



FORSCHUNGSPROJEKT „ResWiMet“

Entwicklung und modellhafte Anwendung eines modularen Konzeptes zur restauratorischen Abreinigung von Verwitterungsschichten an Metall-Holz-Verbänden historischer mechanischer Baugruppen am Beispiel stark geschädigter Turmuhrwerke

SCHLUSSBERICHT

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Förderkennzeichen 37875/01-45 ResWiMet

SCHLUSSBERICHT

Berichtszeitraum vom 01.01.2022 – 30.09.2023

Dr. Michael Mäder

Staatliche Kunstsammlungen Dresden (SKD), Dresden

Kooperationspartner:

Dipl.-Phys. Frank-Holm Rögner

Dipl.-Ing. (FH) Ludwig Decker

Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP, Dresden

1	Vorwort	5
2	Zielsetzung	7
3	Methodisches Vorgehen	9
4	Ergebnisse	11
5	Diskussion	444
6	Zusammenfassung	46

1 Vorwort

Turmuhren und ihre technische Entwicklung sind nicht nur ein Abbild der Geschichte der Uhrentechnologie sondern auch ein wichtiges Element für die Beschreibung des gesellschaftlichen Lebens in den Dörfern und Städten. Turmuhren sind damit ein wichtiger und erhaltenswerter Bestandteil unseres kulturellen Erbes. Turmuhrwerke wurden lange Zeit in traditioneller Handarbeit aus Eisen gefertigt. Im konstruktiver Aufbau wurden diese Eisenteile oft mit Holzbauteilen kombiniert. Durch die Aufstellung in den Türmen waren die Uhrwerke Jahrhunderte lang vor den Einflüssen der Atmosphäre nicht vollständig geschützt. Korrosion und Verwitterung führten dann oft zum Verlust der Beweglichkeit und damit der Funktion der Konstruktion, können aber auch die Stabilität des gesamten Objektes und damit seinen Erhalt gefährden.

Um diese unerwünschten Oberflächenreaktionen weitestgehend zu unterbinden und deren Erscheinungsbilder zu reduzieren, ist es unbedingt notwendig, geeignete Verfahren zur Abnahme oder Reduzierung dieser veränderten Oberflächenschichten zu entwickeln, die eine konservatorisch wirksame und restaurierungsethisch konforme Methodik bieten. Grundsätzliche Anforderungen in der Restaurierung ist der „substanzschonende Erhalt eines Objektes“. Der Restaurator darf insofern nur Techniken und Maßnahmen zur Anwendung bringen, welche nach aktuellem Kenntnisstand sowohl den materiellen als auch den ideellen Bestand des Kunst- und Kulturgutes nicht gefährden und künftige Maßnahmen nicht behindern. In der Restaurierung können Schichten der korrodierten Oberfläche als „Patina“ zur Originalsubstanz gezählt werden, da eine Oberfläche die Objektgeschichte dokumentiert wie wenige andere Aspekte des Erhaltungszustands. Nichtsdestotrotz ist die Reinigung eines Objekts unumgänglich für eine gepflegte Erscheinung als auch für den Korrosionsschutz, d.h. für den Substanzerhalt.

Die massiven Verkrustungen und Materialschwächungen der Metallbauteile in Verbindung mit den zum Teil fragil gewordenen Basiskonstruktionen aus Holz gestalten eine Restaurierung sehr schwierig und aufwändig. Viele schwer zugängliche Verbindungs- und Lagerstellen sowie Holz-Metall-Fügestellen lassen die Anwendung herkömmlicher Korrosionsreduktionsverfahren und Reinigungsmethoden nicht zu.

Ziel des Projektes ist es deshalb, ausgehend von Wirkprinzipien industrieller Reinigungstechnologien ein innovatives, modulares und handgeführtes Werkzeug für die Restaurierung zu entwickeln, das harte Verkrustungen und Korrosionsprodukte materialschonend entfernen kann und dem Restaurator gleichzeitig die permanente Kontrolle der zu reinigenden Stelle ermöglicht.

Aus den aktuell bekannten Anforderungen bietet sich dafür das Saugstrahlverfahren an. Im Projekt wurden umfangreiche Grundlagenuntersuchungen durchgeführt zu den Einsatzmöglichkeiten der verschiedensten Stahlmittel, dem Einfluss experimenteller Parameter der Strahlführung sowie den Auswirkungen einer dreidimensionalen Oberflächengeometrie mit „Ecken und Kanten“. Ziel dieser Evaluierungen war, Möglichkeiten und Grenzen der Reinigungsmethode für das Erreichen der gewünschten Reinigungsergebnisse zu bestimmen. Weiterhin wurden auch erste Va-

arianten zum Einsatz von optischen Detektionsmöglichkeiten zur in-situ Überwachung des Reinigungsfortschritts getestet. Aus den praktischen Erfahrungen und den Projektergebnissen wurde ein Anforderungskatalog konstruktiver Veränderungen und Verbesserungen abgeleitet, um die Grundlage für eine spätere Entwicklung eines praxistauglichen Restaurierungswerkzeugs zu erarbeiten.

2 Zielsetzung

Das Projektvorhaben beinhaltet die Evaluierung des Vakuumsaugstrahlverfahrens als ein alternatives Reinigungsverfahren für die Restaurierung, um beispielhaft an Metall-Holz-Verbänden historischer Objekte Verwitterungsschichten schonend abzureinigen. Das Gesamtvorhaben wurde in fünf Arbeitspakete (AP) unterteilt, deren Zielsetzung nachfolgend nochmals genannt werden.

AP 1 – Konzeptionsphase:

Hauptziel: Anforderungskatalog für das geplante Reinigungsverfahren mit abrechenbaren Entwicklungsaufgaben

Nebenziele:

- Erstellung eines (restauratorischen) Anforderungskataloges für einen Reinigungsprozess, mittels eines Workshops
 - Berücksichtigung von Minimalanforderungen und gewichtete Klassifizierung an Zusatzanforderungen sowie Ausschlusskriterien
- Starke Fokussierung auf Metall-Holz Materialkombinationen
- Beurteilung von Verfahrensparametern:
 - Sichere Handhabung fragiler Objekte
 - Gute Beobachtung und Beurteilung des Bearbeitungszustandes im Prozess
 - Steuerung der Abtragsgeschwindigkeit für die betreffenden Verwitterungsschichten
 - Wahlmöglichkeit der Abrasivität durch verschiedene Strahlmittel
 - Größe und zielgenaue Justierung der Bearbeitungszone
 - Handhabung und Arbeitsschutz für Restauratoren

AP 2 – Aufbau der Experimentieranordnung:

Hauptziel: Anwendungsbereite Experimentieranordnung, welche den in AP 1 erarbeiteten Anforderungen entspricht und als Basis für die weitere Technologieentwicklung dienen kann.

Nebenziele:

- Konstruierte Bearbeitungskammer, ausgestattet mit kommerziellen Vakuum-Saugstrahlkomponenten
- Nachweis der Funktionsfähigkeit
- Parameterübersicht zu Bearbeitungseigenschaften mit verschiedenen Strahlmitteln
- Übersicht zu Bearbeitungseigenschaften verschiedener Düsengeometrien
- Nachweis der erfolgreichen Rezirkulierung des Strahlmittels auch unter den Bedingungen der Behandlungskammer.

AP 3 – Reinigungsuntersuchungen:

Hauptziel: Realitätsnahe Dummy-Proben können mit der Experimentieranordnung aus AP 2 erfolgreich von Verwitterungsschichten entsprechend der Anforderungen aus AP 1 befreit werden.

Nebenziele:

- Auswahl geeigneter Düsengeometrien
- Erstellung einer strahlmittelabhängigen Parametermatrix als Katalog gereinigter Referenzflächen
- Prüfung des Einflusses von Strahlparametern (Vakuurstufe, Abstand zur Bearbeitungsfläche, Einstrahlwinkel)
- Voruntersuchungen zum Einfluss der Topographie der Bearbeitungsfläche (Ecke, Kante, Metall-Holz-Übergang)
- Zusammenfassung der Möglichkeiten und Grenzen der Reinigung

AP 4 – Untersuchung zu optischen Überwachungsmöglichkeiten:

Hauptziel: Die Machbarkeit ist zu zeigen, dass Objekte während der Bearbeitung sowohl als Ganzes als auch lokal an der Bearbeitungsstelle optisch überwacht und unterstützend für den Bearbeiter dargestellt werden können.

Nebenziele:

- Testaufbau zur Demonstration von Grenzen und Möglichkeiten der optischen Live-Überwachung
- Konzept für digitales Unterstützungssystem mit Auflistung des Entwicklungsbedarfs

AP 5 – Demonstration der Vakuum-Saugstrahlreinigung an einem ausgewählten Objekt der SKD

Hauptziel: Demonstration des Reinigungsverfahrens an einem realen Objekt

Nebenziele:

- Auswahl der geeigneten Strahlparameter und des Strahlmittels aus der im AP3 erstellten Matrix passend zum Oberflächenzustand des Objektes
- Test der Handhabbarkeit eines realen dreidimensionalen Objektes während der Bearbeitung
- Zusammenfassung der praktischen Erfahrungen und der daraus abgeleiteten konstruktiven Verbesserungsmöglichkeiten der Apparatur

Das methodische Vorgehen ist an den Arbeitspaketen (1-5) ausgerichtet.

Die wesentliche Grundlage der Forschung bildet der intensive Dialog der Technologieentwickler mit den Restauratoren und deren Anforderungen an die Gerätetechnik sowie Handhabung. Erst wenn die Vorstellungen und Anforderungen klar sind, kann mit dem weiteren Versuchsaufbau vorangeschritten werden. Die Abklärung von theoretischen Grundlagen sind hierbei essentiell für den weiteren Werdegang. Hierfür sind, neben dem Dialog, ein Workshop sowie weitere Input-Gespräche mit den Restauratoren vorgesehen. Daraus resultierend soll sich ein Anforderungskatalog, an die Arbeit, Gerätetechnik und Geräteführung, für die weitere praktische Arbeit entwickeln.

Nach den Grundlagengesprächen folgt der praktische Aufbau der Experimentieranordnung, bestehend aus kommerziellen Komponenten und angepasst konstruierten Bauteilen. Zunächst muss geklärt werden, wie die kommerziellen Vakuum-Saugstrahl-Komponenten aufgebaut sind und welche wichtigen Parameter die Funktionsweise beeinflussen. Darin schließt sich eine erste Bewertung der Komponenten ein. Hierbei lautet die Fragestellung: *Sind die Komponenten in ihrer rudimentären, industriell geprägten Ausführung bereits für die Restaurierung (und deren Anforderungen) geeignet oder ergeben sich bereits im Vorfeld Schwierigkeiten, hinsichtlich der grundsätzlichen Machbarkeit der Versuchsstudien?*

Nach dem Kennenlernen und Verstehen des Aufbaus, wird das Experimentierumfeld eingerichtet. Hierbei spielt die Bearbeitungskammer eine wesentliche Rolle. Diese muss so eingerichtet/ konstruiert werden, dass eine Bearbeitung und sichere Handhabung von historischen Objekten gewährleistet werden kann, hierbei sind die restauratorischen Anforderungen zu berücksichtigen. Neben der Kammereinrichtung und Geräteführung sind sämtliche Arbeitsparameter, welche direkten oder indirekten Einfluss auf die Bearbeitung haben, kennenzulernen und hinsichtlich ihrer Einwirkung einzuordnen. Nach der Parameterübersicht soll mittels ersten Strahlversuchen eine grobe Einordnung und Einschätzung der Bearbeitung erfolgen.

Wesentliche einstellbare Parameter:

- Saugstufe (1 bis 3), entscheidend für den erzeugten Unterdruck
- Abstand der Strahlanze zu der zu bearbeitenden Oberfläche
- Einstrahlwinkel, Winkel zwischen der Strahlanze und der Oberflächennormale der Bearbeitungsfläche
- Applikationszeit / Wiederholungen
- Strahlmittel: *Mikrocellulose, Weizenstärke, Soda, Nussschale, Kunststoff, Asilit, Strahlglas, Edelkorund*

Für die grundsätzlich beginnenden Versuche dienen hierfür drei verschiedene Probestkörper, mit unterschiedlicher Textur, Geometrie und Verwitterungszustand. Anhand dieser sind verschiedene (Vakuum-)Saugstufen, Strahldüsen und Strahlmittel kennenzulernen.

Ist nach einer ersten Versuchsreihe die genaue Experimentiertechnik verstanden und bekannt, erfolgt eine zweite Versuchsreihe mit Probeblechen anhand einer genau aufgestellten Parametermatrix.

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe sind Bestandteil einer weiteren Bewertung durch die Restauratoren der SKD, um neue oder veränderte oder erweiterte Ziele für die zweite Versuchsreihe zu definieren.

Ziel der zweiten Versuchsreihe ist die Erstellung einer Bearbeitungsmatrix, die den erreichten Oberflächenzustand der Probebleche nach der Reinigung visualisiert in Abhängigkeit vom Strahlmittel und den Strahlparametern (bei nahezu senkrechtem Strahleinfall und einem konstanten Arbeitsabstand von 3cm). Diese Matrix soll später als Arbeitsmittel für die Wahl der geeigneten/notwendigen Bearbeitungsparameter dienen. Durch Auswahl des gewünschten Reinigungszustandes der Oberfläche aus den Bildreihen definieren sich geeignete Strahlmittel und die Strahlparameter.

Eine dreidimensionale Topographie der Bearbeitungsfläche wird durch Dummy-Proben simuliert. Dabei werden zwei Probeflächen senkrecht zueinander angeordnet. Variiert werden in den Experimenten der Abstand des Mittelpunktes der Strahlfläche zur Kehle und der Einstrahlwinkel. Die Fragestellung dabei lautet, ob und wie eine gleichmäßige Bearbeitung von angrenzenden horizontalen und vertikalen Flächen möglich ist.

Für die Untersuchung der Bearbeitung/Reinigung von korrodierten Metalloberflächen in unmittelbarer Nachbarschaft von Holzoberflächen wurde exemplarisch eine Probeanordnung „Metall-in-Holz“ gewählt. Dafür wurden in Holzbretter zwei verschiedener Holzarten Nuten gefräst, in die Metallstäbe mit quadratischem Querschnitt eingelegt werden.

Alle bearbeiteten Oberflächen wurden nach dem Reinigungsschritt visuell beurteilt und fotografisch dokumentiert. Ein Teil der Ergebnisse wurden auch zusätzlich mit dem Mikroskop charakterisiert.

4 Ergebnisse

4.1 Restauratorische Anforderungen (Konzeptionsphase AP1)

Innerhalb der Gesprächsrunden und des Workshops mit den Restauratoren verschiedener Sammlungen der SKD (Mathematisch-Physikalischer Salon (MPS), Rüstkammer (RK), Staatlich Ethnographische Sammlungen (SES), Grünes Gewölbe (GG), Skulpturensammlung (SKS)) konnten nachfolgende Anforderungen und Entwicklungsaufgaben definiert werden.

