

Abschlussbericht zum DBU-Projekt

Forschungsprojekt zur Adaption der
CO₂-Schneestrahls-technologie zur Reinigung
empfindlicher schadstoffbelasteter
Oberflächen von Kulturgütern am Beispiel von
historischen Musikinstrumenten.

Dipl.-Rest. (FH) Stefan Ehricht, Stiftung Händel-Haus
Dipl.-Ing. (FH) Ralf Grimme, Fraunhofer IPA Stuttgart
M. A. Oliver Mack, Germanisches Nationalmuseum IKK
Dipl.-Rest. (FH) Martin Meyer, Germanisches Nationalmuseum IKK
Dipl.-Rest. (FH) Markus Raquet, Germanisches Nationalmuseum IKK
Dipl.-Ing. (FH) Christof Zorn, Fraunhofer IPA Stuttgart

STIFTUNG HÄNDEL-HAUS

Internationales Zentrum der Händel-Pflege
Forschung und Wissenschaft



Abschlussbericht DBU-Projekt
Aktenzeichen 32275
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

gefördert durch

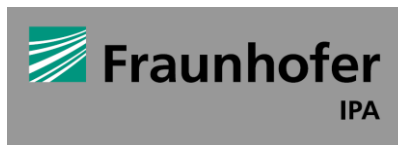


Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

**Forschungsprojekt zur Adaption der CO₂-Schneestrahls-technologie zur
Reinigung empfindlicher schadstoffbelasteter Oberflächen von Kulturgütern am
Beispiel von historischen Musikinstrumenten.**

Bericht zu den Forschungsergebnissen im Projekt
AZ 32275, gefördert durch die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt



Projektteam und Autoren

Dipl.-Rest. (FH) Stefan Ehrlich, Stiftung Händel-Haus
Dipl.-Ing. (FH) Ralf Grimme, Fraunhofer IPA Stuttgart
M. A. Oliver Mack, Germanisches Nationalmuseum IKK
Dipl.-Rest. (FH) Martin Meyer, Germanisches Nationalmuseum IKK
Dipl.-Rest. (FH) Markus Raquet, Germanisches Nationalmuseum IKK
Dipl.-Ing. (FH) Christof Zorn, Fraunhofer IPA Stuttgart

Laufzeit: 6.10.2015 – 31.05.2019

Deckblatt
Inhaltsverzeichnis
Verzeichnis Abbildungen
Verzeichnis Tabellen
Verzeichnis Diagramme
Verzeichnis Abkürzungen
Danksagung

Inhaltsverzeichnis

Seite

1. Einleitung	12
2. Ziel DBU-Projekt	13
3. Methoden	14
3.1 CO ₂ -Schneestrahlschnelle	14
3.2 Analysemethoden	16
3.3 Dokumentation Schädigungsschwellenermittlung.....	17
3.4 Probenahmesystem	18
4. Untersuchungsverlauf	19
4.1 Ermittlung Schädigungsschwelle	19
4.1.1 Probenvorbereitung	19
4.1.2 Kälteeinwirkung durch CO ₂ - Schneestrahlschnelle	23
4.1.3 Versuchsaufbau	27
4.1.4 Ergebnisse Testreihe Schädigungsschwelle	29
4.2 Qualifikation der Messmethoden.....	33
4.2.1 Qualifikation der Messmethoden am Objekt auf der Oberfläche	33
4.3 Probenahmesystem Oberfläche.....	34
4.3.1 Test Wischelemente	34
4.3.2 Auswertung Swab-Anwendung	36
4.4 CO ₂ -Dekontaminationsarbeitsplatz	40
4.4.1 Konzeption Aufbau Lastenheft.....	40
4.4.2 Konstruktionsdetails Strahlkammer	42
4.4.3 Strömungsgeschwindigkeit Strahlkammer	42
4.4.4 Prüfung der Dichtigkeit der Strahlkammer	43
4.4.5 Prüfung Staubaustrag Abklingsmessung.....	43
4.5 Reinigungsschwelle historische Lackoberfläche.....	46
4.5.1 Objektzustand Tafelklavierdeckelfragment	46
4.5.2 Analyse der Ablagerungen.....	47
4.5.3 Auswertung der Reinigungstestreihe	48
4.5.4 Anpassung Prozessparameter.....	49
4.5.5 Politurreinigung Tischplattenfragment	51
4.5.6 Informationstiefe Chlorgehalt	52
4.5.7 mRFA-Messung Oberflächenkontamination	53
4.6 Anwendung Tafelklavier-Lyra MS-15	54
4.6.1 Objektzustand Tafelklavier-Lyra MS-15.....	54
4.6.2 Ablaufkonzeption Arbeitsschutz.....	54
4.6.3 Objektdokumentation	57
4.6.4 Testreinigung Lyra	60
4.6.5 Anwendung Swab-Probenahme	61
4.7 Anwendung Flötenuhr MS-450	63
4.7.1 Objektzustand	64
4.7.2 Ablaufplan	67
4.7.3 mRFA-Analyse Oberflächen	68
4.7.4 CO ₂ -Schneestrahlschnelle-Testreinigung Flötenuhr	75
4.7.5 Bewertung Reinigungsergebnis	77
4.8 Anwendung Tastenhebel	79
4.8.1 Objektzustand	79
4.8.2 Ablaufkonzeption Arbeitsschutz.....	79
4.8.3 mRFA-Messung Oberflächenkontamination	81
5. Bewertung Gesamtergebnis.....	84
5.1 Reinigungstest - Dekontamination	84
5.2 Probenahme Schnellanalyse	84
5.3 Übertragbarkeit	84

6. Projekt-Dokumente	84
6.1 Projektplattform	85
6.2 Datei Download-Link	85
6.2.1 Link Video-Datei:.....	85
6.2.2 Link RTI-Datei:.....	85
7. Forschungsbedarf	86
8. Aufstellung finanzielle Mittel.....	86
9. Literatur	86

Verzeichnis Abbildungen:

- Abbildung 1: Modell Strahldüse
- Abbildung 2: Schema CO₂-Schneestrawlwirkung
- Abbildung 3: Kamera- und Lichtposition RTI
- Abbildung 4: Holzproben Schädigungsschwelle
- Abbildung 5: Holzproben beschichtet Schädigungsschwelle
- Abbildung 6: Textilproben Schädigungsschwelle
- Abbildung 7: Papierproben Schädigungsschwelle
- Abbildung 8: Lederproben Schädigungsschwelle
- Abbildung 9: Metallproben Schädigungsschwelle
- Abbildung 10: Beinproben Schädigungsschwelle
- Abbildung 11: Videofoto Kältewirkung Schellackpolitur
- Abbildung 12: Videofoto Kältewirkung Seide
- Abbildung 13: Aufbau Standard-Düse (links); Aufbau Minilanze (rechts)
- Abbildung 14: Bestimmung Spurbreite und Spurpositionen
- Abbildung 15: RTI-Snapshots Mamorpapier 1960, Orgelmetall, Fichte
- Abbildung 16: mRFA-Anwendung
- Abbildung 17: Labor-Messgeräte
- Abbildung 18: Wischelemente
- Abbildung 19: Swab-Systeme
- Abbildung 20: GNM Objekte Wischtest
- Abbildung 21: DDT-Referenzspektrum
- Abbildung 22: Modell Strahlkammer
- Abbildung 23: Strahlkammer
- Abbildung 24: Dichtigkeitsprüfung
- Abbildung 25: Deckelfragmente
- Abbildung 26: mRFA-Messung Deckelfragment
- Abbildung 27: FTIR-Messung Deckelfragment
- Abbildung 28: CO₂-Reinigung Deckelfragment
- Abbildung 29: Reinigungsstaffel Deckelfragment
- Abbildung 30: Reduzierung weißer Niederschlag
- Abbildung 31: Tischplattenfragment Reinigungsstufen
- Abbildung 32: Lack-Reinigungsvergleich Tischplattenfragment
- Abbildung 33: Detail CO₂-Schneestrawlreinigung
- Abbildung 34: Probeflächen Salzverteilung
- Abbildung 35: Tafelklavier MS-15
- Abbildung 36: Lyra Details Vorzustand
- Abbildung 37: Lyra mRFA-Messung
- Abbildung 38: CO₂-Reinigung der Lyra
- Abbildung 39: Flötenuhr MS-450
- Abbildung 40: Flötenuhr Detail Vorzustand
- Abbildung 41: mRFA-Messpunkte Flötenuhr
- Abbildung 42: mRFA-Messung und Probenahme Flötenuhr
- Abbildung 43: FTIR-ATR Spektrometer Messsituation
- Abbildung 44: CO₂-Schneestrawlreinigung Flötenuhr
- Abbildung 45: Zustand Flötenuhr, vor und nach Reinigung
- Abbildung 46: Tastenhebel
- Abbildung 47: RFA-Messpunkte Tastenhebel
- Abbildung 48: Tastenhebel nach Reinigung
- Abbildung 49: Tastenhebel nach Reinigung

Die Bildrechte liegen bei Fraunhofer IPA, Germanisches Nationalmuseum, Stiftung Händel-Haus. Die Abbildungen fertigten, soweit nicht im Text angegeben: Ralf Grimme, Markus Raquet, Christof Zorn, Stefan Ehricht.

Verzeichnis Tabellen:

Tabelle 1: Materialauswahl Schädigungsschwelle
Tabelle 2: Vergleich Oberflächenabkühlung
Tabelle 3: Prozessparameter
Tabelle 4: Prozessparameter Schädigungsschwelle
Tabelle 5: Objekte Wischtest GNM
Tabelle 6: Swab RFA-Messergebnissvergleich KI 12996
Tabelle 7: Swab FTIR-, GCMS-, IC-Messergebnisse
Tabelle 8: Einsatz Analysemethode
Tabelle 9: Abmessungen Strahlkammer
Tabelle 10: Ergebnisse Strömungsprüfung
Tabelle 11: Bewertung Reinigungsstaffel
Tabelle 12: Messergebnisse Oberflächenrauigkeit
Tabelle 13: Rahmendaten Gefährdungsbeurteilung
Tabelle 14: Arbeitsablauf Testreinigung Lyra
Tabelle 15: Messpositionen mRFA-Messung und Swab-Probenahme
Tabelle 16: mRFA-Messergebnisse Lyra
Tabelle 17: Ablaufplan Testreinigung Flötenuhr
Tabelle 18: mRFA-Messergebnisse Flötenuhr
Tabelle 19: Auswertung Swab-Proben mit FTIR-Analyse Flötenuhr
Tabelle 20: Prozessparameter CO₂-Schneestrahlsreinigung Flötenuhr
Tabelle 21: Bewertung Arbeitsvorgang
Tabelle 22: Rahmendaten Gefährdungsbeurteilung
Tabelle 23: Ablaufplan Testreinigung Tastenhebel
Tabelle 24: mRFA-Messung Tastenhebel
Tabelle 25: Forschungsbedarf

Verzeichnis Diagramme:

Diagramm 1: Materialabkühlung Modell - Messung
Diagramm 2: Partikelanzahl Strahlsituation a)
Diagramm 3: Partikelanzahl Strahlsituation b)
Diagramm 4: Partikelanzahl Strahlsituation c)
Diagramm 5: mRFA-Messergebnisse Salzverteilung
Diagramm 6: mRFA- Direkt-Messwerte vor und nach der CO₂-Reinigung
Diagramm 7: mRFA- Swab-Messwerte vor und nach der CO₂-Reinigung
Diagramm 8: FTIR-Messwerte von P4 Swab
Diagramm 9: mRFA-Messwerte Flötenuhr, vor und nach der CO₂-Reinigung
Diagramm 10: Swab-mRFA-Messwertvergleich Flötenuhr
Diagramm 11: FTIR-Messkurven Swab P4 Flötenuhr

Verzeichnis Abkürzungen:

AGÖF	Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e. V.
AMR	Arbeitsmedizinische Regeln
ArbMedVV	Arbeitsmedizinische Vorsorgeverordnung
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
GHS	Global Harmonisiertes System
FTIR	Fourier-Transform-Infrarotspektrometer
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
GNM	Germanisches Nationalmuseum
GCMS	Gaschromatographie-Massenspektrometrie
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie
HSM	Holzschutzmittel
IC	Ionenchromatographie
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
IKK	Institut für Kunsttechnik und Konservierung
IRT	Infrarotthermografie
LGA	Landesgewerbeanstalt
OPZ	optischer Partikelzähler
PCP	Pentachlorphenol
PE	Polyethylen
μ-RFA	Mikroröntgenfluoreszenzanalyse
mRFA	mobile Röntgenfluoreszenzanalyse
RTI	Reflectance Transformation Imaging
SVOC	Semi Volatile Organic Compounds
TRGS	Technische Regeln Gefahrstoffe

Danksagung

Das Projekt ist durch die Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt erst ermöglicht worden. Für diese großzügige Unterstützung möchte sich die Stiftung Händel-Haus im Namen aller Beteiligten bedanken. Nur durch das Engagement vieler Kolleginnen und Kollegen konnte das Vorhaben erfolgreich durchgeführt werden. Ganz besonders danken möchten wir Herr Dr. Paul Bellendorf von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, der das Projekt unkompliziert, engagiert und stets verständnisvoll begleitet hat.

1. Einleitung

„Kulturgüter sind keine erneuerbaren Ressourcen – was einmal zerfallen oder zerstört ist, ist unwiederbringlich verloren. Sie bedürfen deshalb des bestmöglichen Schutzes. Ihre Erhaltung stellt somit auch eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe hoher Priorität dar.“[1]

Das Forschungsprojekt „DECO₂N“ widmet sich beispielhaft schadstoffbelasteten musealen Objekten aus dem Bereich Musikinstrumente. Material, Herstellungstechniken, Lagerung, Reparatur- und Restaurierungsmaßnahmen bilden mögliche Quellen für Schadstoffbelastungen. Im Unterschied zu den viel diskutierten Schadstoffbelastungen in Wohn- und Arbeitsräumen spielt die Gesundheitsgefährdung durch historische Artefakte bisher in der öffentlichen Wahrnehmung eine eher untergeordnete Rolle.

Nach konkreten gesundheitlichen Beeinträchtigungen von Mitarbeitern des Germanischen Nationalmuseums in Nürnberg, während der Arbeit in Musikinstrumentendepots 2011, wurden Arbeitsplatzanalysen bei der Landesgewerbeanstalt Bayern - Immissions- und Arbeitsschutz GmbH (LGA) auf der gesetzlichen Grundlage der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) in Auftrag gegeben. Die Ergebnisse der Raumluftuntersuchungen und Staubanalysen ergab, dass besonders die Staubproben die Vorgaben lt. PCP Richtlinie deutlich überschritten und auch die Schwermetallbelastung deutlich erhöht ist (z. B. Blei 17000 mg/kg - AGÖF Auffälligkeitwert: 150 mg/kg, Arsen bis zu 67 mg/kg - AGÖF 3 mg/kg, Quecksilber 150 mg/kg – AGÖF 1 mg/kg). Es ist davon auszugehen, dass auch die übrigen Depots mit ähnlichen Materialgruppen erhöhte Schadstoffbelastungen aufweisen.

Eine mündliche Überlieferung eines Museumsmitarbeiters bestätigt den Einsatz des Holzschutzmittels „Hylotox 59“ zur vorbeugenden Bekämpfung von Insektenbefall an Tasteninstrumenten der Sammlung Stiftung Händel-Haus in den 1980er Jahren. Auf den Gehäuseteilen, Resonanzböden und den Klaviaturen zeigen sich aktuell flächige Wirkstoffablagerungen des verwendeten Holzschutzmittels. Die korrosive Wirkung des HSM-Wirkstoffs führt zur Bildung von Reaktionsprodukten an Metallbauteilen, z. B. an Tastenbleigewichten, deren Abrieb sich auf angrenzenden Bauteilen verteilt. Diese Schadstoffbelastungen verhindern die Restaurierungen und wissenschaftliche Erforschung betroffener Musikinstrumente. Die in solchen Fällen praktizierte trockene Oberflächenreinigung mit Abluftfilterung bleibt unbefriedigend, da fester anhaftenden Verschmutzungen und Kontaminationen so nicht entfernt werden können. Um die Schadstoffbelastung in Museen und eine dadurch verursachte Gefährdung des Museumspersonals, der Besucher und Wissenschaftler zu verringern, ist es wichtig die musealen Objekte in Ausstellungen und den Depots auf wirksamere Weise zu reinigen. Bestehende Reinigungsmethoden müssen für dieses Ziel weiterentwickelt und neue Technologien den Bedingungen am Objekte angepasst werden. Einen viel versprechenden Ansatz zur Minimierung von Schadstoffbelastungen auf Oberflächen bildet hierbei das CO₂-Schneestrahilverfahren.

2. Ziel DBU-Projekt

Das Projekt verfolgte folgende Forschungsziele:

- 1 Erprobung von Einsatzmöglichkeiten der am Fraunhofer IPA entwickelten CO₂-Schneestrahlerwerkzeugen. Ermittlung von Werkzeugkennwerten für spezielle Oberflächenstrukturen und Oberflächenmaterialien. Konzeption und Anpassung von Absaug- und Filtereinrichtungen für verschiedene Objektstrukturen.
- 2 Ermittlung von Schwellenwerten für schädigende Oberflächenveränderung durch den CO₂-Schneestrahlerprozess auf verschiedenen Werkstoffoberflächen.
- 3 Ermittlung von Parametern zur Steuerung der CO₂-Schneestrahlerprozesse für Dekontaminationsanwendungen auf sensiblen Objektoberflächen.
- 4 Arbeitsplatzaufbau mit einer für die Dekontamination geeigneten CO₂-Schneestrahlerkammer und Absaugeinrichtung im Labormaßstab.
- 5 Entwicklung einer zerstörungsfreien Probenahme-Methode für schnelle „Vorort“-Tests und daraufhin angepasster Labor-Analytik.
- 6 Identifikation von Potenzialen für weitere Reinigungs- und Dekontaminationsanwendungen an Kulturgütern.

3. Methoden

3.1 CO₂-Schneestrahlschnologie

Die CO₂-Strahltechnik wird seit Jahren erfolgreich in vielen Branchen von der schonenden Reinigung bis hin zur Oberflächenstrukturierung eingesetzt. Ein Anwendungsbereich, der dem geplanten Vorhaben sehr nahe kommt stellt die Verwendung der Technologie bei der Sanierung von Bauwerken dar. Hierbei werden neben Schimmel, Rauch und Feuerschäden auch Oberflächen dekontaminiert. Zum Einsatz kommen hierbei in der Regel CO₂-Strahlmethoden, welche CO₂-Pellets mittels Druckluft auf die zu reinigende Oberfläche schießen. Diese Methoden sind für den großflächigen Einsatz konzipiert, besitzen eine große Abrasivität und setzen deshalb einen robusten Untergrund voraus. Für die Reinigung und Dekontamination von empfindlichen Oberflächen sind diese CO₂-Reinigungsmethoden nicht geeignet. CO₂-Schneestrahlerverfahren besitzen ein großes Potenzial diese Aufgabenstellung nachhaltig zu lösen. Das CO₂-Schneestrahlerverfahren beruht auf der Erzeugung von sehr kleinen Trockeneiskristallen (daher Bezeichnung „Schnee“), die im Einschlauch-Niederdruck-System durch zermahlen von Trockeneisblöcken oder durch entspannen von flüssigem Kohlendioxid erzeugt werden können. Bei der am Fraunhofer IPA entwickelten und patentierten Strahldüse entspannt sich das flüssig zugeführte CO₂ beim Austreten aus einer Zweistoffdüse zu einem Schneegasgemisch, das durch einen Mantelstrahl aus beschleunigter Druckluft gebündelt und bis in den Überschallbereich beschleunigt wird. Diese eingesetzte Strahldüse ist als Zweistoffdüse ohne Agglomerationskammer konstruiert.

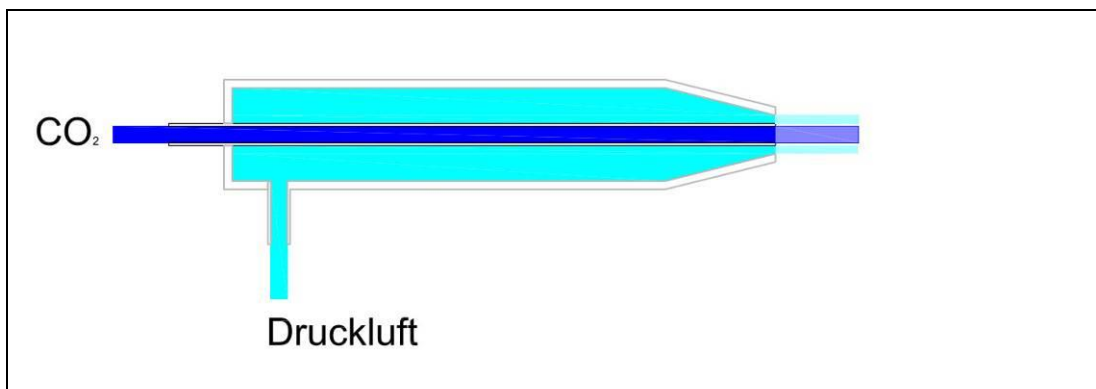


Abbildung 1: Modell Strahldüse

Grundlage des Verfahrens ist die Herstellung des nahezu monodispersen feinen CO₂-Schnees, welcher sofort bei der Entstehung mittels des überschallschnellen Beschleunigungsgases auf die zu reinigende Oberfläche geblasen wird. Die generierten Teilchen haben eine Größe < 100 µm und erzeugen beim Auftreffen einen starken Impuls auf anhaftende Kontaminationen, wie z.B. Partikel oder Verunreinigungen, wodurch diese kleinteilig zertrümmert, beschleunigt und entfernt werden. Schichtkontaminationen können stark abgekühlt werden, zerfallen durch Schrumpfen und Versprödung leichter in eine Partikelstruktur und werden durch den Eiskristall-Gasstrom abgetragen.

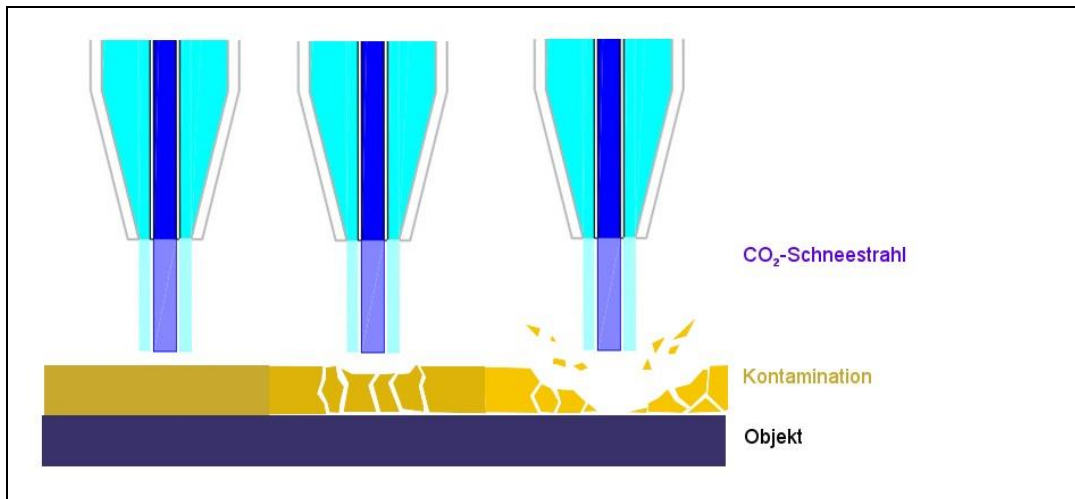


Abbildung 2: Schema CO₂-Schneestrahlswirkung

Aufgrund der homogenen Größenverteilung der Eiskristalle und des regelbaren Drucks des Beschleunigungsgases kann sehr feinfühlig ein Arbeitspunkt eingestellt werden, der die Kontamination von der zu reinigenden Oberfläche entfernt.

Der Reinigungsstrahl besitzt einen Durchmesser von ca. 4 mm bei der Standard-Düse und knapp 3 mm beim Düsensystem „Minilanze“. Der Arbeitsabstand der Standard-Düse zur Objektoberfläche wurde für die Voruntersuchungen auf 60 mm mit Einstrahlwinkel 45° eingerichtet.

Basierend auf der beschriebenen technologischen Grundlage, wurden für verschiedene im musealen Bereich auftretende Oberflächenstrukturen beispielhaft Schädigungsschwellen an unkontaminierten Probeflächen ermittelt.

Die so ermittelten Prozessparameter waren die Ausgangswerte für die Erprobung der CO₂-Schneestrahlsreinigung hinsichtlich Anwendbarkeit und Reinigungseffizienz beim Entfernen festhaftender Verunreinigungen sowie der Dekontamination von mit Schwermetallen und Biozid belasteten Oberflächen. Die Reinigungsversuche wurden an geeigneten musealen Modellflächen mit gegebene Verschmutzungen und Schadstoffbelastungen durchgeführt.

Neben dem Ziel der Schadstofffreiheit steht die konservatorische Aufgabe der Erhaltung der objektspezifischen Patina. Dafür wurde ein manuell vorbereitetes Reinigungsziel auf einer Testfläche mit einem mittels CO₂-Schneestrahls-technologie auf derselben Oberfläche direkt angrenzend hergestelltes Reinigungsergebnis verglichen. Zusätzlich wurde die Reinigung kontaminierter Modelloberfläche bis zur Schadstofffreiheit der Oberfläche durchgeführt und dann mit den Zielvorgaben verglichen.

Die Reinigungseffizienz wurde mit verschiedenen Analysemethoden überprüft.

Für zukünftige Anwendungen der CO₂-Schneestrahls-technologie können fallbezogene Hinweise gegeben werden, wie Schadstoffreduktion und Krustenschmutzreinigung unter Erhalt der Patina möglich ist.

3.2 Analysemethoden

Etablierte Analysemethoden kontaminierter Oberflächen setzen eine Probeentnahme von Originalsubstanz oder den „Vorort“-Einsatz der Analysetechnik voraus. Für den Anwender soll durch eine einfachere Probeentnahme die Möglichkeit geschaffen werden, die Kontamination bzw. den Reinheitsgrad der Oberfläche „Vorort“ zerstörungsfrei abzunehmen und im eigenen Labor oder mobilen Analysegeräten bewerten zu können.

Für die qualitative Analyse organischer und anorganischer Substanzen müssen verschiedene Messmethoden verwendet werden. Im Falle des HSM-Wirkstoffes DDT kann z. B. mittels mRFA nur das Chlor in der Verbindung nachgewiesen werden. Ein Rückschluss auf die organische Substanz ist damit aber nicht möglich. Mobile Messgeräte für den Vororteinsatz sind für RFA- und FTIR-Messungen verfügbar.

Bei Messungen mit mobil-RFA muss stets die elementspezifische Tiefenmesswirkung bei der Beurteilung von Oberflächenablagerungen berücksichtigt werden.

Holzschutzmittelwirkstoffe dringen bei flüssiger Applikation mehrere Millimeter tief in die Holzstruktur ein und lagern sich z. B. im Falle von „Hylotox 59“ mit dem Wirkstoff DDT über einen sehr langen Zeitraum (> 10 Jahre) auf den Objektflächen ab. Nach einer erstmaligen Oberflächenreinigung kann ein nicht geringer Wirkstoffanteil in den tieferliegenden Holzschichten verbleiben und messtechnisch bei der mRFA Nachkontrolle mit erfasst werden.

Hochgenaue qualitative und quantitative Analysen sind nur im Labor durchführbar.

Laborgeräte setzen immer eine Probeentnahme und deren Transport voraus. Im Laborbereich werden für die Bestimmung organischer Substanzen

GasChromatographie-MassenSpektrometer, Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (ATR-System), Raman-Spektroskopie, IR-Spektroskopie, Hochdruckflüssigkeit-Chromatographie und Ionenchromatographie eingesetzt. Für die Bestimmung anorganischer Substanzen kommen z. B. zum Einsatz: RFA, Raman- und IR-Spektroskopie.

3.3 Dokumentation Schädigungsschwellenermittlung

Die fotografische Dokumentation der beprobten Oberflächen erfolgte mit einer Digitalkamera und mittels RTI-Aufnahmen (Reflectance Transformation Imaging). „RTI wurde 2001 (Hewlett-Packard Laboratories: „Polynomial Texture Maps“; General Public License 3 Software „RTIBuilder“) entwickelt und hat inzwischen eine weite Verbreitung für die Dokumentation von Objekten mit flachen Oberflächen, wie etwa Felsbilder, Inschriften oder Münzen, gefunden, da hochauflösende Ergebnisse mit vergleichsweise günstiger Ausrüstung erzielt werden können.“ (IANUS: www.ianus-fdz.de; // culturalheritageimaging.org; abgerufen 24.9.2018)

Mit der Software „RTIBuilder“ können die ptm-Dateien unter 6.2.2 geöffnet werden. Zudem wurden Videosequenzen aufgezeichnet und Probenprotokolle angelegt.

