

Eisengarn und Stahlrohr

Untersuchungen am B 35 von Marcel Breuer

Kerstin Heitmann

Einem Stahlrohrmöbel als Alltagsgegenstand sind die Gebrauchsspuren oftmals deutlich anzusehen. Besonders Modelle, bei denen das Stahlrohrgestell mit einer textilen Bespannung kombiniert ist, weisen charakteristische Alterungsspuren auf. An den Stahlrohrelementen, welche vom Eisengarngewebe abgedeckt werden, kommt es zu starken Korrosionsprozessen.

Eisengarn ist ein Material, welches in der Fachliteratur bisher nahezu unbekannt blieb. Marcel Breuer nutzte Eisengarngewebe als Sitzfläche für seine Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelten Stahlrohrstühle. Am Beispiel des Freischwingers B 35 wurden die Materialien Eisengarn und Stahlrohr mit Hilfe naturwissenschaftlicher Untersuchungsmethoden genauer bestimmt und die Korrosionsprozesse ermittelt.

Die Versuchsreihen zum Entfernen der Korrosionsprodukte konzentrieren sich primär auf die Reinigung des Eisengarngewebes. Hierfür wurden die Komplexbildner Na₂-EDTA¹, DTPA², H BED³ sowie Oxalsäure getestet. Testreihen zur Trockenreinigung zeigten außerdem, dass sich die Korrosionsprodukte im Feinstrahlverfahren deutlich reduzieren lassen. Die Freilegung der korrodierten Stahlrohrelemente erfolgte mittels Laser.

,Eisengarn' and tubular steel

An examination of Marcel Breuer's B35

As an everyday object tubular steel chairs often show clear traces of wear. These characteristic signs of ageing are particularly evident on models where tubular steel and fabric upholstery are combined. 'Eisengarn' or 'iron yarn' fabric (a sturdy paraffin treated cotton) is a material nearly unknown in technical literature. Marcel Breuer employed it to form the seat and back of the tubular steel chairs he designed at the beginning of the 20th century. Scientific analysis was carried out on the „Eisengarn“ and tubular steel used to manufacture his B 35 lounge chair to define the material properties and identify corrosion processes. To remove the corrosion several tests of various dry and wet cleaning methods were developed including the complexing agents Na₂-EDTA, DTPA, H BED and oxalic acid. The test series showed that dry cleaning using a microbeam in combination with wet cleaning with an oxalic acid could significantly reduce the corrosion products. Laser cleaning was employed to remove the corrosion of the tubular steel.

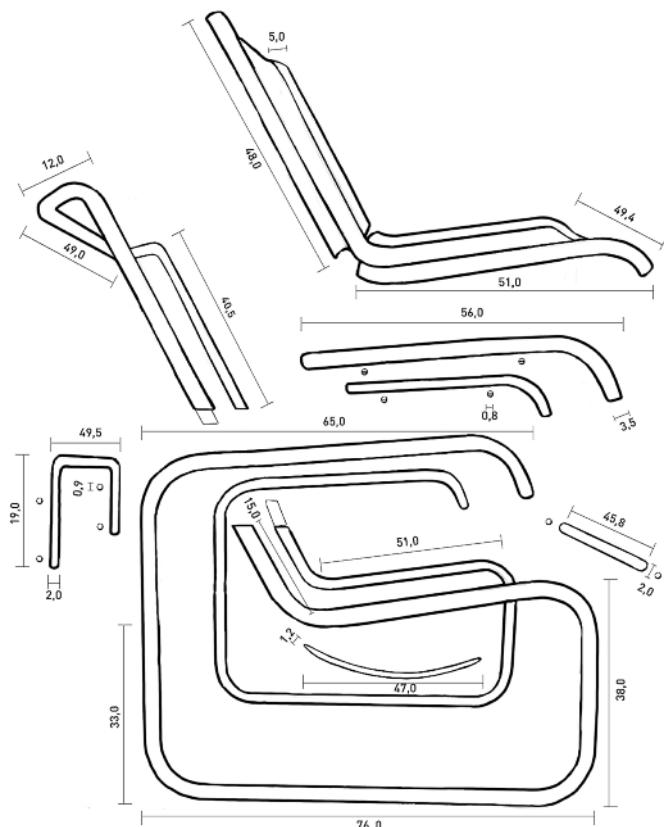
Der Stahlrohrstuhl B 35

Stahlrohrmöbel sind seit ihrer Erfindung Anfang des 20. Jahrhunderts ein Symbol des modernen Lebens und zählen heute zu den bekanntesten Möbeln der Bauhaus-Zeit.

Beispielhaft für Stühle dieser Art wurde ein frei schwingender Stahlrohrstuhl B 35 des Bauhaus-Schülers Marcel Breuer im Rahmen einer Masterarbeit untersucht. Er befindet sich unter der Inventarnummer OV 187 als Dauerleihgabe der Overstolzengesellschaft in der Sammlung des Museums für Angewandte Kunst Köln (MAKK) (Abb. 1).

Der Stuhl, Modell B 35, wurde von der Firma Gebrüder Thonet AG ab 1928/29 in Serie produziert. Da für industriell gefertigte Alltagsgegenstände oftmals nur unzureichende Datierungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen, kann auch hier nur eine ungefähre zeitliche Einordnung vorgenommen werden. Das vorliegende Modell zeigt einige Merkmale, welche auf die besondere Funktion als Prototyp hinweisen.

Der B 35 ist als Fortsetzung der ersten Entwürfe Breuers zu sehen. Das Gestell folgt einer durchgehend geschwungenen Linie. Die Stahlrohre verlaufen von der Rückenlehne zur Sitzfläche, bilden darunter die tragenden Kufen und laufen als Armlehnen aus. Somit schwingen Sitzfläche und Armlehnen unabhängig voneinander. Die Textilbespannung verbindet Sitzbereich und Rückenlehne zu einer durchge-





1
Stahlrohrstuhl B 35, Gesamtaufnahme, Inv. Nr. OV 187

henden Fläche. Die technische Zeichnung gibt einen Überblick zu den einzelnen Stuhlelementen (Abb. 2).

Die Bespannung aus Eisengarngewebe

Die Bezeichnung Eisengarngewebe⁴ könnte fälschlicherweise den Eindruck erwecken, dass es sich um ein textiles Material mit Metallbestandteil handelt. Es handelt sich jedoch um ein appretiertes und gewachstes, besonders festes, glänzendes und strapazierfähiges Gewebe aus stark verzwirnten Baumwollfäden. Der Terminus Eisengarn ist also nicht technisch zu verstehen, sondern weist in Analogie auf den Glanz und die Stabilität des Materials hin. 1925 konnte die Bauhaus-Weberin Margaretha Reichardt mit diesem Ausgangsmaterial die Idee Breuers von Robustheit und matt glänzender Ästhetik umset-

zen.⁵ Eisengarn ist als solches nicht neu. Hinweise aus der textiltechnischen Fachliteratur, historischen Lexika sowie Patentschriften beschreiben die Nutzung dieses Materials für Gebrauchstextilien ab Ende des 19. Jahrhunderts.⁶ Die Neuheit des bei Breuers Stuhl verwendeten Stoffes besteht in seiner besonders dichten und damit stabilen Gewebebindung. Im Gegensatz zu anderen technischen Textilien, welche am Bauhaus entwickelt und bald schon über Lizenzvergaben von unabhängigen Firmen produziert wurden, ist dies für die Eisengarngewebe in den ersten Jahren der Produktion nicht bekannt. Hergestellt wurden die Gewebe anfangs in den Farben Rostrot, Schwarz, Grau und später auch in Orange, Blau und Gelb.⁷ Zum Färben von Eisengarn fanden dabei meist die wenig farbechten Direktfarbstoffe Verwendung.⁸ Ab den 1950er Jahren bis 2014 wurden die Eisengarngewebe dann in einer lizenzierten Version speziell für Bauhausmöbel hergestellt.⁹