Anforderungen:

- Substanzschonender Objekterhalt, möglichst nur Entfernung von Fremdschubstanz
- Auswahlmöglichkeit von sensitiven bis abrasiven Bearbeitungen
- Einteilung von unterschiedlichen Einflussparametern innerhalb einer geeigneten Parametermatrix für einen jeweilig wünschenswerten Bearbeitungszustand
- Bearbeitung größerer Bereiche oder nur an ausgewählten und begrenzten Stellen der Oberfläche
- Eventuell ist ein Maskierungsmaterial erforderlich für geschützte Oberflächenbereiche
- Ständige Kontrolle der Bearbeitungskammer und der bestrahlten Fläche zur Beurteilung des Reinigungsfortschrittes und exakten Steuerung der Bearbeitung

Entwicklungsaufgaben:

- Schnelles Ab- und Zuschalten der Gerätetechnik gewünscht, für eine gezielte Bearbeitung
- Anbringung einer Micro-Optik, eines Mikroskops für eine genauere Beobachtung der Arbeitsfläche
- Anbringung eines Zielpunkt-Lasers für die genaue Lokalisierung der Arbeitsfläche
- Anbringung eines Textils, Gewebes an der Arbeitskammer-Abdichtung, damit sich kein Strahlmittel verfängt und möglicherweise andere Strahlmittel beeinflusst
- Anbringung von mehreren Lichtquellen

Die Anforderungen und Entwicklungsaufgaben können sich im Projektzeitraum ändern, da mit neuen Versuchsobjekten neue Anforderungen entstehen können. Selbst jedes neue Material, welches erprobt wird, benötigt die Definition spezieller Reinigungsziele, Anforderungen und Bearbeitungsmöglichkeiten.

In einem späteren Praxiseinsatz in der Restaurierung können die Projektergebnisse nur eine Orientierung darstellen, die Möglichkeiten und Grenzen aufzeigt. Bei der Anwendung des Verfahrens an einem konkreten Objekt ist immer der Restaurator,

die Restauratorin gefragt, die vorliegenden Materialien und deren Erhaltungszustand einzuschätzen und den gewünschten Zustand nach der Reinigung zu definieren. Die Reinigungswirkung der gewählten Parameter ist während der Bearbeitung jederzeit kritisch und sorgfältig einzuschätzen, um eine Schädigung des Objektes zu verhindern. Es wird kein „allgemeingültiges Rezept“ geben!

4.2 Aufbau der Experimentieranordnung (AP2)

Als weiterer Schritt wurde der Versuchsaufbau durchgeführt und die Experimentieranordnung vorbereitet. Hierbei wurde die Saugstrahl-Basis (s. Abb. 1) mit dem Schlauchpaket und Behandlungskammer verknüpft. Innerhalb der oberen (blauen) Haube finden sich drei Kippschalter, welche unabhängig voneinander jeweils einen Motor ansteuern. Somit sind drei Saugstufen wählbar. Ein weiterer Schalter kann betätigt werden, um das Licht in der Bearbeitungskammer einzuschalten. Unterhalb der (blauen) Haube befindet sich ein Manometer, zur (Unter-)Druckbestimmung.



Abb. 1.: Das Basisgerät der Vakuumsaugstrahl-Apparatur (Foto: T. Lorenz)

Die Bearbeitungskammer (s. Abb. 2) ist mit vier Sichtfenstern bestückt, welche allesamt auswechselbar sind. Des Weiteren findet sich eine Leuchte in ihr. Der orangefarbene Dichtungsring dient zur Abdichtung gegen eine Bearbeitungsfläche für die Vakuum-Erzeugung. Dieser ist ebenfalls auswechselbar, sodass eine Reinigung des porösen Materials erfolgen kann. Die Montage geschieht mittels Klettstreifen. In der Kammermitte befindet sich eine Öffnung für das Einbringen der Strahlanze.



Abb. 2.: Blick in die Bearbeitungskammer von unten



Abb. 3.: Äußerer Aufbau der Bearbeitungskammer mit Sichtfenstern und montierter Strahl-
lanze und Vakuumanschluss

Im komplettierten Zustand werden das Schlauchpaket und die Strahl-
lanze mit der Bearbeitungskammer verbunden (s. Abb. 3). Die Strahl-
lanze kann hierbei beliebig gewechselt werden, da der Außendurchmesser immer konstant ist. Es unterscheidet sich lediglich der Innendurchmesser. Die Montage erfolgt mittels einfachem Einstecken der Lanze in das zuführende Saugrohr.

Als zusätzliche Erweiterung können sog. »Abprallplatten« aus Kunststoff in die Be-
arbeitungskammer eingesetzt werden. Diese sorgen dafür, dass aufprallendes
Strahlmittel gebremst wird, sodass keine ungünstige Beeinflussung des zu strahl-
enden Objekts durch Abpraller entsteht. Ein weiterer positiver Effekt besteht in
der Schonung des Strahlmittels, da es auf einem weichen Untergrund aufschlägt.

Die für die Reinigungsversuche benutzten Strahldüsen entsprechen kommerziell
erhältlichen bzw. erfahrungsbasierten Düsenformen der Firma Systemco GmbH. Da
die kommerziellen Komponenten eher für eine hohe Flächenleistung als für lokale
Präzisionsreinigung konzipiert sind, waren nur Düsendurchmesser von 8 – 20 mm
verfügbar. Diese Düsen sind als zylindrisches Rohr ausgeführt, wobei die kleineren
Durchmesser nur über einen entsprechenden Einsatz in der 20 mm Düse realisiert
wurden. Die dadurch auftretenden Sprünge im Querschnitt der Düse sind strömungstechnisch ungünstig. Für die bisherigen kommerziellen Anwendungen spielen diese Einschränkungen jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

Eine restauratorische Anwendung dieses Verfahrens erfordert neben der Reini-
gung größerer Flächen auch die Möglichkeit, kleine lokale Verunreinigungen prä-
zise abzureinigen zu können. Deshalb wurden im Projekt grundlegende Überlegun-
gen zu einer geeigneten Modifikation der Strahldüse angestellt. Fragestellungen
zur optimierten Anpassung von kommerziellen Komponenten waren unter ande-
rem:

- Wie klein kann der Düsenquerschnitt gestaltet werden?
- Welches Optimierungspotential bietet eine angepasste innere Düsenkontur, um effektiv mit kleinen Düsenquerschnitten arbeiten zu können (großer Volumenstrom bei niedrigem Druckverlust)?
- Welchen Einfluss hat die Düsenkontur auf die Strahlformung?

Um diese Eingangsfragen beantworten zu können, wurden Strömungssimulationen mit COMSOL Multiphysics® (Particle Tracing Module) sowie COMSOL-PC (CFD-Modul) durchgeführt. Den Ausgangszustand (Abb. 4) bildete eine typische, strömungsoptimierte Lavaldüsen-Geometrie, wie sie z.B. für Dampfstrahlpumpen genutzt wird mit einem Düsendurchmesser von 3 mm.

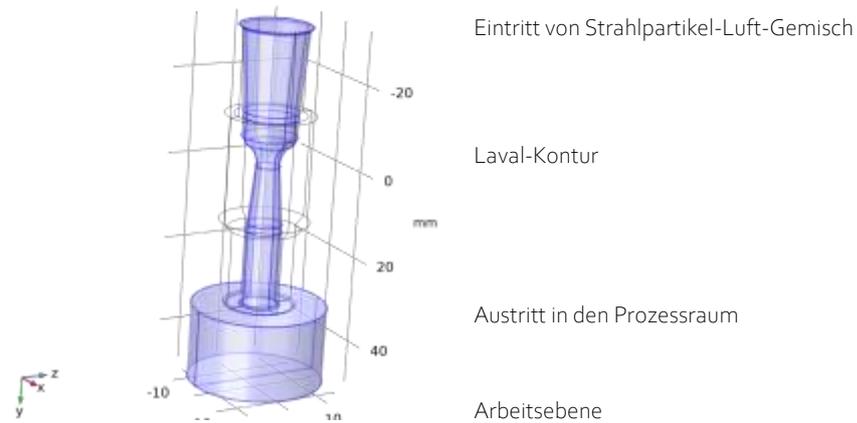


Abb. 4.: Innenkontur einer Lavaldüse aus Ausgangspunkt für Variationen mit COMSOL

Der gewählte Durchmesser resultiert aus der für die Simulation gewählten Größe für die Nylon-Strahlpartikel von 400 µm. Um eine Verblockung in der Düse zu vermeiden, sollte der kleinste Düsendurchmesser die dreifache Partikelgröße nicht unterschreiten. Um während der Simulation eine Variation des Düsendurchmessers zu erlauben, wurde der Startdurchmesser etwas größer gewählt. Ziel war in diesem Projekt nicht eine optimierte Düsengeometrie, sondern die Untersuchung der Einflussgrößen. Deshalb wurde auch nur ein Strahlpartikel-Typ ausgewählt.

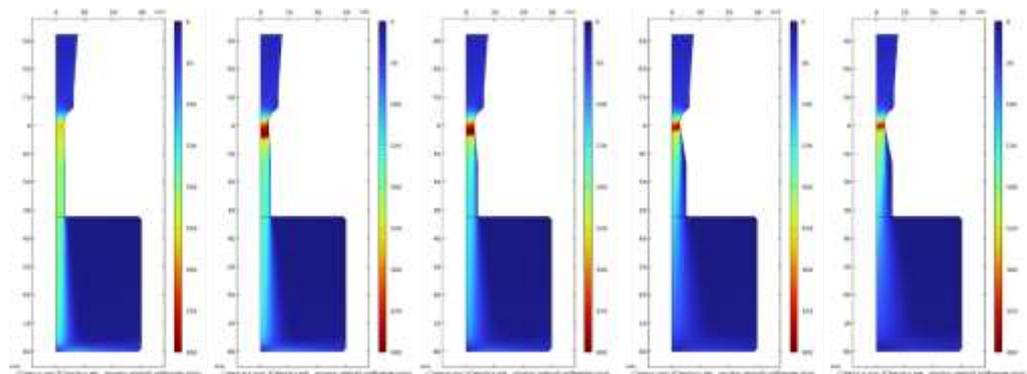


Abb. 5.: Beispiel für eine Simulations-Variation. Variiert wurde der Durchmesser des Düsenauslasses. Dargestellt ist die Strömungsgeschwindigkeit (hohe Geschwindigkeit rot, niedrig = blau) in der Düse, sowie die Strahlausbreitung im Prozessraum (unterer Teil)

Die durchgeführten Variationen des Austrittsdurchmessers der Laval-Geometrie zeigt (Abb. 5), dass mit Vergrößerung des Austrittsdurchmessers die Partikelgeschwindigkeit am Prozessort abnimmt. Auf der anderen Seite steigt durch eine angepasste Laval-Geometrie die Strömungsgeschwindigkeit in der Düse stark an und erreicht Überschall-Geschwindigkeit. Damit gelingt es, bei gleichem Druckverlust den Volumenstrom stark zu erhöhen. Damit ergibt sich für eine zukünftige Entwicklung einer Düse mit kleinem Durchmesser eine Optimierungsaufgabe, die zusätzlich noch den Einfluss von Partikelgröße, Mischungsverhältnis Luft/Partikel und Partikelmaterial (Dichte) berücksichtigen muss.

Ein erster Praxistest mit einer der o.g. Geometrievierungen als additiv gefertigte Kunststoffdüse konnte die Größenordnung der Simulationsergebnisse bestätigen.

Damit konnte gezeigt werden, dass mit kommerziellen Vakuum-Saugstrahl-Komponenten auch sehr kleine (optimierte) Düsenquerschnitte zum Einsatz kommen können.

4.3 Reinigungsuntersuchungen (AP3)

4.3.1 Voruntersuchungen an Dummy-Proben

Mit den Vorstellungen und Anforderungen der Restaurierung konnte bereits ein Konzept für die erste Versuchsreihe erstellt werden. Da der Großteil der Komponenten historischer Turmuhrwerke fast immer aus Schmiedeeisen / Stahl besteht, sind auch vergleichbare Probekörper vonnöten. Hierfür konnten drei Dummy-Proben-Serien für Testzwecke erhalten werden (Abb. 6).

Abb. 6.: Probekörper für die ersten Voruntersuchungen

Dabei handelt es sich (v.l.n.r.) um ein Kettenglied aus Schmiedeeisen um circa 1900, einen gezogenen Vierkant-Stahl und ein gezogenes Stahlrohr (feingeschliffen). Die jeweilige Oberflächentopografie, -textur und der korrodierte Zustand variieren zwischen den Probekörpern deutlich, verdeutlichen aber mitunter auch einen vergleichbaren Zustand zur korrodierten Oberfläche von Turmuhrwerken. Die erste Versuchsreihe soll unterschiedliche Saugstufen beurteilen und einen ersten Eindruck bzgl. der Eignung vorhandener, kommerziell verfügbarer Strahlmittel (s.o.) vermitteln. An die Arbeit schließt sich eine Fotodokumentation an, welche den Vorzustand, einzelne Bearbeitungszustände und Nachzustände aufnimmt. Des Weiteren dient die mikroskopische Vor- und Nachuntersuchung zur genaueren Oberflächenbeurteilung. Diese soll ebenfalls Bestandteil der Fotodokumentation werden. Durch das Wägen der Proben, im Vorfeld und nach einzelnen Bearbeitungsschritten, sowie auch am Ende soll ein erster Eindruck über den möglichen Substanzverlust gewonnen werden. Daraus lässt sich vorsichtig eine erste Aussage über die Abrasivität des jeweiligen Strahlmittels gewinnen.

4.3.2 Untersuchungen zur flächigen Bearbeitung an Probekörpern

In Analogie zu gealterten und verwitterten Metalloberflächen historischer Objekte – wie einem Turmuhrwerk – wurden Probekörper aus einem über Jahrzehnte natürlich gealterten und freibewitterten Stahlblech hergestellt. Die Probekörper haben eine quadratische Grundfläche mit einer Kantenlänge von 40 mm. Abb. 7 zeigt den typischen Ausgangszustand der korrodierten Oberfläche.

Zur Charakterisierung der Probekörper insbesondere der chemischen Zusammensetzung und Morphologie der Korrosionsschichten wurden zahlreiche naturwissenschaftliche Analysen am FEP durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung und Zusammenfassung findet sich in der Bachelorarbeit von Toni Lorenz¹.



Abb. 7.: Probekörper für die Versuchsreihe (Foto: T. Lorenz)

Um die Möglichkeiten des Vakuum-Saugstrahl-Verfahrens beurteilen zu können, wurde eine möglichst große Bandbreite unterschiedlichster Strahlmittel ausgewählt. Die Auswahl beschränkt sich auf kommerziell verfügbare Strahlmittel: Mikrocellulose, Weizenstärke, Soda, Nusschale, Kunststoff, Asilit, Strahlglas, Edelkorund: Abb. 8 fasst grundlegende Informationen zur Zusammensetzung und Korngröße zusammen und gibt eine erste Einteilung hinsichtlich der abtragenden Wirkung in sensitiv und abrasiv.