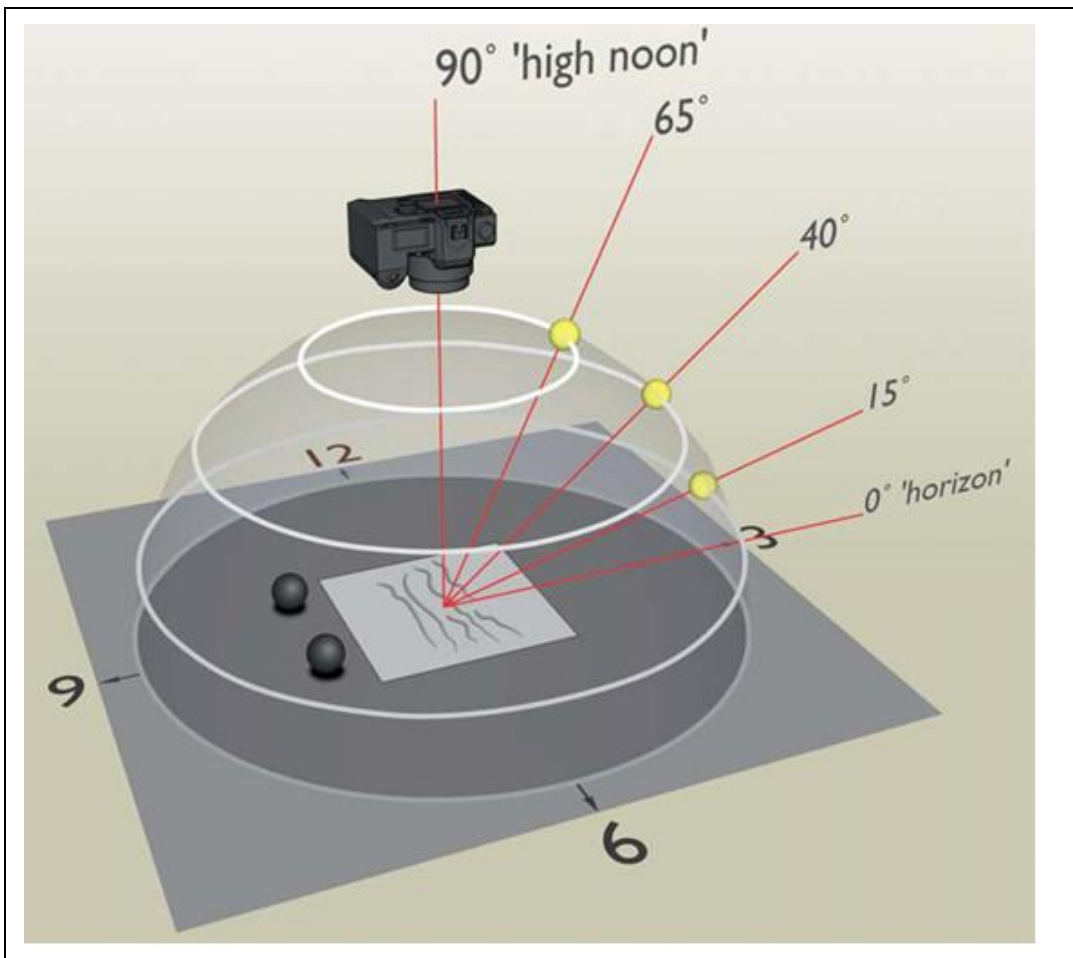


Abbildung 3: Kamera- und Lichtposition RTI (Historic England; Drawn by John Vallender).

3.4 Probenahmesystem

Die Entwicklung einer in der Anwendung einfachen Probenahme, soll dem späteren Anwender erlauben, den Reinheitsgrad der vorgefundenen Oberfläche einfach und schnell zu beurteilen.

Schadstoffbelastete Oberflächen im musealen Bereich weisen eine hohe Materialvielfalt auf, so dass sich vorzugsweise Systeme mit trockener Probenahme für sehr unterschiedliche Objektoberflächen und -formen eignen. Eine Anwendung lösemittelhaltiger Beprobungssysteme wäre nur bei bekannter Oberflächenzusammensetzung möglich, um über die Auswahl der Lösungsparameter eine Schädigung ausschließen zu können.

Zur Anwendung sollen kleinflächig wirksame Probenahmesysteme kommen, mit denen auch auf empfindlichen Oberflächenstrukturen gearbeitet werden kann. Zur Erprobung wurden 3 im Reinigungsbereich etablierte Wischelemente ausgewählt:

- Glasfasermatte (Glaswolle in Adsorptionsröhrchen)
- Wischtuchstreifen (PE)
- Swabs (Tupfer)

Mittels der trockenen Probenahme liegen die aufgenommenen Schadstoffe chemisch und physikalisch praktisch unverändert für die Analytik vor. Untersucht wurde die Aufnahmefähigkeit der Probenahmesysteme für Schadstoffe von unterschiedlichen Materialoberflächen und deren Eignung für die analytische Auswertung.

4. Untersuchungsverlauf

4.1 Ermittlung Schädigungsschwelle

4.1.1 Probenvorbereitung

Zur Ermittlung der Schädigungsschwellen wurden 21 Probekörper angefertigt, welche einen repräsentativen Querschnitt an verwendeten Materialien und Materialoberflächen darstellen.

Material	Abmessung	Proben-Nr.:
Fichte	150x100mm	1.4
Linde	150x100mm	2.4
Eiche	150x100mm	3.1
Buchsbaum	150x100mm	4.1
Laubholz + Schellack	100x100mm	10.1
Nadelholz + Glutinleim	100x100mm	11.1
Laubholz + Wachs	100x100mm	12
Leinenstoff	100x100mm	21
Baumwollstoff	100x100mm	22
Seidenstoff	100x100mm	23
Wollstoff	100x100mm	24
Marmorpapier 19. Jhd.	100x100mm	31
Marmorpapier 1960	100x100mm	32
Marmorpapier 21. Jhd.	100x100mm	33
Lithographie	100x100mm	34
Schafsfleder (Alaungerbung)	100x100mm	41.1
Rehleder (Vegetabilgerbung)	100x100mm	42.1
Messingblech	100x100mm	51.1
Zinnblech	100x100mm	52.1
Elfenbein	ca. 10x80mm	61.1
Rinderknochen	ca. 50x30mm	62.1

Tabelle 1: Materialauswahl Schädigungsschwelle

Die Holzoberfläche bei Fichte, Buchsbaum ist Radialschnitt, bei Eiche, Linde der Tangentialschnitt. Die Holzoberflächen wurden mit Körnung P120 faserparallel geschliffen.

			
Materialprobe 1.4 Fichte	Materialprobe 2.4 Linde	Materialprobe 3.4 Eiche	Materialprobe 4.4 Buchs

Abbildung 4: Holzproben Schädigungsschwelle

Die Probeflächen „Holz beschichtet“ zeigen die auftragstechnologietypische Oberflächenstruktur und wurden nicht zusätzlich geschliffen. Als Glutinleim wurde Knochenwarmleim verwendet, die Schellackoberfläche ist eine Schellackpolitur aus dem 19. Jhd. und die Wachsoberfläche wurde mit Bienenwachs hergestellt.

		
Probe 10.1 Schellack	Probe 11.1 Glutinleim	Probe 12.0 Wachs

Abbildung 5: Holzproben beschichtet Schädigungsschwelle

Die Probefläche „Leinenstoff“ besteht aus ungefärbtem Leinengewebe in Leinwandbindung mit einer Fasendichte von 23 Fäden/cm, das auf einer Trägerplatte fixiert wurde.

Die Probefläche „Baumwollstoff“ besteht aus ungefärbtem Baumwollgewebe (Cretonne-Nessel) in Leinwandbindung mit einer Fadendichte von 23 Fäden/cm, das auf einer Trägerplatte fixiert wurde.

Die Probefläche „Wollstoff“ besteht aus ungefärbtem Wollgewebe in Leinwandbindung mit einer Fadendichte von 21 Fäden/cm, das auf einer Trägerplatte fixiert wurde.

Die Probeflächen „Seidenstoff“ besteht aus ungefärbtem Seidenpopeline in Leinwandbindung mit einer Fadendichte von 40 Fäden/cm, das auf einer Trägerplatte fixiert wurde.

			
Probe 21, Leinen	Probe 22, Baumwolle	Probe 23, Seide	Probe 24, Wolle

Abbildung 6: Textilproben Schädigungsschwelle

Die Probeflächen „Marmorpapier“ entstammen verschiedenen Zeitepochen, sind mehrfarbig bedruckt und unbehandelt auf eine Trägerplatte geklebt. Die Probeflächen „Lithographie“ ist einfarbig mit geometrischen Formen bedruckt und auf eine Trägerplatte geklebt.

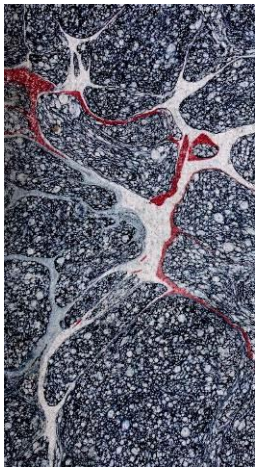
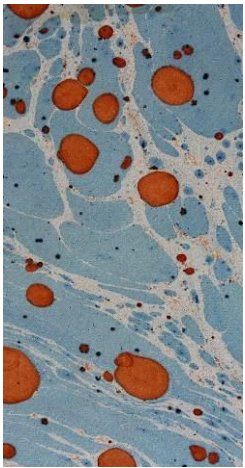

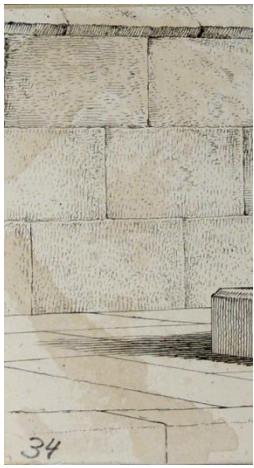
			
Probe 31, Marmorpapier 19. Jhd.	Probe 32, Marmorpapier 1960	Probe 33, Marmorpapier 20./21. Jhd.	Probe 34, Lithographie

Abbildung 7: Papierproben Schädigungsschwelle

Die Probefläche „Schafslleder“ besteht aus alaugegerbtem Schafslleder mit Narbenbild (ungeschliffen) und wurde auf eine Trägerplatte aufgeklebt. Die Probefläche „Rehlleder“ besteht aus vegetabil gegerbtem Rehlleder (braun) ohne Narbenbild (geschliffen) und wurde auf eine Trägerplatte aufgeklebt.



Abbildung 8: Lederproben Schädigungsschwelle

Die Probeflächen „Metall“ sind Metallbleche aus Orgelmetall (58%ige Zinn/Blei-Legierung) und Messingblech (Zn 30), die auf eine Trägerplatte aufgeklebt wurden. Die Metalloberflächen wurden mit Polierkorund angeschliffen.

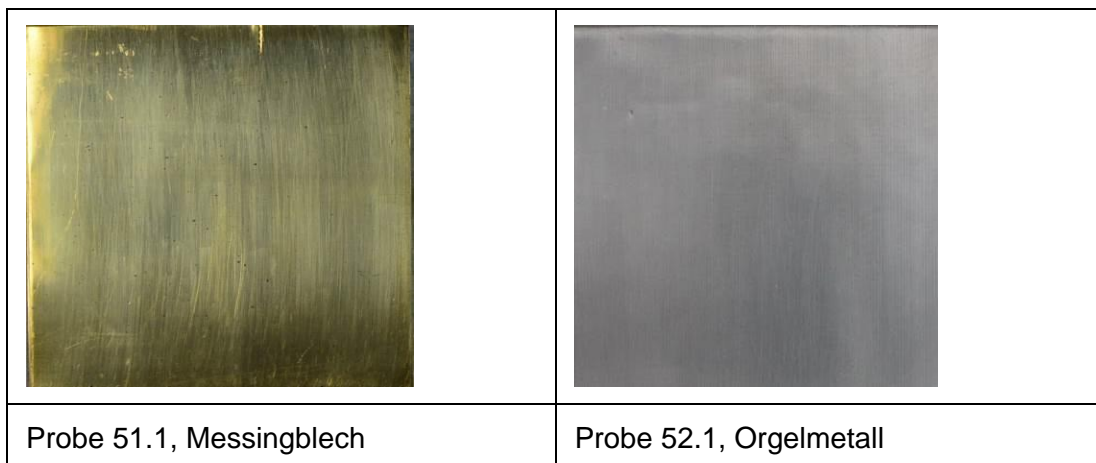


Abbildung 9: Metallproben Schädigungsschwelle

Die Probefläche „Elfenbeinbelag“ besteht aus Tastenbelägen einer Klavierklaviatur, die nicht zusätzlich behandelt wurden. Die Probefläche „Rinderknochen“ besteht aus Rinderröhrenknochen und ist trocken geschliffen, Körnung P250.

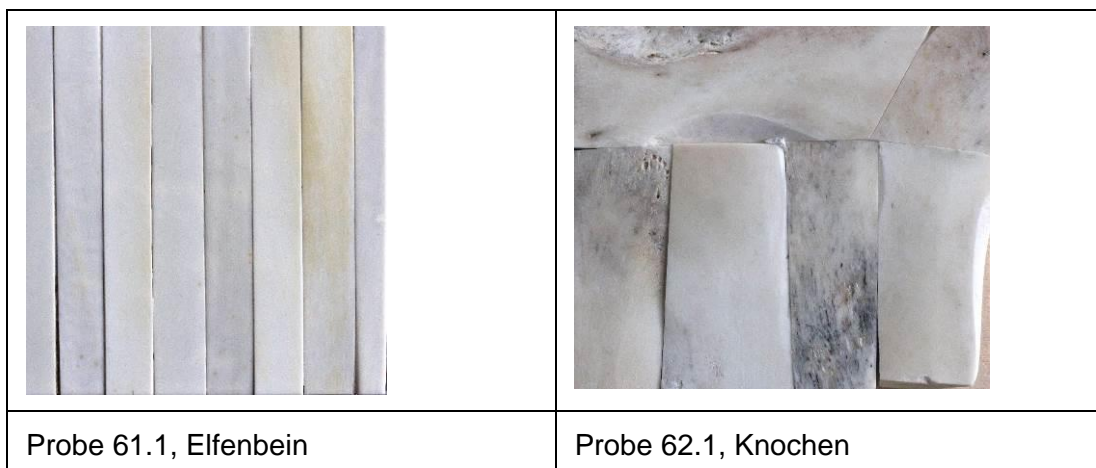





Abbildung 10: Beinproben Schädigungsschwelle

4.1.2 Kälteeinwirkung durch CO₂- Schneestrahleinigung

Der eingesetzte Reinigungsstrahl aus CO₂-Schnee, CO₂-Gas und Beschleunigungsluft besitzt eine Arbeitstemperatur von ca. - 78°C. In Abhängigkeit der Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Materialoberflächen können diese bei der Reinigung stark abkühlen. Die unterschiedliche Wärmeausdehnung der Materialien kann zu Spannungen und Rissen im Bauteil, aber auch zur Bildung von Kondenswasser führen. Wärme- bzw. Kälteübertragungen durch turbulente Strömungen können rechnerisch nur näherungsweise bestimmt werden, da viele Werkstoffeigenschaften und Strömungsparameter betragsgenau berücksichtigt werden müssen.

An verschiedenen Materialproben wurden Temperaturmessungen mit einer Wärmebildkamera (Testo 880) während des CO₂-Strahlvorganges mittels Videoaufzeichnung dokumentiert.

Die ermittelten Abkühltemperaturen sind in Tabelle 2 aufgeführt:

Material	Bild	Min. Temp. [°C]	Beobachtung
Schellack Nr. 10.1		0	Bei punktueller und meandrierender Reinigung im Strahlmittelpunkt 0°C. Nach der Reinigung wärmt sich die Oberfläche wieder langsam auf. Durch Strahlen mit Druckluft wird der Aufwärmprozess beschleunigt.
Seide Nr. 23		-39	Im Arbeitspunkt kühlt die Oberfläche stark ab, erwärmt sich danach schnell auf Umgebungstemperatur
Wolle Nr. 24		-37	Im Auftreffpunkt kühlt die Oberfläche stark ab, erwärmt sich danach schnell auf Umgebungstemperatur

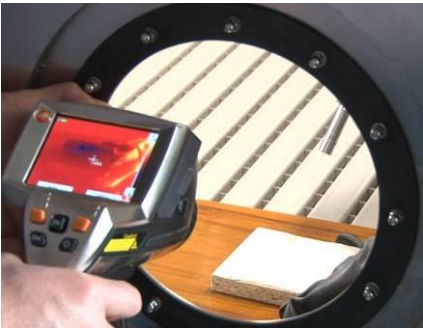

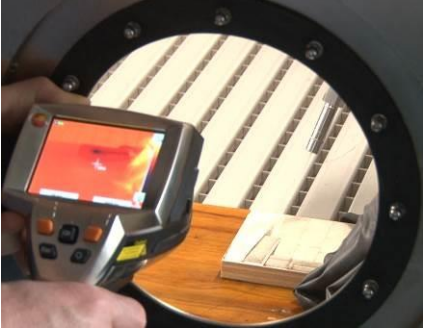
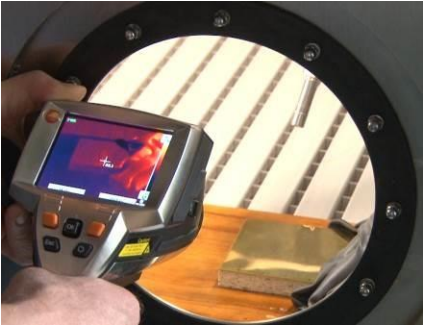
Material	Bild	Min. Temp. [°C]	Beobachtung
Schafsleder Nr. 41.1		9	Temperatur bei Versuch beobachtet.
Elfenbein Nr. 61.1		-2	Temperatur bei Versuch beobachtet.
Papier Nr. 34		-24	Temperatur bei Versuch beobachtet.
Messing Nr. 51.1			Eine Temperaturmessung mittels IRT ist auf einer stark reflektierenden Metallfläche ($\epsilon < 0,06$) nicht sicher möglich, die polierte Oberfläche reflektiert jede auftreffende Temperaturstrahlung.

Tabelle 2: Vergleich Oberflächenabkühlung

Die ermittelten Temperaturen bestehen nur im Auftreffpunkt des CO₂-Strahls und traten bei der Versuchsdurchführung mit der Standard-Düse in einem Durchmesser von ca. 12 mm auf. Unmittelbar nach dem Strahldurchgang stellten sich auf den verschiedenen Oberflächen jeweils um 2-5 Grad gegenüber der Raumtemperatur verringerte Werte ein, nach ca. 2 min hatten sich die Oberflächentemperaturen der Raumtemperatur angeglichen.

Eine mit Schellack polierte Oberfläche kühlt relativ langsam aus:



	
Messpunkt-Temperatur: 14,8°C Scale-min: 15°C, Scale-max: 21°C Videozeit: 0,12 sek	Messpunkt-Temperatur: 18,2°C Scale-min: 16°C, Scale-max: 21°C Videozeit: 9,12 sek

Abbildung 11: Videofoto Kältewirkung Schellackpolitur ([Video](#))

Auf Textilien zeigt die Wärmebildkamera eine schmale Kältespur:




	
Messpunkt-Temperatur: 22,1°C Scale-min: 16°C, Scale-max: 31°C Videozeit: 5,36 sek	Messpunkt-Temperatur: 22,0°C Scale-min: 11°C, Scale-max: 30°C Videozeit: 5,84 sek
	
Messpunkt-Temperatur: 21,6°C Scale-min: -30°C, Scale-max: 30°C Videozeit: 6,36 sek	Messpunkt-Temperatur: 18,6°C Scale-min: -11°C, Scale-max: 30°C Videozeit: 6,68 sek

Abbildung 12: Videofoto Kältewirkung Seide

Der Temperatenausgleich auf der Oberfläche konnte durch ein Bestrahlen mit Druckluft (ohne CO₂-Gas) beschleunigt werden. Werkstoffe mit niedriger Wärmekapazität und geringer Masse werden unter gleichen Bedingungen stärker und schneller abkühlen, als Werkstoffe mit hoher Wärmekapazität und Masse. Diagramm 1 zeigt einen Vergleich dieser Eigenschaftskombination für verschiedene Werkstoffe (vereinfachtes Modell).

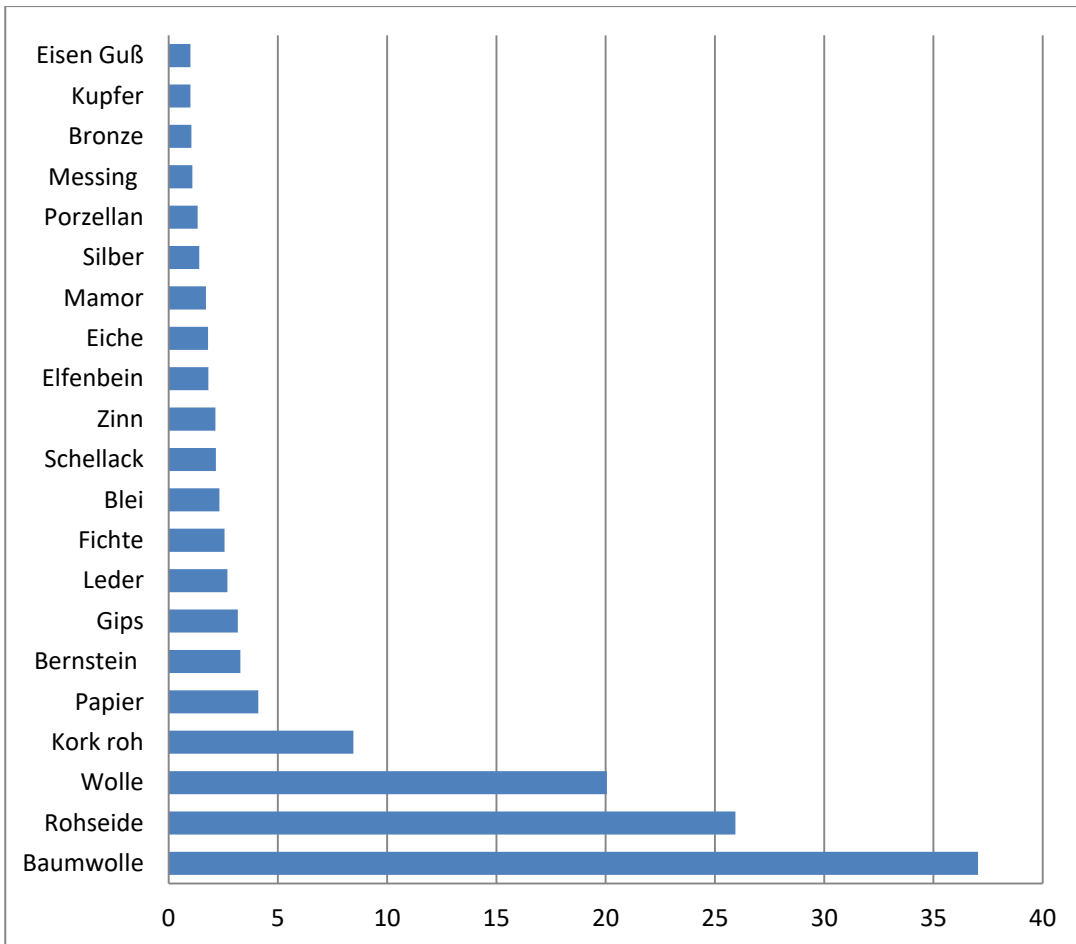


Diagramm 1: Verhältnis Abkühlung Werkstoffe

4.1.3 Versuchsaufbau

Um die Materialproben unter gleichen Bedingungen reinigen zu können wurde ein Versuchsstand aufgebaut, der reproduzierbare Versuchsbedingungen ermöglichte. Es wurden zwei unterschiedliche, vom Fraunhofer IPA entwickelte und patentierte Strahldüsen getestet. Die Düsen haben verschiedene Geometrien und unterscheiden sich in ihrer Abrasivität.

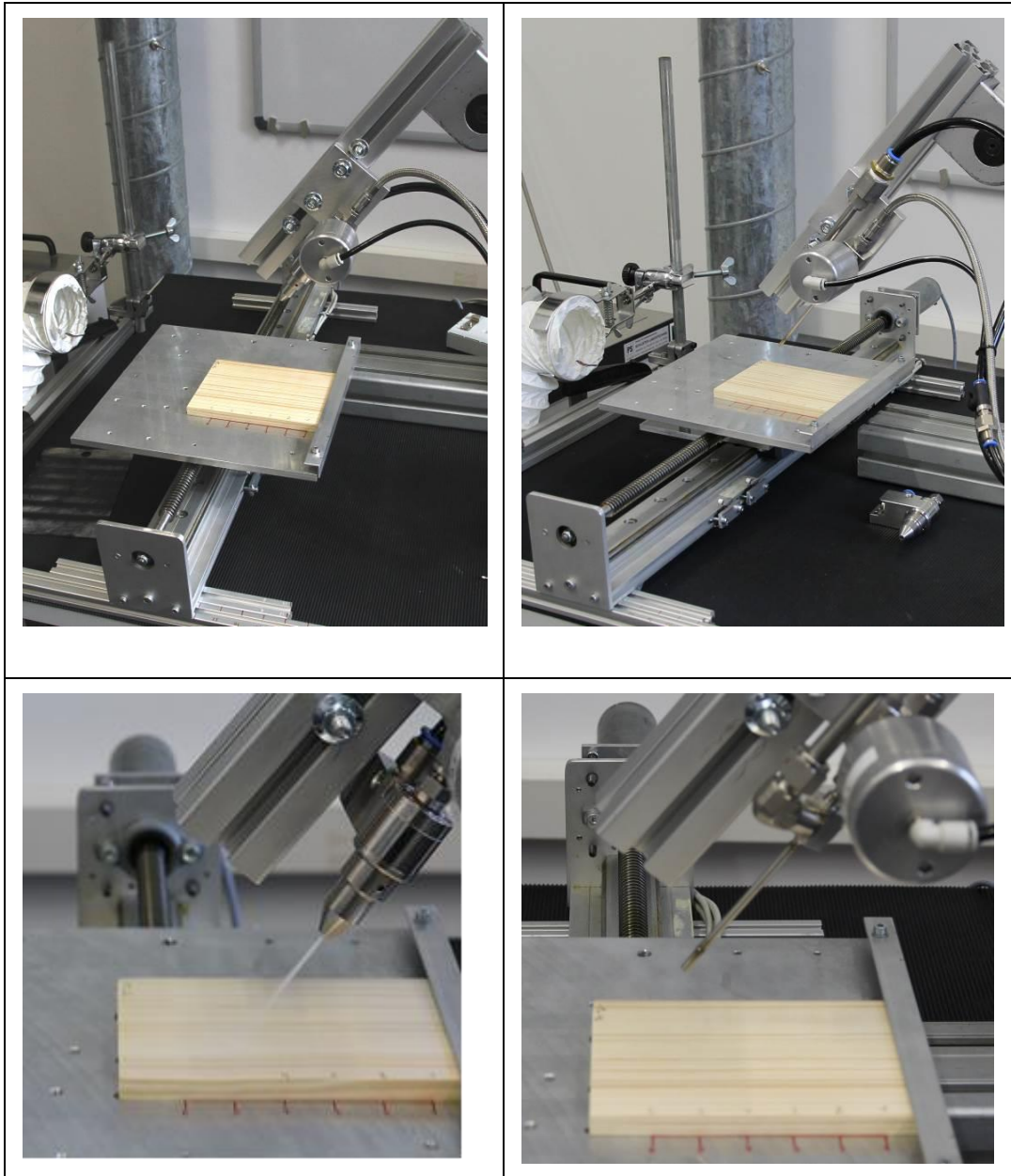


Abbildung 13: Aufbau Standard-Düse (links); Aufbau Minilanz (rechts) [\(Video\)](#)

Die Proben wurden auf einem Lineartisch fixiert, so dass der Düsenabstand während der Tischverföhrung konstant bleibt. Die Verföhrungsgeschwindigkeit des Lineartisches wurde so eingestellt, dass diese der Geschwindigkeit der Düsenbewegung einer üblichen Handreinigung entspricht ($v = 0,18 \text{ m/s}$). Der Düsenabstand ($a = 60 \text{ mm}$ Standarddüse bzw. 40 mm Minilanz) und der Düsenwinkel ($\alpha = 45^\circ$) entsprechen ebenfalls gebräuchlichen Einstellungen bei der Reinigung einer Oberfläche.

Die Versuche zur Bestimmung der Beschädigungsschwelle der Holzproben starten mit den Standardeinstellungen der CO₂-Reinigungsdüse für CO₂-Druck und Beschleunigungsgasdruck. Die Parameter werden stufenweise in Abhängigkeit der erzielten Oberflächenveränderung variiert.