Gewebeanalyse

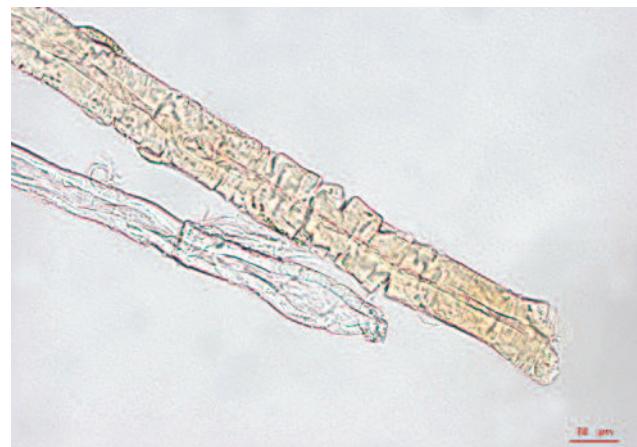
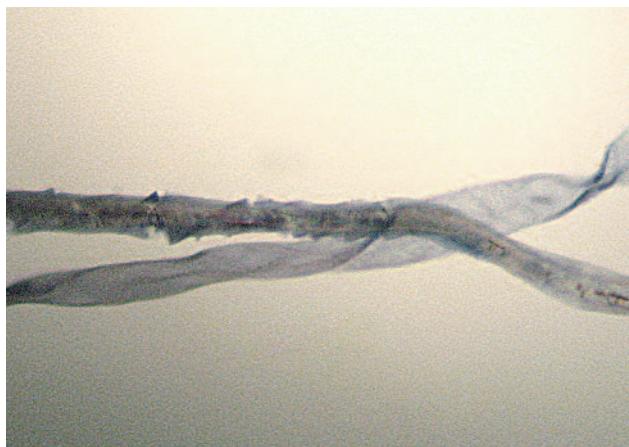
Die Untersuchungen des Gewebes fanden optisch und mit Hilfe eines digitalen Auflichtmikroskops statt. Außerdem wurde eine Faseranalyse am Durchlichtmikroskop und am Rasterelektronenmikroskop mit energiedispersiver Röntgenanalyse (REM/EDX) durchgeführt.

Das Gewebe ist 103,0 cm lang und ca. 50,0 cm breit. Da es sich bei der Ober- und Unterkante des Gewebes um die Webkanten handelt, liegt eine Webbreite entsprechend der Länge des Stuhlbezuges von 103,0 cm vor. Webanfang und Webabschluss befinden sich in den seitlich genähten Tunneln, welche mit einer doppelten Nähmaschinennaht geschlossen sind. Die Stuhlbespannung ist in Gleichgratkörper 2/2 gewebt, wobei die Kettfadendichte mit 45–50 F/cm außergewöhnlich hoch ist und somit die Geweboberfläche hauptsächlich durch die Kette¹⁰ bestimmt wird.

Faseruntersuchung

Untersuchungen am Durchlichtmikroskop lassen anhand von Einzelfaserproben aus Kett- und Schussfäden nicht nur Rückschlüsse auf das Material, sondern auch auf mögliche Aperturen sowie Hinweise auf den Grad der Schädigung zu. In der Längsansicht zeichnet sich die Faserprobe durch ihre charakteristische Bandform mit helixartigen Überschlagungen aus. Die Oberfläche ist leicht fibrilliert, und der Querschnitt weist die nierenförmige Krümmung nichtmerzerisierter Baumwolle auf. Die durchschnittliche Faserbreite liegt bei 20 µm.

Mittels Reagenzien zum Anfärben lassen sich helle, wenig gefärbte Fasern näher charakterisieren. Die Anfärbereaktion unter Zugabe von Chlorzinkjod zeigte die typische Blaufärbung von Cellulosefasern. Zudem löste sich an den Proben des Kettfadens die Oberfläche teilweise schuppenartig ab.



3

Faserprobe, Kettfaden in Chlorzinkjod, blaue Färbung der Faser, Oberfläche löst sich schuppenartig ab, Durchlichtmikroskop

4

Faserprobe, Kettfaden in Cuoxam, Faser (hellblau) quillt gleichmäßig und löst sich langsam auf, dünne Schicht bleibt als Rückstand, Durchlichtmikroskop

5

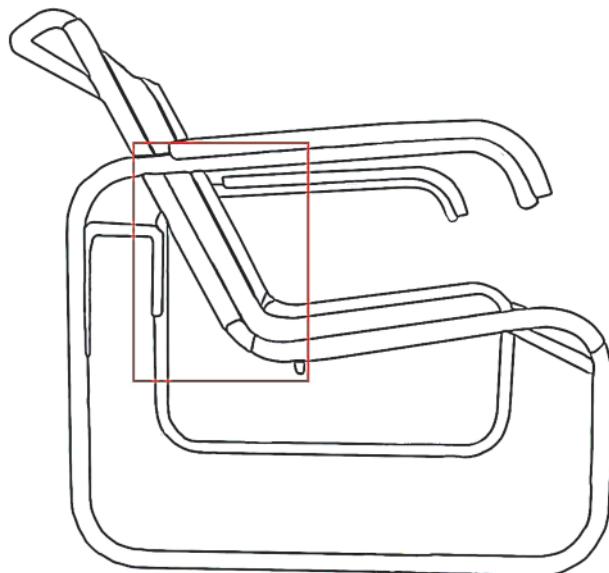
Faserprobe, Laugenquelltest, obere Faser mit Korrosionsprodukten, viele Kerben bedeuten starke Schädigung, untere Faser ohne Korrosion, geringe Schädigung, Durchlichtmikroskop

6

Faserprobe B 35, kleine Stärkekörner, Reisstärke (?), Durchlichtmikroskop



7
Schraubverbindung der hinteren Querstange mit linienförmiger Markierung



8
Skizze zur Verortung der Röntgenaufnahme



9
Das Röntgenbild der Rückenlehne zeigt die Position der Steckmuffen ohne Schraubverbindung

den konnten. Das Spektrum deutet auf eine Mischung aus unterschiedlichen Paraffinkomponenten hin.¹³

Dieser Prozess spricht für eine zusätzliche Beschichtung auf den Fasern, bei der es sich beispielsweise um ein Wachs oder um eine Stärkeappretur handeln könnte (Abb. 3).

In Cuoxam, einem Reagenz zur Löslichkeit, quoll die Faserprobe, im Gegensatz zur typischen ballon- oder tonnenförmigen Quellreaktion von Cellulosefasern, eher gleichmäßig und löste sich dann langsam auf. Es verbleibt ebenfalls eine dünne wachsartige Schicht als Rückstand. Das gleichmäßige Quellen zeigt, dass die Faseroberfläche bereits teilweise abgebaut ist. Die Cuticula ist als äußere Schutzschicht der Faser nicht mehr vollständig erhalten, sodass die ca. 0,1 µm dicke Primärwand der Cellulosefaser durchlässig für Reagenzien wird und Abbauprozesse verstärkt ablaufen können (Abb. 4). Ein Laugenquelltest¹¹ bestätigte die Vermutung, dass insbesondere in den mit Korrosionsprodukten belegten Bereichen ein stark fortgeschrittener Schädigungsgrad vorliegt (Abb. 5). Spuren einer Stärkebeschichtung mit geringer Korngröße deuten auf eine Appretur mittels Reisstärke hin. Das durchlichtmikroskopische Bild zeigte außerdem, dass die Appretur bereits zu großen Teilen abgebaut ist (Abb. 6). Eine Untersuchung mittels Fourier-Transform-Infrarot (FTIR)-Spektroskopie lieferte Erkenntnisse zur Wachsbeschichtung. Die benötigte Probemenge war jedoch so groß, dass ausschließlich Vergleichsproben¹² aus Eisengarn untersucht wer-