¹ Toni Lorenz, Möglichkeiten und Grenzen des Vakuum-Saugstrahlverfahrens zur Reinigung und Freilegung korrodierter Stahl-Oberflächen für die Restaurierung. Bachelorthesis, FH Potsdam, 20.12.2022

Um diese Versuchsreihe wissenschaftlich einzuordnen, wurde eine Parametermatrix aufgestellt. Diese nimmt alle verfügbaren Strahlmittel in die Betrachtung, jedoch mit jeweils unterschiedlichen Arbeitsparametern. Diese Matrix dient somit als Grundlage der weiteren Bearbeitung des Projektes. Mittels dieser ist es möglich, eine Art Katalog zu erstellen, um eine Einordnung (von sensitiv bis abrasiv) und Manipulationsmöglichkeiten zu ergründen. Als Beispiel hierfür dient die Abbildung 9, bei welcher das Strahlmittel »Weizenstärke« benannt ist. Für jedes Strahlmittel existiert eine solche Aufstellung. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass mit jedem Strahlmittel 10 Proben inklusive einer polierten Probe bearbeitet wurden.

sensitiv wirkend		abrasiv wirkend	
Mikrokristalline Cellulose:		Asilit - AS 180: (Aluminiumsilikat)	
Bestandteile:	Cellulose	Chemische Zusammensetzung:	Siliziumdioxid, Aluminiumoxid, Eisen-III-Oxid, Calciumoxid, Kaliumoxid
Körnung:	50 µm	Körnung:	0,04 - 0,18 mm
pH-Wert:	5 - 7	pH-Wert:	7,3
Weizenstärke:		Asilit - AS 250: (Aluminiumsilikat)	
Bestandteile:	Stärke	Chemische Zusammensetzung:	Siliziumdioxid, Aluminiumoxid, Eisen-III-Oxid, Calciumoxid, Kaliumoxid
Körnung:	60 - 200 µm [Jadok (2017, S. 55ff.)]	Körnung:	0,09 - 0,25 mm
pH-Wert:	4 - 7,5	pH-Wert:	7,3
Nusschale - NS 450:		Strahlgas - SG 150: (Glasbruch)	
Bestandteile:	geriebene Walnußschalen	Chemische Zusammensetzung:	Siliziumoxid, Natriumoxid, Calciumoxid, Magnesiumoxid, Aluminiumoxid, Eisenoxid
Körnung:	0,2 - 0,45 mm	Körnung:	0,1 - 0,2 mm
pH-Wert:	k.A.	pH-Wert:	k.A.
JET plast ® - DP 200: (Polymer)		Strahlgas - SG 300: (Glasbruch)	
Bestandteile:	Polykondensationsharze (Harnstoff-, Phenol-, Polyester oder Melaminharz)	Chemische Zusammensetzung:	Siliziumoxid, Natriumoxid, Calciumoxid, Magnesiumoxid, Aluminiumoxid, Eisenoxid
Körnung:	0,1 - 0,2 mm	Körnung:	0,2 - 0,3 mm
pH-Wert:	k.A.	pH-Wert:	k.A.
JET plast ® - DP 600: (Polymer)		Edelkorund - EK 75:	
Bestandteile:	Polykondensationsharze (Harnstoff-, Phenol-, Polyester oder Melaminharz)	Chemische Zusammensetzung:	Aluminiumoxid, Natriumoxid, Siliciumoxid, Eisenoxid
Körnung:	0,3 - 0,6 mm	Körnung:	0,045 - 0,075 mm
pH-Wert:	k.A.	pH-Wert:	k.A.
(Strahl-)Soda:			
Bestandteile:	Natriumhydrogencarbonat		
Körnung:	0,3 - 0,5 mm		
pH-Wert:	8,1 - 8,4		
akawipe weiß			
Bestandteile:	schwefel- und chlorfrei vernetztes Rizinusöl		
Körnung:	fein pulvrig		
pH-Wert:	7 (bis leicht alkalisch)		
akablast fein			
Bestandteile:	spezieller, gefüllter, vulkanisierter Latexschaum		
Körnung:	k.A.		
pH-Wert:	7		

Abb. 8: Alle Strahlmittel der Versuchsreihe, Sortierung in vermeintlich sensitiv oder abrasiv, mit Nennung von wichtigen Eigenschaften anhand der technischen Datenblätter (nach T. Lorenz)

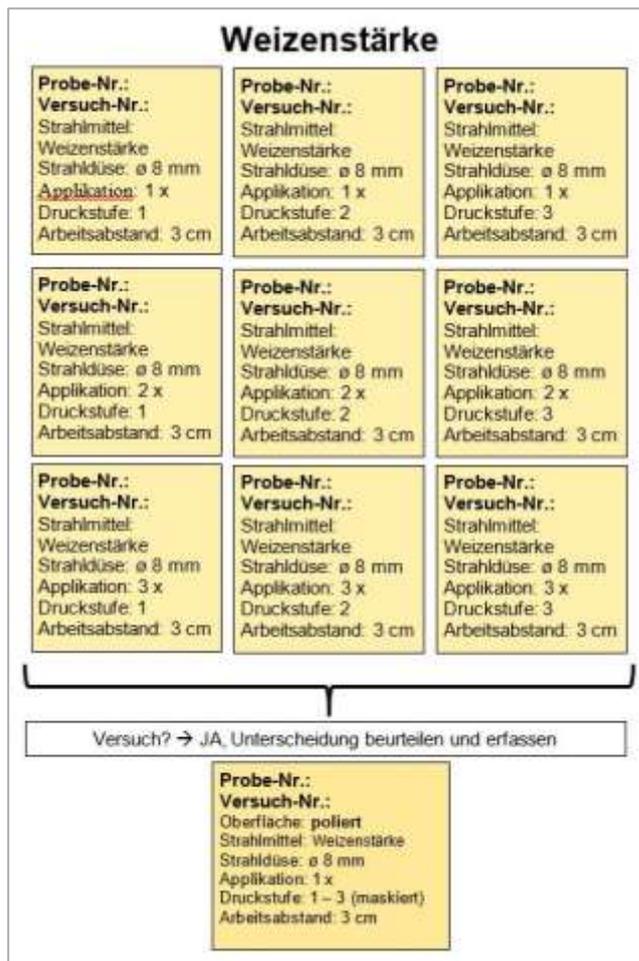


Abb. 9.: Versuchsmatrix, die die Änderung der einzelnen Versuchs-/Strahlparameter darstellt, am Beispiel des Strahlmittels Weizenstärke

Auf das erzielte Bearbeitungsergebnis wird neben den Variationen in einer natürlich gewachsenen Korrosionsschicht auch der „menschliche Faktor“ (in der individuellen Versuchsdurchführung) einen wesentlichen Einfluss haben. Um hier trotzdem vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurde für diese Versuchsreihe eine Prozessabfolge definiert.

Die Probebleche werden mittels eines Magneten auf einem metallenen Probeträger fixiert. Auf diesem befinden sich Linien in einem Abstand von 8mm, dem Durchmesser des „Strahlfleckes“ auf der Probe. Abb. 10 zeigt die mäanderförmige Führung des Strahls über die Probe, wobei die Linien der lokalen Orientierung des Bearbeiters dienen. Innerhalb eines Zeitintervalls von einer Minute (\pm einmalige Applikation) wurde die Probeoberfläche auf diese Weise „abgerastert“ Für mehrmalige Applikationen wurde dieser Vorgang dann wiederholt, wobei die Bearbeitungszeit mit einer Stoppuhr kontrolliert wurde. Mit diesem definierten Versuchsablauf wurde versucht, individuelle Unregelmäßigkeiten in der Strahlführung und der Verweildauer auf einer Teilfläche zu minimieren.

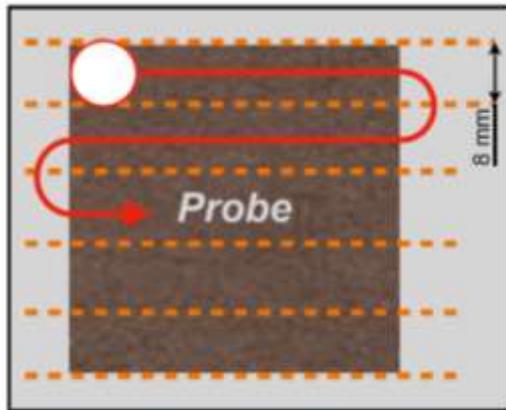


Abb. 10: Schematische Darstellung der Durchführung des Reinigungsversuches. Der Kreis (l.o.) markiert den Strahlfleck auf der Probe mit einem Durchmesser von ca. 8mm. Die Linien auf dem Probenträger dienen der Orientierung des Bearbeiters, um die mäandrierende Strahlführung gleichmäßig zu realisieren.

Zur Bestimmung des tatsächlichen Flächenabtrages wurden die Proben vor und nach der Bearbeitung präzise gewogen. Abb. 11 zeigt die auf diese Weise ermittelte Abtragsrate (Flächenabtrag in mg/cm^2) für jedes Strahlmittel.

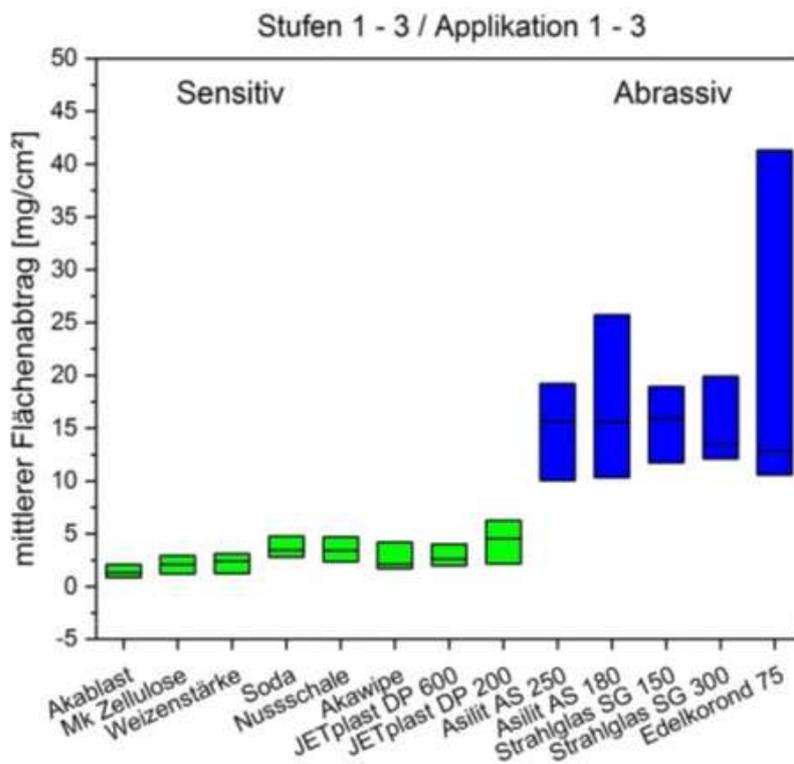


Abb. 11: Vergleich aller Strahlmittel hinsichtlich ihres mittleren Flächenabtrags (Zusammenfassung der Ergebnisse aus den einzelnen Parameterversuchen)

Die grafische Darstellung der Abtragsraten bestätigt noch einmal die Einteilung der Strahlmittel in zwei Gruppen. Mit der einen Gruppe, in Abb. 11 blau unterlegt, kann ein deutlicher Materialabtrag realisiert werden. Ihre Wirkung kann als deutlich abrasiv bezeichnet werden. Dagegen wird mit der anderen Gruppe (grüne Kästchen) auch ein Abtrag erreicht, dieser erfolgt aber wesentlich sensitiver.

Für den Bearbeiter ergibt sich damit die Möglichkeit, durch die Wahl des Strahlmittels die Abtragsrate maßgeblich zu bestimmen. Damit ist eine Anpassung der Reinigung auf den vorliegenden Ausgangszustand und das gewünschte Reinigungsziel möglich.

Für die Auswertung der gesamten Versuchsreihe werden nicht die 130 bearbeiteten Proben einzeln beschrieben. Vielmehr können die Ergebnisse in einer Rangliste (Abb. 14) zusammengefasst werden. Dabei werden die nach der Reinigung erreichten Zustände in Gruppen von 1 bis 6 klassifiziert.

Zustand-Nr. 0 gilt hierbei als Ausgangszustand. Abstufend verstehen sich die Nummern 1 - 6, je nach Grad der Reinigung bis hin zur Freilegung. Die sensitiven Strahlmittel besetzen die Zustände 1 - 3. Oftmals sind die Unterschiede zwischen den mit „sensitiven“ Strahlmitteln bearbeiteten Proben derart gering, dass sich höchstens nuancierende Bemerkungen formulieren lassen (vergl. auch Abb. 12).



Abb. 12: Probenoberflächen der Kategorie Nr. 4 nach Behandlung mit Nusschalen NS 450 und unterschiedlichen Parametern (Proben 31, 34 und 39 - v.l.n.r.) Mikroskopaufnahmen: T.Lorenz

Bei den abrasiven Strahlmitteln stellt sich hingegen, bereits mit Saugstufe (1) und erstmaliger Applikation der Effekt ein, dass nicht nur Korrosionsprodukte entfernt, sondern auch „*gesundes*“ Grundmaterial abgetragen wird. Dies zeigt sich in einer „*samtig*“ erscheinenden Oberfläche, hervorgerufen durch eine relativ gleichmäßige Aufrauung, welche das einfallende Licht streut. Die erreichten Zustände unterscheiden sich anhand eingestellter Arbeitsparameter in drei abstufenden Einteilungen (Zustand-Nr. 4 - 6), exemplarisch an AS 180 in Abb. 13 dargestellt.