Die Standard-Düse besitzt eine CO₂-Kapillare mit einem Ausströmungsdurchmesser von 0,35 mm. Bei jedem Versuch wird die CO₂-Düse jeweils zweimal über die Oberfläche geführt (Tisch Fahrt nach links und nach rechts). Dieser Ablauf wird nachfolgend Hub genannt. Hierdurch entsteht eine gereinigte Spur mit der Breite von ca. 8 mm. Nach jedem Hub wird der Lineartisch versetzt um eine neue Stelle der Holzprobe zu erreichen.

	Parameter	Werte
Standard CO ₂ -Reinigungsdüse (0,35)	CO ₂ -Druck [bar]	65
	Beschleunigungsgasdruck [bar]	3-7
	Arbeitsabstand Standard-Düse ca. [mm]	60
	Strahlwinkel zu Oberfläche [°]	45
	Flächenleistung ca. [cm ² /s]	14,4
Minilanze	CO ₂ -Druck [bar]	65
	Beschleunigungsgasdruck [bar]	3-7
	Arbeitsabstand Minilanze ca. [mm]	40
	Strahlwinkel zu Oberfläche [°]	45
	Flächenleistung ca. [cm ² /s]	
Lineartisch	Verfahrgeschwindigkeit [m/s]	0,18

Tabelle 3: Prozessparameter zur Ermittlung der Beschädigungsschwelle

Die Probenfläche „Holz unbehandelt“ wurde auf 150 x 100 mm festgelegt, so dass bei einer Spurbreite von 8 mm mit der Standard-Düse 6 Spuren pro Probe angelegt werden konnten.

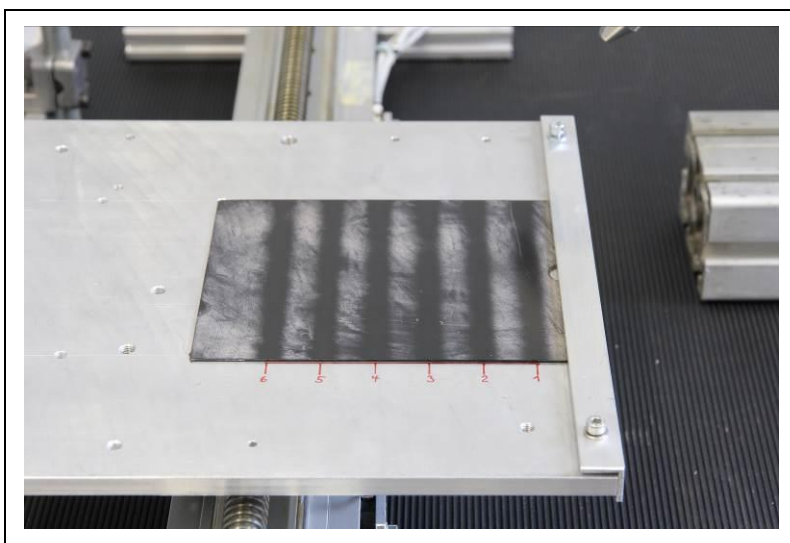


Abbildung 14: Bestimmung Spurbreite und Spurpositionen

Alle weiteren Probeflächen wurden auf 100 x 100 mm festgelegt. Bei einer Spurbreite von 8 mm mit der Standard-Düse konnten 4 Spuren pro Probe angelegt werden.

4.1.4 Ergebnisse Testreihe Schädigungsschwelle

Die Beurteilung von Beschädigungen erfolgte vornehmlich visuell unter Zuhilfenahme von Mikroskopen. Fachkolleginnen anderer Material- und Fachdisziplinen wurden bei Bedarf hinzugezogen und die Beschädigungsschwellen diskutiert. Die fotografische Dokumentation der beprobten Oberflächen erfolgte mit einer Digitalkamera und mittels RTI-Aufnahmen.

Fichte (P 1.4): Mit der Standard-Düse werden durch alle Variationsstufen sichtbare Veränderungen der Oberfläche hervorgerufen. Im Gegensatz dazu sind bei der Minilanze keine Veränderungen trotz verringertem Düsenabstand zur Oberfläche zu beobachten. ([RTI P 1.4 Fichte](#))

Linde (P 2.4): Mit der Standard-Düse werden im Druckluftbereich 5-7 bar sichtbare Veränderungen hervorgerufen. Im niedrigeren Druckbereich sind diese kaum noch nachweisbar. Mit der Minilanze sind im Variationsbereich keine Veränderungen auf der Holzoberfläche optisch zu beobachten. ([RTI P 2.4 Linde](#))

Eiche (P 3.1):

Mit der Standard-Düse werden im Druckluftbereich 5-7 bar nur ganz geringe Veränderungen hervorgerufen. Im niedrigeren Druckbereich sind diese nicht nachweisbar. Mit der Minilanze tritt bei verringertem Düsenabstand eine ähnliche Staffelung der Veränderungen auf der Holzoberfläche auf. Im Druckbereich 7 bar sind ganz schwache Veränderungen sichtbar, im Druckbereich unter 5 bar sind keine Veränderungen sichtbar. ([RTI P 3.1 Eiche](#))

Buchsbaum (P 4.1): Im Druckbereich 7-6 bar sind sowohl bei der Standarddüse als auch bei der Minilanze mit verringertem Strahlabstand ganz schwache Veränderungen sichtbar, im Druckbereich unter 6 bar sind keine Veränderungen sichtbar. Deutlich ist die Tendenz, dass mit zunehmender Holz-Rohdichte die Oberflächenveränderungen unter identischen Prozessbedingungen abnehmen. ([RTI P 4.1 Buchsbaum](#))

Laubholz mit Schellack (P 10.1): Mit der Standard-Düse konnte auch bei 7 bar Druckluft nach 10 Hüben optisch keine Veränderungen festgestellt werden. Die Minilanze wurde daraufhin nicht getestet. Ab dem 10. Überfahren entsteht ein vorübergehender Beschlag durch kondensierende Luftfeuchtigkeit. ([RTI P 10.1 Schellackoberfläche](#))

Nadelholz mit Glutinleim (P 11.1): Auch hier konnte nach 10 Hüben mit der Standard-Düse und 7 bar Druckluft optisch keine Veränderungen festgestellt werden. Bei 10maligem überfahren wird die Reinigungsspur leicht feucht. ([RTI P 11.1 Glutinleim](#))

Laubholz mit Wachs (P 12): Nach 10 Hüben mit der Standard-Düse und 7 bar Druckluft konnte ebenfalls optisch keine Veränderungen festgestellt werden. Eine Vereisung der Fläche trat nicht auf. ([RTI P 12 Wachs](#))

Leinenstoff (P 21): Nach 10 Hüben mit der Standard-Düse bei 7 bar Druckluft konnten optisch keine Veränderungen festgestellt werden. Nach 5 Hüben wird die Probe leicht feucht, es tritt bis zum 10. Hub eine leichte Vereisung auf. ([RTI P 21 Leinen](#))

Baumwollstoff (P 22): Nach 10 Hüben mit der Standard-Düse und 7 bar Druckluft sind optisch keine Veränderungen erkennbar. Nach 5 Hüben wird die Probe fühlbar feuchter, aber es zeichnet sich keine feuchte Spur ab.

Seidenstoff (P 23): Bereits beim 1. Hub mit der Standard-Düse und 7 bar Druckluft zeigen sich leichte Vereisung und leichte Wellen im Stoff, an den Fasern sind optisch keine Veränderungen zu erkennen. Nach 5 Hüben ist die Oberfläche feucht und das Gewebe wellt sich. Diese Wellen blieben nach der Trocknung erhalten. Destilliertes Wasser auf dem Geweberand verursachte keine Falten. Die Falten resultieren danach überwiegend aus dem Strahldruck. Druckluft mit 7 bar ohne CO₂ führte zu keiner Wellenbildung. Die Wellen entstehen erst durch Feuchtigkeit und Druck. Die Minilanze verursacht optisch keine Veränderungen an der Faser und nur eine leichte Wellenbildung im Gewebe, die sich schnell zurück bildet.

Wollstoff (P 24): Die Spur 1 zeigt leichte Vereisung, die länger als bei Seide anhält. Nach 5 Hüben ist das Tuch feucht und der Stoff wellt sich. Die Wellen bilden sich nicht mehr ganz zurück. An der Wollfaser können optisch keine Veränderungen (Faserausrisse, -brüche, Bindungsverschiebungen) beobachtet werden.

Marmorpapier 19. Jhd. (P 31): Nach 5 Hüben mit der Standard-Düse und 7 bar Druckluft ist die Spur nur leicht feucht, nach 10 Hüben ist die Spur erkennbar. Unter Mikroskop sind in der Spur mehr Fasern erkennbar, die aus der Oberfläche herausragen. Nach 10 Hüben mit der Minilanze konnten optisch keine Veränderungen festgestellt werden.

Marmorpapier um 1960 (P 32): Mit der Standard-Düse im Druckbereich von 5-7 bar konnte bereits bei Hub 1 optisch eine leichte Veränderung der Oberfläche beobachtet werden, ab Hub 3 war die Spur deutlich sichtbar. Mit der Minilanze konnten auch nach Hub 10 optisch keine Veränderungen festgestellt werden. ([RTI P 32 Marmorpapier](#))

Marmorpapier 21. Jhd. (P 33): Mit der Standard-Düse und 7 bar Druckluft ist nach dem 1. Hub optisch noch keine Veränderung feststellbar. Nach 5 Hüben zeigen sich erste schwache Veränderungen, und die Spur ist kaum feucht. Nach 10 Hüben wird die Spur leicht feucht und klebrig, die Spur ist leicht aufgefasert und gereinigt. Mit der Minilanze konnten nach 10 Hüben keine Veränderungen festgestellt werden, die Spur wurde kühl und leicht feucht.

Lithographie (P 34): Nach 5 Hüben mit der Standard-Düse und 7 bar Druckluft ist die Spur leicht feucht, aber nicht klebrig, Einzelfasern zeigen keine Veränderung. Beim schrägen Begutachten ist die Spur im Seitenlicht schwach sichtbar. Nach 10 Hüben nimmt die Feuchte auf der Spur zu, eine Kleberschicht wurde entfernt.

Schafslleder (P 41.1): Mit der Standard-Düse und 7 bar Druckluft ist eine Spurbildung sehr schwach zu erkennen. Dieser optische Effekt kann auch durch das Reinigen der Narbenschicht verursacht sein. Eine Schädigung der Faser ist optisch nicht feststellbar. Auch nach 5 Hüben zeigt sich keine Veränderung, die Spur ist ganz leicht feucht, löst sich vom Probekörper. Nach insgesamt 10 Hüben keine weiteren Veränderungen. ([RTI P 41.1 Schafslleder](#))

Rehleder (P 42.1): Nach dem 1. Hub mit der Standard-Düse und 7 bar Druckluft ist auf der Lederoberfläche (ohne Narbenbild) eine kurze Vereisung und das Aufstellen von einzelnen Fasern zu erkennen. Nach 5 Hüben zeigt sich ein Feuchteniederschlag und Reifbildung, nach 10 Hüben ist das Erscheinungsbild unverändert. Mit der Minilanze zeigt sich nach 5 Hüben ein leichter Feuchteniederschlag, nach 10 Hüben hintereinander zeigt sich eine feuchte Spur auf der Oberfläche, ein Faserabrieb ist nicht erkennbar. ([RTI P 42.1 Rehleder](#))

Messingblech (P 51.1): Mit der Standard-Düse und 7 bar Druckluft zeigen sich nach 10 Hüben optisch keine Veränderungen auf der Oberfläche. Es bildet sich nach 10 Hüben ein leichter Feuchtigkeitsniederschlag.

Orgelmetall (P 52.1): Mit der Standard-Düse und 7 bar Druckluft ist bereits nach dem 1. Hub eine Oberflächenspur im Glanzbild der Probe zu erkennen, die nach dem 10. Hub deutlich sichtbar ist. Mit der Minilanz ist diese Oberflächenveränderung bei 7 bar und 6 bar Druckluft nach 5 Hüben schwach erkennbar. Erst ab 5 bar Druckluft sind mit der Minilanz auch nach 10 Hüben keine Veränderungen auf der Oberfläche zu erkennen. ([RTI P 52.1 Orgelmetall](#))

Elfenbein (P 61.1): Mit der Standard-Düse bei 7 bar Druckluft sind auch nach 10 Hüben optisch keine Veränderungen erkennbar. Nach 10 Hüben ist die Spur leicht feucht. Die Minilanz wurde nicht getestet.

Rinderknochen (P 62.1): Mit der Standard-Düse bei 7 bar Druckluft ist nach 1. Hub optisch keine Veränderungen erkennbar. Nach 10 Hüben ist eine Spur deutlich sichtbar. Auch bei auf 5 bar verminderter Druckluft ist nach 5 Hüben eine Spur erkennbar. Mit der Minilanz ist bei 7 bar Druckluft auch nach 10 Hüben keine Veränderung erkennbar. ([RTI P 62.1 Rinderknochen](#))

Für alle getesteten Materialklassen konnte mindestens eine Parametervariante ermittelt werden, bei der auch nach mehrmaligem Strahlvorgang keine optisch sichtbare Veränderung auftritt. Die CO₂-Schnee-Strahltechnologie eignet sich für den Einsatz in einem breiten Materialspektrum. Aus den getesteten Prozessparametern können konkrete Anhaltspunkt für die Planung und den Einsatz auf Oberflächen mit Schadstoffbelastungen abgeleitet werden.

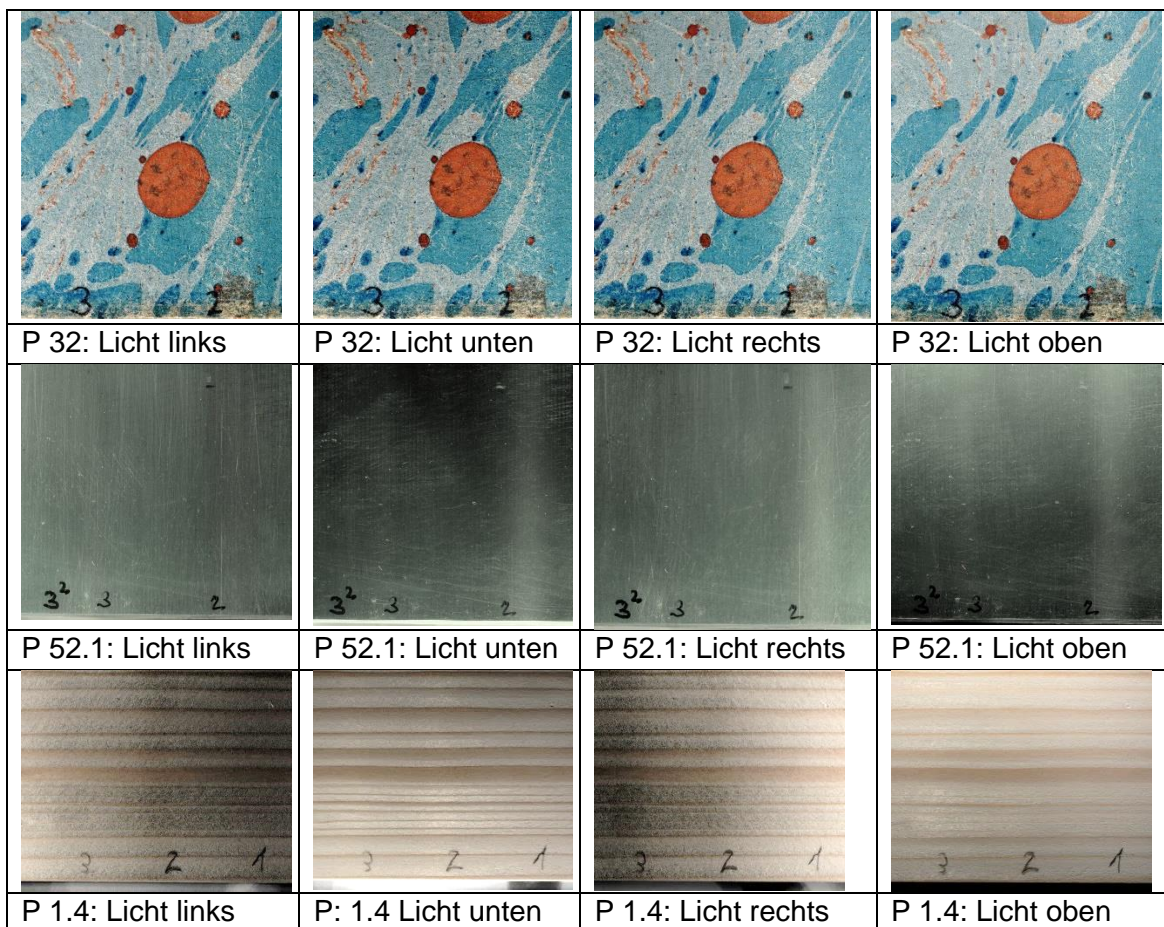


Abbildung 15: RTI-Snapshots Marmorpapier P 32, Orgelmetall P 52.1, Fichte P 1.4

Material	Probe Nr.	SD = Standarddüse	ML = Minilanze	Winkel Düse [°]	Druck CO ₂ [bar]	Druck Luft [bar]	Abstand Düse [mm]	Verfahrensgeschwindigkeit [m/s]	Anzahl Hübe [N]	Beurteilung Visuell IPA	
Fichte	1.4	SD	ML	45	65	7	40	0,18	1	Keine Veränderung	
Linde	2.4		ML	45	65	7	40	0,18	1	Keine Veränderung	
Eiche	3.1		ML	45	65	4	60	0,18	1	keine Spur sichtbar	
Buchs	4.1		ML	45	65	5	40	0,18	1	Keine Veränderung	
Schellack auf Laubholz	10.1		SD	ML	45	65	7	60	0,18	10	Keine Veränderung
Glutinleim auf Nadelholz	11.1		SD	ML	45	65	7	60	0,18	10	Keine Veränderung
Wachs auf Laubholz	12		SD	ML	45	65	7	60	0,18	10	Keine Veränderung
Leinenstoff	21		SD	ML	45	65	7	60	0,18	10	Keine Veränderung
Baumwollstoff	22		SD	ML	45	65	7	60	0,18	10	Keine Veränderung
Seidenstoff	23		ML	ML	45	65	7	40	0,18	10	Keine Veränderung
Wollstoff	24		SD	ML	45	65	7	60	0,18	10	Keine Veränderung
Marmorpapier 19. Jhd.	31		ML	ML	45	65	7	40	0,18	10	Keine Veränderung
Marmorpapier ca. 1960	32		ML	ML	45	65	7	40	0,18	10	Keine Veränderung
Marmorpapier 21. Jhd.	33		ML	ML	45	65	7	40	0,18	10	Keine Veränderung
Lithographie	34		SD	ML	45	65	7	60	0,18	10	Keine Veränderung
Schafsleder Alaungerbung	41.1		SD	ML	45	65	7	60	0,18	10	Keine Veränderung
Rehleder Vegetabilgerbung	42.1	ML	ML	45	65	7	40	0,18	10	Spurreinigung	
Messingblech	51.1	SD	ML	45	65	7	60	0,18	10	Keine Veränderung	
Orgelmetall	52.1	ML	ML	45	65	5	40	0,18	10	Keine Veränderung	
Elfenbeintastenbelag	61.1	SD	ML	45	65	7	60	0,18	10	Keine Veränderung	
Rinderknochen	62.1	ML	ML	45	65	7	40	0,18	10	Keine Veränderung	

Tabelle 4: Prozessparameter Schädigungsschwelle

4.2 Qualifikation der Messmethoden

4.2.1 Qualifikation der Messmethoden am Objekt auf der Oberfläche

In den vorausgegangenen DBU-Projekten (AZ 17314 und AZ 30 311-45) zu mit DDT kontaminierten Kulturgütern hat sich ein Schadstoffscreening mittels mobiler Röntgenfluoreszenzgeräte (mRFA) bewährt. Bei dem aktuellen Projekt wurde für die Vorortbeprobung ebenfalls ein portabler Röntgenfluoreszenz-Analysator (Niton™ XL3t GOLDD+) verwendet.



Abbildung 16: mRFA-Anwendung

Mit der Röntgenfluoreszenzanalyse ist es systembedingt nur möglich Elementbestimmungen durchzuführen. Es können somit keine Elementverbindungen analysiert werden. Aus diesem Grunde ist eine Unterscheidung zwischen anorganischen und organischen Verbindungen nicht möglich. Eine erhöhte Chlor-Konzentration kann somit ein Hinweis auf eine organisch, chlosubstituierte Verbindung (z.B. Biozide) oder/und aber auf eine anorganische, salzartige Chlorverbindung sein. Projektbedingt wurden Objektflächen nur auf DDT-Belastung und Schwermetallbelastung untersucht. Die Informationstiefe (wenige μm bis mehrere mm) der Elemente ist abhängig von der Matrix (strahlungsrelevanter Probenaufbau) und der Probenzusammensetzung. So z.B. beträgt die Informationstiefe von Chlor in einer Holzmatrix mittlerer Dichte ca. 250 μm . In einer Eisenmatrix hingegen nur ca. 5 μm . Das Vorhandensein von DDT in den Swab-Wischproben wurde mittels FTIR-Spektroskopie (Fraunhofer IPA: FTIR Perkin Elmer UATR Spectrum Two) bestimmt. Alle anderen in Bioziden möglichen organisch, chlosubstituierten Verbindungen (z.B. Lindan, PCP, etc.) oder metall- und schwermetallhaltige Salzverbindungen wurden nicht berücksichtigt. Bei nicht eindeutigen Ergebnissen oder um die Messergebnisse zu verifizieren, wurden vereinzelt Proben mittels GCMS-Analyse (Fraunhofer IPA: GCMS, Fa. Perkin Elmer Clarus 600) und/oder mit der IC-Analyse (Fraunhofer IPA: 850 Professional, Firma Metrohm) bestimmt.




		
GCMS Elmer Clarus 600 (Referenzmessung)	FTIR Perkin Elmer UATR Spectrum Two	IC 850 Professional, Metrohm

Abbildung 17: Labor-Messgeräte

4.3 Probenahmesystem Oberfläche

4.3.1 Test Wischelemente

Ein Projektziel war die Entwicklung einer in der Anwendung einfachen „Vorort“ - Probeentnahme, die es dem Anwender erlaubt den Reinheitsgrad der vorgefundenen Oberfläche einfach und schnell zu beurteilen. Die Auswertung sollte zudem zeitnah im eigenen Labor (stationär) oder mittels mobilen Analysegeräten möglich sein.

Die Wischelementeauswahl orientierte sich an den Kriterien Verfügbarkeit, Anwendungsaufwand, Transportsicherheit, Störeinflüsse auf Analyseverfahren und Schadensfreiheit für zu prüfende Oberflächen.

Zur Erprobung wurden 3 verschiedene Wischelemente ausgewählt:


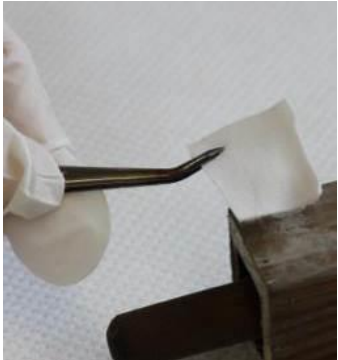

		
Glaswolle in Adsorptionsröhrchen \varnothing 5 mm	Wischtuch PE, ca. 1 cm ²	Swabs (Tupfer) TX761 Alpha Long Handel

Abbildung 18: Wischelemente

Bei der Anwendung von Glasfasermatten kam es immer zu geringfügigen Glasfaser-rückständen auf der Oberfläche. Die Verwendung von Wischtüchern zeigt gegenüber den Swab-Systemen keine Vorteile. Für die Wischtuchsysteme werden zusätzlich Haltestäbchen oder Pinzetten und kontaminationsfreie Transportbehälter benötigt. In der Anwendung haben sich die Swab-Tupfer als sehr praktikabel erwiesen. Sie vereinen einfache Handhabung, kontrollierbare Wischwirkung, hohe Transportsicherheit und gute Verfügbarkeit. Swab-Systeme sind für verschiedenste Anwendungsgebiete verfügbar.

Der Test erfolgte mit zwei Swab-Arten:

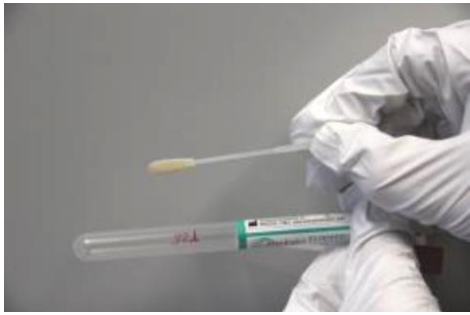

Bild	Name	VWR Nr.
	Flocked Swab,80 mm Breakpoint; Nr. 552C.BX (COPAN DIAGNOSTICS INC)	10755-186
	Cleanroom Swab; TX761 alpha long handle (Texwipe)	TWTX 761

Abbildung 19: Swab-Systeme

Aktuelle Produktdatenblätter werden vom Hersteller zur Verfügung gestellt.
 [https://www.texwipe.com/Content/Images/uploaded/documents/swabs/TDS_TX761_en.pdf und http://products.copangroup.com/index.php/products/clinical/floqswabs ,
 Zugriff 24.9.2018]

Nach Auswahl der Wisch-Test-Systeme wurden diese an musealen Objekten erprobt. Die Probenahme mit den Swab-Systemen TX 761 und Copan 552C erfolgte an den in Tabelle 5 aufgeführten Objekten des Germanischen Nationalmuseums. Ausgewählt wurden Objekte mit vergüteten Holzoberflächen und Objekte aus Textilien.

Inventar Nr. Objekt GNM	Bezeichnung	Flocked Swab (FS) Cleanroom Swab (CS)
KL 12996	Hut (Filz)	FS + CS
T 25	Hut (Textil)	FS + CS
MIR 1149	Tafelklavier, Deckeloberfläche	CS
BA 2349	Bauernstube, Täfelung	CS
HG 1927	Truhenschrank, Deckplatte	FS + CS

Tabelle 5: Objekte Wischtest GNM

	
Schrank, HG 1927	Bauernstube, BA 2349
	
Tafelklavier, MIR 1149	
	
Hut, TA 25	Hut, KI 12964

Abbildung 20: GNM Objekte Wischtest

4.3.2 Auswertung Swab-Anwendung

An den GNM-Objekten wurden vor der Probenahme mit Swabs direkte mRFA-Messungen der Oberflächen durchgeführt. Ein Vergleich mit den mRFA-Messungen an den Swabs sollte zeigen, inwieweit die detektierten Elemente qualitativ und quantitativ vergleichbar sind. Eine Probenahme mittels Swabs ist erfolgreich. Für flockigen Staub eignet sich der Flocked Swab, wohingegen der etwas härtere Standard Cleanroom Swab für aufliegenden Staub geeignet ist.

Die Messung mittels mRFA gibt einen guten Überblick bezüglich der Elementverteilung auf den Objekten und in den Wischproben. Elemente der Oberflächenmessung an den Objekten fanden sich auch auf den Swabs. Bedingt durch die geringe Aufnahme auf den Swabs ist ein quantitativer Vergleich nicht möglich. Es hat sich auch gezeigt, dass die Swabs mehrmals über den definierten Oberflächenbereich geführt werden müssen. Der Wirkstoff DDT kann mittels mRFA nicht direkt, sondern nur dessen Bestandteil Chlor (Cl) nachgewiesen werden (siehe 4.2). Chlor kommt auch in vielen anderen unkritischen Verbindungen vor, weshalb eine ergänzende analytische Messung erfolgen muss. Metall- und Schwermetallelemente (Pb-, As-, Hg- Verbindungen etc.), welche ebenfalls in biozidhaltigen Produkten zu finden sind, können mittels RFA detektiert werden. Nach chlororganischen Verbindungen wie DDT kann mittels FTIR-Analyse in Swab-Proben gesucht werden.