Das Stahlrohrgestell

Der Stuhl besteht aus zwei Teilstücken, dem unteren Stuhlgestell und der Rückenlehne. Zwischen den Kufen des Stuhlgestells befindet sich auf der Vorder- und auf der Rückseite jeweils eine Querstange, die mit unversenkten Sechskantkopfschrauben fixiert ist (Abb. 7). Der Spannbügel unterhalb der Sitzfläche ist leicht gebogen, läuft an beiden Enden spitz zu und wird unter leichtem Druck in die dafür vorgesehenen Löcher eingeschoben. Die Auflagen der Armlehnenden wurden vermutlich aus Buchenholz gefertigt. Sie werden auf der Unterseite jeweils von zwei Schlitzkopfschrauben gehalten. Für die Konstruktion des Stuhlgestells musste es, aus materialtechnischen Gründen, eine zusätzliche Rohrverbindung geben, die, von außen nicht sichtbar, unterhalb des Eisengarngewebes liegt. Das Röntgenbild zeigt die Position dieser Verbindung auf Höhe der Rückenlehnenmitte.¹⁴ Auf beiden Seiten ist eine Steckhülse, eine innenliegende Muffenverbindung, vorhanden. Die runden Aussparungen enthielten keine Schrauben oder Splinte zur Fixierung, wodurch die spätere Demontage deutlich vereinfacht wurde (Abb. 8, 9). Mittels Röntgenfluoreszenz (RFA)-Untersuchung ließ sich der Metallüberzug auf dem Stahl identifizieren.¹⁵ Der erste Messpunkt befindet sich an der hinteren Armlehne des Stuhlge-

stells. Im Rahmen der Messgenauigkeit der angewandten Methode liegt das Ergebnis bei ca. 66 % Nickel, 25 % Eisen und 2 % Chrom. Die zweite Messung erfolgte am unteren Spannbügel. Entsprechend der ersten Messung liegen ca. 52 % Nickel, 35 % Eisen, 2 % Chrom und zusätzlich 1 % Kupfer vor.¹⁶ Es handelt sich demnach um eine Variante der Verchromung, welche, anders als bei den frühen vernickelten Objekten Breuers, einen deutlich stabileren Oberflächenschutz bietet.

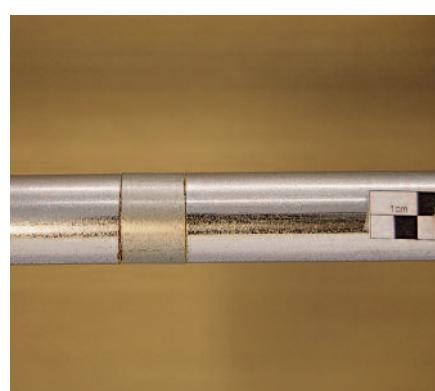
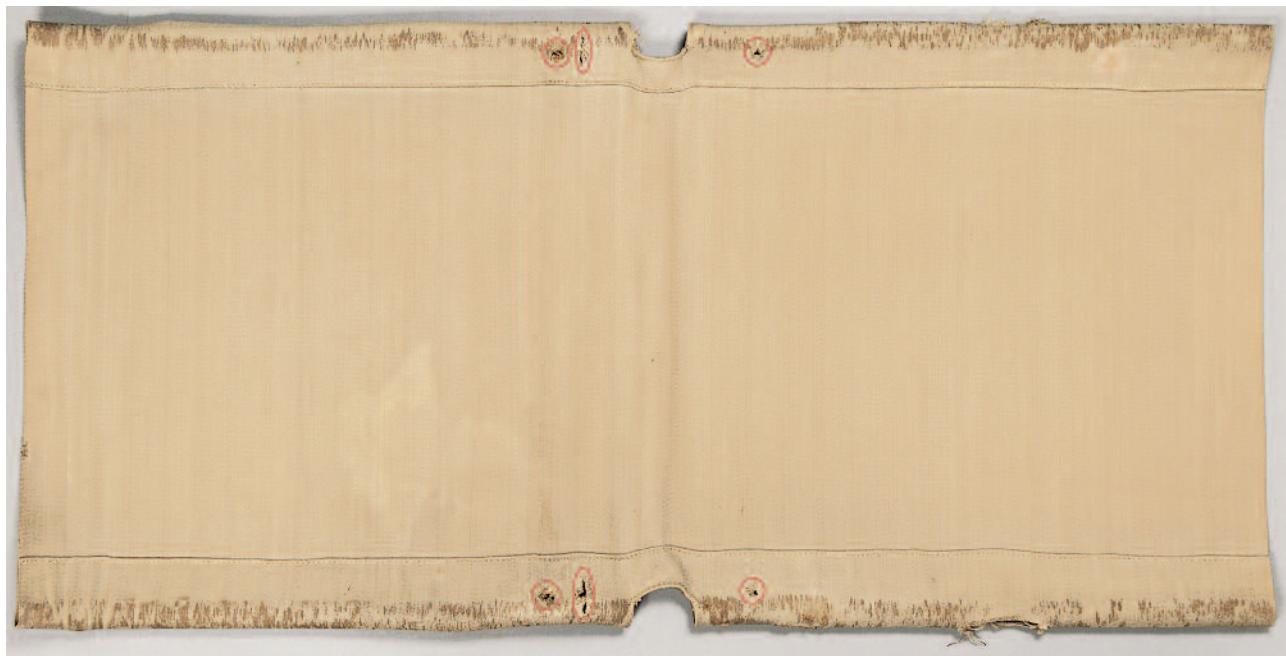
Erkennungsmerkmale eines Prototyps

An dem vorliegenden Stuhlmodell finden sich besondere Merkmale, welche darauf hindeuten, dass es sich um einen seltenen Prototyp handelt, welcher als Muster für die industrielle Produktion genutzt wurde.

Auf der Rückseite der Stoffbespannung sind entlang des geätzten Tunnels insgesamt sechs Einschnitte in runder beziehungsweise länglicher Form vorhanden. Jeweils zwei runde Aussparungen liegen sich rechts und links neben der Öffnung

der Tunnelnaht gegenüber. Zwischen ihnen befindet sich jeweils ein länglicher Einschnitt, dessen Kanten händisch, mit Hilfe eines Knopflochstiches und doppelt geführtem Faden, versäubert worden sind (Abb. 10). Für den Stuhl haben nur zwei der runden Löcher eine technische Bedeutung. Es handelt sich um die Aussparung, durch welche die Spannstange auf der Stuhlunterseite geführt wird. Die übrigen Löcher liegen ohne Funktion wenige Zentimeter versetzt (Abb. 11). Es kann also vermutet werden, dass es Merkmale eines Versuchsmodells sind, an dem die korrekte Position der Aussparungen erst gefunden werden musste. Eine Zweitverwendung des Bezugsstoffes, wie man sie häufiger an Stühlen findet, kann hier ausgeschlossen werden, da die originalen Nähte vollständig erhalten sind.

Ein weiteres Merkmal sind mehrere linienförmige Markierungen am Stahlrohr, die vermutlich auf die Position von Schrauben hinweisen (Abb. 7). Außerdem befindet sich mittig in der hinteren Querstange ein schmaler Metalleinsatz¹⁷. Die Querstange, welche die Rohre der Rückenlehne in ihrem Abstand zueinander fixiert, wurde mit dem eingesetzten Element sehr wahrscheinlich verbreitert (Abb. 12).



10
Stuhlbewehrung, Rückseite, Vorzustand,
je drei gegenüberliegende Gewebeein-
schnitte rot markiert, rundes Lochpaar
links für die Aussparungen für den unteren
Spannbügel

11
Länglicher Einschnitt mit Knopflochstich
eingefasst, darunter starker korrodierte
Aussparung für Spannstange

12
Metalleinsatz mittig der hinteren
Querstange



13

Kartierung des Zustands und der besonderen Merkmale



14

Starke Korrosion, blasenartige Abhebung der Verchromung



15

Gewebeoberfläche, Korrosionsprodukte in den Gewebezwi-schenräumen, Fasern durch Korrosion braun gefärbt, digitales Auflichtmikroskop

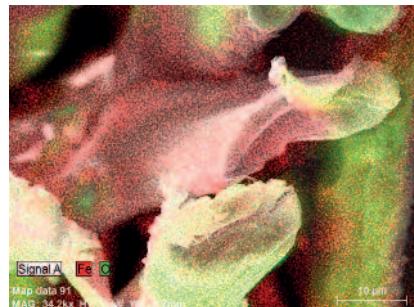
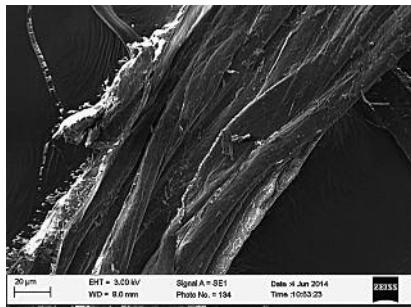


Um die Bedeutung dieser Merkmale besser einschätzen zu können, wurden daraufhin vergleichbare Stühle aus unterschiedlichen Sammlungen untersucht. Die Auswertungen von insgesamt 18 Stahlrohrstühlen ergaben, dass die linienförmigen Markierungen am Stahlrohr auch an einigen der Vergleichsstühle vorhanden sind, jedoch nicht, wie bei dem vorliegenden Modell, symmetrisch an Stellen, welche die Position einer Schraubverbindung markieren. Zusätzliche Ausparungen im Gewebe finden sich nur an einem der untersuchten Stühle, dessen Tunnelnaht jedoch Abdrücke früherer Nähte zeigt. Das Gewebe wurde also in der Vergangenheit aufgetrennt, anschließend neu montiert und ist, aufgrund der nachträglichen Veränderung, nicht als Prototyp zu werten. Die hintere Querstange war an keinem der Vergleichsstühle durchtrennt und mit einem zusätzlichen Metalleinsatz modifiziert. Somit spricht die Kombination aus allen Merkmalen bei diesem Modell für die Funktion als Prototyp für die serielle

Produktion, an dem die einzelnen Stahlrohrelemente und das Eisengarngewebe in einem Entwicklungsprozess verändert und angepasst wurden.