Abb. 13: Unterschiedliche Bearbeitungsqualitäten mit Asilit AS 180: (v.l.n.r.) Zustand 4 (Probe 61), Zustand 5 (Probe 64), Zustand 6 (Probe 69) (Mikroskopaufnahmen: T.Lorenz)

Zustand-Nr.	Beschreibung	Beispielhafte Probe-Nummer:
0	<p>Natürlich korrodierter Ausgangszustand:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Staubauflagen, lose aufliegende oder festhaftende partielle Verunreinigungen - flächig korrodierte Oberfläche, lose aufliegende oder festhaftende teils abstehende Korrosionsprodukte - anzutreffende Poren- und Muldenkorrosion - Korrosionsprodukte nuancieren innerhalb gelblicher, rötlicher, bräunlicher bis schwärzlichen Farbigkeit - Korrosionsprodukte lassen sich als hart, verkrustet bis porös beschreiben - Korrosionsprodukte formieren sich teils in pustel- bis „blumenkohllartigen“ Ausblühungen 	„Nullprobe“ / Vorzustand der jeweiligen Probe
1	<ul style="list-style-type: none"> - lose Korrosionsprodukte: <ul style="list-style-type: none"> - werden abgeschlagen und partiell entfernt bis abgetragen - teils verbleiben diese auf der Oberfläche - Verunreinigungen: <ul style="list-style-type: none"> - lose Komponenten werden partiell entfernt - teils verbleiben diese auf der Oberfläche - aufliegender „Staub“/ Fremdschmutz/ Staubauflagen werden entfernt - fest haftende Korrosionsprodukte verbleiben - fest haftende Fremdschmutz verbleibt - hellere erscheinende Auflagerungen (Fremdschmutz, „Staub“, „Flugrost“) werden abgetragen - die Oberfläche erlangt eine leichte Verdunklung 	Pr. 121 - 129 (akablast fein)
2	<ul style="list-style-type: none"> - lose aufliegende Verunreinigungen und Staubauflagen sind überwiegend entfernt - lose aufliegende Korrosionsprodukte sind überwiegend entfernt - fest haftende Verunreinigungen verbleiben auf der Oberfläche - fest haftende Korrosionsprodukte verbleiben auf der Oberfläche - die Oberfläche lässt sich als „porös“/ rau beschreiben - lockere Korrosionsprodukte werden partiell entfernt 	Pr. 1 - 9 (Microkristalline Zellulose); Pr. 11 - 19 (Weizenstärke); Pr. 111 - 119 (akawipe weiß)
3	<ul style="list-style-type: none"> - lose aufliegende Verunreinigungen und Staubauflagen sind entfernt - los aufliegende Korrosionsprodukte sind entfernt - fest haftende Verunreinigungen verbleiben auf der Oberfläche - fest haftende Korrosionsprodukte verbleiben größtenteils auf der Oberfläche - lockere Korrosionsprodukte sind größtenteils entfernt - Oberfläche ist optisch und haptisch homogenisiert - Oberfläche kann als weniger rau bis „geglättet“ und „griffest“ beschrieben werden 	Pr. 21 - 29 (Soda); Pr. 31 - 39 (NS 450); Pr. 41 - 49 (DP 200); Pr. 51 - 59 (DP 600)
4	<ul style="list-style-type: none"> - überwiegende Ausdünnung fester Korrosionsprodukte und Verunreinigungen bis auf den metallischen Grund - Verbleib von Inseln fester Korrosionsprodukte - Porenräume verbleiben mit Korrosionsprodukten besetzt 	Pr. 61 (AS 180); Pr. 71 (AS 250); Pr. 81 (SG 150); Pr. 91 (SG 300); Pr. 101 (EK 75)
5	<ul style="list-style-type: none"> - überwiegende Ausdünnung fester Korrosionsprodukte und Verunreinigungen bis auf den metallischen Grund - teilweise Verbleib von kleineren Inseln fester Korrosionsprodukte - Porenräume verbleiben mit Korrosionsprodukten besetzt - es zeigt sich eine nahezu metallisch blanke Oberfläche 	Pr. 62 - 68 (AS 180); Pr. 72 - 78 (AS 250); Pr. 82 - 88 (SG 150); Pr. 92 - 98 (SG 300); Pr. 102 - 109 (EK 75)
6	<ul style="list-style-type: none"> - nahezu sämtliche Korrosionsprodukte und Verunreinigungen sind entfernt - in kleinen Poren verbleiben Reste von Korrosionsprodukten - längeres Strahlen notwendig, um sämtliche Porenräume zu erfassen 	Pr. 69 (AS 180); Pr. 79 (AS 250); Pr. 89 (SG 150); Pr. 99 (SG 300)

Ergebnisse

Abb. 14: Rangliste mit Beschreibung der erreichbaren Oberflächenzustände in Abhängigkeit vom Strahlmittel und den Versuchsparametern Druckstufe und Bearbeitungszeit

4.3.3 Verbrauch der Strahlmittel

Prinzipiell werden die Strahlmittel aus der Bearbeitungskammer abgesaugt, über die Filterstrecke gereinigt und wieder in den Strahlprozess zurückgeführt. Während der Versuche wurde aber beobachtet, dass es je nach Aufbau des Strahlmittels bei den Körnern zu unterschiedlichen Verschleißarten kommt. Dabei kann sich einerseits die Korngröße verkleinern, bspw. durch Zersplittern, oder andererseits auch die Kornform zum Beispiel von kantig zu rund verändern. Es wurde beobachtet, dass sich insbesondere die Glassplitter mit zunehmender Anwendung u.U. schnell zerkleinern. Asilit und EK können dagegen einen längeren Einsatz, ohne Korngrößenänderung, vollziehen. Bei den sensitiven Strahlmitteln hat sich während des Versuchs alleinig Soda zerkleinert. Bei allen anderen ist die Korngröße nahezu unverändert geblieben. Eine Veränderung der Korngröße und –form während einer längeren Bearbeitung muss unbedingt beachtet werden, das sich dadurch die abtragenden Eigenschaften des Strahlmittels ändern können.

4.3.4 Untersuchungen zum Einfluss geometrischer Versuchsparameter

In den bisherigen Versuchen wurden die Möglichkeiten einer gleichmäßigen Bearbeitung von unstrukturierter Flächen erprobt. Bei den hier verwendeten Probekörpern, den Platten mit einer Kantenlänge von 40mm spielen Parameter wie Arbeitsabstand und Einstrahlwinkel eine untergeordnete Rolle, wenn eine flächig homogene Reinigung erreicht werden soll. Die Ergebnisse sind mit Sicherheit auf größere Flächen einfach skalierbar. (Passt das Objekt nicht in die Bearbeitungskammer kann diese problemlos auf der Fläche aufgesetzt und dann dort in verschiedenen Arbeitsschritten verschoben werden, um die Gesamtfläche zu bearbeiten.)

In einer realen Anwendung in der Restaurierungspraxis ist die Bearbeitung einer ebenen Fläche aber nur ein Einzelfall. In der Regel werden die Oberflächen eine Topographie aufweisen von einer einfachen Strukturierung bis hin zu einer wirklich dreidimensionalen Ausprägung. Wird der Bearbeitungsstrahl über eine solche dreidimensionale Oberfläche geführt, ändern sich zwangsläufig sowohl der Arbeitsabstand zwischen Düsenauslass und der Oberfläche als auch der Auftreffwinkel des Strahlmittels auf die Oberfläche. Es ist zu erwarten, dass beide Parameter einen Einfluss auf den Materialabtrag und damit das Reinigungsergebnis haben.

4.3.4.1 Untersuchungen zum Einfluss des Arbeitsabstandes

Es ist zu erwarten, dass der Abstand zwischen der Austrittsöffnung der Düse und der gegenüberliegenden, zu bearbeitenden Fläche (im Weiteren als Arbeitsabstand bezeichnet) wesentlichen Einfluss auf die Form des Partikelstrahles haben wird. Nach Aussagen eines Vertreters des Geräteherstellers ist beispielsweise ein punktuell arbeiten mit dem verwendeten Gerät möglich, wenn ein geringer Arbeitsabstand gewählt wird (vgl. Gesprächsprotokoll Florian Eberhardt, systeco GmbH, 27.04.2023).

Mit dem Durchmesser des Strahles wird sich auch die Partikeldichte auf der Bearbeitungsfläche ändern. In der Versuchsreihe sollte dieser Effekt nachgestellt und visualisiert werden. Aus einer Reihe von Vorversuchen mit verschiedenen Oberflächen (korrodiert, gewalzt, poliert und beschichtet) war bekannt, dass sich polierte Stahloberflächen gut eignen, den „Partikeleinschlag“ sichtbar zu machen. Die Probekörper sind polierte Stahlbleche mit einer quadratischen Grundfläche von $40 \times 40 \text{ mm}^2$. Als Strahlmittel wurde Nusschale NS₄₅₀ verwendet. In den Versuchen wurden folgende Parameter konstant gehalten: Druckstufe 3, Applikationszeit 120s, Arbeitswinkel 90° . Variiert wurde der Arbeitsabstand H zwischen 5mm und 80mm. Abb. 15 zeigt schematisch den Versuchsaufbau mit den geometrischen Parametern.

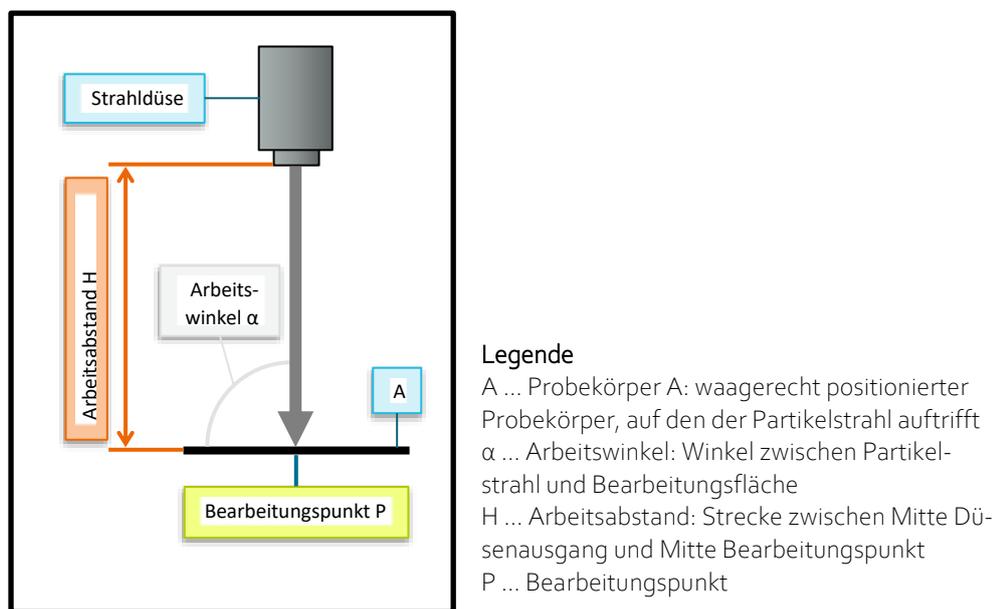


Abb. 15: Schematische Darstellung mit relevanten Parametern: Arbeitsabstand H (H = variierend), Arbeitswinkel α ($\alpha = 90^\circ$), Bearbeitungspunkt P (ca. Probeflächenmitte)

Für jeden Arbeitsabstand wurden jeweils 3 Probelplatten bestrahlt und ausgewertet. Abb. 16 zeigt exemplarisch für jeden Abstand H ein charakteristisches Foto. Die Partikeleinschläge bilden sich auf den polierten Stahloberflächen deutlich als Mattierung ab. Bei kleinen Arbeitsabständen $H = 5 \text{ mm}$ bzw. $H = 10 \text{ mm}$ (obere Bildreihe in Abb. 16) ist der Strahlfleck klein und präzise mit verdichteten Partikeleinschlägen. Es zeigt sich eine markante Abgrenzung zur umliegenden Fläche, der Strahlfleck ist kaum größer als der Strahldüsen-Durchmesser. Nur wenige Partikeleinschläge sind knapp außerhalb des eigentlichen Düsen-Durchmessers zu verzeichnen. Mit wachsendem Arbeitsabstand wird der Strahlfleck diffuser. Die Partikeleinschläge rücken weiter nach außen, es entsteht ein weicher Übergang vom Strahlfleck zur umliegenden Fläche. Bei größeren Arbeitsabständen $H = 50 \text{ mm}$ bzw. 80 mm ist die Mattierung nur noch in der Mitte des Strahlflecks deutlich und nimmt dann nach außen hin schnell ab. Eine klare Abgrenzung der Bearbeitungsfläche ist nicht mehr sichtbar.

Auch bei sehr kleinen Arbeitsabständen, z.B. bei $H = 5\text{mm}$, wird noch ein konstanter Arbeitsdruck aufgebaut. Allerdings ist dann die Sicht auf die Bearbeitungsfläche durch die geometrische Ausdehnung der Düse bereits eingeschränkt, so dass der Bearbeitungsfortschritt nicht mehr sicher verfolgt und eingeschätzt werden kann. Auch bei einer weiteren Reduzierung des Abstandes unter 5mm wird noch ein konstantes Vakuum aufgebaut. Bei einem Abstand unter 1mm bildet sich dann allerdings kein Partikelstrahl mehr aus.

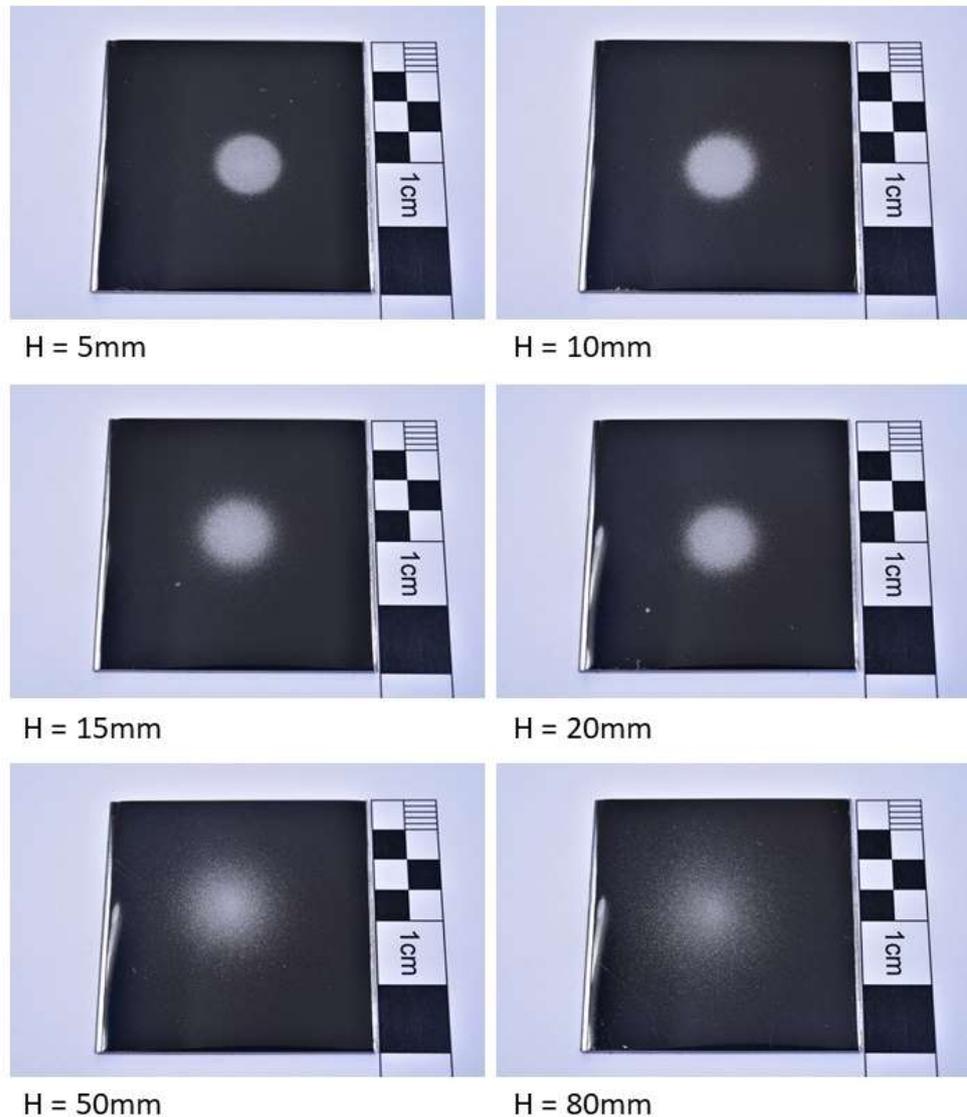


Abb. 16: Dokumentation der Bearbeitung auf einer polierten Stahloberfläche mit dem Strahlmittel Nusschale NS450 (120s, senkrechter Einfall) und variierendem Arbeitsabstand H : 5, 10, 15, 20, 50 und 80mm (v.l.o.n.r.u.)