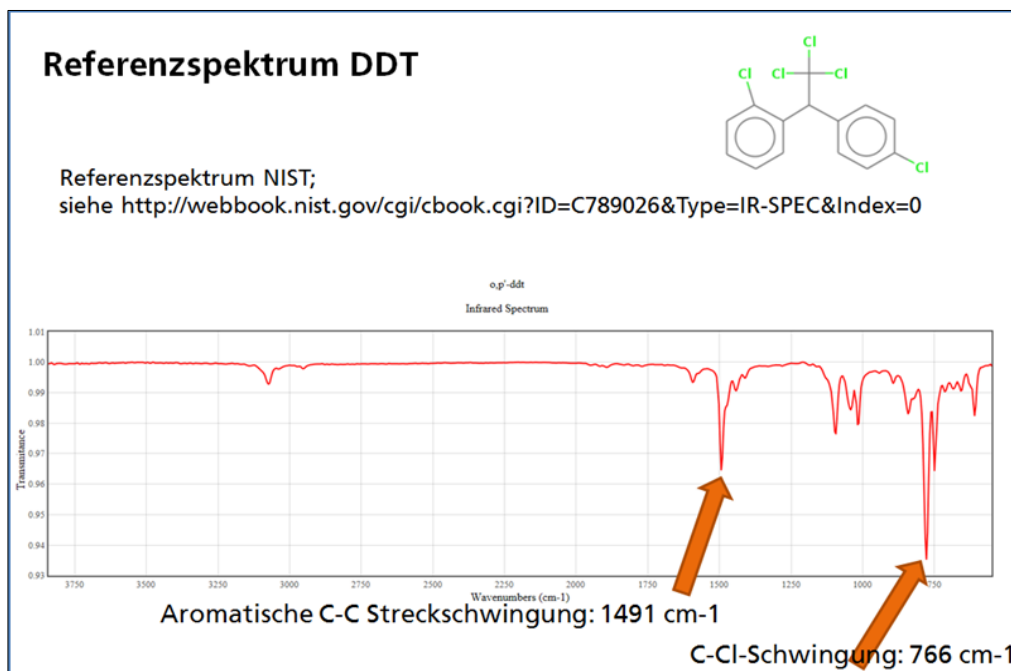
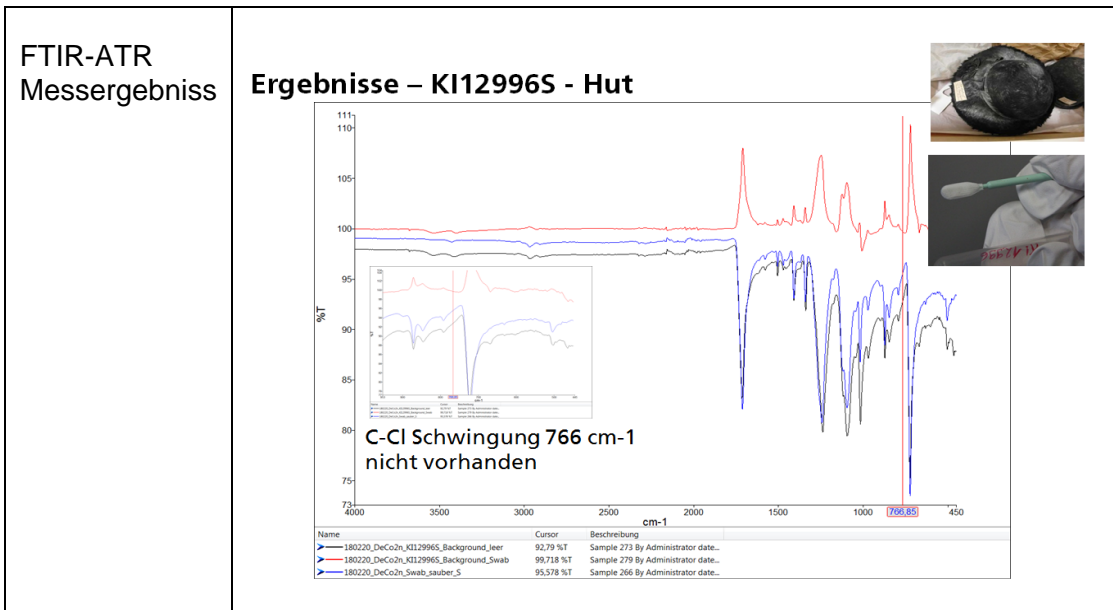


Abbildung 21: DDT-Referenzspektrum

DDT erzeugt bei 766 cm⁻¹ charakteristische Absorptionslinien. Diese typischen Schwingungen der C-Cl-Verbindung können aber auch auf andere Chlorkohlenwasserstoffe hinweisen, wie Pestizide, Herbizide und Lösungsmittel. Andere mögliche Quellen sind Flammenschutzmittel, Transformatoren-Öl, Weichmacher und Kältemittel, welche auf den historischen Oberflächen nicht zu erwarten sind. Bei unklarer Kontaminationslage müssen weitere Analysen (GCMS und/oder IC-Analyse) durchgeführt werden. Die beispielhafte Anwendung und Auswertung der Messmethoden am Hut KL-12996 zeigt auch die Grenzen dieser Methoden. In der Tabelle 6 sind die Ergebnisse der mRFA-Messung aufgeführt. In der linken Spalte befinden sich die Werte der Oberflächenmessung am Objekt, mittig sind die Messwerte der verschmutzten Swabs (CS/fest und FS/weich) und in der rechten Spalte die Messwerte der nicht kontaminierten Swabs. Auffällige Werte sind in rot dargestellt. Auffällig sind besonders die Metall-Messwerte, aber es ist auch ein deutlicher Chlor-Wert vorhanden. Der Titan-Wert (gelb) stammt von den Swabs-Wischkörpern. Der etwas härtere Swab zeigt generell höhere Messwerte als der weichere Swab-Teststab. Fast alle Elemente, die durch die mRFA-Oberflächenmessung erfasst wurden, konnten auch auf den Swabs nachgewiesen werden.

Analyse	CS- und FS-Swab RFA-Messergebnisse KI 12996					
RFA Mess- ergebnisse GNM	RFA Messung			Teststab / Schmutz		Teststab sauber
	INV NR	KL12996	TESTSTAB	TESTSTAB	TESTSTAB	TESTSTAB
OBJEKT	HUT	KL12996	TESTSTAB fest 1	TESTSTAB weich 1	KL12996	TESTSTAB
MATERIAL	TEXTIL	KUNSTSTOFF	KUNSTSTOFF	KUNSTSTOFF	KUNSTSTOFF	TESTSTAB WEICH 1
ANALYSESTELLE	P1 OBERFLAECHE	P1 OBERFFLAECHE	P1 OBERFFLAECHE	P1 OBERFFLAECHE	P1 OBERSEITE	TESTSTAB FEST 1
MESSAUFBAU	FREIHAND	PROBEKAMMER	PROBEKAMMER	PROBEKAMMER	PROBEKAMMER	TESTSTAB WEICH 1
FILTER	m30lo30hi30li30	m30lo30hi30li30	m30lo30hi30li30	m30lo30hi30li30	m30lo30hi30li30	TESTSTAB FEST 1
Ce	-339	-339	-339	-339	-339	TESTSTAB WEICH 1
La	1	1	1	1	1	KUNSTSTOFF
Ba	1	1	1	1	1	KUNSTSTOFF
Sb	1	60,46	1	1	47,22	P1 OBERSEITE
Sn	12,02	1	1	1	1	PROBEKAMMER
Cd	15,62	20,39	21,37	21,37	31	m30lo30hi30li30
Ag	9,92	6,45	2,83	2,83	1	m30lo30hi30li30
Bal	688116,94	709604,13	939008,69	939008,69	957435,69	m30lo30hi30li30
Nb	15,13	21,95	18,72	18,72	22,12	m30lo30hi30li30
Zr	13,17	16,76	23,04	23,04	1	m30lo30hi30li30
Y	7,31	13,66	10,19	10,19	14,47	m30lo30hi30li30
Sr	15,23	9,42	6,67	6,67	10,13	m30lo30hi30li30
Rb	6,06	1	5,35	5,35	1	m30lo30hi30li30
Th	1	1	1	1	1	m30lo30hi30li30
Bi	1	1	1	1	1	m30lo30hi30li30
Au	1	1	1	1	1	m30lo30hi30li30
As	1646,08	79,79	20,93	20,93	1	m30lo30hi30li30
Se	1	1	1	1	1	m30lo30hi30li30
Pb	49,33	1	1	1	1	m30lo30hi30li30
Hg	1810,58	1	39,67	39,67	1	m30lo30hi30li30
Zn	110,31	709,26	139,72	139,72	1181,61	m30lo30hi30li30
Cu	31154,56	350,03	329,68	329,68	83,32	m30lo30hi30li30
Ni	211,96	1	1	1	1	m30lo30hi30li30
Co	1	1	1	1	1	m30lo30hi30li30
Fe	42527,31	10593,02	1101,51	1101,51	1	m30lo30hi30li30
Mn	859,56	230,39	1	1	1	m30lo30hi30li30
Cr	12425,6	691,65	322,37	322,37	1	m30lo30hi30li30
V	112,09	352,91	1	1	606,34	m30lo30hi30li30
Ti	896,16	38956,22	3811,84	3811,84	38956,67	m30lo30hi30li30
Ca	9995,98	6744,87	620,18	620,18	289,24	m30lo30hi30li30
K	1159,78	1	987,42	987,42	1	m30lo30hi30li30
Al	7565,32	13491,26	3520,49	3520,49	1075,22	m30lo30hi30li30
P	721,3	469,66	107,72	107,72	246,98	m30lo30hi30li30
Si	102029,65	137611,03	33713,34	33713,34	1	m30lo30hi30li30
Cl	4840,67	5528,33	529,69	529,69	1	m30lo30hi30li30
S	19389,41	1654,95	5227,66	5227,66	1	m30lo30hi30li30
Mg	74282,99	82743,38	10630,91	10630,91	1	m30lo30hi30li30
Mg Error	11221,43	13653,01	5487,56	5487,56	9626,93	m30lo30hi30li30
Mg CPS ua	0,437	0,332	0,213	0,213	0,01	m30lo30hi30li30
Br						m30lo30hi30li30

Tabelle 6: Swab RFA-Messergebnisse KI 12996



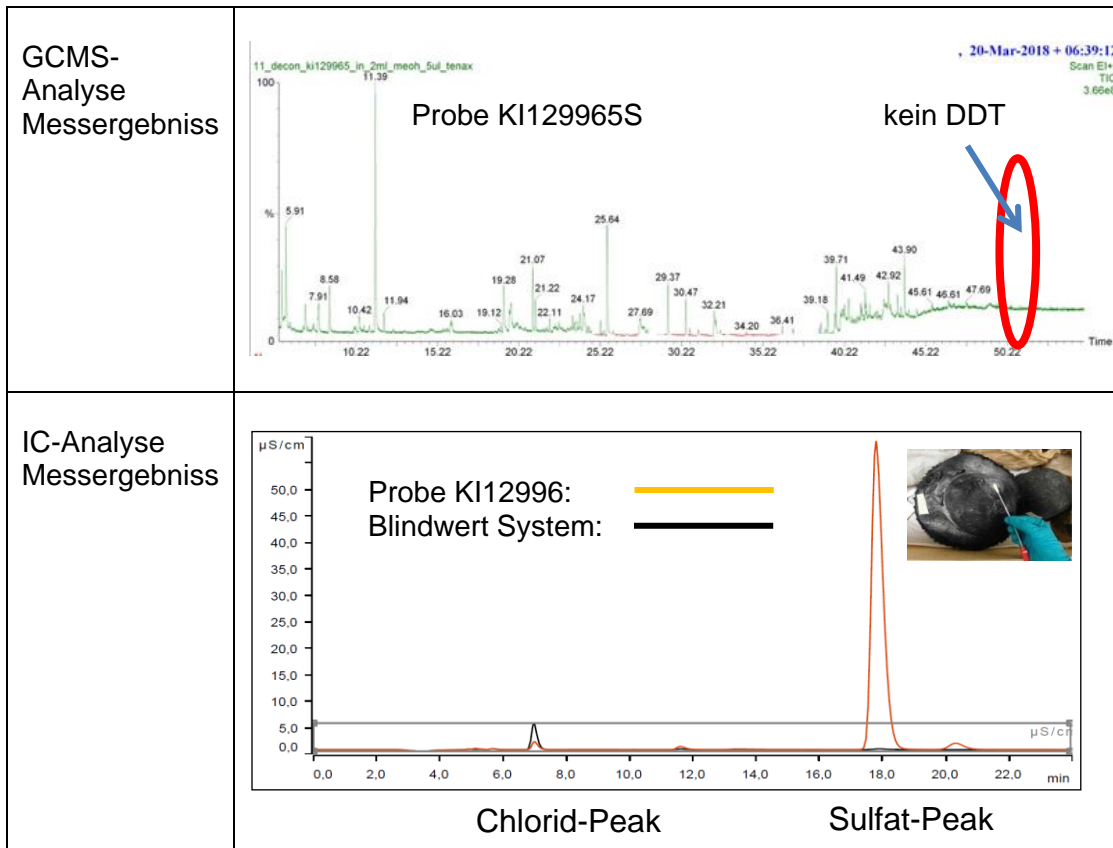


Tabelle 7: FTIR-, GCMS-, IC-Messergebnisse KI 12996

Bei der Swab-FTIR Analyse sind die für DDT typischen Schwingungen nicht erkennbar.

DDT müsste im GCMS-Chromatogramm zwischen Retention Time (RT) 48 und 50 abgebildet werden. Im IC-Chromatogramm liegt der Cl-Wert unterhalb der Nachweisgrenze. D.h., das erfasste Chlor muss in einer Verbindung vorliegen die weder in Wasser noch in Methanol löslich ist und nicht bei Temperaturen < 250°C verdampfbar ist.

In Tabelle 8 sind Vor- und Nachteile der eingesetzten Untersuchungsmethoden dargestellt.

Messgerät	Probenahme	Bewertung	Sensitivität	Anwendung
m-RFA	Bauteil direkt	Beschädigung möglich	Oberfläche +Tiefe	qualitative + quantitative Elementbestimmung
FTIR-ATR	Swab	sehr schonend	Oberfläche	qualitative Molekülverbindung
GC-MS	Swab	sehr schonend	Oberfläche	quantitative (organisch) Molekülbestimmung
IC	Swab	sehr schonend	Oberfläche	quantitative (wässrig) Molekülbestimmung

Tabelle 8: Einsatz Analysemethode

4.4 CO₂-Dekontaminationsarbeitsplatz

4.4.1 Konzeption Aufbau Lastenheft

Bei der Reinigung mit der CO₂-Schneestrahntechnologie werden große Mengen an sehr schnell strömenden CO₂ und Luft freigesetzt. Hierdurch entstehen starke Verwirbelungen und die von Oberflächen abgetragenen Partikel werden im Arbeitsumfeld verteilt. Beim Auftreffen werden an der Oberfläche anhaftende Stäube (Partikel) durch den hohen Impuls der Eiskristalle gelöst und mit dem Gasstrom transportiert. Die Beschleunigung kann kurzzeitig Überschallgeschwindigkeit erreichen. Der erzeugte CO₂-Strahl ist ca. -78°C kalt.

Sowohl staubförmige als auch schadstoffhaltige Substanzen müssen beim Strahlvorgang gefahrlos aufgenommen und gefiltert werden. Es wurde ein Kleinkammer-Arbeitsplatz realisiert, welcher das CO₂-Schneestrahltreinigen von Bauteilen, die mit gesundheitsschädlichen Stoffen kontaminiert sind, in normaler Laborumgebung ermöglicht. Da es bei der CO₂-Schneestrahltreinigung um ein Feinstreinigungsverfahren handelt, wird davon ausgegangen, dass von den hierbei entstehenden Staubmengen keine Explosionsgefahr ausgeht. Der Benutzer der Anlage kann ohne persönliche Schutzausrüstung die CO₂-Reinigungsversuche durchführen. Die bei der Reinigung entstehenden Abgasmengen (Mischung aus Staub, Druckluft und Kohlendioxid) werden ständig abgesaugt, die Strahlkammer wird permanent mit Unterdruck betrieben. Aufgrund des Unterdrucks in der Strahlkammer muß gefilterte Frischluft in die Strahlkammer eingesaugt werden. Über ein Luftverteilsystem (Drallauslass) wird die Luft so geleitet, dass die Strahlkammer turbulent von oben nach unten durchströmt wird. Im Wand und Sichtscheibenbereich strömt mehr Luft schlitzförmig ein, um dort Staubablagerungen zu reduzieren. Die über drei Filter (Taschenfilter F7; Z-Line Filter F7; H14) gereinigte Abluft wird in das vorhandene Laborabluftsystem eingeleitet.

Das Ein- und Ausschleusen der zu reinigenden Bauteile erfolgt kontaminationsfrei bei laufender Absaugung. Nach vorheriger CO₂-Reinigung können die Türen erst nach einer Wartezeit von 3 min geöffnet werden (Die Wartezeit wurde durch Messungen mittels optischem Partikelzähler ermittelt).

Für den Einbau von Versuchseinrichtungen sind Montageschienen an der Rückwand und ein Bohrungsraster auf der Arbeitsplatte vorgesehen. Die Kammer besitzt Türen für das Einbringen von Versuchsaufbauten. Die Abmessungen der Türöffnungen sind Höhe = 1 m, Breite = 0,8 m und die Größe der Arbeitsfläche ist 0,8 m x 1 m.

Die Strahlkammer kann nass, nasschemisch und trocken gereinigt werden.

Die Entsorgung von Verpackungsmaterialien der zu reinigenden Bauteile erfolgt über ein Abfallsammelsystem. Die Entsorgung der Abfälle sowie der abgeschiedenen Stäube ist kontaminationsfrei möglich. Bei längerer Nichtbenutzung ist das System mobil in einem Lagerraum verfahrbar, wobei die Strahlkammer und das Absaugsystem voneinander getrennt und alle Öffnungen staubdicht verschlossen werden.

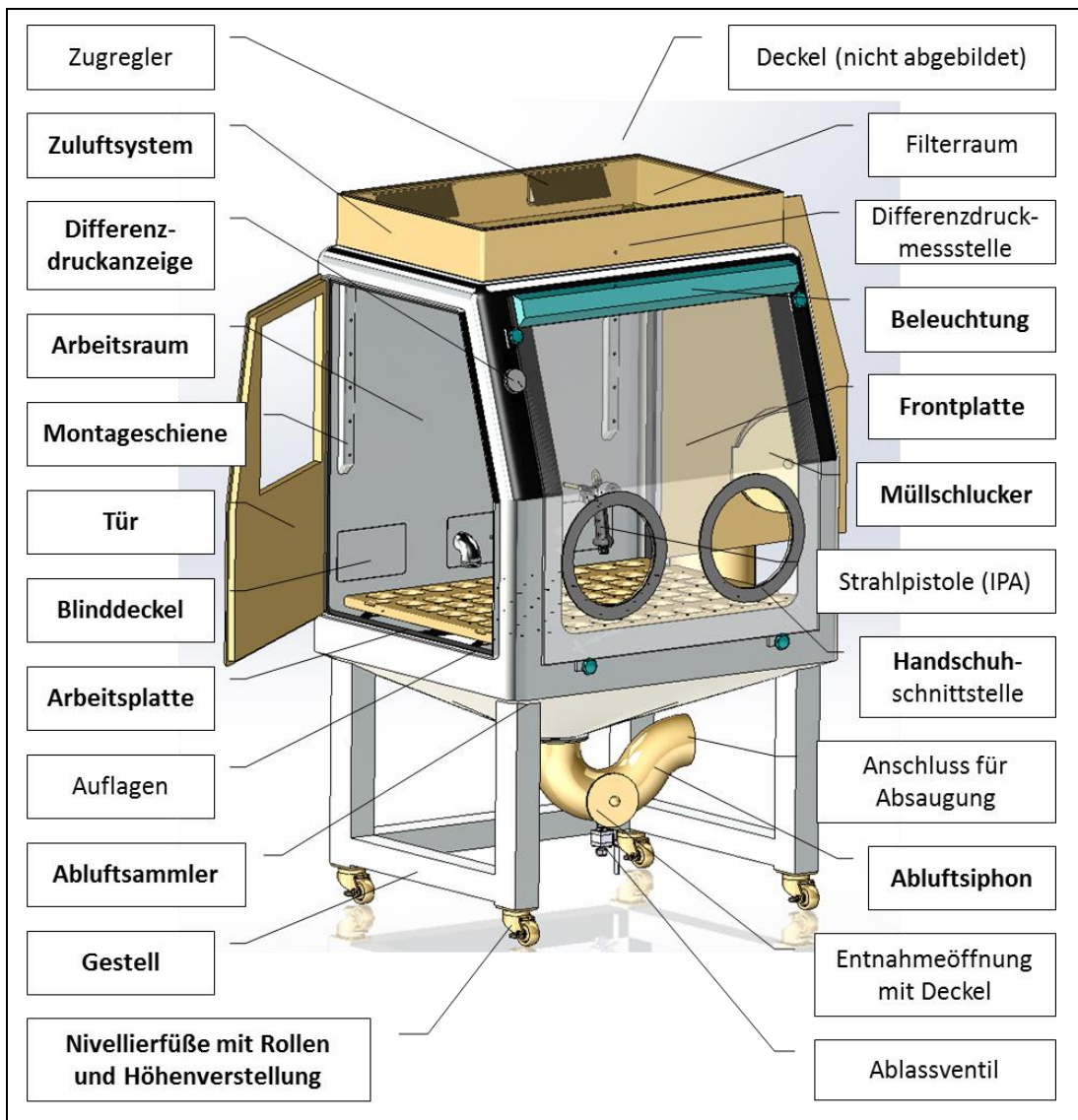


Abbildung 22: Strahlkammer Modellentwurf

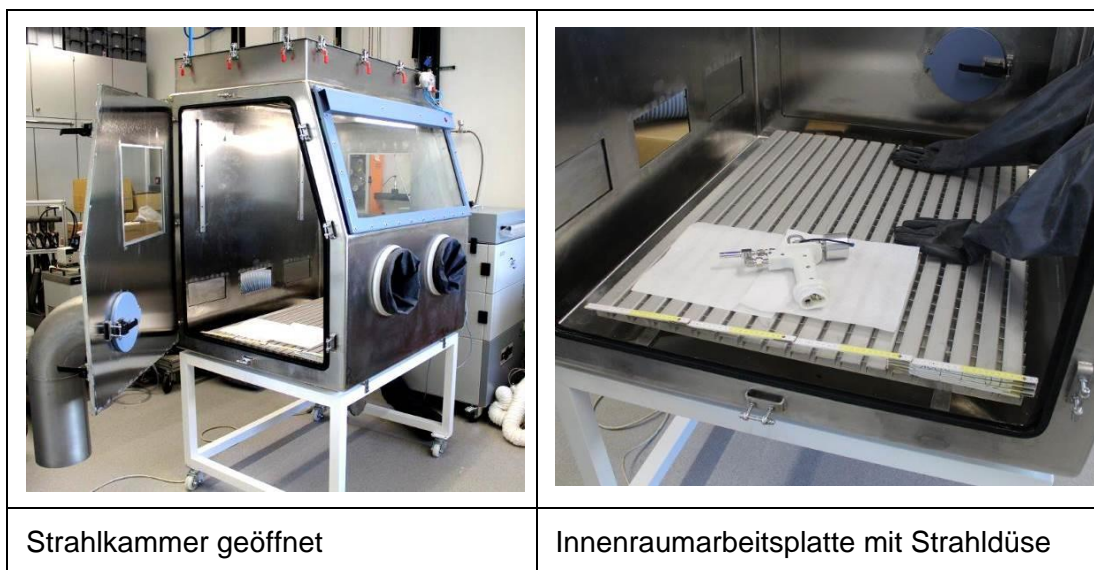


Abbildung 23: Strahlkammer

4.4.2 Konstruktionsdetails Strahlkammer

Maße Arbeitsraum (B/T/H)	1,185/0,98/1,19 m
Fläche Arbeitsraum	1,16 m ²
Volumen Arbeitsraum	1,38 m ³

Tabelle 9: Abmessungen Strahlkammer

Sicherheitsschaltungen: Der Strahlbetrieb kann erst bei anliegendem Unterdruck gestartet werden. Hierzu wurde eine Unterdrucküberwachung eingebaut, welche über einen Druckschalter den Strahlbetrieb freigibt.

4.4.3 Strömungsgeschwindigkeit Strahlkammer

Mittels Flügelradanemometer wurde die Geschwindigkeit, der im Betriebszustand in die Strahlkammer einströmenden Luft bestimmt. Die Einstellung des Absaugsystems wurde so gewählt, dass die abgesaugte Luftmenge vom Laborabluftsystem abtransportiert werden kann. In der Strahlkammer entsteht im Arbeitspunkt ein Unterdruck von -1,5 mbar.

Basierend auf den Strömungsmesswerten und den Maßen der Ansaugöffnung und der Strahlkammer wurden die Strömungsgeschwindigkeit und die Volumenströme bestimmt.

Bauteilbezeichnung	Messwert
Querschnitt Ansaugöffnung	0,0075 m ²
Luftgeschwindigkeit in Ansaugöffnung	12,44 m/s
Volumenstrom angesaugte Luft	335,75 m ³ /h
Maße Arbeitsraum (B, T, H)	1,185 m, 0,98 m, 1,19 m
Fläche Arbeitsraum	1,16 m ²
Volumen Arbeitsraum	1,38 m ³
Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Arbeitsraum	0,08 m/s
Mittlerer Zeitbedarf für einen Luft-wechsel im Arbeitsraum	14,82 s

Tabelle 10: Ergebnisse Strömungsprüfung

4.4.4 Prüfung der Dichtigkeit der Strahlkammer

Die Strahlkammer wird im Arbeitspunkt betrieben. Mittels Nebelgenerator wurde destilliertes Wasser vernebelt. Der Nebel wird entlang der Dichtungen und Öffnungen von außen aufgegeben und der Verlauf der Strömung analysiert. Gleichzeitig wurde von innen mit der CO₂-Reinigungspistole auf den entsprechenden Bereich gestrahlt. Hierbei wird der maximal mögliche Beschleunigungsdruck von 13 bar eingestellt.

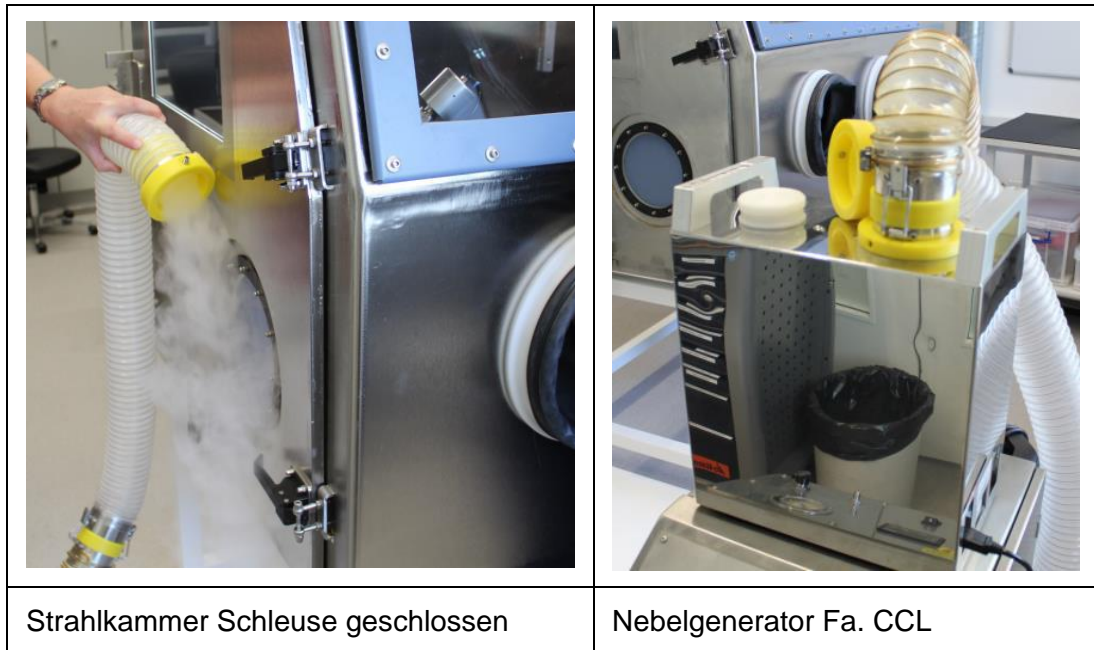


Abbildung 24: Dichtigkeitsprüfung

Die Strahlkammer ist auch bei maximaler Belastung, d.h. direktes Strahlen auf die Dichtungen, Öffnungen und maximalem Beschleunigungsdruck, dicht.