Zustand

Als materialkombiniertes Objekt, bei dem die textile Bespannung in direktem Kontakt zum Stahlrohr liegt, kommt es zu besonders starken Korrosionsprozessen und Abbaureaktionen.¹⁸ Dieses Schadensbild tritt nicht nur an dem beschriebenen Modell auf, sondern ist auch an einer Vielzahl an Vergleichsobjekten als typischer Alterungszustand zu finden. Wie in der Kartierung (Abb. 13) in Grün dargestellt, bildete sich die Korrosion primär in den vom Eisengarngewebe abgedeckten Bereichen, die durch die Nutzung insbesondere mechanisch beansprucht wurden. Reibt das Eisengarngewe-



16
Detail, Längsansicht Kettfäden,
Faseroberfläche uneben und
durch Appretur verklebt, REM

17
EDX-Analyse, Kettfäden, Mapping
mit qualitativem Scan, sehr
gleichmäßige Eisenverteilung auf
Faseroberfläche

be an den tunnelförmig genähten Außenkanten des Gewebes über die Chromoberfläche, wird der Oberflächenschutz des Stahlrohrs beschädigt und es bilden sich Fehlstellen in der Verchromung. Die Folge ist ein Materialabbau des Eisens in Form von Korrosion, wobei die Volumenzunahme der Korrosionsprodukte zu einem blasenartigen Abheben der Verchromung führt und die Korrosion sich unterhalb des metallischen Überzuges fortsetzt (Abb. 14). Beginnende Korrosionsprozesse werden bei erhöhter Luftfeuchtigkeit außerdem durch das Gewebe, wie durch eine Feuchtekompresse, beschleunigt. Die Korrosionsprodukte, vermutlich Eisenoxide, Eisenhydroxide und Eisen(III)-oxidhydrate, sind als dunkle Spuren auf der Textiloberfläche sichtbar. Sie wandern in einem weiteren Prozess in das Innere der Baumwollfasern. Dort katalysieren die Metallionen Oxidationsprozesse sowie Hydrolysereaktionen und beschleunigen die Abbaureaktionen an Cellulose.¹⁹ In den Gewebezwißchenräumen sammelte sich stellenweise eine dichte Schicht kristalliner Korrosionsprodukte. Die Migration der Eisenoxide in die Faser ist durch eine punktuelle braune Verfärbung der Faseroberfläche erkennbar (Abb. 15).

Weiterführende Untersuchungen am REM dienten der Lokalisierung der Korrosionsprodukte auf und innerhalb der Faser (Abb. 16). Um einen besseren Eindruck von der Eisenverteilung zu bekommen, wurde eine EDX-Messung mit Mapping und qualitativem Scan durchgeführt.²⁰ Abbildung 17 zeigt die Messung an den Kettfäden des Originalgewebes, wobei Sauerstoff grün und Eisen rot dargestellt ist. Die Eisenverteilung erstreckt sich gleichmäßig und fein über die gesamte Faser sowie den Faserquerschnitt. Die Eisenoxide konzentrieren sich demnach nicht auf die Faseroberfläche, sondern sind auch in der Faser fein verteilt.

Für ein mögliches Reinigungskonzept bedeutet das Ergebnis der EDX-Messung, dass die Eisenoxide, welche bereits durch die Faserwand in die Fibrillenzwischenräume migriert sind, nur mittels chemischer Nassreinigungsmethoden gelöst werden können. Da es sich bei dem Farbstoff vermutlich um einen teilweise wasserlöslichen Direktfarbstoff handelt, muss die Nassbehandlung jedoch so kurz wie möglich gehalten werden. Aufgrund des nur spärlichen Vorhandenseins früherer Restaurierungsberichte konnte keine bereits bewährte Restaurierungsmethode gefunden werden, mit der die Korrosionsprodukte schonend aus dem Eisengarngewebe zu lösen wären.

Ein Ansatz, die schädigende Faserquellung während der Nassreinigung besser zu kontrollieren, wurde von Wolbers formuliert und beinhaltet das gezielte Einstellen der Ionenkonzentration des Wassers mit Hilfe einer Leitfähigkeitsmessung.²¹ Wird die Faser mit ihrer spezifischen Ionenkonzentration in eine wässrige Lösung gebracht, stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Absorption und Desorption des Wassers ein. Es wird angenommen, dass in einer wässrigen Reinigungslösung mit einer Leitfähigkeit ähnlich der des sauberen Gewebes von ca. 100–200 µS/cm (Mikrosiemens) die Faser am wenigsten quellen würde, da sich die Ionenkonzentration auf beiden Seiten der Faserwand im Gleichgewicht befindet. Entmineralisiertes Wasser hingegen würde die Faser aufgrund von einwandernden Wassermolekülen stärker zum Quellen bringen. Das Risiko der Auslaugung zeigt, dass Ionen, die sich in der Faser, d.h. zwischen den Elementarfibrillen, befinden, aus der Faser herausgespült werden können. Die Zell-

Überlegungen zur Reinigung



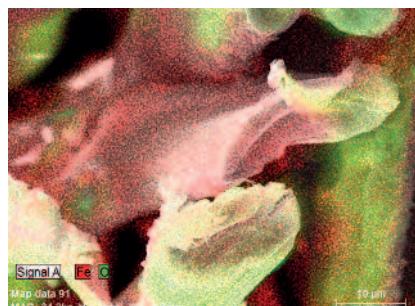
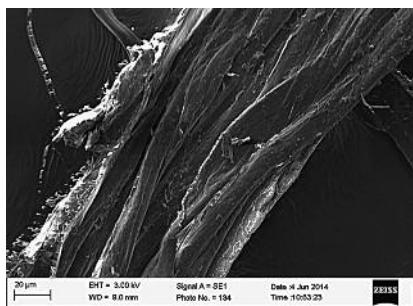
18
Arbeitsfoto während der Feinstrahlreinigung



19
Detail der Eisengarngewebeoberfläche, digitales Auflichtmikroskop,
Vorzustand



20
Detail der Eisengarngewebeoberfläche, digitales Auflichtmikroskop,
Nachzustand



16
Detail, Längsansicht Kettfäden,
Faseroberfläche uneben und
durch Appretur verklebt, REM

17
EDX-Analyse, Kettfäden, Mapping
mit qualitativem Scan, sehr
gleichmäßige Eisenverteilung auf
Faseroberfläche

be an den tunnelförmig genähten Außenkanten des Gewebes über die Chromoberfläche, wird der Oberflächenschutz des Stahlrohres beschädigt und es bilden sich Fehlstellen in der Verchromung. Die Folge ist ein Materialabbau des Eisens in Form von Korrosion, wobei die Volumenzunahme der Korrosionsprodukte zu einem blasenartigen Abheben der Verchromung führt und die Korrosion sich unterhalb des metallischen Überzuges fortsetzt (Abb. 14). Beginnende Korrosionsprozesse werden bei erhöhter Luftfeuchtigkeit außerdem durch das Gewebe, wie durch eine Feuchtekompresse, beschleunigt. Die Korrosionsprodukte, vermutlich Eisenoxide, Eisenhydroxide und Eisen(III)-oxidhydrate, sind als dunkle Spuren auf der Textiloberfläche sichtbar. Sie wandern in einem weiteren Prozess in das Innere der Baumwollfasern. Dort katalysieren die Metallionen Oxidationsprozesse sowie Hydrolysereaktionen und beschleunigen die Abbaureaktionen an Cellulose.¹⁹ In den Gewebezwißchenräumen sammelte sich stellenweise eine dichte Schicht kristalliner Korrosionsprodukte. Die Migration der Eisenoxide in die Faser ist durch eine punktuelle braune Verfärbung der Faseroberfläche erkennbar (Abb. 15). Weiterführende Untersuchungen am REM dienten der Lokalisierung der Korrosionsprodukte auf und innerhalb der Faser (Abb. 16). Um einen besseren Eindruck von der Eisenverteilung zu bekommen, wurde eine EDX-Messung mit Mapping und qualitativem Scan durchgeführt.²⁰ Abbildung 17 zeigt die Messung an den Kettfäden des Originalgewebes, wobei Sauerstoff grün und Eisen rot dargestellt ist. Die Eisenverteilung erstreckt sich gleichmäßig und fein über die gesamte Faser sowie den Faserquerschnitt. Die Eisenoxide konzentrieren sich demnach nicht auf die Faseroberfläche, sondern sind auch in der Faser fein verteilt.