Ein visueller Vergleich der Probekörper zeigt, dass der Strahlfleck in Abhängigkeit vom Arbeitsabstand variiert: je größer der Arbeitsabstand ist, desto größer wird die bearbeitete Fläche. Da die Partikeldichte pro Flächeneinheit mit wachsendem Ab-

stand sinkt, wird auch der Abtrag pro Flächeneinheit geringer. Ob dabei auch Energie und Geschwindigkeit der Strahlpartikel geringer werden, bleibt offen. Hier könnten Strömungsberechnungen dienliche Hinweise liefern.

Eine punktuelle Bearbeitung kleiner Bereiche lässt sich vorrangig bei kleinem Arbeitsabstand realisieren; der Umfang des Partikelstrahls entspricht dann annähernd der Strahldüse. Bei den vorliegenden Strahl- bzw. Versuchsparametern ist eine Auswirkung auf den Arbeitsdruck unwahrscheinlich.

Vermutlich lassen sich mit großem Arbeitsabstand und „fließender“ Führung der Strahlzette weiche Übergänge zwischen den Bearbeitungszonen erzeugen. Dies kann für die Bearbeitung großer, abgegrenzter Flächen vorteilhaft sein, bei denen keine harten Übergänge erwünscht sind.

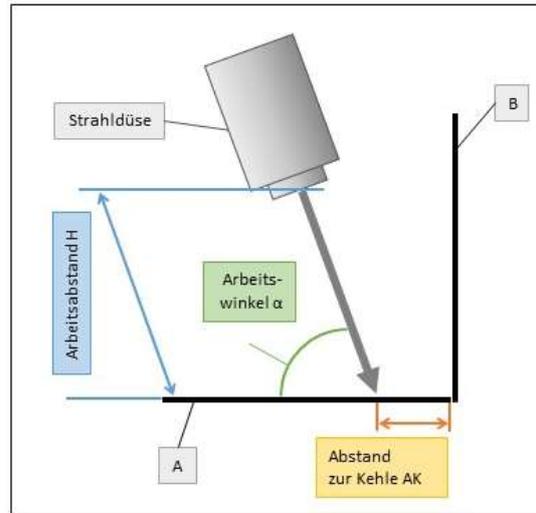
Bei kleinstem Arbeitsabstand ($H = 5 \text{ mm}$) ist aufgrund der Düsengeometrie der Sichtbereich deutlich eingeschränkt sowie eine Pendelbewegung kaum möglich.

Generell würde sich während einer Pendelbewegung vermutlich jeweils der Arbeitsabstand erhöhen und der Partikelstrahl entsprechend aufweiten. Dies würde sich v.a. bei geringem Arbeitsabstand auf das Ergebnis auswirken und wäre bei Erfordernis eines kantengenauen Arbeitens zu beachten.

4.3.4.2 Untersuchungen zum Einfluss des Arbeitswinkels

Voruntersuchungen haben sehr schnell gezeigt, dass sich – wie zu erwarten war – der Arbeitswinkel, der Winkel zwischen der Düsen- bzw. Strahlachse und der Bearbeitungsfläche, im Wesentlichen auf die Form des Strahlfleckes auswirken wird. Der kreisrunde Strahlfleck nimmt dann bei einem nichtsenkrechten Einfall eine elliptische Form an. Offen bleibt aber die Frage, ob es dabei einen sekundären Effekt gibt. Werden bei nichtsenkrechten Einfall des Strahls vermehrt Partikel an der Oberfläche in Vorwärtsrichtung reflektiert und haben diese noch ausreichend kinetische Energie, um beim zweiten Auftreffen auf eine Fläche eine Wirkung zu erzielen? Diese Fragestellung ist direkt relevant im Fall einer dreidimensionalen Objekt-oberfläche, bei der verschiedene Flächen in unterschiedlichen Winkeln zueinander angeordnet sind.

Für eine systematische (Erst-) Untersuchung dieser Fragestellung wurde eine einfache Versuchsanordnung gewählt. Zwei Probeplatte werden so angeordnet, dass sie senkrecht aufeinander stehen. Die sich dabei bildende „innere Kante“ wird im Folgenden als „Kehle“ bezeichnet. Abb. 17 zeigt schematisch die Versuchsanordnung mit den verwendeten Bezeichnungen.

**Legende:**

A ... Probekörper A: waagrecht positionierter Probekörper, auf den der primäre Partikelstrahl auftrifft

B ... Probekörper B: senkrecht positionierter Probekörper

α ... Arbeitswinkel: Winkel zwischen Partikelstrahl und Bearbeitungsfläche
 H ... Arbeitsabstand: Strecke zwischen Mitte Düsenausgang und Mitte Bearbeitungspunkt

AK ... Abstand zur Kehle: kürzeste Strecke zwischen Mitte Bearbeitungspunkt und Kontaktkante der Probekörper A und B

Abb. 17: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung mit zwei senkrecht aufeinander stehenden Probeplatte A und B sowie den relevanten Parametern: Arbeitsabstand H ($H = 30\text{ mm}$), Arbeitswinkel α (variierend), Abstand AK des Bearbeitungspunkt zur „Kehle“ ($AK = 10\text{ mm}$)

Der primäre Partikelstrahl trifft unter einem Winkel auf die waagerechte Probeplatte A auf. Beobachtet wird die Einwirkung der reflektierten Partikel auf die in einem Abstand AK angeordnete senkrechte Platte B. In diesem Versuch wurden sowohl korrodierte als auch polierte Probeplatten verwendet. Als Strahlmittel wurde für diesen Versuch sowohl aus Gründen der Vergleichbarkeit als auch wegen der nachgewiesenen Eignung für die Reinigung korrodierter Eisenoberflächen wieder Nusschale NS450 ausgewählt. Die Applikationen erfolgten mit einem Arbeitsabstand von $H = 30\text{ mm}$, einem Abstand zur Kehle $AK = 10\text{ mm}$ und einem Arbeitswinkel von 70° . Während der Bearbeitung wird eine pendelnde Bewegung der Strahl-lanze um den Drehpunkt (*Eintritt der Strahl-lanze in die Vakuumkammer*) ausgeführt. Dabei bewegt sich der Auftreffpunkt des Partikelstrahls annähernd parallel zur Kehle um ca. 20 mm in zwei Richtungen; der Arbeitsabstand verändert sich nur geringfügig.

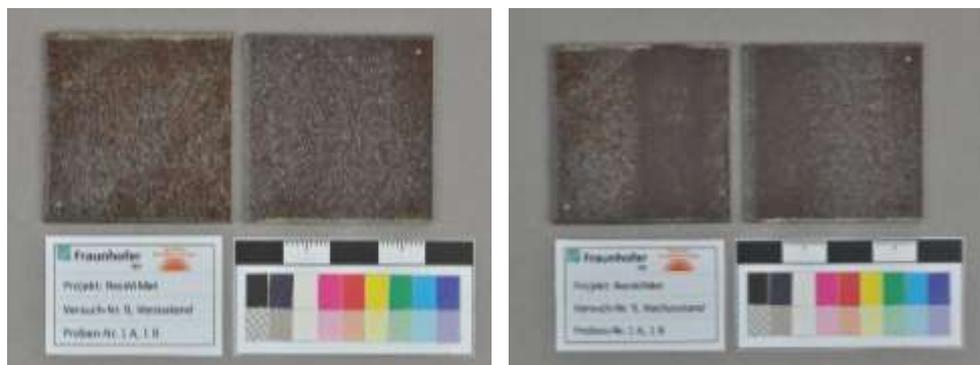


Abb. 18: Fotodokumentation der korrodierten Probekörper A und B vor (links) und nach (rechts) der Bestrahlung



Abb. 19: Fotodokumentation der polierten Probekörper A und B vor (links) und nach (rechts) der Bestrahlung

Die Gegenüberstellung der jeweiligen Vor- und Nachzustandsfotos (Abb. 18 und 19) verdeutlicht den Einfluss des Vakuumsaugstrahlens auf die spezifischen Vorzustände der Probekörper. Bei den waagerechten Probekörpern „A“ (in den Abbildungen jeweils links) ist der Effekt des primären Partikelstrahls deutlich als ein Streifen parallel zur „Kehle“ wahrnehmbar. Diese Form der bearbeiteten Fläche entsteht durch die oben beschriebene Pendelbewegung der Strahlzanze. Auf den korrodierten Flächen zeichnet sich die gereinigte Fläche als dunkler Bereich ab (Abb. 18). Auf den polierten Flächen wird wieder eine helle Mattierung sichtbar (Abb. 19). Auch auf den senkrechten Probekörpern „B“ zeichnen sich ähnliche Veränderungen der Oberfläche ab. Offensichtlich haben die Strahlpartikel nach dem ersten Abprallen noch genügend kinetische Energie, um beim zweiten Aufprall ebenfalls „Arbeit“ zu verrichten. Im Fall der korrodierten Fläche ist ein deutlicher Abtrag zu beobachten. Rein visuell ist der Abtrag auf der senkrechten Fläche in Teilen sogar vergleichbar mit dem beim primären Einfall auf der waagerechten Fläche.

Neben der visuellen Begutachtung wurde dieser Effekt auch mit einer gravimetrischen Messung nachgewiesen. Tab. 1 zeigt die Messwerte der in den 3 Versuchen verwendeten Plattenpaare A und B.

Waagerechter Probekörper „A“ (primärer Partikelstrahl)				Senkrechter Probekörper „B“ (sekundärer Partikeleinfall)			
Nr.	Masse / g vorher	Masse / g nachher	Abtrag / g	Nr.	Masse / g vorher	Masse / g nachher	Abtrag / g
1A	23,795	23,755	0,041	1B	23,948	23,906	0,041
2A	24,046	24,021	0,025	2B	23,937	23,920	0,016
3A	24,850	24,825	0,024	3B	24,059	24,043	0,016

Tab. 1: Wägeprotokoll der 3 Versuche an den korrodierten Probekörpern (Das Plattenpaar eines Versuches ist immer in einer Zeile aufgeführt.) Vergleiche auch Abb. 17.

Die Messwerte in Tab. 1 zeigen, dass auf den korrodierten Probekörpern ein Materialabtrag durch Wägung nachweisbar ist. Das gilt für die Flächen, die direkt vom Partikelstrahl getroffen wurden. Aber auch auf den angrenzenden senkrechten Flächen mit den sekundären Partikelein schlägen ist der Abtrag nicht nur visuell zu beobachten, sondern auch messtechnisch nachweisbar. Eine quantitative Auswertung der Messergebnisse ist in diesem Fall nicht sinnvoll, da die Ausgangszustände der einzelnen Probekörper nicht ausreichend vergleichbar sind.

Auf den polierten Probplatten ist ein Materialabtrag messtechnisch nicht nachweisbar.

Wie bereits in allen vorangegangenen Versuchen gezeigt wurde, ist mit dem Vakuumsaugstrahlverfahren ein gezielter Materialabtrag von einer korrodierten Metalloberfläche durch den direkten Partikeleinfall möglich. In diesem Versuchsteil konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass Partikel, die von der Oberfläche abprallen, noch genügend kinetische Energie besitzen können, um beim Auftreffen auf eine weitere Fläche wiederum Materialabtragen können. Das gilt insbesondere bei schrägem ersten Einfall. Um diesen sekundären Effekt quantifizieren zu können, sind weitere, systematische Versuche notwendig. Aber vermutlich ist der Materialabtrag durch den sekundären Partikelstrahl geringer im Vergleich zum primären Abtrag.

Auf alle Fälle ist dieser Effekt, dass auch Flächen von einem Abtrag beeinflusst werden können, die nicht vom direkten Strahl getroffen werden, bei der Bearbeitung eines realen Objektes unbedingt zu beachten. Wenn solche Flächen nicht bearbeitet werden sollen, sind sie entweder durch eine entsprechende Strahlführung oder durch eine geeignete Maskierung vor der Einwirkung des Strahlmittels zu schützen.

4.3.4.3 Untersuchungen zur Bearbeitung von größeren Objekten

Für die effektive Arbeitsweise des Vakuumsaugstrahlens ist u.a. eine dicht schließende Strahlhaube entscheidend, um einen wirksamen Unterdruck zu erzeugen. In einer ersten Evaluierung soll geprüft werden, ob auch Objekte bearbeitet werden können, die über die seitliche Begrenzung der Strahlhaube hinausragen. Der Gerätehersteller Systemco GmbH bietet für den Einsatz z.B. an Stahlzäunen beispielsweise eine sogenannte Prallplatte an. Diese wird hinter dem Zaun angeordnet und bildet mit der Strahlhaube dann eine flexible „Vakuum-Kammer“. Abb. 20 zeigt einen ähnlichen Versuchsaufbau, mit dem verschiedene Eisenprofile unterschiedlicher Querschnitte getestet wurden.

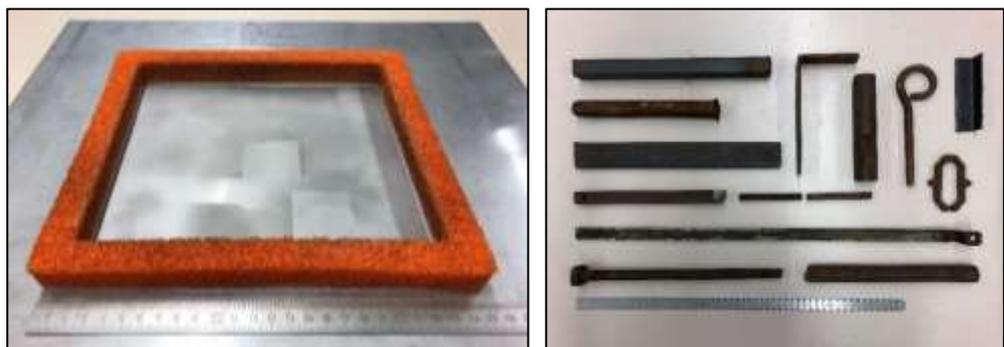


Abb. 20: Links: Versuchsprallplatte aus Edelstahl mit montierter Dichtung aus Schwammgummi als Gegenstück zur Strahlhaube. Rechts: Probekörper aus Eisenlegierungen mit unterschiedlichen Querschnitten.

In Abhängigkeit vom Querschnitt des herausragenden Eisenprofils schließt die Kammerdichtung unterschiedlich gut (s. Abb. 21).

Die bisherigen Versuche haben gezeigt, dass mit der vorliegenden Versuchsanordnung kleine Höhen von bis zu 10mm gut überbrückt werden, ohne dass sich der Arbeitsdruck deutlich verringert. Durch den erzeugten Anpressdruck werden offensichtlich kleine Unterbrechungen der Dichtung der Standard-Arbeitshaube ausgeglichen. Die Bearbeitung der in der Haube befindlichen Oberflächen ist wie gewohnt möglich.