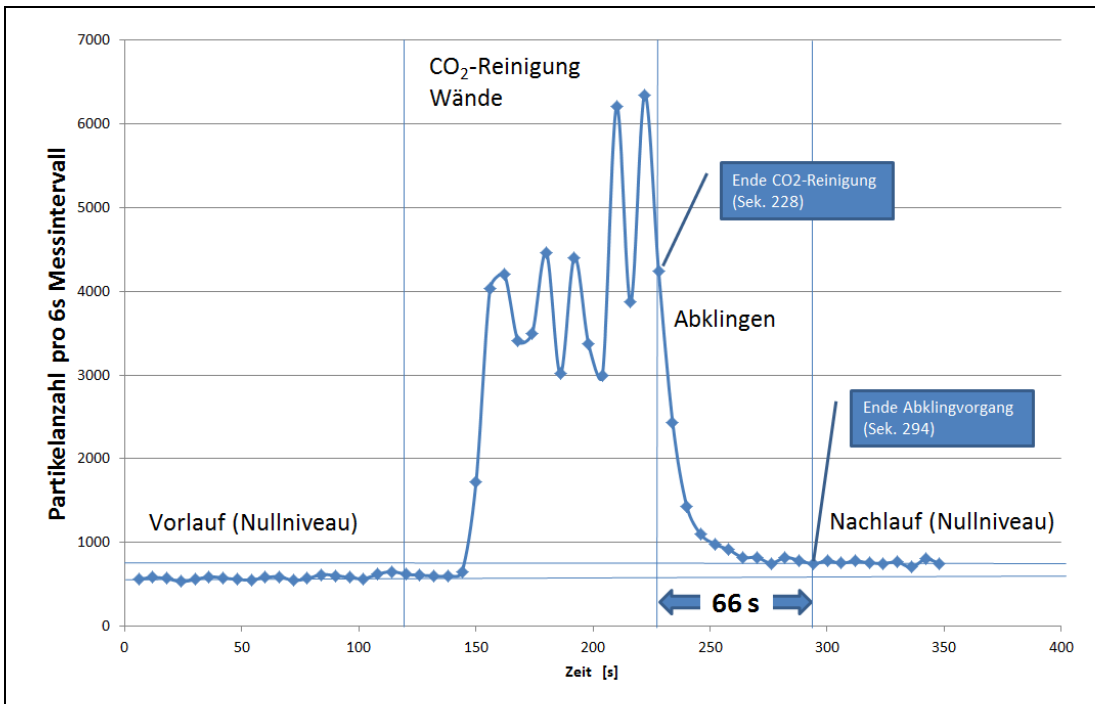
4.4.5 Prüfung Staubaustrag Abklingmessung

Nach einem Reinigungsvorgang hält sich der abgelöste Staub noch einige Zeit in der Strahlkammer auf, bis die Luftströmung die Staubpartikel ausgetragen hat.

Die Untersuchung soll aufzeigen, wie lange nach einem Reinigungsvorgang die Luft der Arbeitskammer entfernt werden muss.

Der Staubaustrag aus der Arbeitskammer wird mittels optischen Partikelzählers (OPZ, Lasair II Fa. PMS) gemessen. Die Messsonde wird im Syphon der Strahlkammer positioniert. Über einen Schlauch wird vom OPZ Luft aus der Strahlkammer angesaugt und die mitgetragenen Partikel ab einer Größe von 0,5 µm vermessen und gezählt.

Die Betriebsparameter in Strahlkammer sind: Unterdruck: -1,5 mbar, Luftgeschwindigkeit in der Ansaugklappe: ca. 12 m/s, Abluftvolumenstrom 335 m³/h. Es wurden drei Strahlsituationen nachgebildet.

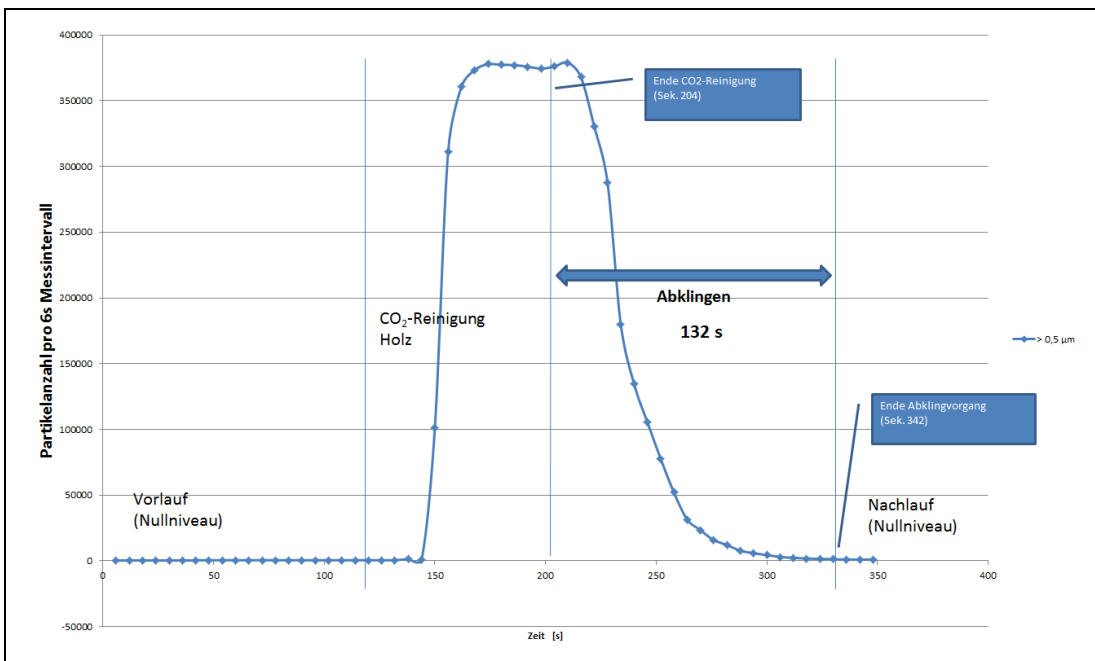


Partikelzahlen vor, während und nach Reinigung Strahlkammerwände

Diagramm 2: Partikelanzahl Strahlsituation a)

a) Reinigung der Wände der Strahlkammer:

Nach dem Beginn der Reinigung steigen die gemessenen Partikelzahlen wie zu erwarten ist an. Ab Sekunde 228 wurde das Reinigen beendet und das Austragen der in der Luft befindlichen Partikel beginnt. Die Konzentration fällt ab und erreicht bei Sekunde 294 einen annähernd stationären Wert der ca. dem Wert vor der Reinigung entspricht. Die Staubbelastung in der Strahlkammer ist nach ca. 66 s abgeklungen.

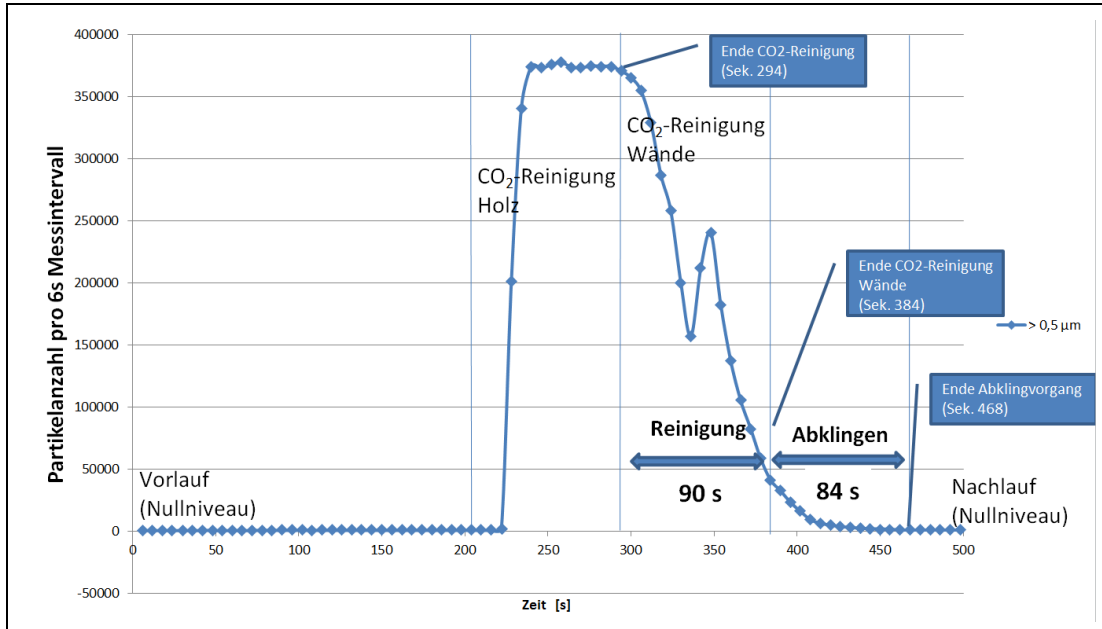


Partikelzahlen vor, während und nach Reinigung Holzprobe

Diagramm 3: Partikelanzahl Strahlsituation b)

b) Reinigung eines Objekts (Holz):

Nach dem Beginn der Reinigung steigen die gemessenen Partikelzahlen stärker an. Ab Sekunde 204 wurde das Reinigen beendet und das Austragen der in der Luft befindlichen Partikel beginnt. Die Konzentration fällt ab und erreicht bei Sekunde 342 einen annähernd stationären Wert der ca. dem Wert vor der Reinigung entspricht. Die Staubbelastung in der Strahlkammer ist erst nach ca. 132 s abgeklungen.



Partikelzahlen vor, während und nach Reinigung Holzprobe und Kammerwände

Diagramm 4: Partikelanzahl Strahlsituation c)

c) Reinigung eines Objekts (Holz) mit anschließender Reinigung der Strahlkammer:

Nach dem Beginn der Reinigung steigen die gemessenen Partikelzahlen wie vorher stark an. Ab Sekunde 294 wurde das Reinigen der Holzprobe beendet.

Die Strahlkammer wurde bis Sekunde 384 gereinigt. Anschließend fällt die Konzentration ab und erreicht bei Sekunde 468 einen annähernd stationären Wert, der ca. dem Wert vor der Reinigung entspricht.

Die Staubbelastung in der Strahlkammer ist erst nach ca. 84 s abgeklungen. Bereits während der Reinigung der Wände der Strahlkammer fällt die Staubkonzentration, da kein neuer Staub freigesetzt wird.

Nach dem Abschluss der Objektreinigung müssen die Wände der Strahlkammer mit CO₂-Schneestrahl gereinigt werden, um zu verhindern, dass beim Öffnen der Kammertür Staub ins Umfeld gelangt. Nach den Messergebnissen sollten 2-3 Minuten Wartezeit vor dem Öffnen der Tür ausreichen.

4.5 Reinigungsschwelle historische Lackoberfläche

4.5.1 Objektzustand Tafelklavierdeckelfragment

Die Wirksamkeit der CO₂-Schneestrahlschmelztechnologie zur Reduzierung von festen Verkrustungen auf Schellackoberflächen wurde an 2 historischen Deckelfragmenten getestet. Die Deckelfragmente gehörten zu einem unsignierten Tafelklavier, dessen Bauweise auf eine Entstehungszeit um 1830 schließen läßt. Die mit Nußbaum furnierte Oberfläche der Deckelfragmente ist mit Schellack poliert. Im Randbereich von Nr. 1 hat sich das Deckfurnier teilweise vom Deckelkern gelöst. Es zeigen sich auf Fragment 1 und 2 großflächige Ablagerungen auf der Lackschicht. Die Verunreinigungen können als hellbraune und schwarze Verkrustungen und als weiße Niederschläge auf der Lackoberfläche bezeichnet werden, die schwarzen Verkrustungen zeigten Merkmale von Einbrennungen.

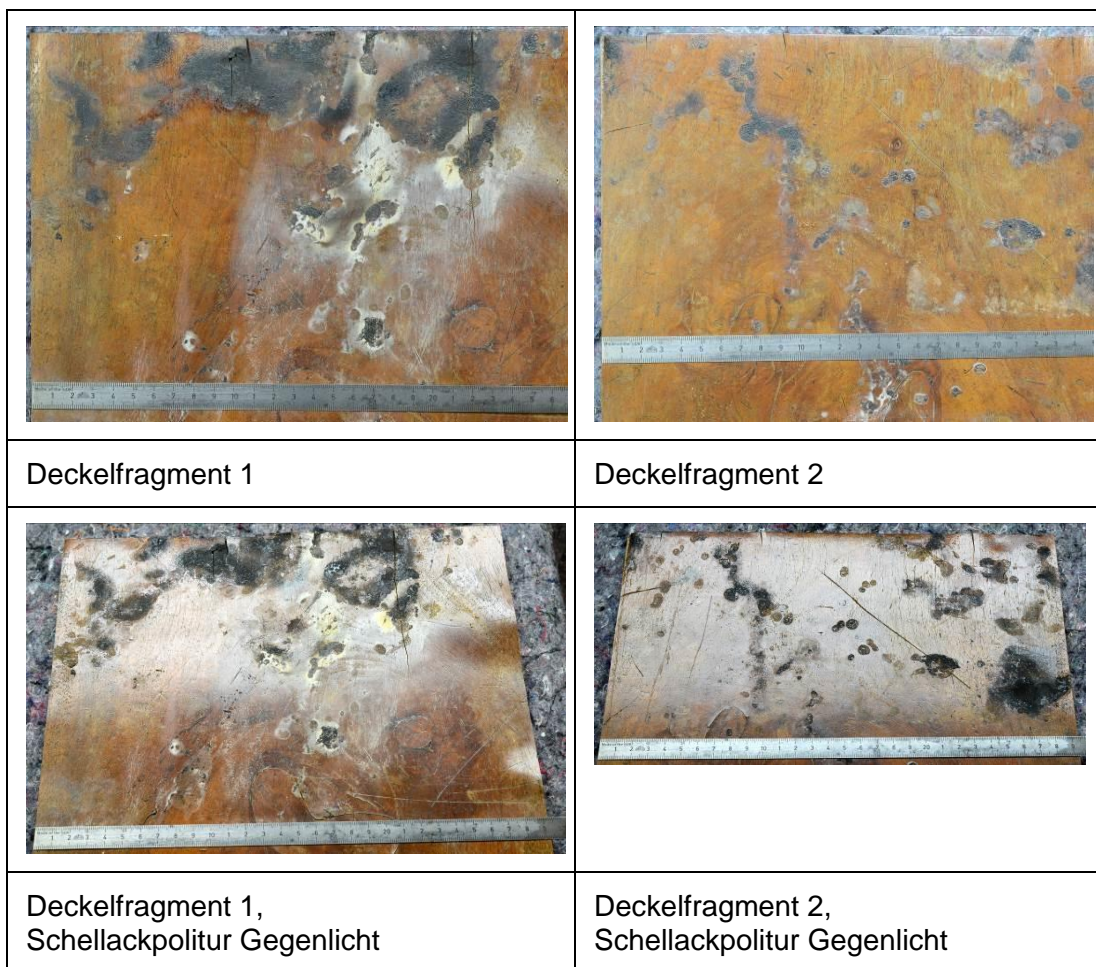


Abbildung 25: Deckelfragmente

4.5.2 Analyse der Ablagerungen

Die Oberflächenverkrustung wurde mittels mRFA-Messung untersucht. Die Elementzusammensetzung deutet auf eine mit Füllstoffen angereicherte Schmelze hin.


	
Deckel 1, mRFA-Messposition	Elementzusammensetzung

Abbildung 26: mRFA-Messung Deckelfragment

Eine Schabprobe der Verkrustung wurde mittels FTIR-Analyse auf organische Gefahrstoffe hin untersucht.


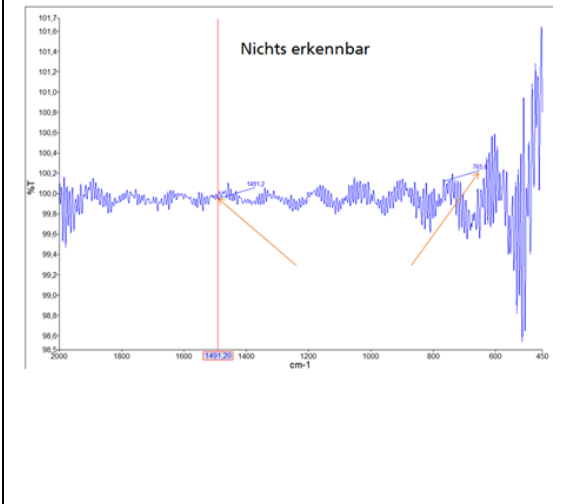
	
P1, Probenahme Verkrustung	P1, FTIR-Analyse Verkrustung

Abbildung 27: FTIR-Messung Deckelfragment

Im FTIR-Diagramm Abbildung 27 sind keine Hinweise auf eine Kontamination mit DDT erkennbar. Die vorliegende Messkurve enthält keine eindeutigen Resonanzen eines bekannten Bindemittels.

4.5.3 Auswertung der Reinigungstestreihe

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Probe P1 vor und nach der Reinigung:






	
<p>Deckelplatte 1, vor Reinigung</p>	<p>P1, RFA-Messpunkt</p>
	
<p>Detail Deckel 1 vor Reinigung</p>	<p>Deckel 1 Reinigung</p>
	
<p>Detail Deckel 1 nach Reinigung</p>	

Abbildung 28: CO₂-Reinigung Deckelfragment

4.5.4 Anpassung Prozessparameter

Der Prozessparameter Beschleunigungsdruck wurde für die Probe P1 stufenweise ansteigend variiert, der CO₂-Gasdruck wurde konstant bei 64 bar gehalten:





Probe P1	Reinigungsstapel Verkrustung
vorher	
Reinigung 7 bar	
Reinigung 8,5 bar	
Reinigung 13 bar	

Abbildung 29: Reinigungsstapel Deckelfragment

Die Reinigungsstapel der Probeplatte 1 mit Verkrustungen, Verkohlungen und Niederschlägen auf der Lackoberfläche wird in Tabelle 11 bewertet:

Beschleunigungsdruck	Beobachtungen
7 bar	keine Wirkung auf Verkrustungen, unverletzte Schellackflächen werden nicht beschädigt, Verkohlungen werden nur wenig abgetragen
8,5 bar	geringe Wirkung auf Verkrustungen, unverletzte Schellackflächen werden nicht beschädigt, Verkohlungen werden deutlich abgetragen
13 bar	Verkrustungen werden nur langsam bei Einwirkzeit >15 sec./Fleck abgetragen, „gesunde“ Schellackflächen werden nicht beschädigt, hohl liegende Lackbereiche werden teilweise aufgebrochen, Verkohlungen werden bis auf unverbranntes Holz abgetragen, weiße Niederschläge werden teilweise mit Lackverlust reduziert, Kittungen und lose Furniersplitter platzen ab

Tabelle 11: Bewertung Reinigungsstaffel Deckelfragment

Die Ergebnisse der Probeplatte 1 zeigten sich auch bei der CO₂-Strahlreinigung auf Probeplatte 2. Die auf Platte 2 stärker vorhandenen weißen Niederschläge konnten bei hohem Beschleunigungsdruck deutlich reduziert werden:

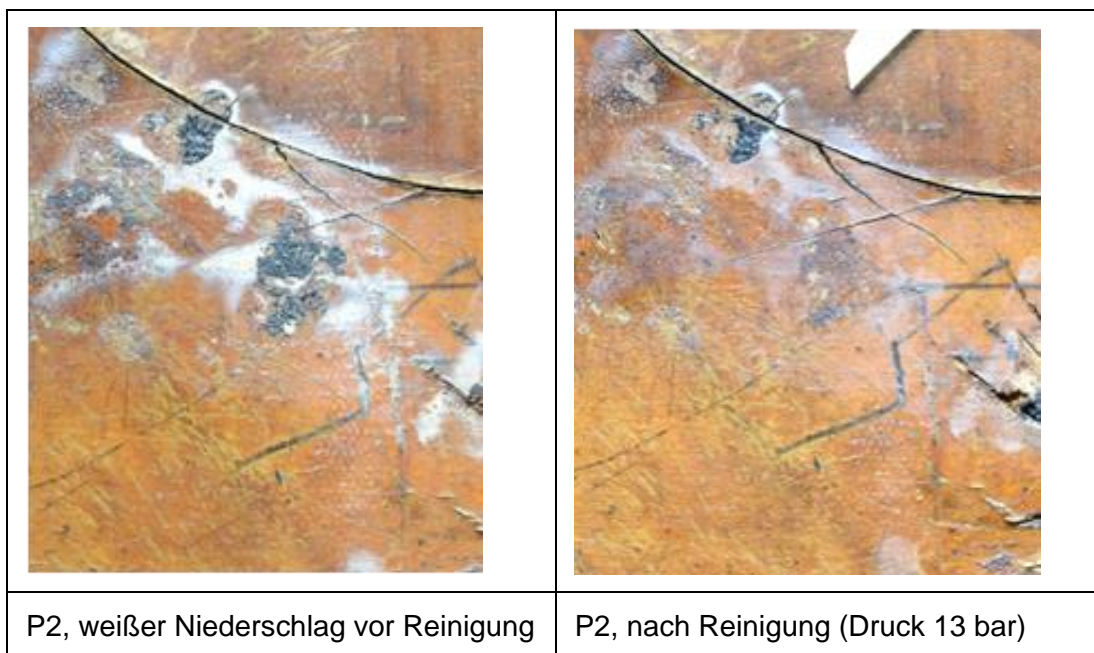


Abbildung 30: Reduzierung weißer Niederschlag

4.5.5 Politurreinigung Tischplattenfragment

Auf einem ausgewählten Tischplattenfragment soll der direkte Vergleich zwischen einer konventionellen und einer CO₂-Schneestrahlsreinigung der historischen Politur durchgeführt werden. Die konventionelle Lackreinigung wurde mechanisch vorgenommen und mit Folie abgedeckt. Die CO₂-Schneestrahlsreinigung wurde auf einer Teilfläche durchgeführt und der Vorzustand in einem weiteren Bereich belassen.

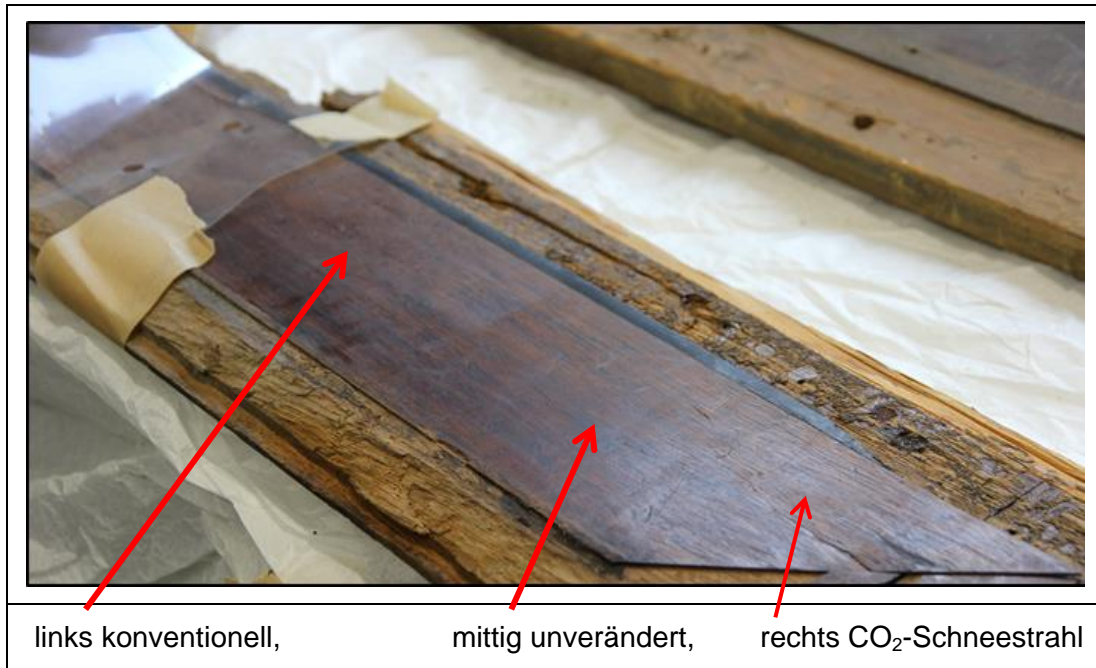


Abbildung 31: Tischplattenfragment Reinigungsstufen

Die makroskopische und mikroskopische Betrachtung zeigt Unterschiede im Reinigungsbild der gereinigten Oberflächen. Die konventionell erzielte Reinigung zeigt einen deutlich verminderten Glanz und bereichsweise geöffnete Furnierporen. Gebrauchsspuren sind teilweise grundhaft bis zur Furnierschicht gereinigt, die Oberfläche wirkt gleichförmig stumpf.

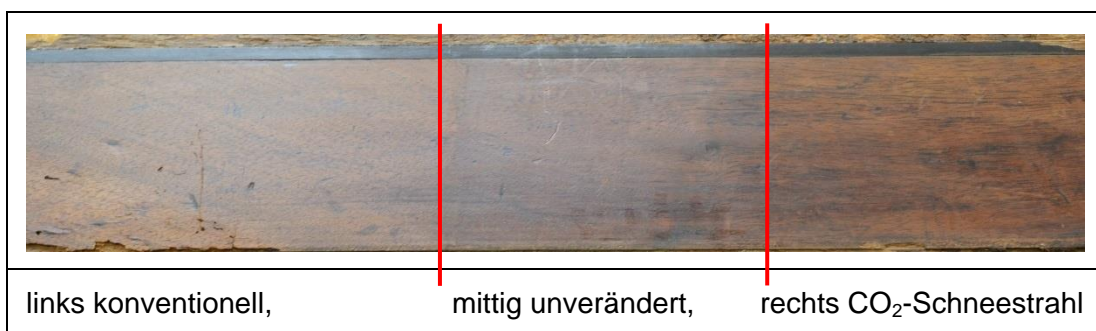


Abbildung 32: Lack-Reinigungsvergleich Tischplattenfragment

Der mit CO₂-Schneestrahls gereinigte Bereich zeigt einen matten Glanz der Politur, deren Farbwirkung deutlich hervortritt. Die Furnierporen sind geschlossen, Politurreste in den Gebrauchsspuren erkennbar, eine Patina bleibt erhalten.

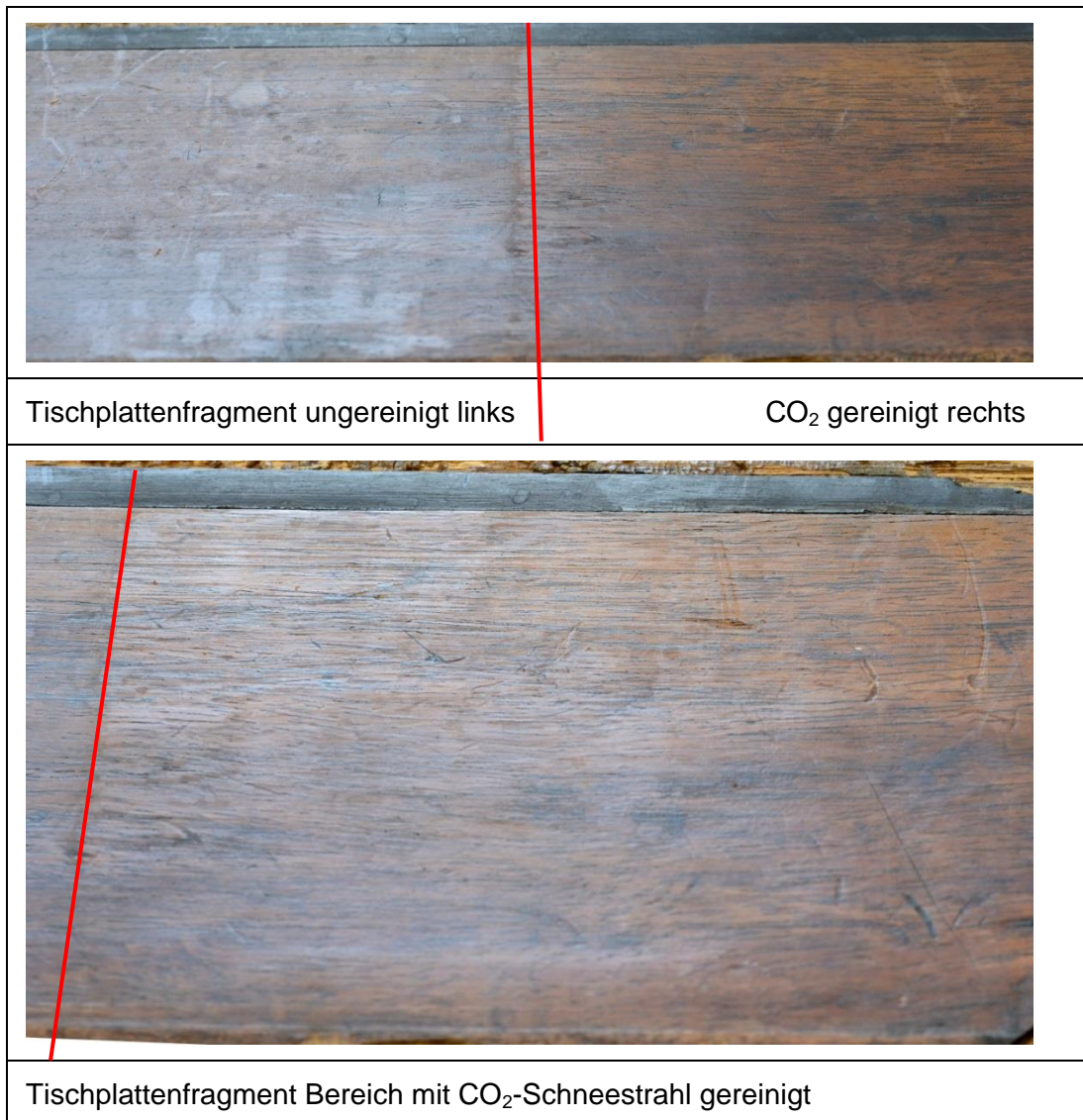


Abbildung 33: Detail CO₂-Schneestrahlreinigung

4.5.6 Informationstiefe Chlorgehalt

Auf einer unbehandelten und einer lackierten Holzoberfläche wurde Kochsalzpulver (NaCl) verteilt und manuell in die Fläche eingerieben.