Für ein mögliches Reinigungskonzept bedeutet das Ergebnis der EDX-Messung, dass die Eisenoxide, welche bereits durch die Faserwand in die Fibrillenzwischenräume migriert sind, nur mittels chemischer Nassreinigungsmethoden gelöst werden können. Da es sich bei dem Farbstoff vermutlich um einen teilweise wasserlöslichen Direktfarbstoff handelt, muss die Nassbehandlung jedoch so kurz wie möglich gehalten werden. Aufgrund des nur spärlichen Vorhandenseins früherer Restaurierungsberichte konnte keine bereits bewährte Restaurierungsmethode gefunden werden, mit der die Korrosionsprodukte schonend aus dem Eisengarngewebe zu lösen wären.

Ein Ansatz, die schädigende Faserquellung während der Nassreinigung besser zu kontrollieren, wurde von Wolbers formuliert und beinhaltet das gezielte Einstellen der Ionenkonzentration des Wassers mit Hilfe einer Leitfähigkeitsmessung.²¹ Wird die Faser mit ihrer spezifischen Ionenkonzentration in eine wässrige Lösung gebracht, stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Absorption und Desorption des Wassers ein. Es wird angenommen, dass in einer wässrigen Reinigungslösung mit einer Leitfähigkeit ähnlich der des sauberen Gewebes von ca. 100–200 µS/cm (Mikrosiemens) die Faser am wenigsten quellen würde, da sich die Ionenkonzentration auf beiden Seiten der Faserwand im Gleichgewicht befindet. Entmineralisiertes Wasser hingegen würde die Faser aufgrund von einwandernden Wassermolekülen stärker zum Quellen bringen. Das Risiko der Auslaugung zeigt, dass Ionen, die sich in der Faser, d.h. zwischen den Elementarfibrillen, befinden, aus der Faser herausgespült werden können. Die Zell-



18
Arbeitsfoto während der Feinstrahlreinigung



19
Detail der Eisengarngewebooberfläche, digitales Auflichtmikroskop, Vorzustand



20
Detail der Eisengarngewebooberfläche, digitales Auflichtmikroskop, Nachzustand

Überlegungen zur Reinigung

wand verhält sich dementsprechend durchlässig für Ionen. In einer Reinigungslösung mit einer höheren Ionenkonzentration würde die Faser laut Wolbers dagegen schrumpfen. Die Ionenkonzentration des Wassers beeinflusst die feuchtephysikalischen Eigenschaften der Faser insoweit, als dass eine niedrige Menge an Ionen zum Lösen fasereigener Salze führen kann und eine hohe Ionenkonzentration das Quellen der Faser verstärkt.²² Die Theorie geht davon aus, dass das Einstellen der Leitfähigkeit der wässrigen Lösung auf die Leitfähigkeit des unverschmutzten Gewebes das Risiko negativer Faserveränderungen verringern kann. Während der Nassreinigungstests zeigte sich jedoch, dass die Leitfähigkeit einer Reinigungslösung mit Komplexbildner bei über 10 000 µS/cm liegt, wohingegen das unverschmutzte Gewebe eine Leitfähigkeit von 200–210 µS/cm besitzt.²³

Die chemische Nassreinigung bildet die einzige Möglichkeit zum Reduzieren der Korrosionsprodukte. Aufgrund der hohen Ionenkonzentration und dem damit verbundenen Quellen der Faser stellt diese Methode jedoch ein erhöhtes Risiko für bereits geschädigtes Fasermaterial dar.

Demontage und Trockenreinigung

Der Stahlrohrstuhl B 35 wurde aufgrund der fortgeschrittenen Korrosion aus der Dauerausstellung des MAKK entnommen, um Möglichkeiten zu finden, die Korrosionsprodukte weitestgehend zu entfernen. Ohne entsprechende Maßnahmen zur Reinigung würden die Abbaureaktionen an Metall und Textil weiter katalysiert. Um die innenliegende Korrosion zu erreichen, ist ein Auf trennen der originalen Nähte allerdings auszuschließen. Dies wäre als invasive Methode mit dem Verlust der Nähfäden verbunden.

Auf Grundlage der Röntgenuntersuchung bestand jedoch die Möglichkeit den Stuhl zu demontieren. In einem ersten Schritt musste die Rückenlehne vom unteren Stuhlgestell abgehoben werden. Aufgrund der korrodierten Muffen ließ sich die Steckverbindung nur sehr langsam lösen. Nachdem die obere Rückenlehne entfernt war, ließ sich auch das Eisengarngewebe langsam vom Stuhlgestell schieben. Anschließend wurde der nicht weiter fixierte untere Spannbügel herausgehoben und die vordere Querstange abgeschraubt.²⁴

In ausführlichen Reinigungstests an Vergleichsmaterial aus Eisengarn zeigte die Feinstrahlreinigung mittels Airbrush-

Technik und weichem Strahlmittel das beste Ergebnis. Die auf der Faseroberfläche locker bis pudrig aufliegenden Korrosionsprodukte konnten sichtbar werden, ohne das Fasergefüge aufzurauen oder mechanisch zu belasten. Die Reinigung an der Stuhlbespannung erfolgte mit Arbocel® bei 1,7 bar.²⁵ Die Düse am Ende des Griffstückes wurde bei einem variierenden Winkel 3–5 cm über der Gewebeoberfläche gehalten. Vor allem die Gewebezwischenräume erscheinen insgesamt sauberer und heller (Abb. 18–20).

Im Anschluss ist ein gründliches Absaugen des Strahlmittels notwendig. Sollten dennoch Arbocel®-Fasern in dem Fasergefüge des Eisengarns verbleiben, geht von ihnen keine Gefahr für das Originalgewebe aus, da es sich bei beiden Materialien um Cellulose handelt.

Vorversuche zur Nassreinigung

Die zentrale Frage der Nassreinigung lautete: Wie lässt sich das Gewebe so schonend wie möglich reinigen, ohne den wasserlöslichen Farbstoff zu lösen? Fest stand, dass eine Entfernung der Korrosionsprodukte nur mit Hilfe von Komplexbildner oder Säuren erfolgen kann und die Reinigungs dauer so kurz wie möglich gehalten werden sollte.