Größere Profile bis ca. 35mm können mithilfe einer zweiten Dichtung bzw. einer Prallplatte gut umschlossen werden, dies ist jedoch von Fall zu Fall zu erproben und neu zu bewerten. Gegebenenfalls sitzt die Strahlhaube sehr wackelig auf, außerdem kann es vorkommen, dass die Strahlmittel nicht ausreichend abgesaugt werden.

Diese Versuchsreihe kann nur ein erster Test zur Handhabung von größer dimensionierten Objekten bzw. Bauteilen sein. Hier sind unbedingt weitere Untersuchungen notwendig zur Evaluierung von konstruktiven Verbesserungen der Strahlhaube und der Absauggeometrie.

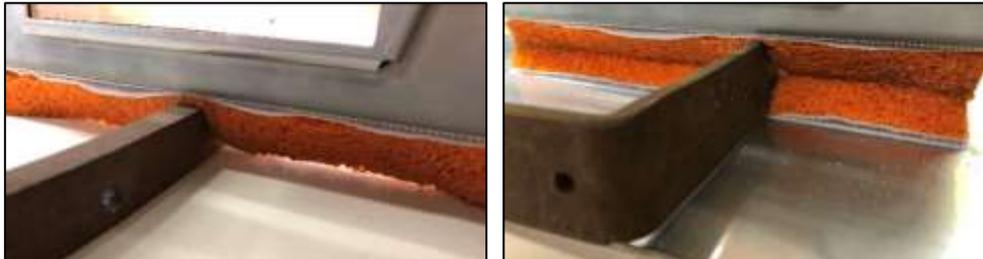


Abb. 21: Versuchsaufbau mit großem Eisenprofil, welches aus der Strahlhaube herausragt. Links: Vierkantprofil 10 x 20mm mit einseitiger Dichtung der Stahlhaube, rechts: Profil 30 x 6mm mit zweiter Dichtung der Prallplatte.

4.3.5 Untersuchungen am Materialübergang zwischen Metall und Holz

Die Untersuchung der Reinigungsmöglichkeit einer Metall-Holz-Kombination wurden an einem einfachen Probekörper-Design durchgeführt. Verwendet wurden einerseits korrodierte Eisenprofilstäbe mit einem Querschnitt von 11 x 11 mm. Zur Simulation des Metall-Holzübergangs wurden in ein Holzbrett 3 Nuten mit einer Tiefe von 11 mm und Breiten von 11, 12 und 14 mm eingefräst, um unterschiedliche Spaltbreiten zwischen Metall und Holz zu realisieren. Für die Hölzer wurden zwei Holzarten verwendet: Kiefer als ein Vertreter von Weichholz und Esche als eine typische Hartholzart. Abb. 22 zeigt die Versuchsanordnung und die Maskierung einzelner Bereiche während der Bearbeitung.



Abb. 22: Versuchsanordnung für die Bearbeitung eines Metall-Holz-Verbundes. Die Zahlen geben die Breite der Nuten von 11, 12 und 14 mm an, die unterschiedliche Spaltmaße ergeben. Links: Maskierung von Oberflächenbereichen während der Bearbeitung.

Als Strahlmittel wurde in den Versuchen wieder das bewährte Material Nusschale NS450 mit einem Arbeitsabstand von ca. 30 mm verwendet. Bei der Bestrahlung wurde die Strahlzange längs der Profile bewegt, so dass im Wesentlichen nur die Metallflächen von den Partikeln getroffen wurden. Lediglich die freie Fläche des Nutbodens (in den Abbildungen jeweils rechts) wurde vom Strahlmittel getroffen. Die Bearbeitung der korrodierten Oberseite der Metallprofile erfolgt in der bekannten Weise. Abb. 23 zeigt den Zustand der Probekörper nach der Bearbeitung.



Abb. 23: Metall-Holz-Probekörper nach der Bearbeitung. Das linke Viertel der Eisenprofile war abgedeckt und zeigt den korrodierten Vorzustand zum Vergleich.

An den Seiten der Profilstäbe ist im oberen Bereich an manchen Stellen ein geringfügiger Abtrag zu beobachten. Das ist aber nicht als eine gezielte Bearbeitung zu werten, muss aber aus konservatorischen Gründen bei einem historischen Objekt bedacht werden. In den Spalten zwischen Metall und Holz verbleibt ein Rest an Strahlmittel, welches nicht abgesaugt wird (Abb. 24). Je größer der Spalt umso geringer ist die Menge an Strahlpartikeln.

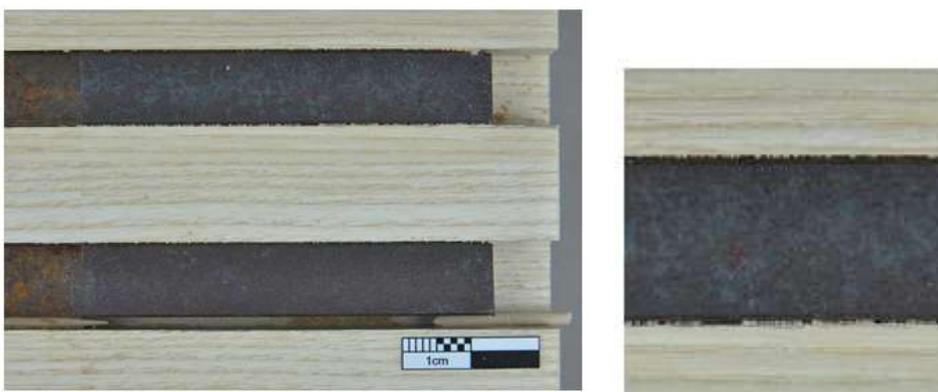


Abb. 24: Detailaufnahmen, die Reste von Strahlmittel im Spalt zwischen Metall und Holz zeigen.

Wird das Holz direkt vom Partikelstrahl getroffen, erfolgt auch dort ein Abtrag, der in diesem Fall aber als eine Beschädigung der Originalsubstanz zu bewerten ist. Abb. 25 zeigt die Zerstörung der Holzstruktur an der Oberfläche. Dabei findet besonders im Weichholz Kiefer ein selektiver Abtrag statt. Besonders das weichere Frühholz der Baumringstruktur wird durch die Partikelstrahlen angegriffen.

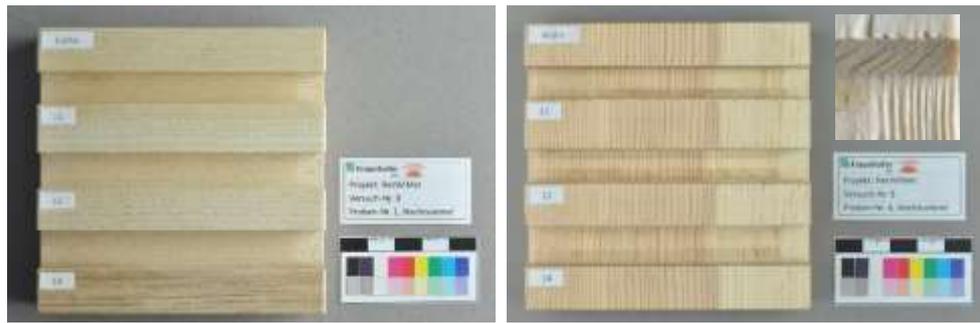


Abb. 25: Direkte Einwirkung der Partikelstrahlen auf die Holzoberfläche mit einem selektiven Abtrag im Hartholz Esche (links) und im Weichholz Kiefer (rechts) mit einer Detailansicht rechts oben.

Die ersten Versuche zur Bearbeitung einer Metall-Holz-Kombination zeigen, dass die Reinigung des Metalls problemlos möglich ist, solange der Teilchenstrahl nicht auf das Holz trifft. Dafür ist eine vorsichtige Annäherung der Strahlfläche an die Grenzlinie zwischen Metall und Holz erforderlich. Sicherer in der Handhabung ist aber eine geeignete Maskierung der Holzteile und eventuell ein Verschluss von Ritzen und Spalten mit einem reversiblen Material, um das Zurückbleiben von Strahlmittel zu verhindern.

Ziel dieses Arbeitspaketes waren Machbarkeitsuntersuchungen zu möglichen optischen/digitalen Unterstützungsmöglichkeiten für den Restaurator, um den Reinigungsprozess, der ja in einer abgeschlossenen Kammer stattfindet, live monitorieren und im Bedarfsfall in Echtzeit eingreifen zu können.

4.4.1 Laserunterstützung der Strahlführung

Die erste, eher simple Aufgabe bestand in der Auswahl einer Methode, den Bearbeitungsort des Partikelstrahls für den Restaurator sichtbar zu machen, um zielgenau den Prozess starten und verfolgen zu können. Ein einfacher Laserpointer, der das Zentrum des Bearbeitungsortes auf dem Bauteil im eingestellten Bearbeitungsabstand anvisiert liefert eine sehr gute Arbeiterunterstützung. Justiert werden kann die korrekte Position des Laserpunktes, indem im eingestellten Bearbeitungsabstand der Laserpunkt auf der Bauteiloberfläche mit dem Lichtfleck einer fokussierten LED direkt durch die Strahldüse abgeglichen wird (Abb. 26). Mit dem Laserpointer kann man sowohl vor dem Start des Strahlvorgangs die richtige Ausrichtung der Strahldüse auf die Bearbeitungszone sicherstellen, als auch während der Bearbeitung den Verlauf der Bearbeitungszone verfolgen. Die Befürchtung, dass der Laserstrahl durch das Strahlmittel zu stark gestreut wird, haben sich nicht bewahrheitet.

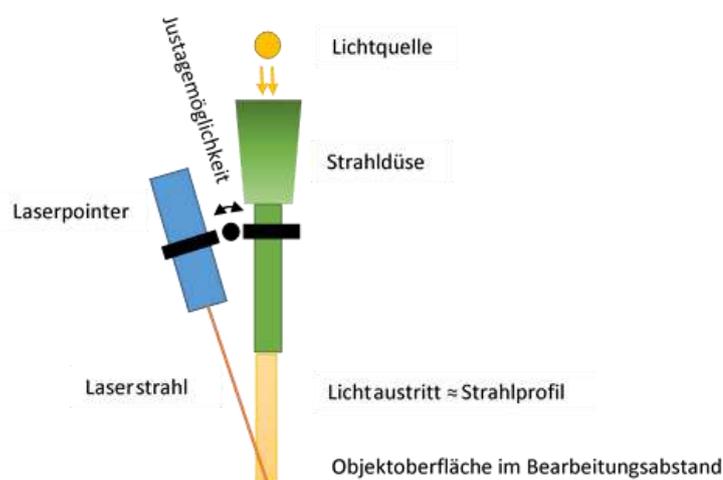


Abb. 26: Prinzip der Laser-Peilung mit Justagemöglichkeit

Abb. 27 zeigt eine provisorische Realisierung des Aufbaus, in dem der Laserpointer mit der Düse fest verbunden wurde. Abb. 28 demonstriert dann die Ausrichtung des Laserpunktes in der Mitte der Strahlfläche, hier durch Beleuchtung durch die Strahldüse auf einer polierten Metalloberfläche sichtbar gemacht. Der Auftreffpunkt des Laserstrahls ist auch auf einer stark korrodierten Oberfläche sehr gut wahrnehmbar (Abb. 29).



Abb. 27: Laserpointer mit provisorischer Befestigung an der Strahldüse, Blick aus Richtung Objekt in die Arbeitskammer

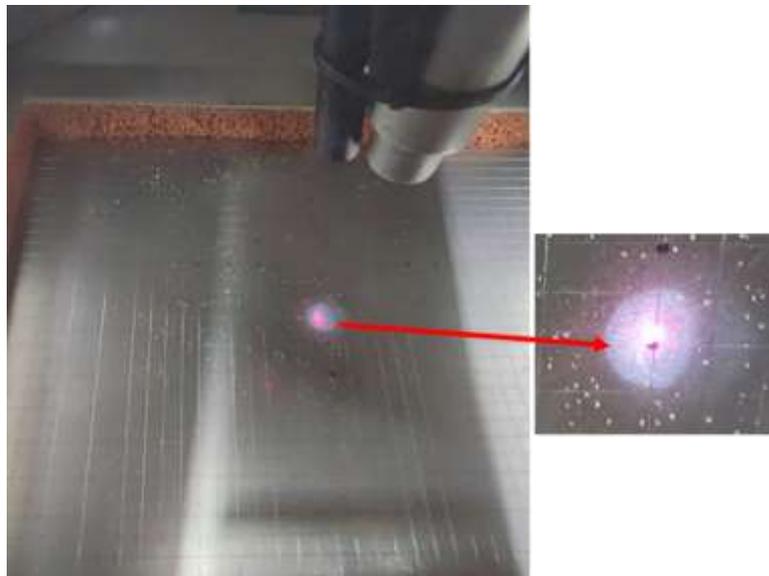


Abb. 28: Justage des Laserpointers auf der Objektoberfläche mittig zum Lichtfleck durch die Strahldüse

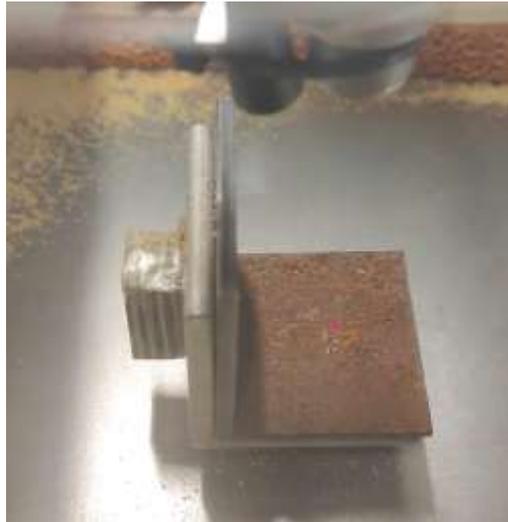


Abb. 29: Gute Sichtbarkeit des Laserpunktes während des Strahlvorgangs auch auf rauen, korrodierten Oberflächen

4.4.2 Monitoring der Strahlfläche

Ein weiteres Thema der Untersuchungen war die optische Online-Monitoring des Strahlprozesses. Es sollte geklärt werden, welche digitalen Unterstützungsmöglichkeiten es für einen Restaurator gibt.

Bereits die verwendete einfache Arbeitskammer hat eine innenliegende Beleuchtung des Arbeitsraumes und Einblickfenster aus 4 verschiedenen Richtungen. Das erlaubt einen visuellen Überblick über den Strahlprozess, reicht jedoch nicht aus, um feinste Detail bei sensiblen Objekten zu beobachten.

Eine erste Überlegung bestand in der Prozessbeobachtung mittels eines außen an einem Sichtfenster angebrachten Digitalmikroskops. Es gibt derzeit kompakte und preiswerte USB-Mikroskope mit einer erstaunlichen Optik und einem erheblichen Vergrößerungsbereich (Abb. 30). Diese Mikroskope besitzen in der Regel auch eine integrierte Möglichkeit der Objektbeleuchtung und können sowohl Einzelbilder als auch Videosequenzen aufzeichnen.



