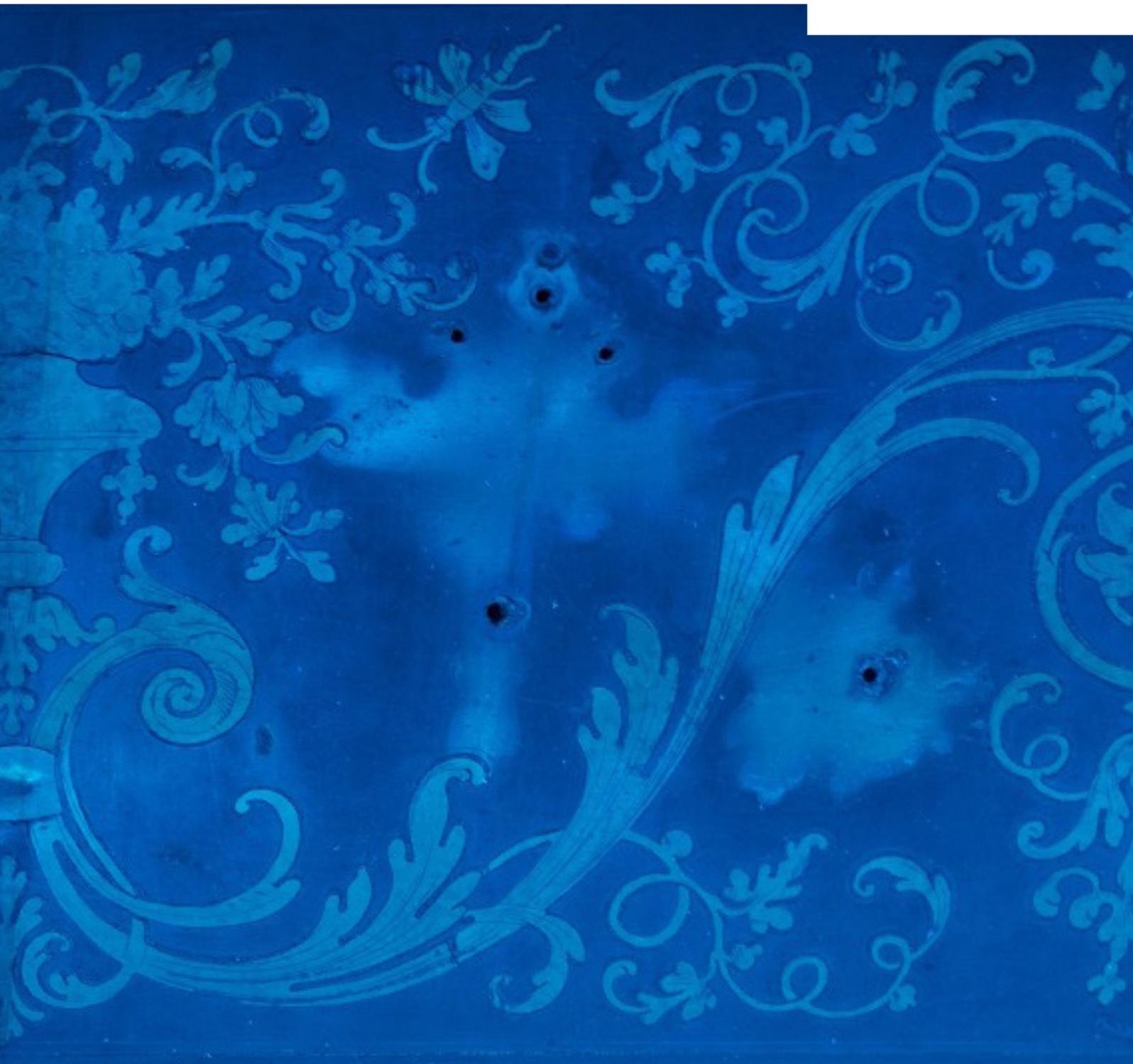


Maßgeschneiderte Schäume für die Reinigung von gefassten und materialsichtigen Objekten der Kunst und Denkmalpflege

Peter Kopp



Maßgeschneiderte Schäume für die Reinigung von gefassten und materialsichtigen Objekten der Kunst und Denkmalpflege

Peter Kopp

Schäume können für die Reinigung von empfindlichen Oberflächen an Objekten der Kunst und Denkmalpflege von großem Nutzen sein. Aus der Reinigungs-, Pharma- und Kosmetikindustrie wohl bekannt, haben sie bis dato in der Restaurierung nur geringe Bedeutung. Die Schäume lassen sich, wie die bereits in der Restaurierung wohl eingeführten wässrigen Systeme, genau auf die Lösung unterschiedlicher abzunehmender Komponenten einstellen und haben darüber hinaus weitere Vorteile. Sie sind annähernd gewichtslos und der Flüssigkeitsgehalt in der Schaumstruktur kann in etwa auf nur 5 % des Gesamtvolumens reduziert werden. Durch die den Schäumen eigene Kinetik läuft die Benetzung und der Ablösungsprozess der Schmutzpartikel nicht nur äußerst schonend ab, sondern die Schmutzpartikel werden auch ohne äußere Einwirkung wieder in den Schaumkörper aufgenommen, der dann weitgehend rückstandsfrei von der Oberfläche abgesaugt bzw. abgenommen werden kann. Wesentlich dabei ist, dass die unterschiedlichen schaumstabilisierenden und schmutzlösenden Bestandteile nicht nur maßgeschneidert (objektbezogen) formuliert werden, sondern auch deren Menge auf das notwendige Minimum beschränkt wird

Die Reinigung gehört zu den schwierigsten und komplexesten Schritten im Restaurierungsprozess von Kunstobjekten und Objekten der Denkmalpflege.