Zu den drei ausgewählten Komplexbildnern zählten neben dem in der Textilrestaurierung gängigen Na₂-EDTA auch DTPA und H BED, welche eine höhere Effektivität in der Bindung von Eisen besitzen und, im Gegensatz zu Na₂-EDTA, in leicht basischem Milieu angewendet werden können.²⁶

Da die Komplexbildner bei schwerlöslichen Eisenkorrosions verbindungen eine vergleichsweise lange Einwirkdauer benötigen, erfolgten Überlegungen zur Reinigung mit Oxalsäure.²⁷ Durch die Anwendung einer starken Säure lässt sich die Dauer der Nassbehandlung deutlich reduzieren.²⁸

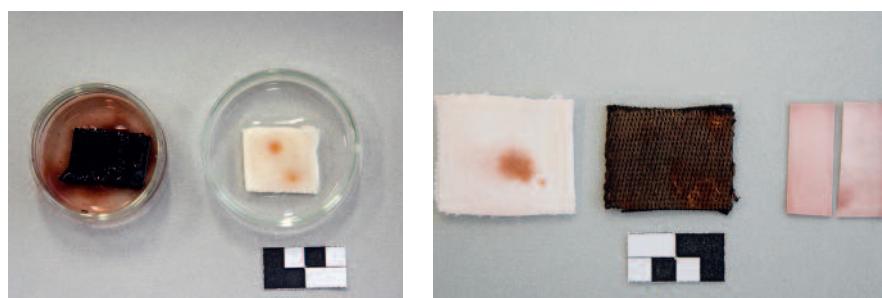
Als Probegewebe dienten gealterte und mit Korrosionsprodukten behandelte, schwarze Eisengarnzuschnitte²⁹, die in Aufbau und Verschmutzung dem Originalgewebe glichen. Der erste Versuch bestand in einer vollständigen Tränkung der Probegewebe mit der Reinigungslösung und einer anschließenden Trocknung zwischen Löschkarton. In einem zweiten Versuch fand eine partielle Reinigungsmethode mit Hilfe von Löschkartonkompressen statt. Die Versuchsdauer wurde jeweils auf 10 Minuten begrenzt. In Tab. 1 sind die jeweiligen Lösungen und ihre Reinigungswirkung zusammengefasst.

21

H BED-Komplex färbt die Reinigungslösung bei vollständiger Tränkung rot

22

H BED-Löschkarton-Komresse rot gefärbt, Korrosionsflecken nach der Reinigung weiterhin sichtbar



Komplexbildner	Reinigungseffekt	Bemerkung
Na ₂ -EDTA 0,1 molar + 10%ige NaOH-Lösung bis pH 7,5	-	Leitfähigkeit ca. 10 000 µS/cm Reinigungslösung leicht hellbraun gefärbt, Löschkarton leicht hellbraun gefärbt
DTPA 0,1 molar + 10%ige NaOH-Lösung bis pH 7,5	-	Leitfähigkeit ca. 20 000 µS/cm Reinigungslösung leicht gelblich gefärbt, Löschkarton leicht gelblich gefärbt
H BED 0,1 molar + 10%ige NaOH-Lösung bis pH 7,5	+	Leitfähigkeit ca. 20 000 µS/cm Reinigungslösung dunkelrot gefärbt, Löschkarton dunkelrot bis schwarz gefärbt
H BED 0,01 molar + 10%ige NaOH-Lösung bis pH 7,5	+	Reinigungslösung dunkelrot gefärbt, Löschkarton dunkelrot bis schwarz gefärbt
Oxalsäure 0,2 molar pH 1,1	++	Löschkarton leicht bräunlich gefärbt, nach 10 Minuten kann das Fe ²⁺ aus dem Gewebe herausgespült werden.
Oxalsäure 5%ig (= 0,55 molar) pH 0,9	++	Deutliche Entfernung der Korrosionsprodukte nach 5 Minuten, Reinigungslösung braun gefärbt, Löschkarton braun gefärbt
Oxalsäure 10%ig (= 1,11 molar) pH 0,7	+++	Leitfähigkeit ca. 2000 µS/cm, vollständige Entfernung der Korrosionsprodukte nach 2 Minuten, Reinigungslösung braun gefärbt, Löschkarton braun gefärbt keine Beeinträchtigung der Stabilität feststellbar
Referenzprobe, entmineralisiertes Wasser		Reinigungslösung leicht bräunlich gefärbt, Löschkarton erst bräunlich und nach langerer Einwirkzeit stellenweise schwarz gefärbt → Farbstoff löst sich

Tab. 1:
Ergebnisse der Nassreinigung mittels Komplexbildner



Diskussion der Ergebnisse

Anhand einer optischen Beurteilung der Reinigungsergebnisse zeigten die Komplexbildner Na₂-EDTA und DTPA innerhalb der kurzen Einwirkzeit keinen sichtbaren Reinigungseffekt. Auch eine Zugabe von Tensid oder Ethanol zur Modifikation des Eindringverhaltes der Reinigungslösungen in das Gewebe konnte den Löseprozess nicht verbessern. Wie in Abb. 21 zu sehen, färbt sich der H BED-Eisenkomplex während der Reinigung dunkelrot. Sobald eine Rotfärbung entsteht, ist der Eisenkomplex wasserlöslich und lässt sich ausspülen. (Abb. 21, 22) Durch den Spülvorgang wurden jedoch nicht nur die H BED-Komplexe entfernt, es löste sich auch ein Teil des Farbstoffes. Obwohl H BED also eine wirkungsvolle Reinigung bietet, eignet sich keiner der Komplexbildner für eine punktuelle und effektive Reinigung an der Stuhlbespannung, da der Prozess je nach Schichtdicke der Korrosionsprodukte mehrere Stunden in Anspruch nehmen würde. Anders verhält es sich bei der Reinigung mit Oxalsäure. Bereits eine 0,2 molare Lösung reicht aus, um die Eisenoxide anzulösen. Nach einer Behandlung mit 10%iger Oxalsäure konnten die Korrosionsprodukte innerhalb von 2 Minuten vollständig entfernt werden. Bedenkt man darüber hinaus, dass die Einstellung der Leitfähigkeit das Faserschädigungspotential während der Nassreinigung verringern und damit theoretisch das Herauslösen des Farbstoffes reduzieren kann, so liegt der Wert von Oxalsäure mit 2000 µS/cm deutlich näher an den 200 µS/cm des gereinigten Eisengarngewebes als die bis zu 20 000 µS/cm der Komplexbildner. Folgt man der Theorie, müssten die Fasern bei einer Oxalsäurereinigung also deutlich weniger quellen.

Die Vorversuche zeigten, dass eine partielle Reinigung der Korrosionsprodukte bei kurzer Einwirkdauer nur mit Hilfe einer starken Säure möglich ist, wobei die Gefahr einer hydrolytischen Spaltung der säureempfindlichen Cellulose besteht.

Versuche zur Entfernung von Eisenkorrosion in der Papierrestaurierung ergaben, dass die kurzzeitige Einwirkung einer starken Säure den durchschnittlichen Polymerisationsgrad und damit die Stabilität der Cellulose nicht verringert und daher keine weiteren Abbauprozesse auslöst. Gearbeitet wird meist mit einer 0,1 M-Lösung und einer Einwirkdauer von maximal 1 Minute. Anschließend muss das behandelte Objekt sofort mit Hilfe einer alkalischen Lösung neutralisiert werden.³⁰ Damit kann der Einsatz von starken Säuren auch für säureempfindliche Cellulose besser geeignet sein als die langwierige Behandlung mit einem Komplexbildner.³¹ Jedoch enthält Papier weitere Zusätze, wie Leimungsmittel und Füllstoffe, welche das Material möglicherweise gegenüber Abbauprozessen schützen.

Nassreinigung am Originalgewebe

Für die Versuche zur Nassreinigung am Originalgewebe wurde, aufgrund der kurzen Einwirkdauer und der guten Testergebnisse, die 10%ige Oxalsäure ausgewählt.

Da sich die Korrosionsprodukte an der Stuhlbespannung größtenteils auf der Innenseite des genähten Tunnels befinden, sollte die Reinigungslösung kontrolliert und punktuell von außen auf das Gewebe gegeben und direkt von innen abgesaugt werden. Hierfür wurde ein Plexiglasrohr entwickelt, welches die Reinigungslösung, ähnlich einer mobilen Niederdruckanlage, im Gewebetunnel auffing. Die Saugleitung ließ sich mittels Vakuumpumpe regulieren, und die Reinigungslösung wurde in eine Woulfesche Flasche geleitet (Abb. 23). Als vorbereitende Maßnahme erfolgte, wie auch an den Probegeweben der Testreihen, eine Messung des pH-Wertes sowie der Leitfähigkeit. Tab. 2 fasst die Messergebnisse zusammen.