Abb. 30: Links: Digitalmikroskop, dank 3in1-USB-Kabel kompatibel zu PC, Mac und Android-Smartphone, Vergrößerung bis 1000-fach, rechts: Blick auf das Objektiv mit einer einstellbaren konzentrischen Möglichkeit der Objektbeleuchtung

Die Beobachtung von außen hat jedoch einige erhebliche Nachteile:

- Reflexe an der Einblickscheibe lassen sich nicht ganz vermeiden.
- Die Verwendung der Mikroskop-eigenen Beleuchtung führt zu starken Schlag Schatten an dreidimensionalen Objekten. Außerdem wird das Licht durch das Strahlmittel sehr stark gestreut, so dass eine Beobachtung im Strahlbetrieb kaum noch möglich ist. Hier ist unbedingt eine separate Beleuchtung mit seitlichem Einfall erforderlich.
- Durch den großen Beobachtungsabstand ist das Sichtfeld des Mikroskops bei großen Vergrößerungsmaßstab so stark eingeschränkt, dass in Verbindung mit dem begrenzten Einblick durch die Sichtfenster keine sinnvolle Beobachtung der aktuellen Bearbeitungszone mehr möglich ist.

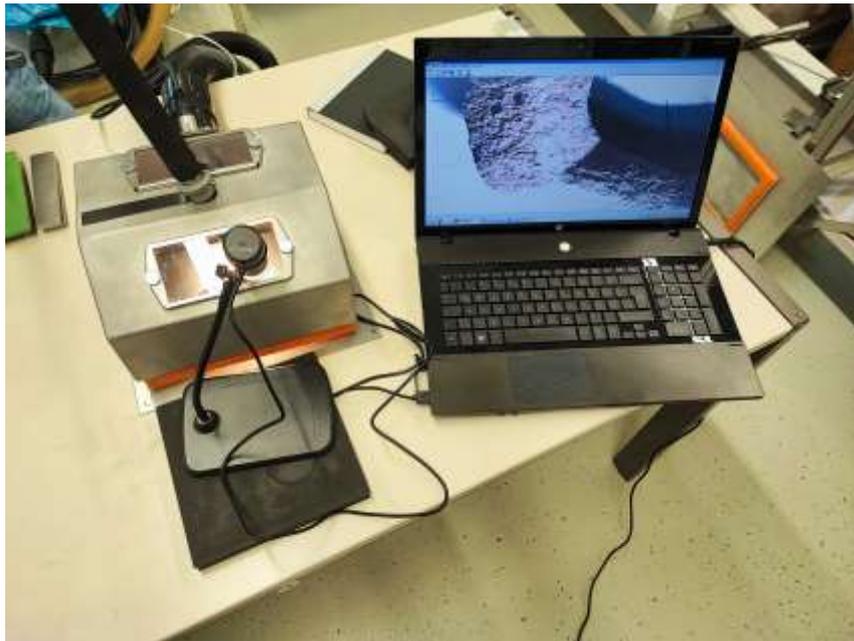


Abb. 31: Außen am Einblickfenster montiertes Digitalmikroskop. Die Beleuchtung erfolgt über die integrierte Kammerbeleuchtung. Objektdetails lassen sich sehr gut auf dem Monitor des PC erkennen.

Eine Möglichkeit, den Beobachtungsabstand zu verkleinern und näher an das Objekt zu kommen, bestand darin, das Mikroskop in die Bearbeitungskammer eintauchen zu lassen (Abb. 31). Benutzt wurde dafür die Öffnung für die Kammerbeleuchtung, die gegen das Mikroskop ausgetauscht wurde. Um das Objektiv gegen vagabundierende abrasive Strahlpartikel zu schützen, wurde eine Schutzscheibe davor montiert. Die Einschränkungen waren aber ähnlich stark:

- Sichtfenster ist zu klein und durch die starre Einbauposition nicht veränderbar

Eine Lösung ergab sich durch die Verwendung einer Endoskopkamera, die direkt an der Strahldüse montiert werden kann (Abb. 32). Die entscheidenden Vorteile sind:

- Der Fokus der Kamera kann fest auf den Arbeitsabstand eingestellt werden.
- Das Sichtfeld der Kamera folgt durch die Montage an der Strahldüse zwangsläufig dem Bearbeitungsfeld (Abb. 33).

Da sich das Objektiv in diesem Fall noch näher am Bearbeitungsort befindet muss es unbedingt vor abprallenden Strahlpartikeln geschützt werden. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten

- Kollimator
- zusätzliche Schutzscheibe
- zusätzlicher Gasfluss durch den Kollimator

die in Summe für einen zuverlässigen Langzeitbetrieb sorgen können. Auch in diesem Fall ist eine geeignete Beleuchtung das A und O für eine hohe Abbildungsgüte.



Abb. 32: Endoskopkamera mit einer justierbaren Befestigung an der Strahldüse



Abb. 33: Sicht der Endoskopkamera auf das Objekt vor (links) und während (rechts) des Strahlvorgangs. Beleuchtung ist noch nicht optimiert.

4.4.3 Hyperspektrale Prozessüberwachung

Im Rahmen dieses Projektes war vorgesehen, mit ersten Tests zu untersuchen, ob es möglich ist, den Reinigungsprozess mittels Hyperspektraler Bildgebung (HSI) zu überwachen. Restauratoren könnte man damit neben der rein visuellen Überwachung ein weiteres Werkzeug für die zielgenaue Steuerung des Abtragsprozesses zur Verfügung stellen, da die Möglichkeiten der visuellen Bewertung des Reinigungszustandes sehr begrenzt sind, zumal sich das Objekt während der Bearbeitung in einer abgeschlossenen Arbeitskammer befindet.

Die Hyperspektrale Bildgebung erfasst bei einer definierten Beleuchtung das von der Oberfläche reflektierte Licht in einem weiten Spektralbereich und speichert für jeden Bildpunkt das komplette Spektrum ab. Damit lassen sich viele verschiedene Abbildungen des Objekts für jede einzelne spektrale Wellenlänge in hoher Auflösung auswerten.

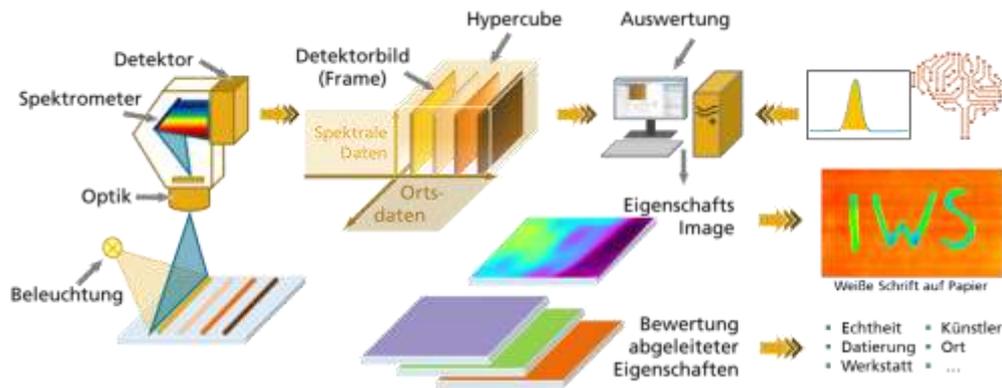


Abb. 34: Prinzip der Hyperspektralen Bildgebung (HSI), Quelle: Florian Gruber, Fraunhofer IWS

Erste Tests an Proben, die mit unterschiedlichen Strahlmitteln bearbeitet wurden, lieferten optimistische Resultate. So erkennt man z.B. deutliche Unterschiede der behandelten Oberflächen in der Reflexion bei 780 nm (Abb. 35).

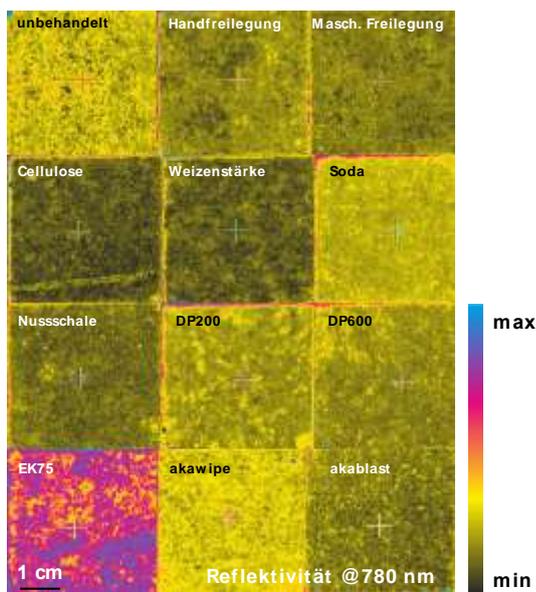


Abb. 35: Farbkodierte Reflektivität (Intensität) bei 780 nm, Quelle: Florian Gruber, Fraunhofer IWS

Diese Information ist allerdings noch ungeeignet, um einen Reinigungszustand zu bewerten. Selbst, wenn man zusätzlich die kompletten Spektren an jeweils einem Bildpunkt (Kreuze auf den Proben in Abb. 35) der einzelnen Proben miteinander vergleicht (siehe Abb. 36) ergeben sich keinerlei Hinweis auf eine Detektionsmöglichkeit, zumal sich die Spektren an unterschiedlichen Punkten der Proben (zumindest in der Intensität) zusätzlich noch deutlich unterscheiden werden (was sich in Abb. 35 schon andeutet).

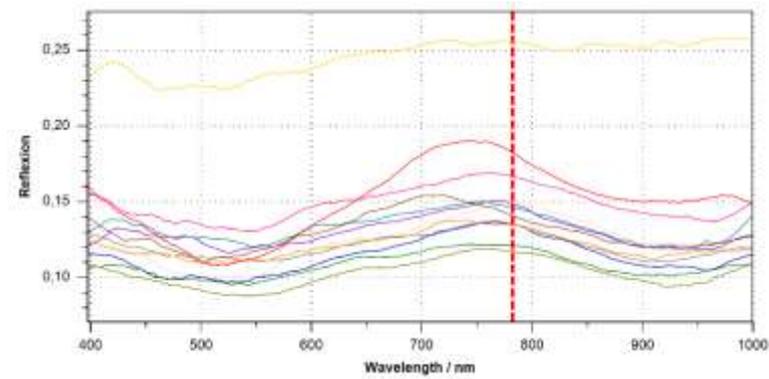


Abb. 36: Spektren an den in Abb.35 gekennzeichneten Stellen der bearbeiteten Proben)
 Quelle: Florian Gruber, Fraunhofer IWS

Wird der Informationsgehalt der Spektren jedoch mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse (PCA) verdichtet, ergeben sich interessante Möglichkeiten. Die PCA ist ein statistisches Verfahren, mit dem der Informationsinhalt in großen Datentabellen mithilfe eines kleineren Satzes von „Hauptindizes“ zusammengefasst werden kann und damit einfacher visualisiert und analysiert werden kann. Die zugrunde liegenden Daten können beispielsweise Spektren sein. Das Ergebnis dieser Analyse ist ein so genannter Score Plot (Abb. 37), in dem jedes Spektrum durch einen Punkt im Raum der zwei Hauptindizes dargestellt wird. Nahe beieinander liegende Punkte haben dabei ähnliche spektrale Eigenschaften. Mit der Kenntnis der spektralen Eigenschaften der Zielgröße (Mittelwert aus den spektralen Eigenschaften für eine anforderungsgerecht gereinigte Probe), lässt sich nunmehr einfacher feststellen, wie weit der aktuelle Bearbeitungszustand von der Zielgröße entfernt ist (sowohl noch nicht ausreichend gereinigt als auch schon zu viel abgetragen).

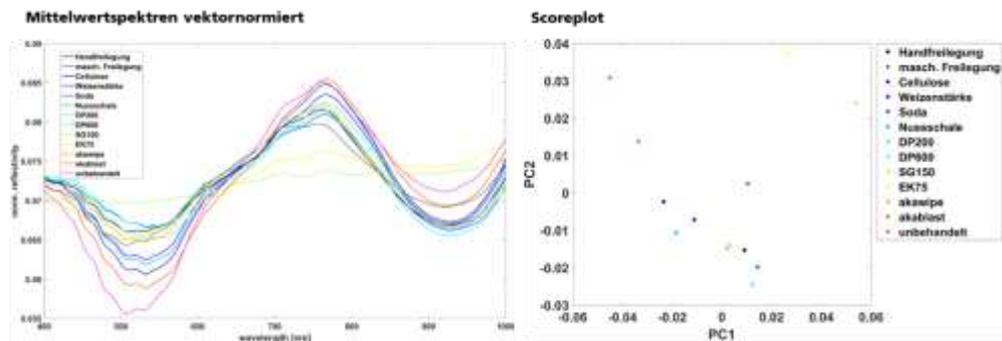


Abb. 37: Normierte und in einem Scoreplot dargestellte Spektren aus Abb. 36
 Quelle: Florian Gruber, Fraunhofer IWS

Mit diesen ersten Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass es eine realistische Chance gibt, diese Methode für eine In-situ Prozesskontrolle zu nutzen. Dafür ist jedoch noch eine entsprechende Technologieentwicklung erforderlich, um prozessnah über eine Faseroptik den aktuellen Prozessort in Echtzeit mit HSI zu überwachen. Der Einfluss des Strahlmittels auf die HSI-Ergebnisse während des laufenden Abtragsprozesses, die Wahl geeigneter Hauptkomponenten für die PCA, die für historische Materialoberflächen zulässigen Unsicherheiten des Zielraums im

Scoreplot, usw. müssen dazu, ggf. unter Einbeziehung interpretierbarer KI, ebenfalls noch eingehend untersucht werden.

Ergebnisse

4.5 Demonstration der Vakuum-Saugstrahlreinigung an einem Objekt der SKD (AP5)

Im Projektverlauf wurden in den Arbeitspaketen 1 bis 4 zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um die Anwendungsmöglichkeiten des Vakuum-Saugstrahl-Verfahrens für die Abtragung von Korrosions- und Verwitterungsschichten auf Eisenmaterialien zu evaluieren. Für die Versuche wurden standardisierte Probekörper verwendet, um die Einflüsse der Strahlmittel und –parameter möglichst objektiv bewerten zu können. Alle Ergebnisse der verschiedenen Versuche sowie die Erkenntnisse zum Prozessablauf und zur praktischen Handhabung der Apparatur wurden dann genutzt, um für die Reinigung eines ausgewählten realen Objektes die Versuchsbedingungen auszuwählen.

Abb. 5.1 zeigt das ausgewählte Bauteil einer historischen Turmuhr. Die charakteristische Schrägverzahnung des Stirnrades weist auf seine Funktion als Sperrrad hin. In die Verzahnung greift eine Sperrklinke ein, die dafür sorgt, dass sich das Rad auf der Welle nur in eine Richtung drehen kann. Das hier vorgestellte Bauteil wurde von der Werkstatt Bernhard Saam in Themar (Thüringen) gefertigt und gehört zum Bestand des Mathematisch-Physikalischen Salon der SKD. Es ist aber nicht einem konkreten und inventarisierten Sammlungsobjekt zugeordnet.