Die Reinigungsverfahren reichen von den traditionellen Methoden der Reinigung mit Lösungsmitteln¹ über die in den letzten 30 Jahren verfeinerten wässrigen Methoden und deren Kombination in Form von Emulsionen² bis zur Anwendung von ReinigungsLasern in unterschiedlichen Wellenbereichen. Jede Methode hat ihr Für und Wider und wird einzeln oder in Kombination mit anderen angewendet, um unerwünschtes Material abzunehmen, ohne die Integrität des zu behandelnden Objekts zu verletzen und im Idealfall weder die Gesundheit des Ausführenden noch die Umwelt zu gefährden.³

Unterschiedliche Möglichkeiten stehen zur Verfügung, um flüssige Reinigungslösungen mit der zu behandelnden Objektfläche in Kontakt zu bringen: mit Hilfe von saugenden Materialien wie Watte, Cellulose und Schwämmen,⁴ als niedrigviskose Gele gebunden in unterschiedlichen Celluloseethern oder natürlichen Verdickungsmitteln wie Xanthan, als hochviskose Gele mit Hilfe von pH-justierten Polyacrylsäuren oder als feste Gele mit Agar den sogenannten „Rigid-Gels“.⁵ Das Rückhaltevermögen dieser Materialien

Tailor-made foams for cleaning mounted and transparent objects of art and historical monuments

Foams are of great value for the cleaning process of delicate surfaces on objects of art and cultural heritage. While well known in the cleaning, pharmaceutical, and cosmetic industries, they have so far had little significance in restoration. Like aqueous systems already well established in restoration, foams can be precisely adjusted to the solution of various unwanted components, yet they offer additional advantages. They are nearly weightless, and the liquid content in the foam structure can be reduced to approximately only 5 % of the total volume. Due to the inherent kinetics of foams, the wetting and detachment process of dirt particles is not only extremely gentle, but the dirt particles are also absorbed into the foam body without external influence, which can then be removed from the surface nearly residue-free by suction or other means. It is essential that the different foam-stabilizing and dirt-dissolving components are not only tailored (object-specific) but also their quantity is limited to the necessary minimum.

ermöglicht eine kontrollierte Vorgehensweise, die für die Benetzung und Lösung des abzunehmenden Materials notwendig ist.

Ein weiteres Kernproblem im Reinigungsprozess liegt in der Mobilisierung des abzunehmenden Materials. Es sollte gelöst und ohne allzu große mechanische Einwirkung auf die meist hochempfindlichen Oberflächen in das Reinigungsmedium aufgenommen werden, sodass es (mit demselben) leicht abgenommen und möglichst rückstandsfrei entfernt werden kann.

Hierfür können Luft in Wasserdispersionen, besser bekannt als wässrige Schäume, sehr hilfreich sein. Durch ihren Aufbau, ihr geringes Gewicht und durch ihre kinetische Wirkungsweise können sie bei richtiger Zusammensetzung nicht nur den Schmutz lösen, sondern sie nehmen denselben ohne zusätzliche Wirkung von außen in die Schaummatrix auf, welche in einem weiteren Schritt leicht von der Oberfläche abgenommen werden kann.

Schäume sind uns beispielsweise aus der Reinigungs-, Pharma- und Kosmetikindustrie wohl bekannt, haben aber bis dato in der Restaurierung nur geringe Bedeutung. Das ist verwunderlich, haben doch maßgeschneiderte Schäume

viele Eigenschaften, die genau für den Reinigungsvorgang von empfindlichen Oberflächen an Objekten der Kunst und Denkmalpflege von großem Nutzen sind:

- Die Menge des benötigten Reinigungswassers kann stark reduziert werden.
- Schaum ist annähernd gewichtslos und kann selbst bei empfindlichen und amorphen rauen Oberflächen Anwendung finden.
- Die Stabilität der Schäume nimmt mit Abnahme der Oberflächenspannung an den Grenzflächen zu, was zu einer optimalen Benetzung der zu reinigenden Oberfläche führt.
- Schäume können durch ihren charakteristischen Aufbau das abzunehmende Material ohne weitere Mobilisierung in den Schaumkörper aufnehmen.
- Eine mechanische Mobilisierung kann wegfallen bzw. stark reduziert werden.
- Schäume können durch die Formulierung der wässrigen Komponente auf das abzunehmende Material zugeschnitten werden: Durch die Anpassung des pH-Werts und der Ionenkonzentration, die unterschiedliche Wahl von Verdickungsmitteln, Tensiden, Chelatbildnern eventuell auch Enzymen ist eine feine Justierung auf die spezifische Reinigungssituation möglich.
- Abhängig von der Formulierung können Schäume auch als Emulsionen eingesetzt werden.
- Schäume besitzen eine stark vergrößerte Oberfläche im Vergleich zu reinen Flüssigkeiten und Gelen und daher auch Mechanismen, die mit Makroemulsionen verglichen werden können.
- Schäume können durch Abheben oder Absaugen leicht entfernt werden.

Schäume sind von sich aus instabil. Auch wenn die Instabilität der Schäume wesentlich für die Wirkungsweise und Funktion verantwortlich ist, ist es das Ziel bei der Herstellung von Reinigungsschäumen in der Restaurierung, sie nicht nur möglichst stabil zu halten, sondern auch die einzelnen Komponenten mengenmäßig auf das Notwendige zu reduzieren. Es hat sich dabei gezeigt, dass die Dosierungen der einzelnen Ingredienzien für den Erhalt eines stabilen Reinigungsschaums durchaus mit den gängigen Rezepturen der wässrigen Systeme und Hydrogels vergleichbar sind und teilweise sogar mengenmäßig darunterliegen. Daher kann bei der Formulierung von Reinigungsschäumen auf die langjährige Erfahrung bei der Verwendung von wässrigen Systemen und Gelen zurückgegriffen werden.

Als frühes Beispiel für die Anwendung einer Schaumrezeptur an einer holzsichtigen, lackierten Oberfläche kann die Reinigung der barocken Wandvertäfelung des Nussbaumzimmers in Schloss Schönbrunn genannt werden.⁶ Neben der guten Lösung des Oberflächenschmutzes ist die Verfärbung des Schaums durch die Aufnahme des Schmutzwassers in die Schaummatrix gut erkennbar (Abb. 1a–b).

Der Beitrag setzt sich mit den Grundlagen und dem Aufbau von Reinigungsschäumen auseinander, bespricht mögliche Einsatzgebiete, geht auf Anpassungen für unterschiedliche Reinigungssituationen und Schmutzzusammensetzungen ein und erläutert einige Anwendungsbeispiele der Oberflächenreinigung mit maßgeschneiderten Schäumen aus den letzten zehn Jahren.



