container innerhalb von ca. 4 Stunden erreicht werden, so dass eine Behandlung innerhalb von 24 Stunden in einem Containerdurchgang abgeschlossen werden könnte.

Für die Behandlung wurde in der vorliegenden Studie ausschließlich Papier verwendet. Für eine Schimmelpilzinaktivierung muss das Papier in direktem Kontakt mit dem Ozon stehen, daher sind vorbereitende Maßnahmen notwendig, um das Papier für die Behandlung im Container vorzubereiten.

Für die konservatorischen Arbeiten vor und nach der Ozonbehandlung wäre im Notfall ein Arbeitscontainer erforderlich, in dem die Restauratoren:innen die geschädigten Papiere geschützt vorbereiten können (z. B. auf Trocknungswagen ausbreiten und in den Ozoncontainer schieben – Abb. 16).



Abb. 16 Trocknungswagen. Quelle Maschinenbau Bochonow GmbH

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie stellte sich die Frage der Messtechnik für die Ozonkonzentration im Container als Herausforderung dar. Der Grenzwert zum Schutz der menschlichen Gesundheit beträgt seit 2012 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als höchster 8-Stunden-Mittelwert während eines Tages bei 25 zulässigen Überschreitungen pro Kalenderjahr. Dies entspricht einer Konzentration von etwa 60 ppb. Aus diesem Grund ist es sehr wichtig die genaue Konzentration im Container zu messen, um den Maximalwert von 8.000 ppb und auch die Absenkungen auf 60 ppb zu erfassen.

Dafür soll in Zusammenarbeit mit Krah & Grote Messtechnik eine Ozonampel am Container installiert werden. Derzeit können die Werte nur am Computer bzw. der Online-Version der Messdatenbank überprüft werden.

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

2.8 Diskussion

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, wie vielversprechend eine mobile, ortsunabhängige und großflächige Ozonbehandlung als schnelle Notfallversorgung für Kulturgüter funktionieren kann.

Für die weitere Entwicklung muss die Frage der Behandlung anderer Kunstwerke und Materialien geklärt werden. Im Gegensatz zu Papieren, die vor der Behandlung noch vorbereitet werden müssen, können z. B. Möbel oder Gemälde direkt in den Container eingelagert werden (Abb. 17).

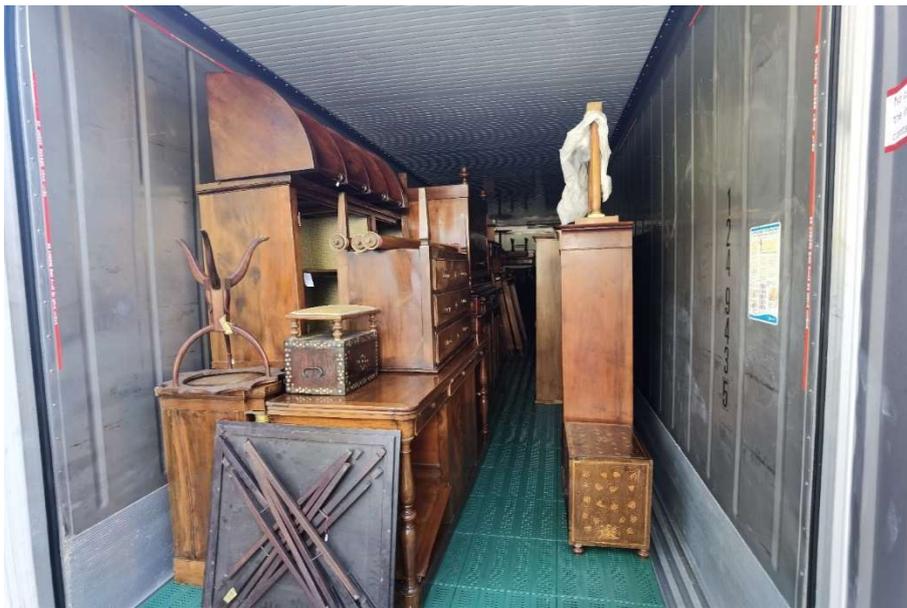


Abb. 17 Möbel in einem Kulturgutrettungscontainer für eine IPM-Freezer Behandlung. Quelle: iconyk GmbH 2022.

Eine ausschließliche Ozonbehandlung ohne konservatorische Nachbehandlung wird jedoch unabhängig von Materialien oder Sammlung nicht möglich sein.