Abb. 38: Das Sperrrad, ein typisches Bauteil einer historischen Turmuhr, welches für die Demonstrationsversuche verwendet wurde. Deutlich unterscheiden sich die bearbeitete Fläche (rechts) von der unbearbeiteten (links).

Zum Zweck der Demonstration wurde nur eine Hälfte des Objektes bearbeitet. Deutlich lassen sich in Abb. 38 der Vorzustand (linke Hälfte) vom gereinigten Endzustand (rechts) unterscheiden. Beide Flächen sind durch eine deutlich und scharfe Trennlinie voneinander abgegrenzt.

Vor der Bearbeitung mit dem Vakuum-Saugstrahl-Verfahren wurde durch die Restauratorin eine Begutachtung des Oberflächenzustandes des Bauteils durchgeführt

und das Reinigungsziel definiert. Auf der Metalloberfläche hat sich eine nahezu gleichmäßige Flächenkorrosion ausgebildet (vergl. Abb. 5.1 linke Bauteilhälfte). Es handelt sich um eine dünne hellbraune Schicht. Dickere und in die Tiefe gehende Korrosionserscheinung und Verwitterungsablagerungen sind nicht zu beobachten. Ziel der Reinigung soll eine Reduzierung der Flächenkorrosion sein, um das typische metallische Aussehen einer historischen, aber nicht korrodierten Eisenoberfläche wiederherzustellen.

Auf Grundlage dieser Festlegung des Reinigungsziels können mit der im Projekt erarbeiteten Rangliste der erreichbaren Oberflächenzustände (vergl. Kap. 4.3) und den praktischen Erfahrungen der Experimente das geeignete Strahlmittel sowie die benötigten Strahlparametern Druckstufe und Bearbeitungszeit ausgewählt werden. Da in diesem aus konservatorischen Gründen nur eine sehr sensitive, oberflächliche Abreinigung ohne Beeinflussung der Originalsubstanz gefordert ist, wurde als Strahlmittel Nusschale NS450, welches nur mit Druckstufe 1, höchstens 2 angewendet wird, ausgewählt. Die Bearbeitungszeit wird in Abhängigkeit vom Reinigungsfortschritt individuell festgelegt. Das heißt, die Reinigung wird nach Erreichen des gewünschten Oberflächenzustandes auf der bearbeiteten Fläche nach optischer Begutachtung beendet.

Gereinigt wurden die flache Kreisfläche des Zahnrades, die einzelnen Zähne und der Ansatz für die Aufnahme der Welle. Der Vergleich von Vor- und Nachzustand an dem Objekt belegt, dass mit dem zur Verfügung stehenden Versuchsaufbau eine Reinigung der Oberfläche eines realen, dreidimensionalen Objektes grundsätzlich möglich ist. Durch eine kontinuierliche, pendelnde Bewegung der Strahl-lanze während der Bearbeitung wird die Einstellung eines homogenen Oberflächenbildes erreicht. Die Struktur mit den Zähnen auf der Stirnfläche erfordert ständig eine Neupositionierung des Bauteils in der Strahlkammer. Diese Manipulationen erfordern jedes Mal eine Unterbrechung und ein Öffnen der Strahlkammer mit einem Absaugen des Strahlmittels. Dieser Vorgang ist zeitaufwendig und schlägt sich auf die Gesamtbearbeitungszeit nieder. In der Gesamteinschätzung wurde eine vergleichsweise kurze Bearbeitungszeit bis zum Erreichen des gewünschten Endzustandes aber positiv durch die Bearbeiterin hervorgehoben. Trotz der zahlreichen Manipulationen und Unterbrechungen ist festzustellen, dass diese händischen Eingriffe von außen handhabbar sind und auch die „Zahnzwischenräume“ gut gereinigt werden können.

Der Demonstrationsversuch an einem originalen Objekt aus der Sammlung wurde mit einem insgesamt positiven Ergebnis abgeschlossen. Mit der Vakuumsaugstrahl-Apparatur in dieser Form ist eine Reinigung der Metalloberflächen eines realen dreidimensionalen Objektes möglich.

5 Diskussion

Im vorstehenden Kapitel 4 wurden die Praxis-Ergebnisse dieser Machbarkeitsstudie vorgestellt. Erste wichtige Grundlagenuntersuchungen wurden vorgenommen, um die prinzipielle Eignung des Vakuumsaugstrahl-Verfahrens für eine Reinigung von Metalloberflächen für Anwendungen in der Restaurierung wertvoller Einzelobjekte zu evaluieren. In zahlreichen Versuchen konnte gezeigt werden, dass mit dem hier vorgestellten Verfahren Metalloberflächen nicht nur von Korrosionserscheinungen und anhaftenden Verwitterungsschichten befreit werden können. Auch Verunreinigungen auf sehr fragilen Korrosionsschichten können damit schonend abgenommen werden. Durch Auswahl des Strahlmittels und der Strahlparameter, kann der Reinigungsfortschritt und das Reinigungsergebnis gezielt ausgewählt und beeinflusst werden. Der vorausgesagte Vorteil einer guten Beobachtung der Reinigungsfläche während des Prozesses konnte bestätigt werden. Erste Tests weisen darauf hin, dass durch Einsatz optischer Hilfsmittel der Restaurator weiter in der Prozesssteuerung unterstützt werden kann. Mit der Hyperspektralen Bildgebung bietet sich ein Messverfahren zur objektiven Prozessüberwachung an. Hier sind weitere systematische Untersuchungen erforderlich, um so eine Möglichkeit des Monitorings und der Steuerung für den Praxiseinsatz zu entwickeln.

Während der Bearbeitung des Projektes und im praktischen Umgang mit der Apparatur wurden von den beteiligten Restauratoren umfangreiche Beobachtungen gemacht, die die Verbesserungsmöglichkeiten des Versuchsaufbaus betreffen. Hier sind vor allem „Unzulänglichkeiten“ des experimentellen Versuchsaufbaus der Anlage, die für diese Anwendung ursprünglich gar nicht konzipiert ist, aufgefallen. Entstanden ist eine Liste konkreter Vorschläge für die Technologie- und Anlagenentwicklung einer verbesserten Reinigungsapparatur auf der Grundlage des Vakuumsaugstrahl-Verfahrens, die dann insbesondere auf die Anforderungen im restauratorischen Bereich aber auch im Spezial- und Musterbau ausgerichtet sind. Die Liste lässt sich grob in folgende Themen sortieren:

- Neugestaltung einer modularen Strahlkammer in Größe, Abdichtung und Beobachtungsfenstern
- Strömungsoptimierte Änderung der Absaugung am Kammerboden
- Verbesserung der händischen Führung der Strahlzanze mit Einstellmöglichkeiten und Kraftaufnahmen für eine sichere und präzisere Strahlführung
- Entwicklung einer effektiven Beleuchtung der Bearbeitungsfläche
- Konstruktion einer Probenaufnahme zur (von außen) gesteuerten präzisen Lageveränderung während des Prozesses (zur Prozessoptimierung)
- Einsatz von optischen Beobachtungs- und Messmöglichkeiten zum Monitoring und zur Prozesssteuerung
- Verbesserung der Strahlmittelführung, -Filterung und -Überwachung inkl. einer Erweiterung zum (schnellen) Einsatz verschiedener Strahlmittel

Die Evaluierung und Weiterentwicklung dieser Vorschläge erfordert ein neues Projekt mit einem erweiterten interdisziplinären Ansatz mit neuen Partner aus Konstruktion, Geräte- und Prozessentwicklung, Geräteherstellung, Oberflächentechnik

und Restaurierung. In der Vorbereitung bzw. in der ersten Projektphase eines solchen Projektes können mit Sicherheit weitere Verbesserungen im Aufbau und Handling erschlossen werden. Bestandteil einer Fortsetzung dieses Projektes muss unbedingt die Validierung des Innovationspotentials der Forschungsergebnisse für eine Überführung in eine kommerzielle Anwendung bei der Erhaltung des kulturellen Erbes sein.

Diskussion

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Förderprojekt sollte ein Verfahren der Oberflächenreinigung, das Vakuumsaugstrahlverfahren, auf seine Eignung zur restauratorischen Abreinigung von Verwitterungsschichten auf Metalloberflächen und an Metall-Holz-Verbänden hin untersucht werden. Die besondere Herausforderung besteht darin, dass es sich in der geplanten Anwendung bei den zu reinigenden Objekten um historische Sammlungsobjekte aus dem musealen Umfeld handeln soll. Solche wertvollen, einzigartigen und unwiederbringlichen Objekte stellen an restauratorische und konservatorische Maßnahmen besondere Anforderungen, die sich aus der notwendigen Erhaltung solcher Objekte unseres kulturellen Erbes ergeben. Aus diesem Grund war von Projektbeginn an die „Anwenderseite“, die Restauratoren, in die Projektbearbeitung aktiv involviert. Stets wurden die Teilergebnisse und das weitere Vorgehen mit ihnen diskutiert und abgestimmt.



Abb. 39: Blick in die Bearbeitungskammer während der Reinigung. Deutlich zu sehen ist der gerichtete Strahl des Strahlmittels, der durch das Vakuum aus der Düse gezogen wird und das Probestück trifft. Gleichzeitig wird das Absaugen von Strahlmittel und abgereinigten Partikeln sichtbar.

Die Untersuchungen zur Entwicklung und modelhaften Anwendung eines modularen Reinigungskonzeptes wurden hauptsächlich an Probestücken durchgeführt, deren Oberflächenzustand sehr gut die späteren Anwendungsfälle repräsentieren (Abb. 39). Dieses Vorgehen ermöglicht systematische Grundlagenuntersuchungen, deren Ergebnisse vergleichbar und reproduzierbar sind. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse wurde durch die Bearbeitung eines realen Objektes, einem s.g. Sperrad, wie es in Turmuhren typischerweise Verwendung findet, demonstriert.

Das Projekt war in mehrere Arbeitspakete strukturiert. In der Laufzeit des Projektes wurden diese Arbeitspakete systematisch und vollständig bearbeitet. Die Zielstellung, einerseits erste Ergebnisse zur Anwendbarkeit dieser Reinigungstechnologie

im Feld der Restaurierung zu erbringen und andererseits Erkenntnisse zur konstruktiven Gestaltung einer für diesen Zweck geeigneten Apparatur zu entwickeln, wurde erreicht.

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass mit dem hier vorgestellten Verfahren Metalloberflächen von Korrosionserscheinungen und anhaftenden Verwitterungsschichten befreit werden können. Durch gezielte Auswahl des Strahlmittels und der Strahlparameter, kann der Reinigungsfortschritt und das Reinigungsergebnis gezielt ausgewählt und beeinflusst werden. Das Verfahren ist besonders gut geeignet, flache Oberflächenbereiche zu reinigen. Es konnte aber auch gezeigt werden, dass es ebenso an strukturierten, echt dreidimensionalen Strukturen und Oberflächen-Topographien angewendet werden kann. In diesem Fall werden konstruktive Verbesserungen des apparativen Aufbaus und ein Training der Anwender deutliche Verbesserungen in der Handhabbarkeit sowie auch in der Einheitlichkeit des final erzielbaren Erscheinungsbildes ermöglichen. Gleiches gilt für die Bearbeitung von Metall-Holz-Verbänden, die in historischen Objekten an vielen Stellen vorkommen können. Gegenstand weiterer Untersuchungen muss hier vor allem die Entwicklung und der Test geeigneter Maskierungsmaterialien sein, um die Holzoberflächen vor der Einwirkung des Strahlmittels sicher zu schützen.

Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit im Projekt wurde ein Workshop durchgeführt, um in das Projekt einzuführen, die Reinigungsmethode vorzustellen und die restauratorisch-konservatorischen Anforderungen und Wünsche zu diskutieren. Teilgenommen haben Restauratoren aus den verschiedenen Sammlungen der SKD und aus anderen Museen der Stadt Dresden. Erste Ergebnisse aus dem Projekt wurden in einer Fachzeitschrift veröffentlicht (mo Magazin für Oberflächentechnik, 30.11.2023, Ottobrunn, S. 10-13). Weiterhin werden Projektergebnisse in Lehrveranstaltungen in der Ausbildung von Restauratoren an der HTW Berlin und in Weiterbildungsveranstaltungen zur Industriellen Oberflächenreinigung verwendet und vorgestellt. Geplant sind die Durchführung eines weiteren Workshops für Restauratoren, in dem die Ergebnisse zusammengefasst vorgestellt und die Reinigungsanlage demonstriert werden sollen und die Veröffentlichung der Projektergebnisse in einem längeren Artikel in einer Fachzeitschrift für Restauratoren und Denkmalpfleger.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Projekt erfolgreich durchgeführt wurde. Die Eignung des Vakuum-Saugstrahlverfahrens für die Reinigung von Metalloberflächen und die materialschonende Entfernung von Korrosions- und Verwitterungsschichten konnte nachgewiesen werden. Schon mit einer einfachen Apparatur, die für die Entfernung von Farbschichten auf Stein konzipiert ist, waren Reinigungserfolge in den Anwendungsfällen des Projektes möglich. Eine deutliche Verbesserung der Handhabbarkeit im praktischen Einsatz und der erzielbaren Ergebnisse sind durch konstruktive und technologische Verbesserungen zu erzielen.

Nach dem Nachweis der prinzipiellen Eignung des Verfahrens für die restauratorische Anwendung ist zu empfehlen, in einem Folgeprojekt die Technologie und die Apparatur zu verbessern und weiter zu entwickeln. Zahlreiche Verbesserungsmöglichkeiten und Anforderungen an eine Neukonstruktion wurden bereits in diesem Projekt gesammelt. Eine mögliche Fortsetzung des Projektes war bereits im

ursprünglichen Förderantrag beschrieben, um letztendlich eine geeignete Apparatur für die praktische Anwendung beim Erhalt von Objekten des kulturellen Erbes zu entwickeln und ihre Einsatzmöglichkeiten zu validieren.

Danksagung

Die Projektpartner, das Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP, Dresden und die Staatlichen Kunstsammlungen Dresden (SKD), bedanken sich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die großzügige Förderung dieses Forschungsvorhabens unter dem Förderkennzeichen 37875/01-45. Besonders bedanken sich die Partner bei Frau Constanze Fuhrmann für die zahlreichen Diskussionen und wertvollen Hinweise und Anregungen, die wesentlich zur Schärfung der Projektidee und den Ergebnisfortschritten beigetragen haben. Wesentlichen Anteil am Gelingen des Projektes haben Toni Lorenz (z.Zt. Master-Student an der FH Potsdam), Maria Willert (Restauratorin, SKD) und Ludwig Deckert (FEP) sowie die Kollegen des Fraunhofer IWS mit ihren Ideen zur HSI-Analyse und die Restauratoren des MPS mit ihrer Beratung zu den restauratorischen Belangen.