1a Schloss Schönbrunn, Nussbaumzimmer: Detail während der Schaumreinigung 2010



1b Schloss Schönbrunn, Nussbaumzimmer: Detail nach der Schaumreinigung 2010



1c Schloss Schönbrunn, Nussbaumzimmer: Endzustand Februar 2011

Definition und Aufbau von Schäumen

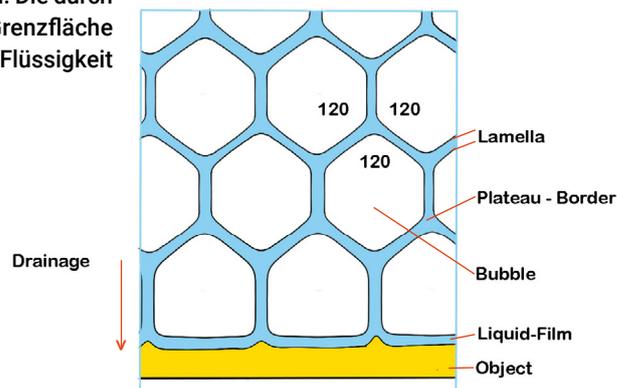
Schäume sind Dispersionen einer großen Menge eines Gases in einer relativ kleinen Menge einer Flüssigkeit. Ein üblicher, feuchtnasser Reinigungsschaum besteht aus 95 % Luft und 5 % Flüssigkeit.

Über 95 % des 5%igen Flüssigkeitsanteils sind Wasser, den Rest bilden notwendige Zusatzstoffe für die Schaumstabilisierung und den Reinigungsvorgang.⁷ Da die einzelnen (Luft-)Blasen in einem (Reinigungs-)Schaum dicht aneinandergedrängt sind, bilden sie eng aneinanderliegende Polyeder aus (Abb. 2). Die im Schaum enthaltene Flüssigkeit ist auf dünne Filme zwischen den polyedrischen Luftblasen reduziert, die Grenzflächen zwischen Luft und Flüssigkeit werden durch Tenside und andere Zusatzstoffe stabilisiert und verhindern so das Zerplatzen der Luftblasen. Die durch Tenside und andere Zusatzstoffe stabilisierte Grenzfläche zwischen den polyedrischen Luftblasen und der Flüssigkeit wird als Lamelle (Lamella) bezeichnet.

Die polyederförmigen Blasen treffen sich entlang einer Kante immer in einer Weise, dass drei Lamellen im Winkel von 120° zusammenkommen. Räumlich gesehen treffen vier Lamellen auf einen Punkt in einem Winkel von annähernd 109° zusammen.

Der Bereich oder die Kante, wo die einzelnen Lamellen aufeinandertreffen, wird nach dem belgischen Physiker Joseph Plateau (1801–1883) als „Plateau Border“ bezeichnet.⁸ Plateau fasste schon im 19. Jahrhundert die Struktur von Seifenblasen in einem Schaum in den oben beschriebenen Regeln zusammen.⁹

2 Schematische Darstellung Schaumstruktur



Mechanismen der Schaumstabilität

Der von Plateau beschriebene räumliche Aufbau der eng aneinander liegenden polyedrischen Luftblasen verleiht den Schäumen eine gewisse Stabilität bei gleichzeitiger Flexibilität.¹⁰ Darüber hinaus wirken in einem Schaum weitere destabilisierende und stabilisierende Kräfte und Mechanismen.

Destabilisierende Mechanismen in Schäumen

Der wichtigste destabilisierende Mechanismus innerhalb der Schaumblasen wird nach seinem Entdecker, dem deutschbaltischen Chemiker Wilhelm Ostwald (1853–1932),¹¹ als Ostwald-Reifung bezeichnet. Sie besagt Folgendes:

Da der Druck in kleinen Blasen höher ist als der Druck in größeren Blasen, tendieren die kleinen Blasen dazu, in die größeren Blasen überzugehen. Dies führt einerseits zum Reißen des Grenzflächenfilms (Lamelle) mit einer Neuverteilung der Blasen, andererseits zu einer kontinuierlichen Vergrößerung der Schaumblasen bis zum vollständigen Zerfall des Schaums.¹² Dieser Prozess kann, je nach Formulierung, in einem Zeitraum von Bruchteilen von Sekunden bis zu Monaten ablaufen.

Darüber hinaus unterliegt die Flüssigkeit in den Schaumlammellen der Schwerkraftwirkung. Die Flüssigkeit wird einerseits durch den Druckunterschied innerhalb der Lamelle und der Plateau-Border in Richtung Plateau-Border geleitet und andererseits durch die Schwerkraft nach unten geführt.

Dies führt zu einem permanenten Drainage-Effekt von oben nach unten, wodurch sich einerseits an der unteren Kontaktfläche ein Überschuss an Flüssigkeit ausbildet, andererseits die Lamellen im darüberliegenden Bereich bis zum Bersten gedünnt werden.¹³

Die Umverteilung in der Größe der Luftblasen, die Filmdünnung und letztlich der Filmbruch sind die wesentlichen destabilisierenden Mechanismen in Schäumen.¹⁴

Stabilisierende Mechanismen in Schäumen

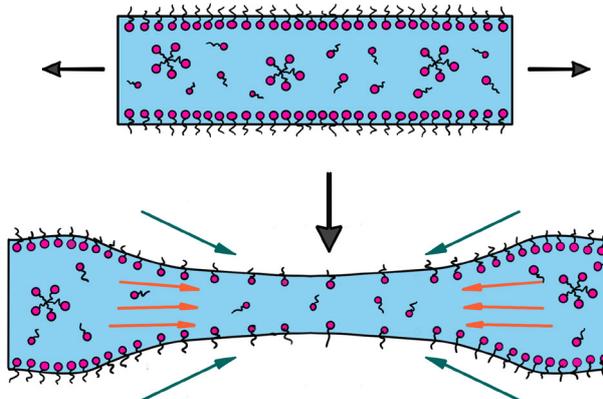
Ebenso gibt es eine Reihe von stabilisierenden Mechanismen, von denen die für die Stabilität und Funktion von Schäumen wichtigsten durch den amerikanischen Chemiker und Physiker Josiah Willard Gibbs (1839–1903) und den italienischen Physiker Carlo Marangoni (1840–1925) beschrieben wurden und daher als Gibbs-Marangoni Effekt bezeichnet werden. Sie erklären die Wechselwirkungen von Tensiden stabilisierten Membranen und Wirkungen an den Grenzflächen in Folge von Verformungen (Abb. 3).