Für die abgestimmte Kombination von konservatorischer Notfallversorgung vor Ort und dem Einsatz eines Containers mit Ozonbehandlung fanden innerhalb der Machbarkeitsstudie Workshops mit Restauratoren (MonaLisI GbR) statt, in denen die Arbeitsschritte, die technischen und logistische Voraussetzungen und die dafür notwendige Aufwand diskutiert wurden (Abb. 18).

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau



Abb. 18 Workshop mit MonaLis! GbR Konservatorische und Technische Optionen. Quelle: iconyk GmbH 2022.

Auch der Einsatz von Arbeitscontainern wurde bereits durch die iconyk GmbH erprobt (Abb. 19). Hier bietet sich eine Kombination mit den Notfallcontainern an, wie sie in der Kooperation mit dem Historischen Archiv Köln und der Kölner Feuerwehr entstanden sind.



Abb. 19 Einsatz eines Arbeitscontainers in Kombination mit einem Kulturgutrettungscontainer. Quelle: iconyk GmbH 2020.

2.9 Öffentlichkeitsarbeit

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie wurden und werden wie folgt an die Öffentlichkeit getragen:

- Darstellung als Factsheet auf den Webseiten der Partner Krah&Grote, Oxytec, iconyk, Fraunhofer-IBP und MonaLisI
- Kurzdarstellung auf den Tagung DMB Osnabrück 2023
- Veröffentlichung eines Artikels für Fachzeitschriften wie *restauro* (geplant)
- Vortrag auf dem Tag der Archive (Fachtagung des VdA – Verband deutscher Archivarinnen und Archivare e.V.) sowie Fachgruppentagungen des VdR (Verband der Restauratoren) – geplant

2.10 Fazit

Die Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass der Einsatz von Kulturgut-Rettungscontainern für die Ozonbehandlung größerer Mengen geschädigter Kulturgüter sinnvoll ist und mit geringem Aufwand durchgeführt werden kann.

Die Container können sehr schnell am Einsatzort in Betrieb genommen werden. Die Behandlung einer kompletten Containerladung ist innerhalb von 24 Stunden abgeschlossen. Vor- und Nacharbeiten sind dennoch notwendig – aber in jedem Fall auch sinnvoll, z. B., um die beschädigten Kunstwerke nach der Behandlung zu reinigen und neu zu verpacken.

Eine umfassende Darstellung einer solchen Notfall-Versorgungskombination soll Gegenstand einer weiteren Studie sein.

Die bisherigen Ergebnisse sind ermutigend und sollen jetzt vertieft und erweitert werden. Es sind durch die bisherige Arbeit Kontakte zu möglichen Kooperationspartnern entstanden (Stadtarchive, Museen), die einen Testlauf der Container Ozonbehandlung zulassen würden. Hier können dann die bisherigen Arbeiten weiter angewandt und vor allem wichtige Erkenntnisse zu den Vor- und Nacharbeiten, Zeitmanagement und Arbeitsaufwand im Echteinsatz gewonnen werden.

3 Literatur

Borrego, S.; Molina, A.; Santana, A. Mold on Stored Photographs and Maps: A Case Study. *Top. Photogr. Preserv.* 2015, 16, 109–120.

Cappitelli, Francesca; Principi, Pamela; Sorlini, Claudia (2006): Biodeterioration of modern materials in contemporary collections: can biotechnology help? In: *Trends in biotechnology* 24 (8), S. 350–354.

Ioanid, Emil Ghiocel; Frunză, Viorica; Rusu, Dorina Emilia; Vlad, Ana Maria; Tănase, Cătălin; Dunca, Simona Isabela (2015): Radio-Frequency Plasma Discharge Equipment for Conservation Treatments of Paper Supports. In: *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering* (9), S. 760–764.

Ioanid, Emil Ghiocel; Rusu, Dorina; Dunca, Simona; Tanase, Catalin (2010): High-frequency plasma in heritage photo decontamination. In: *Ann Microbiol* 60 (2), S. 355–361. DOI: 10.1007/s13213-010-0051-2.

Ioanid, Ghiocel Emil; Tănase, Cătălin; Rusu, Dorina; Vlad, Ana; Cazacu, Geor-geta; Balaes, Tiberius; Dunca, Simona (2016): Decontamination effects of radio frequency low-temperature plasma on paper-based materials. In: *Revue Roumaine de Chimie* 61 (6-7), S. 583–590.