Tab. 2:
Messung von pH-Wert und Leitfähigkeit

Probe	pH-Wert	Leitfähigkeit in µS/cm
Eisengarn B 35, außen	6,5–6,9	220–610
Eisengarn B 35, innen	4,8–6,7	370–710
Eisengarn B 35, ohne Korrosion	7,6	200–210
Oxalsäure, 10%ig	0,7	ca. 2000

Die Reinigungsversuche wurden an insgesamt zwei durch Korrosion rostrot verfärbten Bereichen im Eisengarngewebe getestet. Der Oxalsäure-Auftrag erfolgte mittels Pipette auf der Gewebeoberfläche. Im direkten Anschluss wurde die Flüssigkeit dann von der Innenseite durch das Plexiglasrohr abgesaugt. Nachdem ca. 1 ml Oxalsäure durch das Gewebe

gegeben wurden, folgte ein erster Spülvorgang mit entmineralisiertem Wasser. Bereits nach kurzzeitigem Spülen löste sich die Korrosion deutlich. Die Behandlung wurde einmal wiederholt. Die Dauer des Vorgangs betrug insgesamt 5 Minuten. Die Trockenphase, in der mit wechselnden Löschkartonstreifen die Restfeuchtigkeit von der Oberseite und von



24
Tunnelnaht, untere Kante vor der
Oxalsäure-Behandlung



25
Tunnelnaht, untere Kante nach der
Oxalsäure-Behandlung



26
Innenseite der Tunnelnaht mit rost-
roten Korrosionsprodukten nach
der Oxalsäure-Behandlung

der Innenseite abgenommen wurde, dauerte ca. 15 Minuten. Währenddessen wurde der pH-Wert kontrolliert, um eine ausreichende Neutralisierung sicherzustellen. Obwohl die Korrosionsprodukte auf der Gewebeoberseite sichtbar entfernt wurden, verblieben im Gewebeinneren weiterhin deutliche Rückstände an Eisenoxiden (Abb. 24–26). Außerdem kann an der Gewebeoberfläche eine leichte Aufhellung beobachtet werden, welche u. a. auf ein Herauslösen des Farbstoffes zurückzuführen ist. Aus diesem Grund konnte die Nassreinigung nicht fortgesetzt werden, da ein zu hohes Risiko bestand, Gewebe- und Faserschäden auszulösen. Eine Oxalsäure-Behandlung kann sich schädigend auf Cellulosefasern auswirken. Dieses Risiko wäre mit der Entfernung eines Großteiles der Korrosionsprodukte vertretbar gewesen. Eine vollständige Reinigung der Eisenoxide würde jedoch vermutlich mehrere Stunden dauern oder wäre nur in einem Reinigungsbad möglich, was aufgrund der Empfindlichkeit des Eisengarngewebes gegenüber Wasser nicht möglich ist.



27
Unterer Spannbügel mit markierter
Probefläche der Laserreinigung

Laserreinigung der Stahlrohre

Die Entfernung der Korrosionsprodukte auf der Metalloberfläche erfolgte mittels Laser. Für die Freilegung der Stahlrohre wurde in ersten Tests eine Laserreinigung am unteren Spannbügel des B 35 durchgeführt (Abb. 27). Die Oberfläche erscheint glänzend und die Chromoberfläche weitestgehend intakt, unter dem Auflichtmikroskop sind jedoch punktuell dunkle Korrosionsprodukte erkennbar (Abb. 28). Für die Reinigung stand das Lasergerät „Phoenix R10“ zur Verfügung:

Tab. 3:
Technische Angaben zur Laserreinigung

Gerät	Wellenlänge	Pulsfrequenz	Pulsdauer	Pulsenergie am Laser	Wirkfleck Ø max.
Phoenix R10, Glasfaser, Fa.: Lynton Lasers	1064 nm	max. 50 Hz	5-10 ns	max. 325 mJ	10 mm

Bei einer Pulsenergie am Objekt von 0,23–0,25 J/cm² konnten die Korrosionsprodukte vollständig entfernt werden, ohne die empfindliche Chromoberfläche zu beschädigen (Abb. 29).³² In Bereichen mit sehr starker Korrosionsschichtdicke war die Laserreinigung allerdings nicht ausreichend, und es bildeten sich nach der Reinigung partiell erneut Korrosionsprodukte. An diesen Stellen wurde abrasiv mit Stahldrahtbürsten nachgearbeitet, um die Eisenoxide vollständig zu entfernen.³³

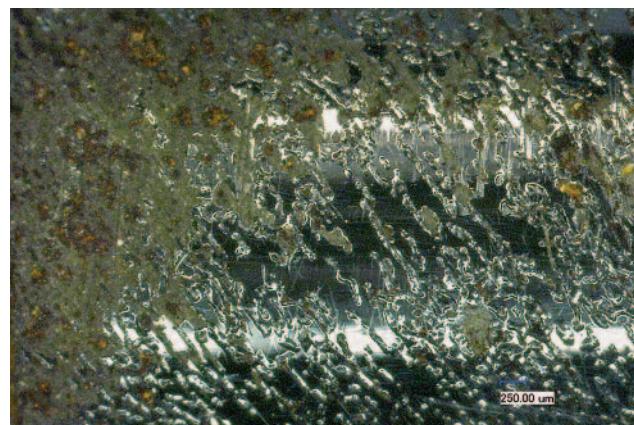
Als wichtige präventive Maßnahme erfolgte im Anschluss an die Laserreinigung der gesamtflächige Auftrag einer Schutz-

beschichtung der Stahloberfläche durch Cosmoloid H80³⁴ in Siedegrenzenbenzin 100–120 °C. Nach der Aushärtung wurde das mikrokristalline Wachs mit einem Baumwolltuch poliert. Die Anforderungen an eine Beschichtung der Stahlrohrelemente sind hoch, da der schützende Überzug einer mechanischen Belastung durch die erneute Montierung der einzelnen Rohrelemente und dem Aufziehen der Stuhlbespannung standhalten muss. Nur die vollkommen unversehrte Schutzschicht kann weitere Korrosionsprozesse sowie die Migration von Eisenoxiden in das Gewebe verhindern. Aus diesem Grund ist ein Forschungsprojekt mit weiterführenden Test-



28

Detail der Korrosion mit Fehlstellen in der Chromoberfläche, digitales Auflichtmikroskop



29

Laser-Probefeld, untere Hälfte mit einer Pulsennergie von 0,23–0,25 J/cm² gereinigt, digitales Auflichtmikroskop

reihen geplant, in dem Beschichtungsmöglichkeiten an mit Eisengarn bespannten Stahlrohren untersucht werden sollen, um die Stahlrohrstühle als bedeutende Zeugnisse der Moderne in ihrer Gesamtheit erhalten zu können.

Kerstin Heitmann M. A.