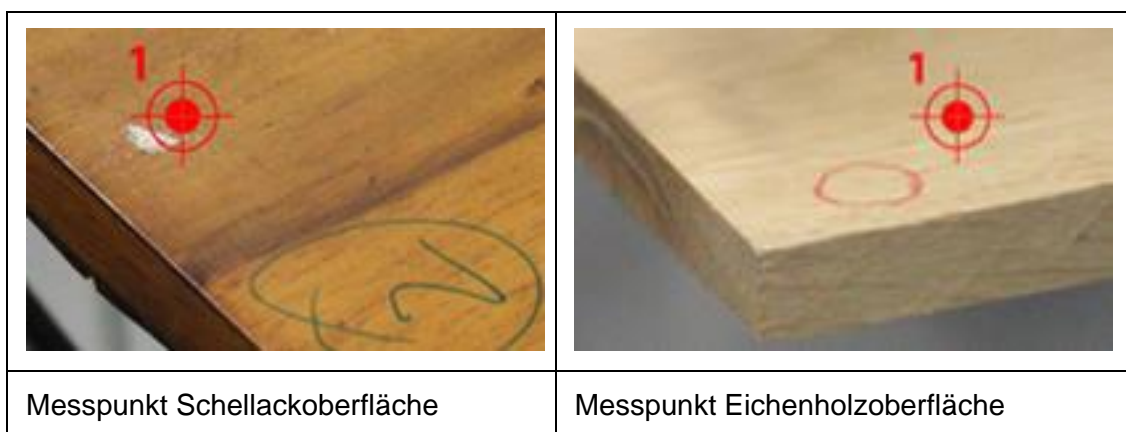


Abbildung 34: Probeflächen Salzverteilung

4.5.7 mRFA-Messung Oberflächenkontamination

Mittels mRFA wurde die Grundbelastung der Proben, die Belastung mit NaCl und die Belastung nach der CO₂-Reinigung bestimmt.

Das Messgerät m-RF-Spektrumsanalysator, Niton XL3t Hybrid+, Firma Analyticon instruments gmbh wurde mit nachfolgender Einstellung eingesetzt:

Modus	Duration	Units	Flags	MESSAUFBAU	FILTER
Plastics Non PVC	90 sec.	ppm		STATIV	m30Ioli30

In der nachfolgenden Tabelle 11 sind die ermittelten mRFA-Messwerte aufgeführt:

Messpunkt	mRFA-Messergebnis				
	Probe	vor der Reinigung Cl in ppm	nach der Reinigung	Differenz	Abweichung Cl in %
Schellackoberfläche	Oberfläche Holz	406,27			
	Oberfläche Holz+Salz	30575,97			
	Oberfläche		348,38	-30227,59	-98,86
Eichenholzoberfläche	Oberfläche Holz	155,12			
	Oberfläche Holz+Salz	14945,87			
	Oberfläche		399,76	-14546,11	-97,33

Tabelle 12: Messergebnisse Oberflächenrauigkeit

Beim CO₂-Reinigungsvorgang wurden die Proben mehrfach längs, quer und senkrecht zur Faserrichtung gründlich bestrahlt, um eine sehr intensive Reinigung zu erreichen. Die Beurteilung erfolgte durch den Bearbeiter auf Sicht.

Die Messergebnisse zeigen, dass staubförmige bzw. pulvrige Ablagerungen von geschlossenen und glatten Oberflächen, wie z. B. Lackierungen, nahezu vollständig entfernt werden (vor der Reinigung 406 ppm, nach der Reinigung 348 ppm). Dagegen muß in rauen bzw. porigen Oberflächen, wie beim Eichenholz, mit nachweisbaren Restverunreinigungen in diesen Vertiefungen gerechnet werden (vor der Reinigung 155 ppm, nach der Reinigung 399 ppm).

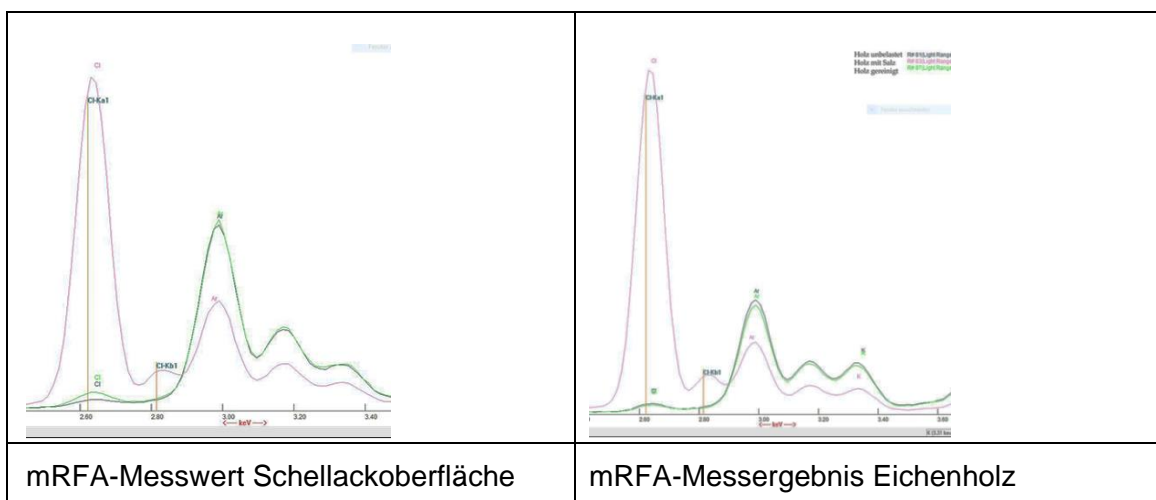


Diagramm 5: mRFA-Messergebnisse Salzverteilung

4.6 Anwendung Tafelklavier-Lyra MS-15

4.6.1 Objektzustand Tafelklavier-Lyra MS-15

Das Tafelklavier MS-15 wurde in den 1980er Jahren bei einer Holzschutzmittelbehandlung der Depoträume mit dem HSM „Hylotox 59“ kontaminiert. Die dabei eingebrachten Wirkstoffmengen sind nicht bekannt. Die Wirkstoffablagerungen zeigen sich aktuell auf den lackierten Furnierflächen von Gehäuse, Deckel und Beinen. Die betroffenen lackierten und schwarz gefassten Oberflächenbereiche der Lyra sollen in die Testreinigungen mit einbezogen werden, da die musikhistorische Bedeutung des Instrumentes eine wissenschaftliche Erschließung erfordert, die aber erst nach einer umfassenden Dekontamination durchgeführt werden kann.



Abbildung 35: Tafelklavier MS-15

Die furnierten Oberflächen der Lyra sind mit Schellack poliert. Auf der Rückseite im Porenbereich der Deckfurniere ist die Politur leicht eingesunken und im Bereich der Furnierfugen befinden sich kleinflächige Politur-Fehlstellen. Die schwarze Fassung auf dem Lyra-Sockel ist verschmutzt, zeigt Kristallablagerungen und Fehlstellen in der Fassung. Die Metallteile der Pedalhebel und ein Gelenkwinkel sind korrodiert, der Dämpfungsfilz ist tiefgründig verschmutzt.

4.6.2 Ablaufkonzeption Arbeitsschutz

Für den Ablauf der Testreinigung wurde ein Ablaufschema entwickelt, um notwendige Sicherheitsabläufe hinsichtlich des Umgangs mit kontaminierten Objekten zu bestimmen, da die Kontamination des Objektes mit dem HSM-Wirkstoff DDT bekannt ist. Mit Gefahrstoffen behandelte Museumsobjekte werden gefahrstoffrechtlich als Erzeugnisse nach GefStoffV § 1 Abs. (3) angesehen. Grundsätzlich ist der Umgang mit Gefahrstoffen in der Gefahrstoffverordnung und im Arbeitsschutzgesetz geregelt. Die Anforderungen der GefStoffV werden in den Technischen Regeln für Gefahrstoffe konkretisiert. Das ArbSchG fordert generell bei Arbeiten mit Gefahrstoffen eine tätigkeitsbezogene Gefährdungsbeurteilung. Für die Projektbearbeiter gelten die betriebliche Gefährdungsbeurteilung und bestehende Betriebsanweisungen von Fraunhofer IPA. Eine Unterweisung für den Arbeitsbereich CO₂-Reinigungslabor des Fraunhofer IPA erfolgt schriftlich.


Durchführung	Ergebnis
Gefahrstoff ermittelt	<p>HSM-Behandlung mit „Hylotox 59“ mündlich bekannt, Kristallablagerungen auf Oberflächen sichtbar</p> <p>HSM enthält Wirkstoff DDT + Lindan, analytischer Nachweis von DDT mittels FTIR und RFA positiv,</p> <p>DDT nach KMR-Liste (67/548/EWG) = K2;</p> <p>GHS (EG/1272/2008) = H301 + H311+ H351 + H372 + H400 + H410;</p> 
Gefährdung ermittelt	<p>Das Objekt soll entpackt, dokumentiert, analysiert und gereinigt werden. Diese Aufgaben erfordern das Handhaben und Bewegen des Objektes. Eine Gefährdung ergibt sich: bei Objektkontakt, durch mögliche Staubfreisetzung, durch CO₂-Gas Freisetzung, durch Prozessgas CO₂-flüssig (T < -50°C). Die Arbeiten erfolgen im Anwendungsbereich TRGS 526.</p>
Schutzmaßnahmen festgelegt	<p>Die Betriebsanweisung „Gefahrstoffe“ Stiftung Handel-Haus regelt u.a.:</p> <p>Kein Hautkontakt mit dem Objekt, Staub nicht einatmen; Dokumentieren und Analysieren mit PSA: Schutzkleidung, Schutzhandschuh und Atemschutz Partikelfilter FFP3 S/L, im Abluftstrom arbeiten;</p> <p>Betriebsanweisung „CO₂-Reinigungslabor“ IPA regelt u.a.:</p> <p>CO₂-Reinigung nur gekapselt in geschlossener Anlage mit Abluftfilterung und Freiluftabführung, Raumkontrolle der CO₂-Konzentration.</p> <p>Keine Flüssig- und Nahrungsaufnahme im Arbeitsbereich.</p>
Arbeitsmedizinische Vorsorge	<p>Nach AMR 11.1 gilt ein Abschneidekriterium mit 3.2 (1) 4. = geringe Gefährdung im Sinne GefStoffV § 6 (13) unter Beibehaltung der Wunschvorsorge nach AMR 11.1 Punkt 3.2 (3), i. V. m. TRGS 526 und § 5a ArbMedVV.</p>

Tabelle 13: Rahmendaten Gefährdungsbeurteilung

Der Ablaufplan für die Testreinigung Lyra ist in Tabelle 14 zusammengestellt:

Nr.	Beschreibung	Anweisung
1	Auspacken der Lyra in der Strahlkammer (Folienverpackung), Tür geschlossen	Abluft maximal, Volumenstrom 1000 m ³ /h, PSA = Handschutz + Staubschutzkleidung
2	Dokumentation des Ausgangszustands (fotografisch), Tür offen	PSA=Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
3	Festlegung der Messpositionen, Tür offen	PSA=Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
4	1. mRFA-Messung an den Messpositionen auf der Oberfläche (Ausgangszustand), Tür offen	PSA=Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
5	1. Swab-Probenahme (Ausgangszustand) und FTIR und mRFA-Messung an den Swabs. Tür offen	PSA=Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
6	1. CO ₂ -Reinigung der gesamten Oberfläche der Lyra, Tür geschlossen	Strahlkammer geschlossen, Abluft entsprechen Strahlprozessparameter
7	2. mRFA-Messung an den Messpositionen auf der Oberfläche. (Zustand nach der ersten Reinigung). Tür offen	Abluft maximal PSA Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
8	2. Swab-Probenahme und FTIR und mRFA-Messung an den Swabs (Zustand nach der ersten Reinigung). Tür offen	PSA Handschutz + Staubschutzkleidung
9	2. CO ₂ -Reinigung der gesamten Oberfläche der Lyra, Tür geschlossen	Strahlkammer geschlossen, Abluft entsprechend Strahlprozessparameter Strahlkammerreinigung
10	3. mRFA-Messung an den Messpositionen auf der Oberfläche. (Zustand nach der ersten Reinigung). Tür offen	PSA Handschutz + Staubschutzkleidung
11	3. Swab-Probenahme und FTIR und mRFA-Messung an den Swabs (Zustand nach der ersten Reinigung). Tür offen	PSA Handschutz + Staubschutzkleidung
12	Dokumentation des Endzustands (fotografisch). Tür offen	PSA Handschutz + Staubschutzkleidung

Tabelle 14: Arbeitsablauf Testreinigung Lyra

4.6.3 Objektdokumentation

Die Oberflächenbereiche wurden fotografisch und analytisch dokumentiert.





Materialien	Bild
Schellack auf Mahagonifurnier	
Pedalkasten Schwarzer Lack (schwarz gefasst)	
Filz (rot)	
Metallteile (korrodiert)	

Abbildung 36: Lyra Details Vorzustand

Die verschiedenen Oberflächenbereiche wurden auf Kontaminationen untersucht. Auf den Oberflächen wurden Positionen für mRFA-Direktmessungen und Swab-Probenahme festgelegt.

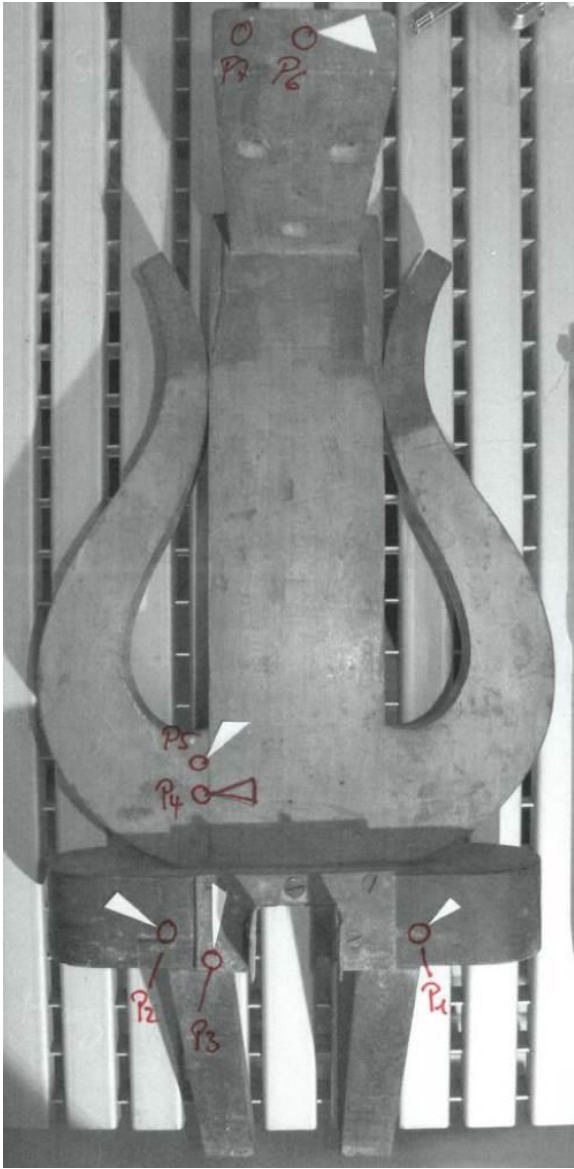
Pos.	Beschreibung	Bild
1	Pedalkasten (schwarzer Lack)	
2	Pedalkasten (schwarzer Lack)	
3	Metall	
4	Schellack	
5	Schellack	
6	Stirnholz	
7	Stirnholz	

Tabelle 15: Messpositionen mRFA-Messung und Swab-Probenahme

Die mRFA-Oberflächendirektmessungen wurden in der Strahlkammer im Abluftstrom durchgeführt. Für die Messungen wurde das RFA-Mobiler RF-Spektrumsanalysator Typ: Niton XL3t Hybrid+ Analyticon Instruments GmbH mit den Einstellungen nach Abbildung 37 für alle Messpunkte eingesetzt. Die Tabelle 16 beinhaltet die Messwerte der mRFA-Oberflächen- und Swab-Probenmessungen vor der CO₂-Reinigung.



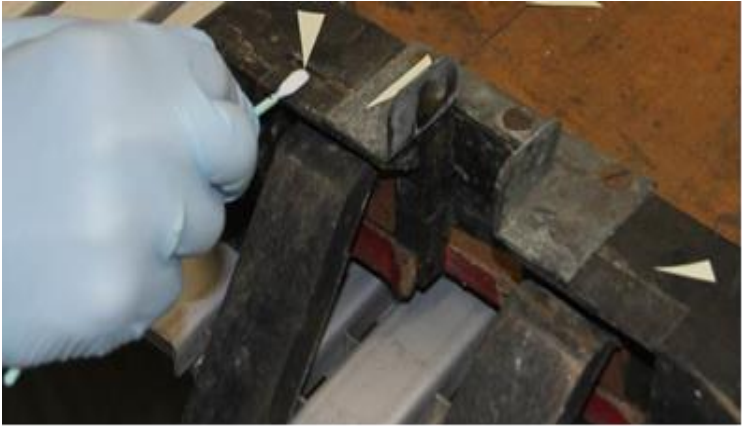
Messpunkt	Position Messung												
P1													
Gerätekonfiguration	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Modus</th> <th>Duration</th> <th>Units</th> <th>Flags</th> <th>MESSAUFBAU</th> <th>FILTER</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Plastics Non PVC</td> <td>90 sec.</td> <td>ppm</td> <td></td> <td>STATIV</td> <td>m30lo30li30</td> </tr> </tbody> </table>	Modus	Duration	Units	Flags	MESSAUFBAU	FILTER	Plastics Non PVC	90 sec.	ppm		STATIV	m30lo30li30
Modus	Duration	Units	Flags	MESSAUFBAU	FILTER								
Plastics Non PVC	90 sec.	ppm		STATIV	m30lo30li30								
P2													
Swab P2													

Abbildung 37: Lyra mRFA-Messung

4.6.4 Testreinigung Lyra

Die Lyra wurde in 2 Durchgängen mit dem CO₂-Schneestrahls gereinigt. Für alle Oberflächen wurden die Prozessparameter 7 bar Beschleunigungsdruck und 280 g/min CO₂ eingestellt. Der erste Reinigungsdurchgang erfolgte mit einem Düsen-Oberflächenabstand >10 cm. Die auf der Vorder- als auch auf der Rückseite identifizierten Bereiche von Wirkstoffablagerungen wurden streifenweise behandelt. Die CO₂-Strahlwirkung auf die Lacksicht wurde laufend im Gegenlicht visuell kontrolliert. Bei den vorgegebenen Prozessparametern konnte die gesamte Oberfläche beschädigungsfrei gearbeitet werden. Lokal verblieben dunklere, fleckenartige Ablagerungen. Der erreichte Reinigungseffekt wurde messtechnisch analysiert und dokumentiert. Die mRFA-Oberflächen- und Swab-Messungen nach der 1. CO₂-Reinigung für die Proben P2, P4 und P6 beinhaltet Tabelle 15 in der Spalte „w.d.Reinigung“.



Abbildung 38: CO₂-Reinigung der Lyra ([Video Reinigung Lyra](#)): ([Video Lyra-Pedal](#))

Die noch vorhandenen Ablagerungen wurden in einem zweiten Durchgang mittels CO₂-Schneestrahls behandelt. Dabei wurde der Düsenabstand zwischen 4-10 cm variiert, diese Entscheidung erfolgte „auf Sicht“. Die vorhandenen Ablagerungen konnten dadurch teilweise weiter reduziert werden. Trübe rissige Lackbereiche, die nur schwach auf der Furnierfläche hafteten wurden an zwei Versuchsstellen dennoch kleinflächig abgehoben. Dieses Risiko wurde durch eine veränderte Strahlführung und eine genauere Strahlkontrolle auf der Oberfläche minimiert. Durch die konstruktiven Eigenheiten der Strahlkammer und der Strahldüse sind der Oberflächenbeobachtung im Nahbereich Grenzen gesetzt. Eine weitere Reduzierung der Schädigungsschwelle für schwach haftende Oberflächenbereiche ist durch die Steuerung der Beschleunigungsluft gegeben. Nicht vorgeschädigte Lackbereiche und der schwarz gefasste Lyra-Sockel wurden auch im 2. Durchgang im Glanz und Patina nicht verändert. Die rauen Oberflächenbereiche auf der Lyra-Sockelunterseite und die Filzpolster konnten ebenfalls schadensfrei gereinigt werden. Die Korrosion auf den Metalloberflächen wird reduziert, die Oberfläche wird nicht metallisch blank.

Für die Reinigung der Lyra wurden etwa 52 min benötigt. Der Materialverbrauch CO₂ betrug etwa 14,5 kg, so dass diese Kosten bei einem aktuellen Kilopreis von 0,50 € insgesamt ca. 7,28 € betragen.

4.6.5 Anwendung Swab-Probenahme

Für die Anwendung der Swab-Probenahme muß der Wisch-Flächenbereich für die Probenahmestelle definiert werden, um die Vor- und Nachmessung vergleichen zu können. Auf der Lyra wurden Wischflächen von ca. 20 x 20 mm gewählt. Es wurde ein möglichst hoher Anpressdruck der Swabs auf die Wischfläche angestrebt. Die Swab-Proben müssen bei Transport vor Sekundärkontaminationen geschützt werden und wurden in „Microcentrifuge Tubes“ verpackt.

Messpunkt	mRFA-Messergebnis						
	Probe	vor der Reinigung Cl in ppm	w. d. Reinigung	nach der 1. Reinigung	nach der 2. Reinigung	Differenz	Abweichung Cl in %
P1	Oberfläche 1. Swab 2. Swab	6962,36		6100,52		-861,84	-12,38
P2	Oberfläche 1. Swab 2. Swab 3. Swab	20750,86 4671,66			5331,36	-15419,50 -4622,55 -4641,56	-74,31 -98,95 -99,36
P3	Oberfläche 1. Swab 2. Swab	52335,01 63,75					
P4	Oberfläche 1. Swab 2. Swab 3. Swab	5872,66 5975,29		4522,65		-1350,01 -5885,05 -5933,90	-22,99 -98,49 -99,31
P5	Oberfläche 1. Swab	5348,87		1980,78		-3368,09	-62,97
P6	Oberfläche 1. Swab 2. Swab 3. Swab	7538,94 2155,65		3206,81	2686,21	-4332,13 -4852,73 -2083,29 -2111,55	-57,46 -64,37 -96,64 -97,95
P7	Oberfläche 1. Swab	11881,41		1379,65		-10501,76	-88,39

Tabelle 16: mRFA-Messergebnisse Lyra

Den direkten Vergleich der Messergebnisse von Vor- und Nach-Reinigungszustand zeigen die Diagramme 6 und 7:

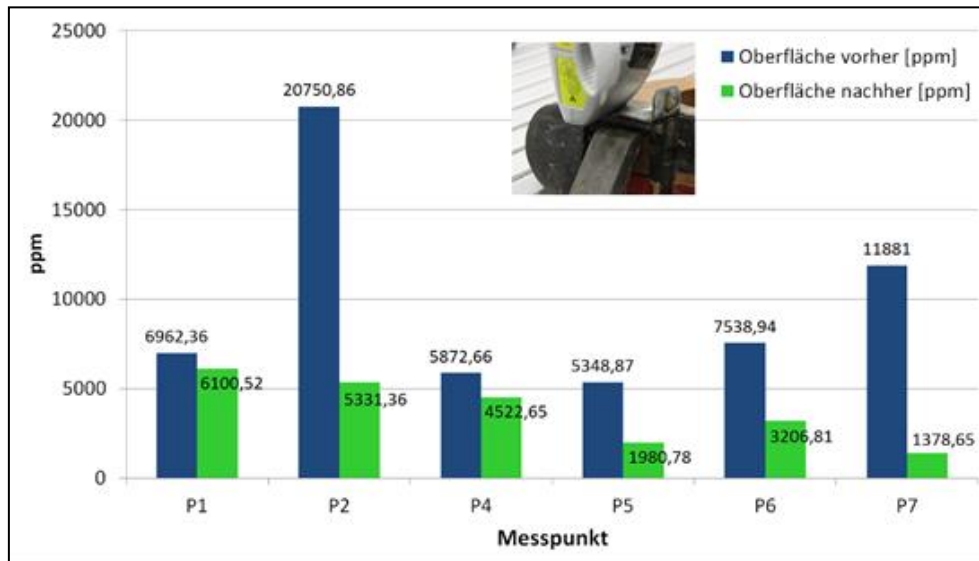


Diagramm 6: mRFA-Direkt-Messwerte vor und nach der CO₂-Reinigung

Die CI-Ausgangsbelastung der Oberfläche von 20750 ppm (P2) bis 5348 ppm (P5) weist auf eine sehr inhomogene Applikation hin. Die Restbelastung deutet auf ein DDT-Depot hin. Die durchgeführten mRFA-Messungen erfassen Chlor-Signale bei Holz bis aus einer Tiefe von ca. 10 mm.

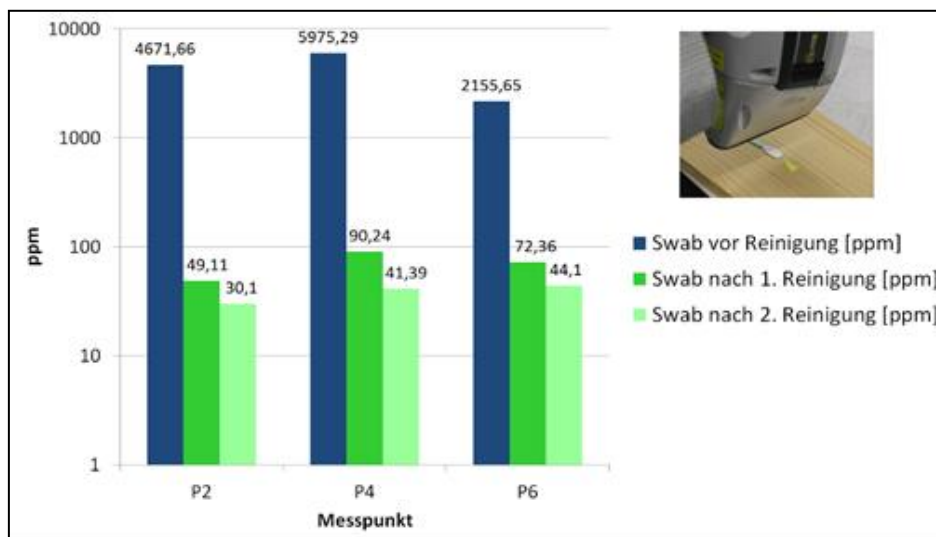


Diagramm 7: mRFA-Swab-Messwerte vor und nach der CO₂-Reinigung

Die CI-Belastung der Swab-Proben korreliert nicht mit der mRFA-Direktmessung der Oberflächenbelastung. Der Swab P4 hat mit 5975 ppm einen höheren CI-Wert als die mRFA-Direktmessung mit 5872 ppm. Die mit Swabs beprobte Flächengröße unterscheidet sich von der Messfläche des mRFA an derselben Probestelle. Zudem können eine inhomogene Verteilung des Wirkstoffes DDT und die manuelle Swab-Wischbewegung weitere Ursachen sein. Die gemessene Abnahme der Chlor-Oberflächenbelastung durch die CO₂-Reinigung beträgt bis zu 99 %, die mittlere Abnahme 98 %. Der Nachweis von Cl im Swab ist bis zu einem Wert von 50 ppm mit mRFA möglich.

Die FTIR-Analyse der Swab-Proben bestätigen die mRFA-Messergebnisse.