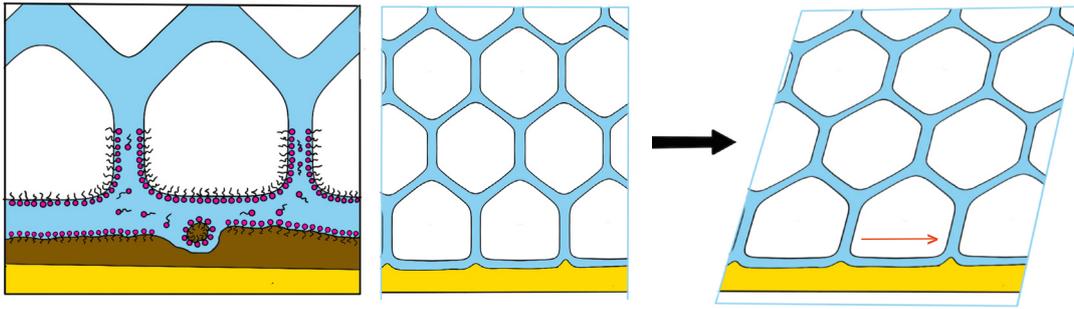
Die nach ihrem Entdecker benannte Gibbs-Filmelastizität beschreibt dabei folgenden Effekt: Wenn ein Film, der durch Tenside stabilisiert ist, plötzlich gestreckt wird, hat der gestreckte Teil eine geringere Tensiddichte als der ungestreckte Teil, da sich die Oberfläche vergrößert hat. Das bewirkt eine vergrößerte Oberflächenspannung in diesen Bereichen, wodurch einerseits einer weiteren Streckung entgegengewirkt wird, andererseits die lokale Anhebung der Oberflächenspannung zu einer Kontraktion der Oberfläche in diesem Bereich führt.

Diese Kontraktion der Oberfläche bewirkt eine Flüssigkeitsbewegung vom Bereich mit niedriger Oberflächenspannung zum Bereich mit höherer Oberflächenspannung bzw. vom unkontrahierten Bereich zum kontrahierten Bereich. Der Flüssigkeitstransport, der auf den Gradienten der Oberflächenspannung zurückzuführen ist, wird Marangoni-Effekt genannt. Damit der Flüssigkeit auch die darin vorhandenen Tenside mittransportiert werden und sich erneut an den Grenzflächen anordnen, wird die Oberflächenspannung wieder gleichmäßig verteilt und der Film stabilisiert; er kehrt in seine Ausgangsposition zurück.¹⁵

Die destabilisierenden und stabilisierenden Mechanismen in einen Schaum führen dazu, dass sich der Schaum stetig umbildet und von Neuem stabilisiert. Der Gibbs-Marangoni-Effekt wirkt der schwerkraftbedingten Filmdünnung entgegen und ist dafür verantwortlich, dass die abgegebene Flüssigkeit an der Kontaktfläche wieder in die Schaumstruktur aufgenommen wird.

3 Gibbs-Marangoni-Effekt





4 Rheologie des Schaumkörpers; Flexibilität bei gleichzeitiger Stabilität mit Wischeffekt an der Kontaktfläche

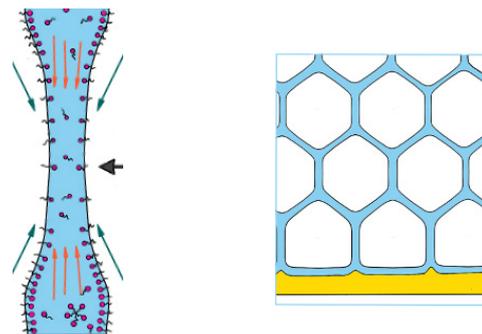
Mechanismen der Schaumreinigung

Die oben beschriebene Struktur und die Mechanismen zur Schaumstabilität erklären auch die Mechanismen der Schaumreinigung, die sich in drei wesentliche Punkte unterteilen lassen:

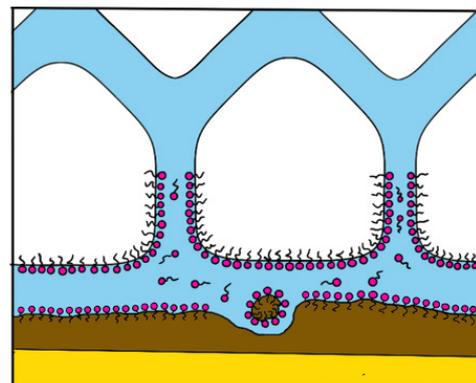
- **Kontrollierte Benetzung der Kontaktfläche**
Die durch den Flüssigkeitstransport innerhalb der Schaumstruktur bzw. Lamelle in Richtung Plateau-Border und durch die Schwerkraft stattfindende Drainage bzw. Flüssigkeitsabgabe von oben nach unten bewirkt die notwendige Benetzung der Kontaktfläche. Es liegt an der Formulierung des Reinigungsschaums, die Drainage in kontrollierter Weise ablaufen zu lassen.
- **Schonender Ablösungsprozess der Schmutzpartikel (Abb. 4)**
Die von Plateau beschriebene Schaumstruktur ist dafür verantwortlich, dass die Schaummatrix große Flexibilität bei gleichzeitiger Stabilität aufweist und der Flüssigkeitsanteil in entsprechender Verteilung in die Schaummatrix aufgenommen wird. Das System der eng aneinander liegenden polyedrischen Schaumblasen bewirkt, dass auf die Schaumstruktur wirkende Scherkräfte ständig von Neuem stabilisiert werden, indem sich das System wieder ausrichtet und in die Grundposition zurückkehrt bzw. der ausscherende Bereich durch den Schaumkörper „nachgezogen“ wird.¹⁶ Dies entfacht an der Kontaktfläche einen Art Wischeffekt, der zu einem sehr schonenden Ablösungsprozess im Reinigungsvorgang führt. Er findet ohne äußeren Kontakt statt bzw. ohne die Objektoberfläche von außen zu berühren.
- **Aufnahme der gelösten Schmutzpartikel in den Schaumkörper (Abb. 5)**
Die Ostwald-Reifung und die Schwerkraftwirkung führen dazu, dass die Schaumstruktur einem ständigen Veränderungsprozess mit Neubildung unterliegt. Dies führt zu laufenden Verformungen in der Schaumstruktur, wodurch der Gibbs-Marangoni-Effekt forciert wird: Die Flüssigkeit wird von den wenig kontrahierten Bereichen in Richtung kontrahierte Bereiche der Schaumlamelle gepumpt, was einem Saugeffekt gleichkommt. Das Reinigungswasser, das die Kontaktfläche durch

eine kontrollierte Drainage benetzt, wird nach dem Lösungsprozess der Schmutzpartikel ohne Hilfe von außen wieder in den Schaumkörper gepumpt. Visuell ist dieser Prozess durch eine Farbänderung des Schaums ersichtlich. Um das Schmutzwasser besser in der Schaummatrix zu halten, werden zusätzliche Hilfsstoffe wie Co-Tenside, Verdickungsmittel und andere die Viskosität beeinflussende Ingredienzien in die Schaumformulierungen eingebaut.¹⁷

In der Praxis laufen die kontrollierte Benetzung der Kontaktfläche, der schonende Ablösungsprozess der Schmutzpartikel und die Aufnahme der gelösten Schmutzpartikel in den Schaumkörper während der Auftragsdauer des Reinigungsschaums parallel ab. Durch zusätzliche äußere Mobilisierung des Schaums kann dieser Prozess beschleunigt werden, wesentlich ist jedoch die Feststellung, dass dieser Prozess ohne weiteren äußeren Einfluss stattfindet.