Düppelstraße 14–16

50679 Köln

textil@restaurierung-heitmann.de

Anmerkungen

- 1 Dinatrium-Ethyldiamintetraessigsäure ($\text{Na}_2\text{-EDTA}$)
- 2 Diethylentriaminpentaessigsäure (DTPA)
- 3 N,N'-Di(2-hydroxybenzyl)ethyldiamin-N,N'-diessigsäure Monohydrochlorid (H BED)
- 4 Eisengarn, Glanzgarn, engl.: Iron yarn, glacé yarn, polished yarn; franz.: Fil glacé; span.: Hilo glacé o Pulido
- 5 Freundliche mündliche Mitteilung von Axel Bruchhäuser, TECTA Bruchhäuser & Drescher OHG, Lauenförde; WORTMANN WELTKE 1993, S. 58; REICHARDT 1994, S. 16–17
- 6 TEXTILKUNDE LEXIKON; SCHREIBER 1927, S. 15–33
- 7 SIEBENBRODT/SCHÖBE 2009, S. 139; DROSTE/LUDEWIG 1998, S. 205
- 8 SCHREIBER 1927, S. 16
- 9 Von der Firma TECTA Bruchhäuser & Drescher OHG
- 10 Gewebeanalyse nach CIETA (Centre Internationale d' Etudes des Textiles Anciens), Kette: Verhältnis: 1 Kettsystem, Material: Baumwolle stark 3z/S gedreht beige, Dichte: 45–50 F/cm, Bemerkung: Die Kettfäden wurden beschichtet, Schuss: Verhältnis: 1 Schusssystem, Material: Baumwolle 2z/2s/S gedreht beige, Dichte: 9–10 F/cm, Bemerkung: Die Schussfäden sind unbeschichtet und weicher, Schusseintrag mit doppeltem Faden
- 11 Laugenquelltest nach Koch, auch Pilzkopfreaktion genannt, Faser wird mit gerader Schnittkante in 15%ige Natronlauge gegeben. Je höher die chemische Faserschädigung, desto eher quillt die Faser in die Breite und zeigt Brüche und Kerben. MAHALL 1990, S. 43 ff.
- 12 Es handelt sich um ein gealtertes Eisengarngewebe der Firma TECTA Bruchhäuser & Drescher OHG, die sich laut Herrn Bruchhäuser in der Produktion an die von Breuer festgelegten Herstellungsverfahren hält.
- 13 Die Untersuchungen wurden von Frau Prof. Dr. Elisabeth Jägers, Mikroanalytisches Labor Dr. Jägers GbR, Bornheim, durchgeführt.
- 14 Die Untersuchungen wurden von Herrn Prof. Hans Portsteffen mit dem Gerätetyp „Seiffert Eresco 150“, Scanner „CIX-RAY CRX-Pro“ mit 100 Kv durchgeführt; CICS, TH Köln
- 15 Die Messungen wurden von Luigi Di Stefano mit dem RFA-Gerät XL3t980-HE der Firma Thermo Scientific Niton® durchgeführt; CICS, TH Köln.
- 16 Die Messwerte von ca. 50–60 % Nickel, 25–35 % Eisen, 2,0–2,5 % Chrom und 1,3 % Kupfer lassen keine genauen Aussagen zu quantitativen Ergebnissen zu. Die klassische Schichtdicke einer Verchromung von ca. 25 µm Nickel und 0,3 µm Chrom kann mit dieser Messmethode in ihrem prozentualen Verhältnis nicht wiedergegeben werden.
- 17 Die RFA-Messung ergab ca. 47 % Eisen, 45 % Nickel und 2 % Kupfer. Damit liegt ein charakteristischer Messwert einer Vernickelung vor. Es könnte sich demnach um eine frühe Maßnahme zur Korrektur der Querstange handeln, da die Vernickelung zu dieser Zeit bereits durch die stabilere Verchromung abgelöst wurde.
- 18 In der Zustandsbeschreibung kann an dieser Stelle ausschließlich auf das wichtigste Schadensbild, die Korrosionsprozesse, eingegangen werden. Die übrigen Schäden sind in der Kartierung markiert.
- 19 BOERSMA 2007, S. 21 ff.
- 20 Die Untersuchungen wurden von Frau Dr. Anne Sicken, CICS, TH Köln, durchgeführt.
- 21 New Methods of Cleaning Textiles with Richard Wolbers, Workshop in Berlin 2013
- 22 TIMAR-BALAZSY/EASTOP 1998, S. 33–35 und S. 275
- 23 pH-Wert und Leitfähigkeit wurden mittels Agarose-Kompresen gemessen. Aktuelle Untersuchungen zeigten jedoch, dass die Messergebnisse mit Agarose nur zwischen pH 4,5 bis 6,5 zuverlässig sind. Im sauren und alkalischen Bereich können die Ergebnisse von anderen Messmethoden abweichen. HUGHES 2017, S. 62–66
- 24 Für die Unterstützung bei der Demontage danke ich Herrn Dipl.-Rest. Tobias Friedrich und Herrn Jürgen Schablitzky, MAKK.
- 25 Arbocel®-Pulver BWW 40: Hochreine Cellulose mit einer Faserlänge von ca. 30–300 µm. Durch die eher runde Form ist Arbocel® im Vergleich zu anderem Strahlmittel nicht scharfkantig und daher auch für empfindliche Objekte geeignet. JAČEK 2013, S. 44–47
- 26 DTPA besitzt mit $\text{pK}_\text{D} \text{ Fe}^{3+}$: 27,9 eine etwas höhere Komplexbildungskonstante als $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ ($\text{pK}_\text{D} \text{ Fe}^{3+}$: 25,1). Der pK_D -Wert von H BED für Fe^{3+} liegt bei 39,68. Dieser Komplexbildner wird von Wolbers als besonders effektiv beschrieben und kann bis 12 pH eingesetzt werden.
- 27 In einem Forschungsprojekt des CCI von 2005–2014 zum Thema „Iron Stain Removal from Archaeological Composite Artifacts made of Wood and Iron“ wurde Oxalsäure 1%ig angesetzt (Gewichtsprozent). SELW-YN/SEASON TSE 2008, S. 61–73; CCI Untersuchungen 2004, Season Tse empfiehlt für die partielle Reinigung von Korrosionsprodukten die

- Anwendung von 5%iger Oxalsäure. Anschließend sollte die behandelte Fläche neutralisiert und ausreichend gespült werden.
- 28 Der pH-Wert sollte für eine effektive Reinigung unter pH 3 liegen. SÜSS 2003, S. 411–424
- 29 Für die Bereitstellung der Eisengarn-Probegewebe danke ich der Firma TECTA.
- 30 NIEHUS et al. 2012, S. 364
- 31 Freundliche mündliche Mitteilung von Prof. Dr. Robert Fuchs, CICS, TH Köln
- 32 Die auf das Objekt auftreffende Energiedichte berechnet sich aus der gemessenen Energie des Lasers in Watt/Impulsfrequenz in Hz/Fläche des Wirkflecks in cm².
- 33 Für die Umsetzung danke ich Herrn Dipl.-Rest. Tobias Friedrich, MAKK.
- 34 Cosmoloid H 80: Kohlenwasserstoffwachs, farblos, säurefrei

Literatur

- BOERSMA 2007: Foekje Boersma, Unravelling Textiles. A Handbook for the Preservation of Textile Collections. London 2007
- DROSTE/LUDEWIG 1998: Magdalena Droste und Manfred Ludewig, Das Bauhaus webt. Die Textilwerkstatt am Bauhaus. Berlin 1998
- HUGHES 2017: Amy Hughes, Measurement of surface pH of paper using agarose gel plugs: a feasibility study. In: GELS in the Conservation of Art, Hrsg. von L. V. Angelova, B. Ormsby, J. H. Townsend, R. Wolbers. London 2017, S. 62–66, JAČEK 2013: Bert Jaček, Das „weiche Feinstrahlen“. Ein neuer Ansatz zur Trockenreinigung von Papier und Pergament. In: Restauro 3/2013, S. 44–47
- MAHALL 1990: Karl Mahall, Qualitätsbeurteilung von Textilien: Schadensermittlung durch praktische Textilmikroskopie, Berlin 1990

- NIEHUS et al. 2012: Lena Niehus, Ute Henniges, Monika Horsky, Thomas Prohaska, Antje Potthas und Irene Brücke, Reducing the Risk of Hydrogen Peroxide Bleaching in Presence of Iron Ions in Paper. In: Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material 33/2012. Hrsg. von: Gerhard Banik, Irene Brücke, S. 355–394
- REICHARDT 1994: Margaretha Reichardt, Textilkunst. Ausstellungskatalog. Hrsg. von Angermuseum Erfurt. Erfurt 1994
- SCHREIBER 1927: Hans Schreiber, Die Fabrikation von Eisengarn und ihre Entwicklungsgeschichte. Wittenberg 1927
- SELWYN/SEASON TSE 2008: Lyndsie Selwyn und Season Tse, The Chemistry of Sodium Dithionite and Its Uses in Conservation. In: Reviews in Conservation 9/2008, S. 61–73
- SIEBENBRODT / SCHÖBE 2009: Michael Siebenbrodt, Lutz Schöbe, Bauhaus 1919–1933. Weimar-Dessau-Berlin. New York/Paris 2009
- SÜSS 2003: H. U. Süss, Bleaching. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Hrsg. von: M. Bohnet, C. J. Brinker, B. Cornils. 6th edition. Weinheim 2003, S. 411–424
- TIMAR-BALÁZSY/EASTOP 1998: Ágnes Tímár-Balázs und Dinah Eastop, Chemical Principles of Textile Conservation. Oxford 1998
- WORTMANN WELTGE 1993: Sigrid Wortmann Weltge, bauhaus-textilien. kunst und künstlerinnen der webwerkstatt. London 1993

Abbildungsnachweis

- Abb. 1–8, 10–15, 19–22 und 24–29: Kerstin Heitmann, M. A.
 Abb. 9: Prof. Hans Portsteffen, CICS, TH Köln
 Abb. 16 und 17: Dr. Anne Sicken, CICS, TH KÖLN
 Abb. 18 und 23: Isabel Klotz, M. A.