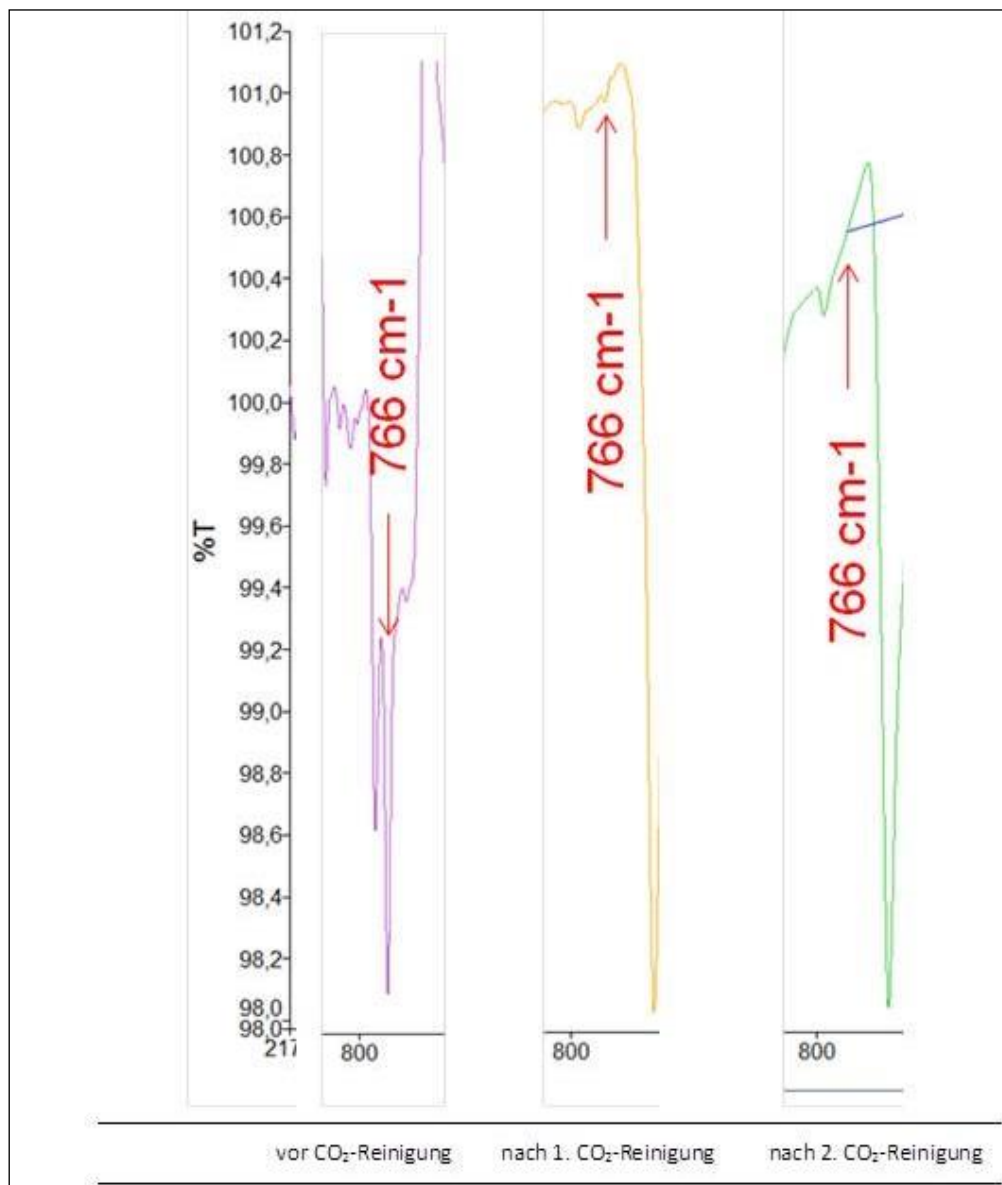


Diagramm 8: FTIR-Messwerte von P4 Swab links: LP4V, vor der Reinigung; mitte: LP4N, nach der 1. Reinigung; rechts: LP4N2, nach der 2. Reinigung

In der Swab-Probe nach der 1. CO₂-Reinigung ist noch eine Absorption bei 766 cm⁻¹ zu erkennen, in der Swab-Probe nach der 2. CO₂-Reinigung ist keine Absorption bei 766 cm⁻¹ vorhanden, diese Oberfläche gilt als gereinigt. Die Messungen der Swabs mittels FTIR-ATR Kristall sind nicht quantifizierbar. Diese Absorption bei 766 cm⁻¹ weist eine C-Cl Verbindung nach, nicht direkt den Wirkstoff DDT. Eine Absorption bei 766 cm⁻¹ kann durch verschiedene chlororganische Verbindungen hervorgerufen werden. Die Nachweisgrenze der FTIR-Messung für das Swab-System liegt bei ca. 72 ppm. Alternativ könnten Swab-Proben nach Extraktion mittels HPLC analysiert werden.

4.7 Anwendung Flötenuhr MS-450

Die Flötenuhr wurde nach 1860 in der Werkstatt von Matthäus Muggle Neukirchen (Baden) gefertigt. Sie besaß eine Vogelmechanik (nicht erhalten), einen dreiachsigen Uhrwerkmotor mit Gewichtantrieb, eine Stiftwalze mit 8 Melodien. Die Disposition lautet: Flöte 2-Fuß (Holz), Gedackt 4-Fuß (Holz) in süddeutscher Pfeifenmensur.





4.7.1 Objektzustand

Die Flötenuhr MS-450 aus dem Bestand der Musikinstrumentensammlung Stiftung Händel-Haus wurde auf Grund von Insekten-Fluglochfunden zu einem nicht dokumentierten Zeitpunkt mit dem HSM „Hylotox 59“ behandelt.



Abbildung 39: Flötenuhr MS-450

Auf den Holzbauteilen Gestell und Orgelpfeifen sind Kristallablagerungen optisch zu erkennen. Generell sind alle Flächen stark verschmutzt, sämtliche Metallteile korrodiert sowie teilweise demontiert und die Funktionsfähigkeit insgesamt nicht mehr gegeben. Die Balgplatten und der Pfeifenstock sind mit Papier beklebt, die Keilfalten sind beledert. Die Stiftwalze ist mit Papier umhüllt.

Material	Bildokumentation
Fichtenholz roh Pfeifen	
Papier an Flötenpfeifen	
Papier auf Walze	
Papier Pfeifenstock	

Material	Bilddokumentation
Filz Clavisdämpfung	
Metallteile Walzenantrieb	
Leder Faltenbalg	
Lasiertes Holz Mechanikgestell	

Abbildung 40: Flötenuhr Detail Vorzustand

4.7.2 Ablaufplan



Die Kontamination des Objektes mit dem HSM-Wirkstoff DDT ist bekannt. Für die Testreinigung wurde ein Ablaufplan erstellt, in dem die Arbeitsschutzvorschriften für den Umgang mit dem kontaminierten Objekt spezifiziert wurden. Es gelten die in 4.6.2 genannten Voraussetzungen und die Vorschriften nach Tabelle 13.



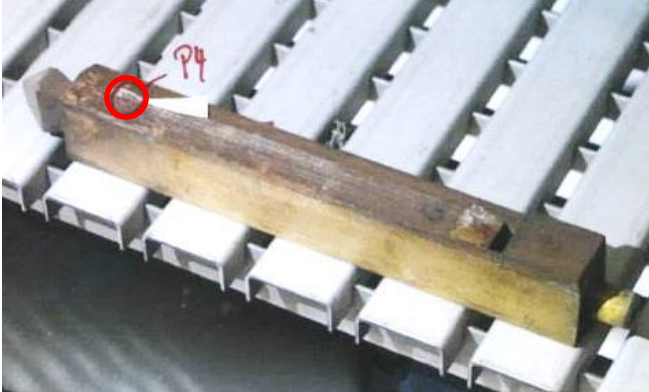
Schritt Nr.	Beschreibung	
1	Auspacken Flötenuhr in der Strahlkammer, Tür geschlossen (Folienverpackung)	Abluft eingeschaltet Volumenstrom (1000 m ³ /h), maximale Abluft PSA = Handschutz + Staubschutzkleidung
2	Dokumentation des Ausgangszustands (fotografisch)	Abluft eingeschaltet, maximale Abluft PSA = Atemschutz + Einweg-Handschutz + Staubschutzkleidung
3	Festlegung der Messpositionen	Abluft eingeschaltet, maximale Abluft PSA = Atemschutz + Einweg-Handschutz + Staubschutzkleidung
4	1. mRFA-Messung an den Messpositionen auf der Oberfläche (Vorzustand)	Abluft eingeschaltet, maximale Abluft PSA = Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
5	1. Swab-Probenahme (Vorzustand) und FTIR und mRFA-Messung an den Swabs.	Abluft eingeschaltet, maximale Abluft PSA = Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
6	1. CO ₂ -Reinigung der gesamten Oberfläche der Flötenuhr	Strahlkammer geschlossen, Abluft entsprechend Strahlprozessparameter Strahlkammerreinigung
7	2. mRFA-Messung an den Messpositionen auf der Oberfläche. (Zustand nach 1. Reinigung).	Abluft eingeschaltet, maximale Abluft PSA = Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
8	2. Swab-Probenahme und FTIR und mRFA-Messung an den Swabs (Zustand nach 1. Reinigung).	Abluft eingeschaltet, maximale Abluft PSA = Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
9	Dokumentation des Reinigungszustandes (fotografisch)	Abluft eingeschaltet, maximale Abluft PSA = Handschutz + Staubschutzkleidung

Tabelle 17: Ablaufplan Testreinigung Flötenuhr

4.7.3 mRFA-Analyse Oberflächen

Nach dem Auspacken in der geschlossenen Strahlkammer wurden die mRFA-Messpunkte unter Berücksichtigung von Kontaminationsgrad und Materialart festgelegt.

Messpunkt	Beschreibung	Bild
P1	Stiftwalze Papieroberfläche	
P2	Clavisbalkenoberseite	
P7	Uhrwerkgehäuse hinter Zifferblatt	
P3	Balgplatte Papieroberfläche	

Messpunkt	Beschreibung	Bild
P6	Balgfalte	
P8	Walzenverschluss	
P9	Grundplatte Unterseite	
P4	Flötenregister Ton „G“	

Messpunkt	Beschreibung	Bild
P5	Stundenglocke	

Abbildung 41: mRFA-Messpunkte Flötenuhr

Die mRFA-Messung und die Swab-Probenahme erfolgten in der Strahlkammer bei maximaler Abluft mit den in Abbildung 42 angegebenen Messgeräte-Einstellungen.

Messpunkt	Messung												
P1													
Einstellung	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Modus</th> <th>Duration</th> <th>Units</th> <th>Flags</th> <th>MESSAUFBAU</th> <th>FILTER</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Plastics-Non-PVC</td> <td>90-sec.</td> <td>ppm</td> <td>-</td> <td>STATIV</td> <td>m30lo30hi30li30</td> </tr> </tbody> </table>	Modus	Duration	Units	Flags	MESSAUFBAU	FILTER	Plastics-Non-PVC	90-sec.	ppm	-	STATIV	m30lo30hi30li30
Modus	Duration	Units	Flags	MESSAUFBAU	FILTER								
Plastics-Non-PVC	90-sec.	ppm	-	STATIV	m30lo30hi30li30								

Abbildung 42: mRFA-Messung und Probenahme Flötenuhr

Messpunkt	mRFA-Messergebnis				
	Probe	vor der Reinigung Cl in ppm	nach der Reinigung	Differenz	Abweichung Cl in %
P1	Oberfläche	1834,03	1939,23	105,20	5,74
	1. Swab	102,09	50,85	-51,24	-50,19
	2. Swab				
P2	Oberfläche	1445,51	1552,28	106,77	7,39
	1. Swab	241,91	51,03	-190,88	-78,91
	2. Swab				
P3	Oberfläche	897,67	1137,72	240,05	26,74
	1. Swab	58,66	79,04	20,38	34,74
	2. Swab				
P4	Oberfläche	14100,00	4212,13	-9887,87	-70,13
	1. Swab	2918,64	93,47	-2825,17	-96,80
	2. Swab				
P5	Oberfläche				
	1. Swab	184,55			
	2. Swab		82,10	-102,45	-55,51
P6	Oberfläche				
	1. Swab	107,04			
	2. Swab		32,90	-74,14	-69,26
P7	Oberfläche				
	1. Swab	69,64			
	2. Swab		53,22	-16,42	-23,58
P8	Oberfläche				
	1. Swab	573,84			
	2. Swab		98,20	-475,64	-82,89
P9	Oberfläche				
	1. Swab	43,33			
	2. Swab		43,57	0,24	0,55

Tabelle 18: mRFA-Messergebnisse Flötenuhr

Die Cl-mRFA-Messwerte nehmen nach dem CO₂-Reinigen teilweise leicht zu. Möglicherweise ist die Oberfläche nach der Reinigung messtechnisch zugänglicher oder die Cl-Depotverteilung in den Oberflächen ist sehr inhomogen. Die mittels mRFA im Bereich von 50 - 251 ppm detektierten Swab-Cl-Werte (P1 - P3) zeigen in der FTIR-Analyse keine DDT-typischen Kurven. In diesen Fällen liegt kein C-Cl bzw. DDT vor.

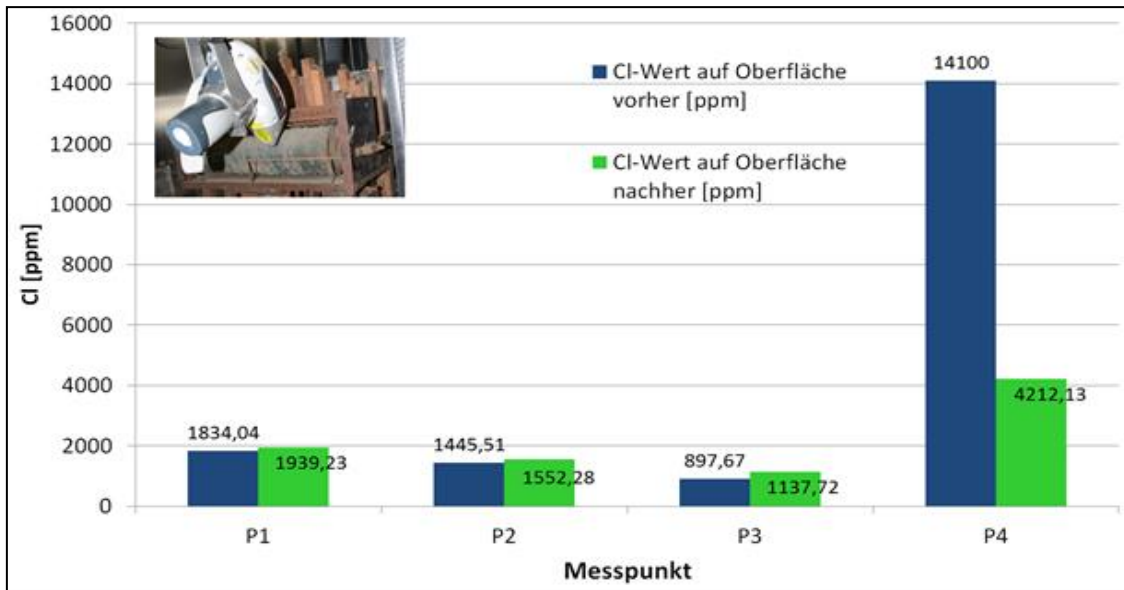


Diagramm 9: mRFA-Messwerte Flötenuhr, vor und nach der CO₂-Reinigung

Die mit den Swabs aufgenommenen starken Staubbelastungen von den Oberflächen der Flötenuhr zeigen vor und nach der Reinigung relativ niedrige Cl-Werte. Da nicht viel Cl vorhanden war, bewirkte die Reinigung auch nur geringe Abnahmen der Cl-Werte. Eine Ausnahme bildet nur der Messpunkt P4 (Flöte „G“), an dieser Stelle liegt der Reinigungseffekt im Bereich nahe 100 % (berechnet = 96,8 %).

Diagramm 10 zeigt den Swab-mRFA-Messwertvergleich:

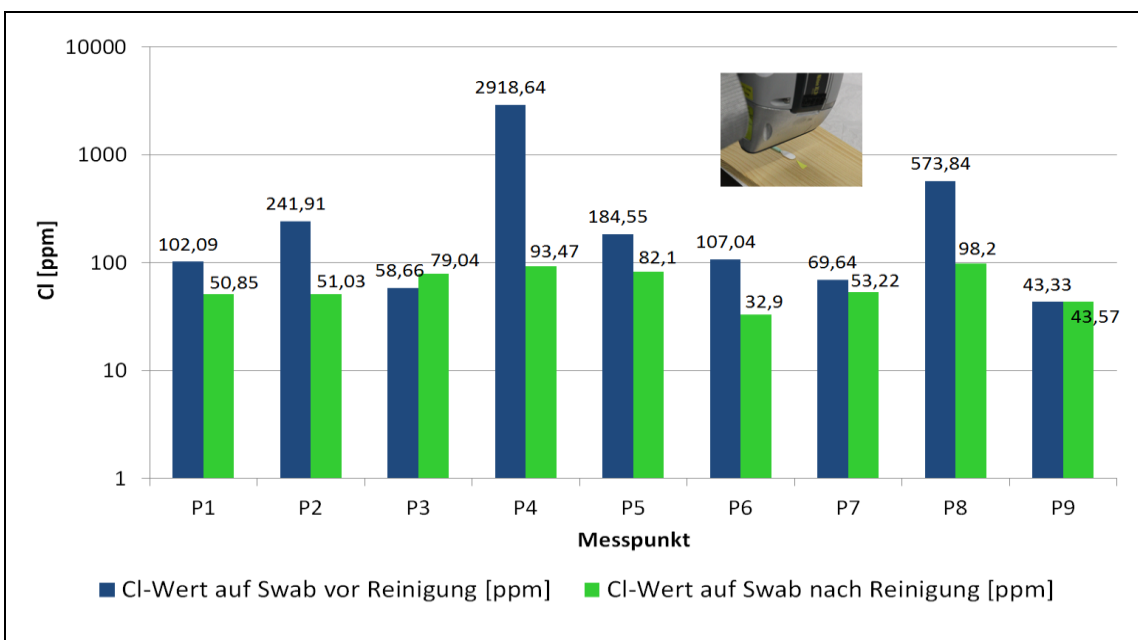


Diagramm 10: Swab-mRFA-Messwertvergleich Flötenuhr

Die FTIR-Analysen der Swab-Proben unterscheiden sich von den mRFA-Messungen. Nur mit der Probenahme Swab-P4 (Flöte „G“) wurde C-Cl (bei 766 cm⁻¹) für DDT erfasst. Weitere sichtbaren Kristallablagerungen auf den Gehäuseteilen wurden nicht beprobt. Eine Auswertung der Befunde enthält Tabelle 19:

Messpunkt Swab	FTIR-Analyse Befund	Auswertung Befund
P1	kein C-Cl vor Reinigung, kein C-Cl nach Reinigung	Die mittels mRFA gemessenen Cl-Werte sind kein DDT.
P2	kein C-Cl vor Reinigung, kein C-Cl nach Reinigung	Die mittels mRFA gemessenen Cl-Werte sind kein DDT.
P3	kein C-Cl vor Reinigung, kein C-Cl nach Reinigung	Die mittels mRFA gemessenen Cl-Werte sind kein DDT.
P4	C-Cl vor Reinigung vorhanden, kein Cl nach Reinigung	Die FTIR-Messung nach Reinigung bestätigt Oberflächenreinheit, die mRFA-Messung zeigt DDT-Depot
P5	kein C-Cl vor Reinigung, kein C-Cl nach Reinigung	Die mittels mRFA gemessenen Cl-Werte sind kein DDT.
P6	kein C-Cl vor Reinigung, kein C-Cl nach Reinigung	Die mittels mRFA gemessenen Cl-Werte sind kein DDT.
P7	kein C-Cl vor Reinigung, kein C-Cl nach Reinigung	Die mittels mRFA gemessenen Cl-Werte sind kein DDT.
P8	kein C-Cl vor Reinigung, kein C-Cl nach Reinigung	Die mittels mRFA gemessenen Cl-Werte sind kein DDT.
P9	kein C-Cl vor Reinigung, kein C-Cl nach Reinigung	Die mittels mRFA gemessenen Cl-Werte sind kein DDT.

Tabelle 19: Auswertung Swab-Proben mit FTIR-Analyse Flötenuhr

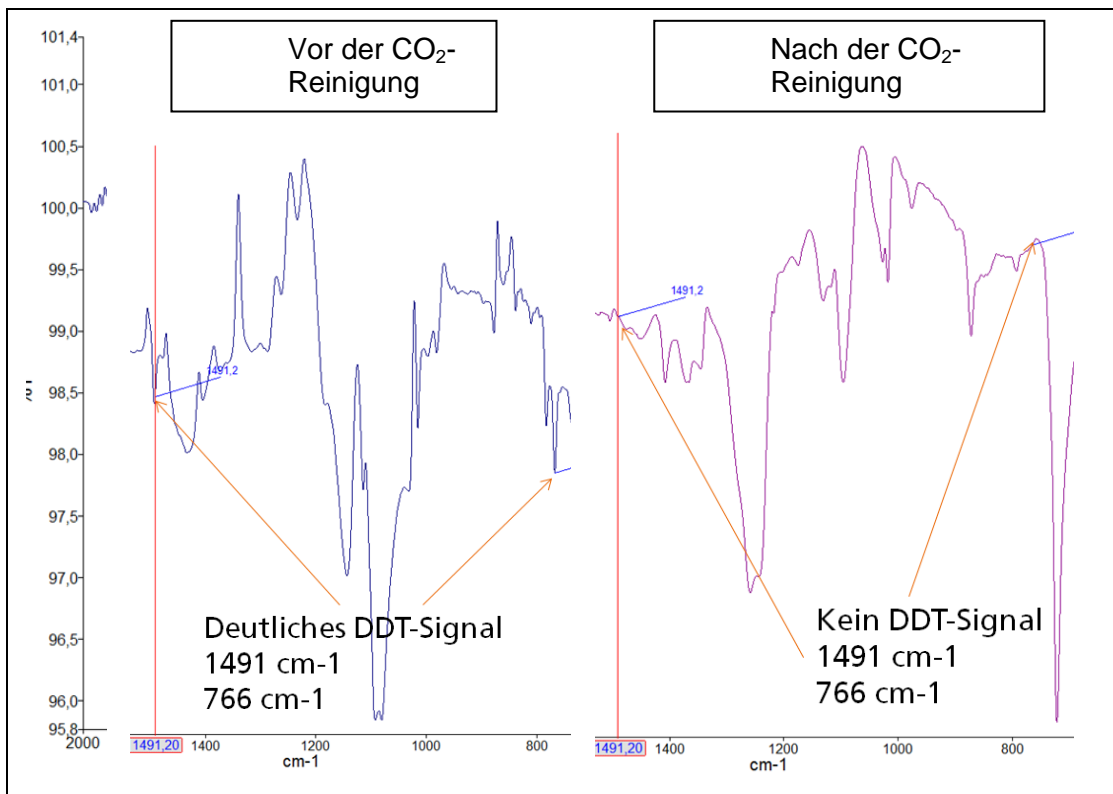


Diagramm 11: FTIR-Messkurven Swab P4 Flötenuhr

Die FTIR-Messergebnisse weisen eine C-Cl Verbindung bei 766 cm^{-1} nach, als Stoff kann DDT nicht nachgewiesen werden. Chlororganische Verbindungen sind häufig Bestandteil von Insektiziden und Pestiziden und werden als Gefahrstoff eingestuft. Bei ihrem Vorkommen auf Museumsobjekten muss immer eine Biozid-Behandlung vermutet und abgeklärt werden.

Das FTIR-ATR Spektrometer erfasst nur einen sehr lokalen Bereich auf dem Swab, d.h. eine homogene Swabflächen-Benetzung ist Voraussetzung für ein genaues Messergebnis. Die Messungen mittels FTIR-ATR Kristall sind nicht quantifizierbar.



Die Swab-Probeflächen werden mittels Spannschraube am Druckbalkenkopf auf den Messkristall gepresst. Das Messergebnis wird nach wenigen Sekunden über die Geräte-Software digitalisiert als Diagramm dargestellt.

Abbildung 43: FTIR-ATR Spektrometer Messsituation

4.7.4 CO₂-Schneestrahl-Testreinigung Flötenuhr

Entsprechend dem Ablaufplan Punkt 5 wurde die Flötenuhr in der geschlossenen Strahlkammer mit guter Sichtbarkeit der zur reinigenden Bauteile positioniert. Der Arbeitsvorgang wurde fotografisch und als Video-Mitschnitt dokumentiert.

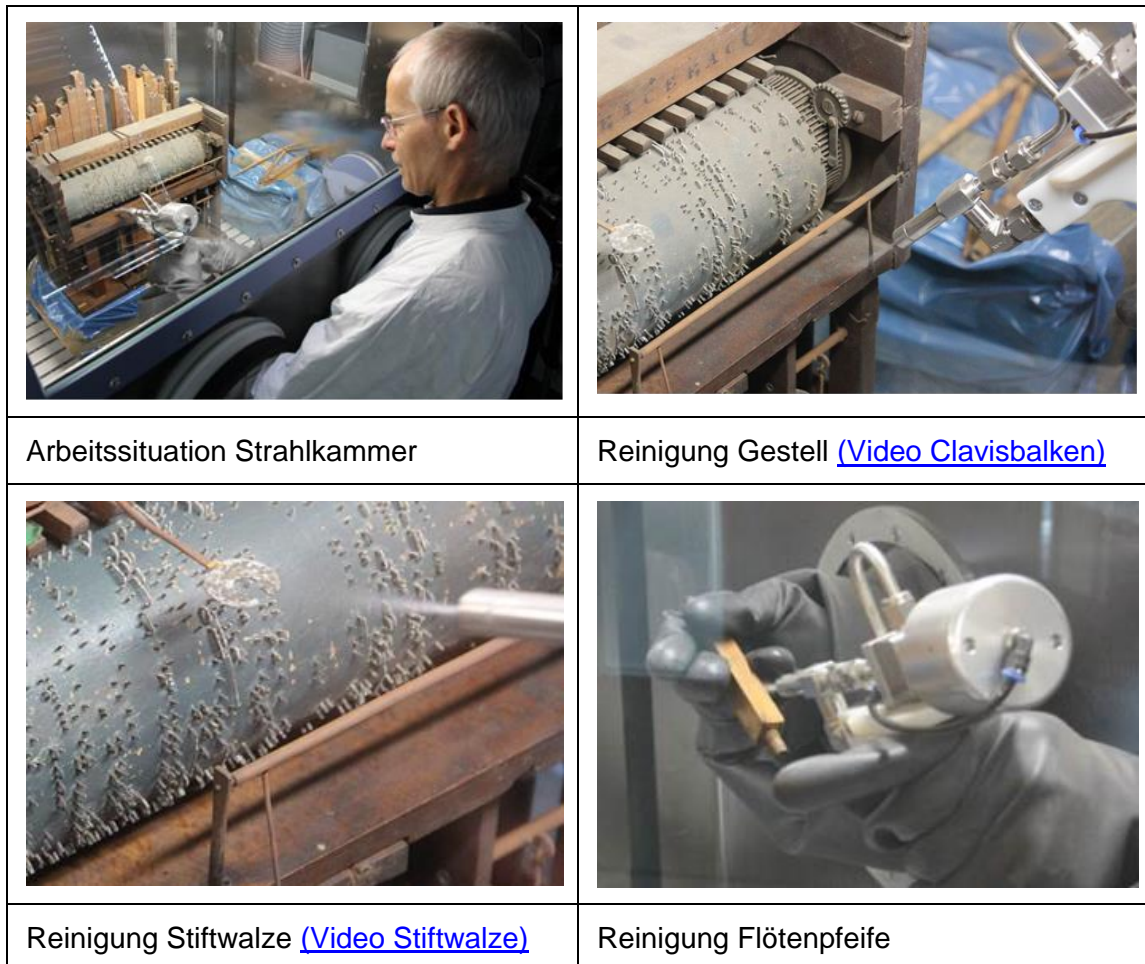


Abbildung 44: CO₂-Schneestrahltreinigung Flötenuhr

Als Prozessparameter wurden aus den Ergebnissen der Vorversuche nachfolgende Einstellungen gewählt:

Strahlwerkzeug	Hand-Düse, kurze Bauform
CO ₂ -Druck	64 bar
Druck Beschleunigungsgas	5 bar (dynamisch)
Arbeitsabstand	50-100 mm
Strahlwinkel	10°- 90° zur Oberfläche
Strahldauer	Entscheidung durch Bearbeiter

Tabelle 20: Prozessparameter CO₂-Schneestrahltreinigung Flötenuhr

Die Durchführung der Reinigung in der Strahlkammer unterliegt verschiedenen Einflüssen, die sich aus dem Geräteaufbau und den Prozessparametern ergeben.