5 Aufnahme der gelösten Schmutzpartikel in den Schaumkörper



Grundlagen für die Formulierung von Reinigungsschäumen

Ein Reinigungsschaum besteht einerseits aus Komponenten, die eine ausreichende Stabilität der Schaummatrix bewirken, andererseits aus den für den speziellen Reinigungsvorgang ausgesuchten Bestandteilen. Dabei sollten Stabilisatoren und Reinigungsmittel mengenmäßig auf ein Minimum beschränkt werden, um Rückstände für die notwendige Nachreinigung möglichst gering zu halten. Beide Bestandteile stehen in Wechselwirkung zueinander, das heißt, Stoffe, die für die Schaumstabilität verantwortlich sind, können auch eine aktive Rolle beim Reinigungsprozess haben bzw. Komponenten, die für die Reinigung verantwortlich sind, können auch die Schaummatrix stabilisieren oder destabilisieren.

Voraussetzung für die Schaumbildung sind Grenzflächen mit niedriger Oberflächenspannung, was in erster Linie durch die Verwendung von Tensiden erreicht wird. Die Anreicherung von Tensiden an den Grenzflächen zwischen Luft und Flüssigkeit senkt die Grenzflächenenergie und sichert die Bildung und Stabilität der Luftblasen in der Flüssigkeit.

Darüber hinaus tragen sie zur Erhöhung der Viskosität an den Grenzflächen bei, wodurch ebenfalls die Schaumstabilität verbessert wird.¹⁸

Wesentlich dabei ist die Erkenntnis, dass anionische Tenside ein Maximum der Schaumbildung schon bei oder knapp über der kritischen Mizellenkonzentration (CMC)¹⁹ erreichen.²⁰ Das heißt, dass Dosierungen, die darüber liegen, eine Schaumbildung nicht weiter verbessern. Gleichzeitig bedeutet es auch, dass die benötigte Tensidmenge für die maximale Schaumbildung unter der für die Reinigungswirkung notwendigen Menge von Tensiden liegt, die in der Restaurierung im Allgemeinen mit der drei- bis fünffachen kritischen Mizellenkonzentration (CMC) angegeben wird.²¹ Dieser Umstand macht die Formulierung von Schäumen für die Reinigung von Oberflächen an Objekten der Kunst und Denkmalpflege mit (anionischen) Tensiden besonders interessant. Darüber hinaus werden die Schaumlamellen durch die Ladung der ionischen Tenside stabilisiert. Durch die Kombination der ionischen Tenside stabilisiert. Durch die Kombination mit amphoteren Tensiden kann die Schaumstabilität zusätzlich enorm verbessert werden.²² Nicht ionische Tenside sind zwar schlechtere Schaumbildner, in Kombination können jedoch beispielsweise die biologisch gut abbaubaren Alkylpolyglucoside (AGP) zusätzlich zur Schaumstabilität beitragen.²³

Glycerol bildet Wasserstoffbrücken aus und erhöht die Viskosität der Flüssigkeit, wodurch die Verdunstungsrate herabgesetzt und die Schaummatrix zusätzlich stabilisiert wird.²⁴ Wie die Erfahrung zeigt, verbessert die Beigabe von Glycerol darüber hinaus die Anhaftung der Schaummatrix an Oberflächen, was besonders wichtig ist, wenn über Kopf oder an senkrechten Oberflächen gearbeitet wird.

Schon die Beigabe von geringen Mengen von Verdickungsmitteln erhöht die Viskosität der Flüssigkeit und wirkt schaumstabilisierend. Darüber hinaus reduziert sie die Drainage und hält die gelösten Schmutzpartikel in der Schaummatrix. Je nach Wahl der Verdickungsmittel können zusätzliche Begleiteffekte erreicht werden.

Kriterien und Komponenten für eine selektive Reinigung durch das in der Schaummatrix verteilte Reinigungswasser

Hier gelten im Wesentlichen die Ansätze für die wässrige Reinigung, die u. a. von Richard Wolbers²⁵ und Paolo Cremonesi²⁶ beschrieben wurden. Sie haben auch für die Formulierung der wässrigen Komponente in Reinigungsschäumen ihre Gültigkeit und werden in Folge kurz zusammengefasst:

Den Ausgangspunkt für die Formulierung der wässrigen Komponente bildet in der Regel die Messung des pH-Werts und der Ionenkonzentration der zu reinigenden Oberfläche des Kunstobjekts.

Für die Reinigungslösung wird eine Pufferlösung entsprechend des gemessenen pH-Werts hergestellt und die Ionenkonzentration bezogen auf die gemessene Ionenkonzentration des Kunstobjekts isotonisch oder leicht hypertonisch eingestellt. Als Richtlinie und Hilfestellung wird in der Literatur eine Konzentration von 25 mmol/L bzw. ein Messwert der Ionenkonzentration zwischen 2 und 8 mS angegeben.

Für das spezifische Reinigungsproblem kann das gepufferte Wasser durch die Wahl von weiteren Tensiden bzw. Cotenensiden, Chelatbildnern und/oder Enzymen weiter angepasst werden. Durch die Wahl des Verdickungsmittels können neben der Stabilisierung der Reinigungsflüssigkeit, Rheologie und emulsionsunterstützende Eigenschaften beeinflusst werden. Dadurch ist es möglich, in Wasser unlösliche Lösungsmittel in das wässrige System einzuemulgieren.²⁷

Geeignete Materialien für die Formulierung von Reinigungsschäumen

Wie oben beschrieben, lassen sich stabile Reinigungsschäume aus der Kombination von einem anionischen Tensid (Primärtensid) und einem amphoteren Co-Tensid herstellen. Zugaben von Verdickungsmitteln, Glycerol und/oder nicht ionischen Tensiden können die Stabilität von Schäumen zusätzlich verbessern.