Kosel, J. & Ropret, P. (2021): Overview of fungal isolates on heritage collections of photographic materials and their biological potency. *Journal of Cultural Heritage* 48: 277-291

Mallo, A.C., Nitiu, D.S., Elíades, L.A., Saparrat, M.C.N. (2017): Fungal Degradation of Cellulosic Materials Used as Support for Cultural Heritage. *International Journal of Conservation Science* 8(4): 619-632.

Michaelsen, A., Piñar, G., Pinzari, F. (2010): Molecular and Microscopical Investigation of the Microflora Inhabiting a Deteriorated Italian Manuscript Dated from the Thirteenth Century. *Microb. Ecol.* 60: 69–80.

Misra, N. N.; Yadav, Barun; Roopesh, M. S.; Jo, Cheorun (2019): Cold Plasma for Effective Fungal and Mycotoxin Control in Foods: Mechanisms, Inactivation Effects, and Applications. In: *Comprehensive reviews in food science and food safety* 18 (1), S. 106–120. DOI: 10.1111/1541-4337.12398.

Pietrzak, K., Otlewska, A., Dybka, K., Danielewicz, D., Pangallo, D., Demnerová, K., Ďurovič, M., Kraková, L., Scholtz, V., Bučková, M., Puškárová, A., Kučerová, I., Škrdlantová, M., Drábková, K., Surma-Ślusarska, B., Gutarowska, B. (2016): 5. A modern approach to biodeterioration assessment and disinfection of historical book. In: Gutarowska, B. (ed.): *A modern approach to biodeterioration assessment and the disinfection of historical book collections*. Institute of Fermentation Technology and Microbiology. Lodz University of Technology. Arden Prepress Studio Sp. z o.o. Łódź, Poland: 81-125.

Pinheiro, A.C., Sequeira, S.O., Macedo, M.F. (2019): Fungi in archives, libraries, and museums: a review on paper conservation and human health. *Critical Reviews in Microbiology* 45(5-6): 686-700.

Samson, R.A. & Hoekstra, E.S. (1994): Common fungi occurring in indoor environments. In: Samson, R.A., Flannigan, B., Flannigan, M.E., Verhoeff, A.P., Adan, O.C.G., Hoekstra, E.S. (eds.): *Health implications of fungi in indoor Environments*. Air Quality Monographs Vol. 2. Elsevier Science, Amsterdam: 541-587.

Samson, R.A., Houbraken, J., Thrane, U., Frisvad, J.C., Andersen, B. (2010): *Food and Indoor Fungi*. CBS-KNAW Fungal Biodiversity Centre, Utrecht: 390 pp.

Sarron, Elodie; Gadonna-Widehem, Pascale; Aussenac, Thierry (2021): Ozone Treatments for Preserving Fresh Vegetables Quality: A Critical Review. In: *Foods* (Basel, Switzerland) 10 (3). DOI: 10.3390/foods10030605.

- Depot- und Archivplanung
- Präventive Konservierung
- Arbeitssicherheit BG Bau

Sequeira, S.O. (2016): Fungal biodeterioration of paper: Development of safer and accessible conservation treatments. Doctoral thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, Lisboa: XXIX + 228 pp.

Sklenář, F., Jurjević, Ž., Zalar, P., Frisvad, J.C., Visagie, C.M., Kolařík, M., Houbraeken, J., Chen, A.J., Yilmaz, N., Seifert, K.A., Coton, M., Déniel, F., Gunde-Cimerman, N., Samson, R.A., Oeterson, S.W., Hubka, V. (2017): Phylogeny of xerophilic aspergilli (subgenus *Aspergillus*) and taxonomic revision of section *Restricti*. *Studies in Mycology* 88: 161-236.

Skóra, J & Gutarowska, B. (2016): 1. Microorganisms in archives and libraries. In: Gutarowska, B. (ed.): A modern approach to biodeterioration assessment and the disinfection of historical book collections. Institute of Fermentation Technology and Microbiology. Lodz University of Technology. Arden Prepress Studio Sp. z o.o. Łódź, Poland: 4-29.

Sterflinger, K. (2010): Fungi: Their role in deterioration of cultural heritage. *Fungal Biology Reviews* 24: 47-55 review of fungal isolates on heritage collections of photographic materials and their biological potency. *Journal of Cultural Heritage* 48: 277-291