<p>Bewegungsfreiheit, Sichtbarkeit</p>	<p>Durch die Strahlkammerkonstruktion ist die Bewegungsfreiheit für die Hände festgelegt. Der motorische Aktionsradius ist im Falle der Flötenuhr ausreichend groß. Die Materialeigenschaften der Strahlhandschuhe gestatten keine sensible Objekt-Ertastung. Die Bauform der Hand-Düse bedingt ein Objekt-Strahlkammersichtscheiben-Mindestabstand, durch den der Beobachtungsabstand zur Arbeitsfläche definiert wird und die genaue Beurteilung bei kleinflächigen oder punktförmigen Verschmutzungen begrenzt ist. Die optische Oberflächenbeurteilung kann eine Punktlichtquelle unterstützen. Die Hand-Düse hat ein Eigengewicht von ca. 1,1 kg, dass eine ruhige Düsenführung unterstützt. Je nach Höhe des gewählten Drucks des Beschleunigungsgases ist die Fixierung des Objektes beim Strahlvorgang nötig. Beim für die Flötenuhr gewählten Druck von 5 bar können auch die kleinen Orgelpfeifen frei Hand gehalten und bearbeitet werden. Die Handhabung der Düse in der Strahlkammer bedarf einer Einarbeitung der Ausführenden.</p>
<p>Steuerung Strahlvorgang</p>	<p>Die Intensität der Schneestrahln-Reinigungswirkung wird maßgeblich durch den Düsen-Objekt-Abstand bestimmt. Bei einem Düsenabstand von 100 mm werden Oberflächenbereiche in einem Radius von ca. 50 mm vom Beschleunigungsgas intensiv bestrahlt, lose Kleinteile werden aufgewirbelt. Bei einem Objekt-Düsenabstand < 50 mm wird die Oberfläche in einem CO₂-Strahlpunkt von ca. 10 mm stark abkühlt, die Strahlwirkung durch Beschleunigung nimmt ab. Stark abgekühlte Flächen können durch Spülen nur mit Beschleunigungsgas schnell erwärmt und kondensatfrei gehalten werden. Richtung und Winkel des CO₂-Schneestrahls müssen bei offenporigen und rauen Oberflächen (z. B. Eichenholz) im 45° Rhythmus variiert werden, um tiefer liegende Bereiche grundhaft zu reinigen. Erst wenn die Düsenabstandskorrektur nicht mehr ausreicht, sollte der Beschleunigungsgasdruck verändert werden. Generell ist der Beschleunigungsgasdruck ansteigend zu staffeln. Nach einer lokalen Nahreinigung müssen Bauteile großflächig nachgestrahlt werden, um Verschleppungen zu reduzieren.</p>
<p>Objekt-oberflächen</p>	<p>Bleistift- und Tuscheschrift reagiert unempfindlich, leichte und dünne Materialien reagieren empfindlich gegenüber hohem Beschleunigungsgasdruck (fixieren), festhaftende Farb-, Fassungs-, Lack- und Politurflächen reagieren wenig und optisch gut kontrollierbar auf eine Beschleunigungsgasdruckänderung.</p>
<p>Verschmutzungsarten</p>	<p>Lockerem Staub zunächst mit großem Düsenabstand flächig reinigen (Staubwolken möglich), danach bei Bedarf Düsenabstand reduzieren oder Beschleunigungsgasdruck erhöhen. Absprengwirkung durch Unterkühlung ist bei Verkrustungen gering, die Technologie eignet sich bedingt zur Farbschichtentfernung</p>

Tabelle 21: Bewertung Arbeitsvorgang

4.7.5 Bewertung Reinigungsergebnis

Mit dem Beschleunigungsdruck von 5 bar werden staubförmige Ablagerungen und DDT-Kristalle von der Oberfläche nahezu vollständig entfernt, Korrosionsschichten auf Metallteilen werden reduziert. Poren, Risse und Fugen, raue Lederoberflächen und Filze werden grundhaft gereinigt. Einzelne, gering haftende Papierteile an der Walze haben sich beim Reinigen gelöst. Glanz und Patina der Holzoberfläche, der Farblacke auf dem Walzen- und Balgpapier, sowie Bleistift- und Tuscheschrift blieben erhalten.

Der konstruktive Aufbau bedingt verdeckte Oberflächenbereiche, die nicht gereinigt werden konnten. Für eine vollständige Reinigung aller Bauteile muss die Flötenuhr in Einzelteile zerlegt werden.

Die Oberflächen erscheinen nach der Reinigung visuell sauber. Eine Emission von kontaminiertem Staub an die Umgebung ist von der gereinigten Oberfläche ohne Fremdwirkung aktuell nicht möglich. Eine zukünftige Migration von DDT an die Oberfläche kann nicht ausgeschlossen werden, auf diese potentielle Gefahr ist beim Umgang mit dem Objekt hinzuweisen.

Die Reinigungszeit der gesamten Flötenuhr betrug ca. 81 min. Der CO₂-Verbrauch für diese Reinigung mit der Hand-Düse (280 g/min) lag bei ca. 22,6 kg CO₂.

Bei einem aktuellen Kilopreis von 0,50 € entstehen dadurch Kosten von ca. 11,34 €. Die Swab-Wischmethode ist anwendbar. Bei der Swab-Probenahme ist das Wischen gleicher Flächen und die Nutzung der gesamten Swab-Oberfläche eine Voraussetzung. Die Swab Wischmethode in Kombination mit dem FTIR kann als Oberflächen-Reinheitsprüfung für DDT eingesetzt werden. Die mRFA-Messungen auf den gereinigten Oberflächen zeigen Cl-Depots in tieferen Materialschichten. Die Kombination von mRFA für die schnelle Prüfung der vorhandenen Elemente in Kombination mit der FTIR-Messung zum Nachweis von DDT hat sich bewährt. Im Vergleich ist die Flötenuhr weit weniger mit DDT belastet als die Lyra MS-15.

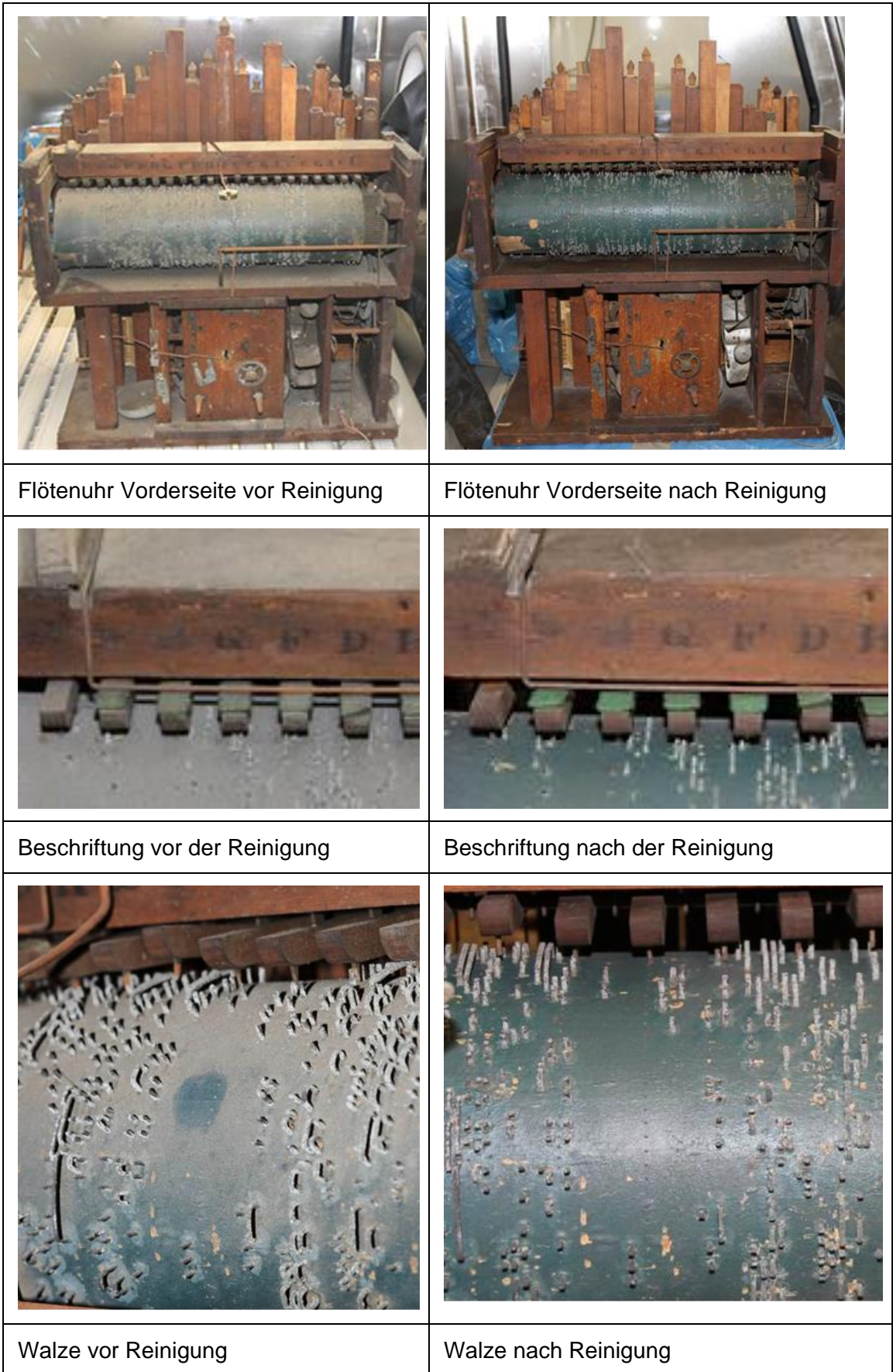


Abbildung 45: Zustand Flötenuhr, vor und nach Reinigung

4.8 Anwendung Tastenhebel

Diese Testreihe untersucht die Wirksamkeit der CO₂-Schneestrahlsreinigung bei Kontaminationen mit pulverförmigen Schwermetallbelastungen.

4.8.1 Objektzustand

Die Tastenhebel entstammen dem unsignierten Tafelklavier der Deckelfragmente unter 4.5.1. Die Bleigewichte sind in dem gerbstoffhaltigen Nadelholz (Fichte) stark korrodiert und der Abrieb hat sich auf den Tastenhebel und dem Klaviaturboden abgelagert.

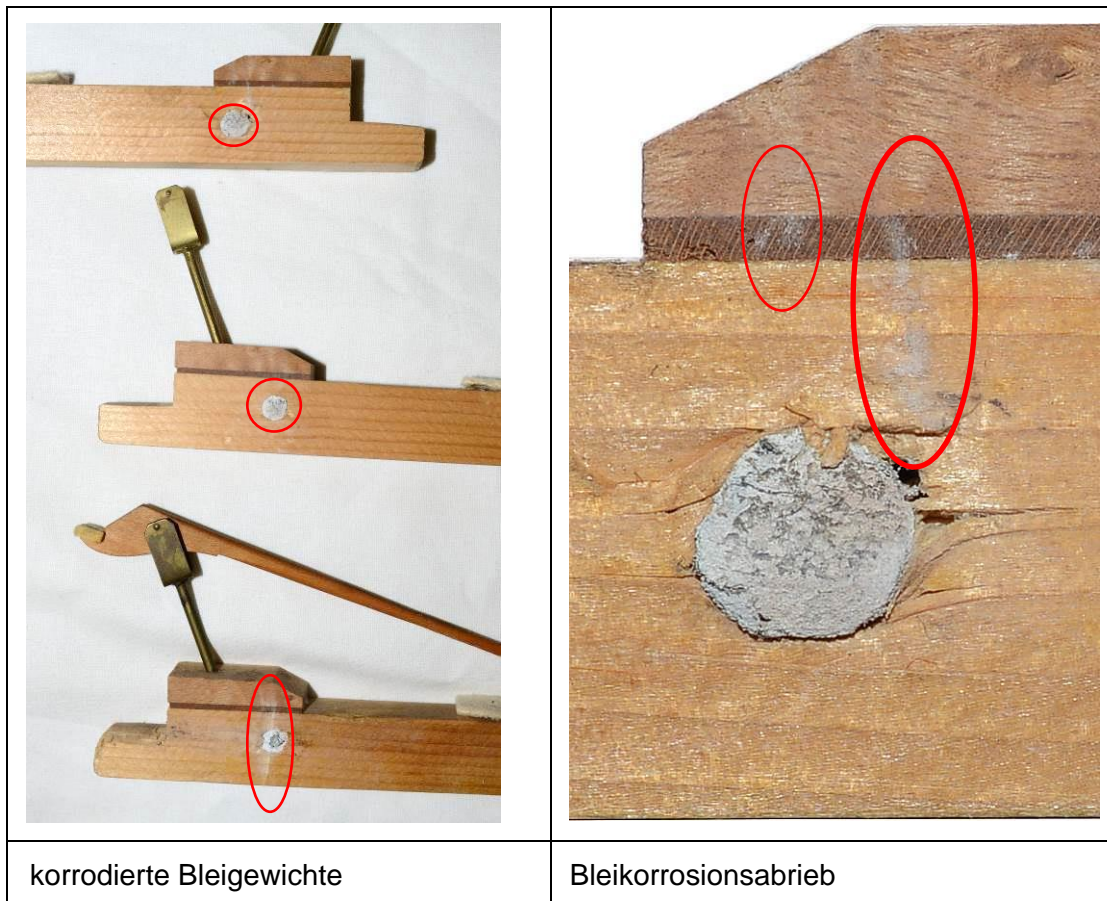


Abbildung 46: Tastenhebel

4.8.2 Ablaufkonzeption Arbeitsschutz

Für den Ablauf der Testreinigung „Schwermetallbelastung“ wurde ein weiteres Ablaufschema entwickelt, um notwendige Sicherheitsabläufe hinsichtlich des Umgangs mit den kontaminierten Objekten zu bestimmen. Blei und Bleiverbindungen haben GHS-Gefahrstoffkennzeichnungen erhalten, aus denen die Erstellung einer tätigkeitsbezogenen Gefährdungsbeurteilung folgt. Für die Projektbearbeiter gelten auch für diese Stoffklasse die betriebliche Gefährdungsbeurteilung und bestehende Betriebsanweisungen von Fraunhofer IPA.


Durchführung	Ergebnis
Gefahrstoff ermittelt	<p>Blei als Tastengewicht bekannt, Korrosionsprodukte auf Oberflächen sichtbar</p> <p>graue Korrosionsprodukte deuten farblich auf Bleicarbonat oder Bleihydroxidkarbonat hin</p> <p>analytischer Nachweis von Pb mittels mRFA positiv,</p> <p>Blei, Blei (II)-carbonat:</p> <p>GHS (EG/1272/2008) = H360 + H350+ H332 + H302 + H372 + H410;</p> 
Gefährdung ermittelt	<p>Das Objekt soll entpackt, dokumentiert, analysiert und gereinigt werden. Diese Aufgaben erfordern das Handhaben und Bewegen des Objektes. Eine Gefährdung ergibt sich: bei Objektkontakt, durch mögliche Staubbefreiung, durch CO₂-Gas Freisetzung, durch Prozessgas CO₂-flüssig (T < -50°C). Die Arbeiten erfolgen im Anwendungsbereich TRGS 526.</p>
Schutzmaßnahmen festgelegt	<p>Die Betriebsanweisung „Gefahrstoffe“ Stiftung Händel-Haus regelt u.a.:</p> <p>Kein Hautkontakt mit dem Objekt, Staub nicht einatmen; Dokumentieren und Analysieren mit PSA: Schutzkleidung, Schutzhandschuh und Atemschutz Partikelfilter FFP3 S/L, im Abluftstrom arbeiten;</p> <p>Betriebsanweisung „CO₂-Reinigungslabor“ IPA regelt u.a.:</p> <p>CO₂-Reinigung nur gekapselt in geschlossener Anlage mit Abluftfilterung und Freiluftabführung, Raumkontrolle der CO₂-Konzentration.</p> <p>Keine Flüssig- und Nahrungsaufnahme im Arbeitsbereich.</p>
Arbeitsmedizinische Vorsorge	<p>Nach AMR 11.1 gilt ein Abschneidekriterium mit 3.2 (1) 4. = geringe Gefährdung im Sinne GefStoffV § 6 (13) unter Beibehaltung der Wunschvorsorge nach AMR 11.1 Punkt 3.2 (3), i. V. m. TRGS 526 und § 5a ArbMedVV.</p>

Tabelle 22: Rahmendaten Gefährdungsbeurteilung

Der Ablaufplan für die Reinigung der Tastenhebel ist in Tabelle 23 zusammengestellt:

Nr.	Beschreibung	Anweisung
1	Auspacken der Tastenhebel in der Strahlkammer (Folienverpackung), Tür geschlossen	Abluft maximal, Volumenstrom 1000 m ³ /h, PSA = Handschutz + Staubschutzkleidung
2	Dokumentation des Ausgangszustands (fotografisch), Tür offen	PSA=Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
3	Festlegung der Messpositionen, Tür offen	PSA=Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
4	1. mRFA-Messung an den Messpositionen auf der Oberfläche (Ausgangszustand), Tür offen	PSA=Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
5	1. Swab-Probenahme (Ausgangszustand) und FTIR und mRFA-Messung an den Swabs. Tür offen	PSA=Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
6	1. CO ₂ -Reinigung der kontaminierten Oberflächenbereiche, Tür geschlossen	Strahlkammer geschlossen, Abluft entsprechen Strahlprozessparameter
7	2. mRFA-Messung an den Messpositionen auf der Oberfläche. (Zustand nach der ersten Reinigung). Tür offen	Abluft maximal PSA Atemschutz + Handschutz + Staubschutzkleidung
8	2. Swab-Probenahme und FTIR und mRFA-Messung an den Swabs (Zustand nach der ersten Reinigung). Tür offen	PSA Handschutz + Staubschutzkleidung
9	Dokumentation des Endzustands (fotografisch). Tür offen	PSA Handschutz + Staubschutzkleidung

Tabelle 23: Ablaufplan Testreinigung Tastenhebel

4.8.3 mRFA-Messung Oberflächenkontamination

Untersucht wurden die Ablagerungen auf den Tastenhebel Nr. 74, 75, 76. Eingesetzt wurde der m-RF-Spektrumsanalysator, Niton XL3t Hybrid+, Firma Analyticon instruments gmbh mit nachfolgenden Einstellungen:

Modus	Duration	Units	Flags	MESSAUFBAU	FILTER
Mining	120 sec.	ppm		STATIV	m30lo30hi30li30

Die mRFA-Messpunkte wurden im Spurbereich des Abriebs festgelegt.



Abbildung 47: RFA-Messpunkte Tastenhebel

Die Messergebnisse vor und nach der CO₂-Schneestrahlsreinigung zeigen die Tabelle 24. Auf dem Tastenhebel Nr. 76 wurde eine Probenahme mit Swab-System vorgenommen, deren Ergebnisse in dieser Tabelle mit aufgeführt sind.

Messpunkt	mRFA-Messergebnis					
	Probe	vor der Reinigung Pb in ppm	während der Reinigung	nach der Reinigung	Differenz	Abweichung Pb in %
Tastenhebel Nr. 74	Oberfläche	1020,98		278,46	-742,52	-72,73
	1. Swab 2. Swab					
Tastenhebel Nr. 75	Oberfläche	1317,28		141,64	-1175,64	-89,25
	1. Swab 2. Swab 3. Swab					
Tastenhebel Nr. 76	Oberfläche nach Swab	337,02	383,14	180,38	-156,64	-46,00
	1. Swab	104,28				
	2. Swab			6,17	-98,11	-94,00

Tabelle 24: mRFA-Messung Tastenhebel

Der Prozessparameter Beschleunigungsdruck wurde bei der Reinigung von Tastenhebel Nr. 74 von 8,5 bar auf 7 bar reduziert, da die oberflächennahen Frühholzzellen teilweise zerstört wurden.

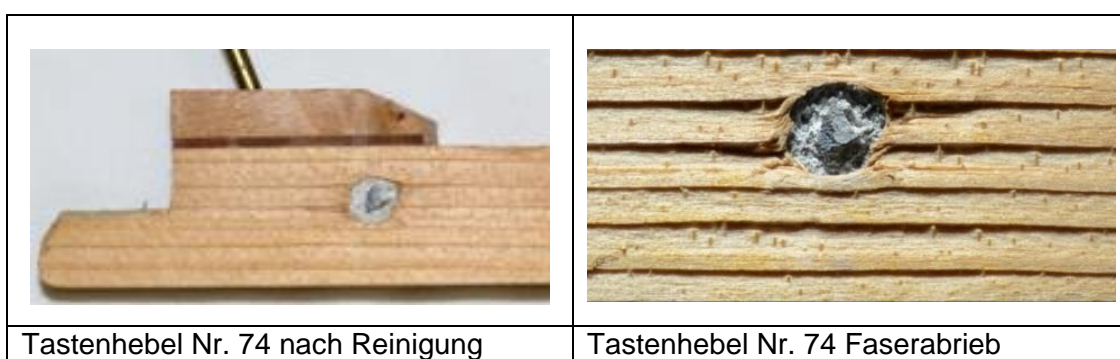


Abbildung 48: Tastenhebel nach Reinigung

Die Reinigungsdauer wurde bei allen Tastenhebeln nach Sichtkontrolle bestimmt. Die RFA-Swab-Nachkontrolle von Nr. 76 zeigt die intensive Reinigungswirkung der CO₂-Schneestrahls-technologie.

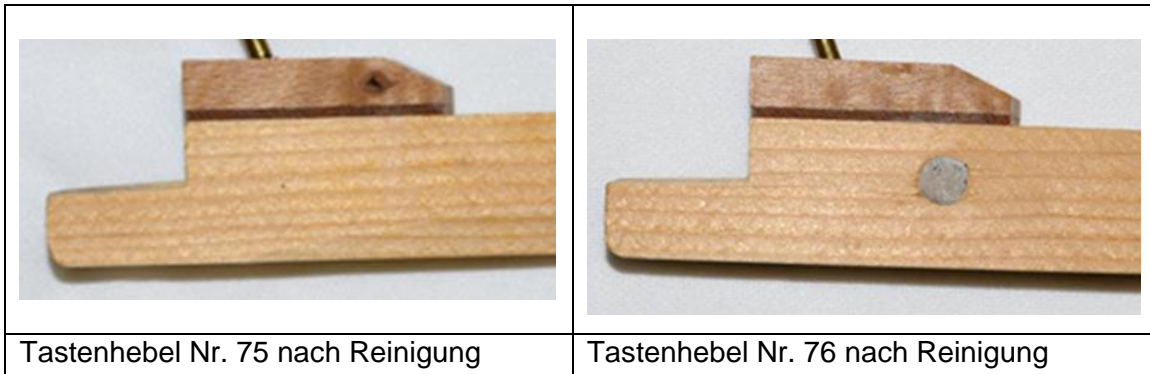


Abbildung 49: Tastenhebel nach Reinigung ([Video Tastenhebel](#))

Die gemessene Restbelastung kann durch tieferliegende Korrosionsanteile und andere Vorbehandlungen hervorgerufen werden oder eine Materialgrundbelastung darstellen.

5. Bewertung Gesamtergebnis

5.1 Reinigungstest - Dekontamination

Mit den erprobten Prozessparametern ist eine schonende und zugleich effektive Reinigung von sensiblen historischen Materialoberflächen möglich. Der Glanz und die Patina von Holzoberflächen, Polituren, Farbfassungen, Buntpapieren sowie Bleistift- und Tuscheschriften können bei der Anwendung dieser Reinigungstechnologie erhalten werden.

Die Technologie eignet sich ebenfalls zur Dekontamination kristalliner Insektizide und pulverförmiger Schwermetalle. Auf den ausgewählten Objekten konnte mit Prozessparametern weit unterhalb der ermittelten Schädigungsschwelle dekontaminierte Oberflächen hergestellt werden. Das technologiebedingte Emittieren von Gas und Stäuben erfordert die Anwendung der gesetzlichen Arbeitsschutzvorschriften.

Grund und Umfang der Reinigung sind auf den Objekten zu deklarieren, wenn eine potentielle Gefährdung nachträglich weiterhin auftreten kann.

5.2 Probenahme Schnellanalyse

Die Swab-Probenahme ist eine mobile, leicht handhabbare, vielseitig einsetzbare und schnelle Methode, mit der partikelförmige Oberflächenkontaminationen Vorort beprobt und extern laboranalytisch bestimmt werden können. Das Swab-System kann je nach Probenart mit verschiedenen Analysesystemen ausgewertet werden. Mit Erfolg wurde die mRFA-, FTIR-, GCMS- und IC-Analyse an Swab-Proben erprobt.

5.3 Übertragbarkeit

Die ermittelten Anwendungsdaten lassen weitere Einsatzgebiete an musealen Objekten als möglich erscheinen, deren Bauteile hinreichend feste Oberflächen besitzen, z. B.: Kunststeinplastik und irdene Gefäße, Wachswalzen, Grammophonplatten, Instrumentenetuis, Bucheinbände und Lederobjekte, fixierte Tapeten, Bilderrahmen.

Anwendungsbeschränkungen auf sensiblen Oberflächen ergeben sich ursächlich aus der Strahlbelastung durch Druck und Temperatur.

6. Projekt-Dokumente

Die Projektplattform ist am Fraunhofer IPA installiert und dient den Kooperationspartnern zum Datenaustausch und zur Datensicherung digital erstellter Dokumente. Einzelne Projekt-Dateien werden zum Download bereitgestellt, es gelten die Nutzungsvereinbarungen nach Creative Common License: CC-BY-NC-ND 4.0. Link-Adressänderungen können auf Grund von technischen Entwicklungen nicht ausgeschlossen werden. Mit der Nutzung der unter 6.2.1 und 6.2.2 aufgeführten Datei-Links gelten die rechtlichen Regelungen zur Nutzung von Onlineangeboten und zum Datenschutz der Stiftung Händel-Haus in der jeweils aktuellen Version. Diese Regelungen sind zum Berichtszeitpunkt 12.11.2018 abrufbar unter:

<https://www.haendelhaus.de/de/impressum>

<https://www.haendelhaus.de/de/datenschutzerklaerung>

6.1 Projektplattform

AP 3.5	Messbericht IPA RFA-Swab-Wischproben GNM
AP 3.5	Messbericht GNM RFA-Swab-Wischproben GNM
AP 3.8	Messbericht IPA GC-IC-Messung Swab-Proben
AP 3.8	Messbericht IPA FTIR-UATR Analyse Swab-Proben
AP 4.5	Messbericht Dichtigkeitsprüfung CO ₂ -Strahlkammer
AP 4.5	Messbericht Strömungsgeschwindigkeit CO ₂ -Strahlkammer
AP 4.5	Messbericht Abklingkurve CO ₂ -Strahlkammer
AP 5.2	Arbeitsbericht CO ₂ -Schneestrahlsreinigung Schrankkranz GNM
AP 5.2	Arbeitsbericht Oberflächenabkühlung bei Reinigung
AP 5.3	Arbeitsbericht Bestimmung Beschädigungsschwelle
AP 5.2	Mess- und Arbeitsbericht CO ₂ -Schneestrahlsreinigung Lacktafel
AP 5.2	Mess- und Arbeitsbericht CO ₂ -Schneestrahlsreinigung Rauigkeitstest
AP 5.2	Mess- und Arbeitsbericht CO ₂ -Schneestrahlsreinigung Glanztest
AP 5.3	Mess- und Arbeitsbericht CO ₂ -Schneestrahlsreinigung Lyra
AP 5.3	Mess- und Arbeitsbericht CO ₂ -Schneestrahlsreinigung Flötenuhr
AP 5.3	Mess- und Arbeitsbericht CO ₂ -Schneestrahlsreinigung Tastenhebel

6.2 Datei Download-Link

6.2.1 Link Video-Datei:

(Webbrowser vorab starten)

[Temperaturabkühlung Schellackplatte](#)
[Ermittlung Beschädigungsschwelle Fichte](#)
[Reinigung Tastenhebel Schwermetall](#)
[MS-015 Reinigung Lyra](#)
[MS-015 Reinigung Lyrapedal](#)
[MS-450 Reinigung Stiftwalze](#)
[MS-450 Reinigung Clavisbalken](#)

6.2.2 Link RTI-Datei:

(Webbrowser vorab starten)

[RTI P 1.4 Fichte](#)
[RTI P 2.4 Linde](#)
[RTI P 3.1 Eiche](#)
[RTI P 4.1 Buchsbaum](#)
[RTI P 10.1 Schellackoberfläche](#)
[RTI P 11.1 Glutinleim](#)
[RTI P 12 Wachsoberfläche](#)
[RTI P 21 Leinenstoff](#)
[RTI P 32 Marmorpapier](#)
[RTI P 41.1 Schafsleder](#)
[RTI P 42.1 Rehleder](#)
[RTI P 52.1 Orgelpfeifenmetall](#)
[RTI P 62.1 Rinderknochen](#)

7. Forschungsbedarf

Die erreichten Anwendungsergebnisse zeigen einen weiteren Forschungsbedarf in mehreren Bereichen auf, mit dem die Anwendungsvielfalt erweitert und die Prozesssensitivität erhöht werden könnte.

Forschungsbereich	Forschungsthemen
Technologie	<ul style="list-style-type: none">- Düsenmodellpalette: Minilanze, Pinsel, Micro-Lanze- Arbeitsbereichserweiterung für Beschleunigungsgas < 4 bar- aktive Ergebniskontrolle handgeführter Strahldüsen (Mikroskop-Kamera-Licht-Spektrum)
Anlagentechnik	<ul style="list-style-type: none">- Großraumkabine, z.B. für historische Klavierinstrumente- gekapselte Kompaktanlage für Restaurierungsatelier
Restaurierung	<ul style="list-style-type: none">- Anwendungserweiterung Materialspektrum- Langzeitverhalten behandelter Oberflächen
Naturwissenschaft	<ul style="list-style-type: none">- Analytik Reinigungskontrolle- Tiefenanalytik Gefahrstoffe- Analyse der DDT-Kristallbildung (zeitlich)

Tabelle 25: Forschungsbedarf

8. Aufstellung finanzielle Mittel

Die Fördersumme der Deutschen Bundesstiftung Umwelt betrug 123.062 Euro.

9. Literatur

- [1] Forschungsallianz Kulturerbe: Dem Zahn der Zeit zum Trotz, Spektrum der Wissenschaft 2012