Als anionische Primärtenside kommen Tenside infrage, die sich besonders gut für die Lösung von fett- und ölgebundenem Schmutz (bspw. Natriumlaurylethersulfat) oder für die Lösung von proteingebundenem Schmutz (bspw. Cocco-collagen) eignen. Dadurch kann schon mit der Wahl des Primärtensids eine gewisse Affinität zu den zu lösenden Schmutzbestandteilen hergestellt werden. Zu beachten sind allerdings auch die Bindemittel der zu reinigenden Oberfläche, weshalb beispielsweise bei jungen Ölfilmen die Anwendung von proteinaffinen Tensiden schonender sein kann als die Verwendung von öläffinen Tensiden.

Die besondere Stabilität der Schaummatrix wird erst durch die Zugabe eines amphoteren Tensids (bspw. Cocco Amido Betaine) bewirkt. Der positiv geladene Teil des amphoteren Tensids setzt sich dabei zwischen die negativen Ladungen des anionischen Tensids, wodurch die Grenzfläche enorm stabilisiert wird.²⁸ Es wird in der Literatur auch als „Foam-Booster“²⁹ bezeichnet. Als ökofreundliche, nicht ionische Co-Tenside werden Alkohol Ethoxylate wie Ecosurf EH9³⁰ und die Alkylpolyglucoside Decylglucosid,³¹ Gluco-pon 225DK³² und Gluco-pon 215 UP³³ diskutiert.

Geeignete Verdickungsmittel, die sowohl die Schaumstabilität als auch die Speicherung des in die Schaumstruktur gepumpten Schmutzwassers verbessern, sind Natrium-Carboxy-Methylcellulose (Na-CMC), Xanthan Gum (Vanzan NF-C) und Pemulen TR2. Na-CMC stabilisiert besonders gut im basischen Bereich, Xanthan Gum und Pemulen TR2 haben emulsionsbildende Eigenschaften. Glycerol beeinflusst die Stabilität besonders bei Anwendung über Kopf und bei senkrechten Flächen.

Fallbeispiele

Die folgenden Beispiele zeigen exemplarisch Schaumformulierungen, die in unterschiedlichen Anwendungsbereichen besonders gute Ergebnisse erzielt haben. In der Praxis sind eine Vielzahl von Variationen und Feinjustierungen möglich, die ebenso gute Ergebnisse liefern können. Je nach Substrat (bzw. zu reinigender Oberfläche) muss auf spezielle Reinigungsproblematiken durch Anpassungen in der Formulierung reagiert werden. Die Veränderung des pH-Werts, die Zugabe von Co-Tensiden, Chelatbildnern oder Enzymen oder der Austausch des Verdickungsmittels können sowohl die Stabilität der Schaummatrix als auch das Reinigungsergebnis wesentlich beeinflussen.

1. Die von Theophil Hansen entworfene Bibliothek der Akademie der bildenden Künste Wien wurde im Rahmen der Generalsanierung des historischen Gebäudes restauriert. Die Bibliotheksschränke aus Eiche sind mit Schablonenmalerei und Linierungen in Öltechnik geziert und wurden mehrfach mit einem Ölfirnis überzogen. Der Ölfirnis war stark verschmutzt, die Schmutzpartikel waren teilweise in die leicht verbräunten Pflegeschichten eingebunden (Abb. 6 a–c). Für die Oberflächenreinigung wurde ein Reinigungsschaum wie folgt zusammengestellt:

Phase A

- 1) 100 ml Wasser
- 2) 0,5 g Zitronensäure
- 3) pH 8,5 mit Triethanolamin

Phase B

- 4) 0,7 g Natriumlaurylsulfat
- 5) 0,1 ml Cocoamidopropyl Betain
- 6) 1,5 ml Glycerol
- 7) 1 ml Isopropanol
- 8) 0,2 g Na-Carboxymethylcellulose

0,5 g (zirka 25 mmol) Zitronensäure wurden in destilliertem Wasser gelöst, die Lösung wurde mit Triethanolamin auf den pH-Wert von 8,5 gepuffert. Als Primärtensid wurde Natriumlaurylsulfat in einer Konzentration des ca. dreifachen CMC verwendet. Als schaumstabilisierendes Co-Tensid wurde das amphotere Tensid Coccoamidopropyl Betain zugesetzt. Als zusätzliche Stabilisatoren wurden geringe Mengen von Glycerol, Isopropanol und das Verdickungsmittel Natrium-Carboxymethylcellulose zugesetzt. Nach der vollständigen Lösung aller Bestandteile wurde die modifizierte Reinigungsflüssigkeit in einen Schaumspender gefüllt, aus welchem nach dem Pumpvorgang die gewünschte Schaummenge für die Oberflächenreinigung entnommen werden konnte.

Interpretation: Das anionische Tensid Natriumlaurylsulfat (Primärtensid) und das amphotere Co-Tensid Coccoamidopropyl Betain bilden den stabilen Schaumkörper. Natriumlaurylsulfat ist darüber hinaus gut fettlösend, zusammen mit den Komponenten der Reinigungsflüssigkeit (Zitronensäure als Chelatbildner und TEA als Puffer) lösten sie bei einem erhöhten pH-Wert von 8,5 den in die Pflegeschicht eingebundenen Schmutz gut. Glycerol erhöhte die Stabilität des Schaums und die Standfestigkeit bei senkrechten Flächen, Natrium-Carboxymethylcellulose verhinderte einerseits, dass das bereits in die Schaummatrix gelangte Schmutzwasser wieder auf die Kontaktfläche gelangt, andererseits wirkt es bei leicht erhöhten pH-Werten schaumstabilisierend. Der Schaum mit den gelösten Schmutzpartikeln wurde nach erfolgter Reinigung von der Oberfläche abgenommen. Die Nachreinigung erfolgte mit einem pH-justierten Reinigungswasser mit den flüchtigen Säure-Base Anteilen aus Essigsäure und Ammoniumhydroxid. ³⁴



6a Akademie der bildenden Künste Wien, Bibliothek, Raum des Bibliothekars: Detail während der Schaumreinigung Juni 2020



6b Akademie der bildenden Künste Wien, Bibliothek, Raum des Bibliothekars: Detail während der Schaumreinigung Juni 2020



6c Akademie der bildenden Künste Wien, Bibliothek, Raum des Bibliothekars: Endzustand Februar 2022

2. Im Rahmen der Generalsanierung des österreichischen Parlaments, ebenfalls ein Bau des Architekten Theophil Hansen, wurden auch die maserierten Holzoberflächen des Bundesversammlungssaals restauriert. Die Galerien und die dahinter angeordneten Gänge sind mit Holzvertäfelungen mit Holzimitationen bzw. Maserierungen in Öltechnik ausgekleidet (Abb. 7 a–b).

Für die Oberflächenreinigung wurde ein Reinigungsschaum wie folgt zusammengestellt:

Phase A

- 1) 100 ml Wasser
- 2) 0,5 g Zitronensäure
- 3) ca. 2 ml Natriumhydroxid 10%ig (pH ca. 6,5; 5 mS)
- 4) 0,2 g Xanthan (VANZAN NF-C)
- 5) 1 ml Isopropanol
- 6) 1 ml Benzylalkohol

Phase B

- 7) 1,5 ml Coccocollagen
- 8) 0,1 ml Cocoamidopropyl Betain
- 9) 1,5 ml Glycerol

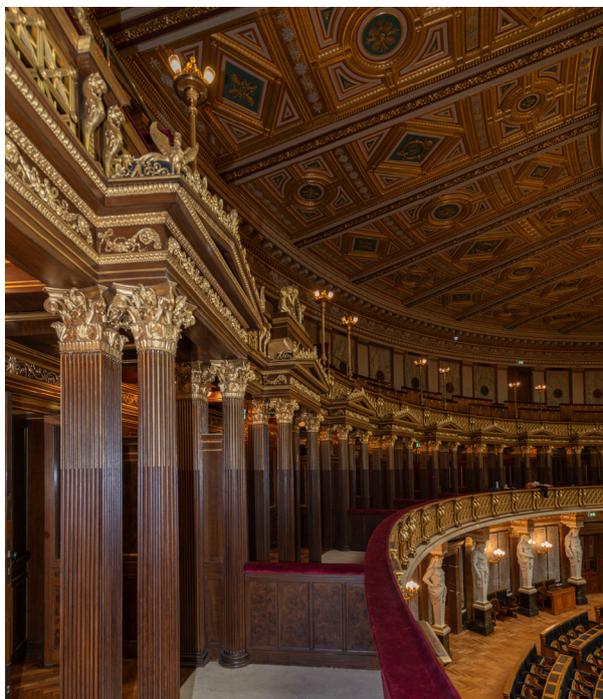
0,5 g (zirka 25 mmol) Zitronensäure wurden in destilliertem Wasser gelöst, die Lösung wurde mit Natriumhydroxid auf den pH-Wert von 6,5 (Messwert der maserierten Oberfläche) gepuffert. 0,2 g Xanthan wurden in 1 ml Isopropanol dispergiert und anschließend in der vorbereiteten Lösung gelöst. 1 ml Benzylalkohol wurde in die Lösung emulgiert. Als Primärtensid wurde Coccocollagen in einer Konzentration des ca. dreifachen CMC verwendet. Als schaumstabilisierendes Co-Tensid wurde das amphotere Tensid Coccoamidopropyl Betain zugesetzt. Als zusätzlicher Stabilisator wurden geringe Mengen von Glycerol zugesetzt. Nach der vollständigen Lösung aller Bestandteile wurde die modifizierte Reinigungsflüssigkeit in einen Schaumspender gefüllt, aus dem durch einen Pumpvorgang die gewünschte Schaummenge für die Oberflächenreinigung entnommen werden konnte.

Interpretation: Das anionische Tensid Coccocollagen (Primärtensid) und das amphotere Co-Tensid Coccoamidopropyl Betain bilden den stabilen Schaumkörper. Coccocollagen ist nicht nur für die Lösung von proteinhaltigem Schmutz geeignet, sondern es ist auch mild gegenüber ölhaltigem Bindemittel. Zusammen mit den Komponenten der Reinigungsflüssigkeit (Zitronensäure als Chelatbildner und Puffer und Natriumhydroxid für die Einstellung des pH-Werts, Benzylalkohol für die Lösung von aromatischen Schmutzanteilen) reinigten sie den eingebundenen

Schmutz gut, ohne die Oberfläche anzugreifen. Glycerol erhöht die Stabilität des Schaums und die Standfestigkeit bei senkrechten Flächen. Xanthan verhindert einerseits, dass das bereits in die Schaummatrix gelangte Schmutzwasser wieder auf die Kontaktfläche gelangte, andererseits wirkt es emulsionsstabilisierend und ist notwendig, um Benzylalkohol in die Reinigungsflüssigkeit zu emulgieren. Der Schaum mit den gelösten Schmutzpartikeln wurde nach erfolgter Reinigung von der Oberfläche abgenommen. Die Nachreinigung erfolgte mit einem pH-justierten Reinigungswasser mit flüchtigen Säure-Base Anteilen.



7a Parlament Wien, Bundesversammlungssaal: Detail während der Schaumreinigung Februar 2022 links gereinigt; Mitte während der Reinigung; rechts vor der Reinigung



7b Parlament Wien, Bundesversammlungssaal: Endzustand September 2022

3. Im Rahmen der Restaurierung einer Boulle-Kommode der Staatlichen Kunstsammlungen in Dresden wurde als Vorstufe für weitere Restaurierungsschritte der anhaftende Oberflächenschmutz abgenommen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die unterschiedlichen eng aneinandergrenzenden Materialien gelegt (Messing, Schildpatt, leimgebundene Gravurkitte; **Abb. 8 a–c**).

Für die Oberflächenreinigung wurde ein Reinigungsschaum wie folgt zusammengestellt:

Phase A

- 1) 100 ml Wasser
- 2) 0,5 g Bisaminotrismethan (BIS-TRIS)
- 3) pH 6,5 Essigsäure 10%ig
- 4) 0,2 g Xanthan (VANZAN NF-C)
- 5) 1 ml Isopropanol
- 6) 1 ml Benzylalkohol

Phase B

- 7) 0,2 ml Natriumlauryl ethersulfat (SLES)
- 8) 0,1 ml Cocoamidopropyl Betain
- 9) 0,01 g Marlipal 1618/25
- 10) 1,5 ml Glycerol



8a Staatliche Kunstsammlungen Dresden, Kommode, Inv.-Nr. 39838: Detail während der Schaumreinigung Juni 2021



8b Staatliche Kunstsammlungen Dresden, Kommode, Inv.-Nr. 39838: Detail während der Schaumreinigung UV-Aufnahme Juni 2021

0,5 g BIS-TRIS wurden in destilliertem Wasser gelöst und mit 10%iger Essigsäure auf einen pH-Wert von 6,5 eingestellt. 0,2 g Xanthan wurden in 1 ml Isopropanol dispergiert und anschließend in der vorbereiteten Lösung gelöst. 1 ml Benzylalkohol wurde in die Lösung emulgiert. Als Primärtensid wurde Natriumlauryl ethersulfat in einer Konzentration des ca. fünffachen CMC verwendet. Als schaumstabilisierendes Co-Tensid wurde das amphotere Tensid Coccoamidopropyl Betain zugesetzt. Als weiteres Co-Tensid wurde Marlipal 1618/25 und als zusätzlicher Stabilisator geringe Mengen von Glycerol zugesetzt. Nach der vollständigen Lösung aller Bestandteile wurde die modifizierte Reinigungsflüssigkeit in einen Schaumspender gefüllt, aus dem durch einen Pumpvorgang die gewünschte Schaummenge für die Oberflächenreinigung entnommen werden konnte.

Interpretation: Das anionische Tensid Natriumlauryl ethersulfat (SLES, Primärtensid) und das amphotere Co-Tensid Coccoamidopropyl Betain bilden den stabilen Schaumkörper. Natriumlauryl ethersulfat ist wie Natriumlaurylsulfat gut fettlösend, besitzt jedoch einen wesentlich geringeren CMC, wodurch die Tensidmenge reduziert werden kann. Die wässrige Komponente wurde mit Rücksicht auf die unterschiedlichen Materialien auf einen pH-Wert von 6,5 ohne Chelatbildnerzusatz gepuffert (Essigsäure, BIS-TRIS). Der Zusatz des nicht ionischen Tensids Marlipal 1618/25 verbesserte den Schmutzabtrag, Benzylalkohol die Lösung von aromatischen Schmutzanteilen. Glycerol erhöht die Stabilität des Schaums und die Standfestigkeit bei senkrechten Flächen. Xanthan verhindert einerseits, dass das bereits in die Schaummatrix gelangte Schmutzwasser wieder auf die Kontaktfläche gelangt, andererseits wirkt es emulsionsstabilisierend und ist notwendig, um Benzylalkohol in die Reinigungsflüssigkeit zu emulgieren. Der Schaum mit den gelösten Schmutzpartikeln wurde nach erfolgter Reinigung von der Oberfläche abgenommen. Die Nachreinigung erfolgte mit einem pH-justierten Reinigungswasser mit den Säure-Base Anteilen aus Kohlendioxid (Sodawasser) und Natriumhydroxid.



8c Staatliche Kunstsammlungen Dresden, Kommode, Inv.-Nr. 39838: Detail teilgereinigte Oberfläche Juni 2021

4. Im Rahmen der Restaurierung des Wohn- und Schlafzimmers der Kaiserin Elisabeth in der Hofburg in Wien wurde auch der polimentvergoldete Schnitzdekor gereinigt (Abb. 9 a–d).

Für die Oberflächenreinigung wurde ein Reinigungsschaum wie folgt zusammengestellt:

Phase A

- 1) 100 ml Wasser
- 2) 0,5 g Zitronensäure
- 3) pH 5,5 mit 1 M Natriumhydroxid (ca. 6 ml)
- 4) 0,2 g Xanthan (VANZAN NF-C)
- 5) 1 ml Isopropanol
- 6) 1 ml Benzylalkohol

Phase B

- 7) 0,2 ml Natriumlaurylathersulfat SLES
- 8) 0,1 ml Cocoaminopropyl Betain
- 9) 0,2 ml Decylglucosid

0,5 g (zirka 25 mmol) Zitronensäure wurden in destilliertem Wasser gelöst, die Lösung wurde mit Natriumhydroxid auf den pH-Wert von 5,5 (Messwert des Poliments über Kreidegrund = isoelektrischer Punkt der Proteinbindemittel) gepuffert. 0,2 g Xanthan wurden in 1 ml Isopropanol dispergiert und anschließend der vorbereiteten Lösung zugegeben. 1 ml Benzylalkohol wurde in die Lösung emulgiert. Als Primärtensid wurde Natriumlaurylathersulfat in einer Konzentration des ca. fünffachen CMC verwendet. Als schaumstabilisierendes Co-Tensid wurde das amphotere Tensid Coccoamidopropyl Betain zugesetzt. Das nichtionische Zuckertensid Decylglucosid dient der zusätzlichen Stabilisierung des Schaumkörpers. Nach der vollständigen Lösung aller Bestandteile wurde die modifizierte Reinigungsflüssigkeit in einen Schaumspender gefüllt, aus dem mittels Pumpvorgang die gewünschte Schaummenge für die Oberflächenreinigung entnommen werden konnte.

Interpretation: Die Zitronensäure dient als Puffersubstanz und als Chelatbildner. Der pH-Wert wurde mit Natriumhydroxid auf den isoelektrischen Punkt der Protein-Bindemittel³⁵ der Polimentvergoldung eingestellt (an der Oberfläche des Poliments gemessener pH-Wert), um die Löslichkeit möglichst gering zu halten. Das anionische Tensid Natriumlaurylathersulfat (Primärtensid) und das amphotere Co-Tensid Coccoamidopropyl Betain bilden den stabilen Schaumkörper. Die Zugabe des nichtionischen Zuckertensids Decylglucosid stabilisierte den Schaumkörper zusätzlich und verbesserte den Schmutzabtrag. Benzylalkohol wurde für die Lösung von aromatischen Schmutzanteilen beigelegt. Xanthan verhindert einerseits, dass das bereits in die Schaummatrix gelangte Schmutzwasser wieder auf

die Kontaktfläche gelangt, andererseits wirkt es emulsionsstabilisierend und ist notwendig, um Benzylalkohol in die Reinigungsflüssigkeit zu emulgieren. Der Schaum mit den gelösten Schmutzpartikeln wurde nach erfolgter Reinigung von der Oberfläche abgenommen. Die Nachreinigung erfolgte mit 96%igen Ethanol, um die wasserempfindliche Polimentvergoldung nicht anzugreifen.



9a Hofburg Wien, Wohn- und Schlafzimmer Kaiserin Elisabeth: Detail der Polimentvergoldung Vorzustand



9b Hofburg Wien, Wohn- und Schlafzimmer Kaiserin Elisabeth: Detail der Polimentvergoldung während der Schaumreinigung



9c Hofburg Wien, Wohn- und Schlafzimmer Kaiserin Elisabeth: Detail der Polimentvergoldung nach erfolgter Schaumreinigung

Zusammenfassung

Modifizierte Schäume können für die Lösung von Verschmutzungen bzw. von Fremdmaterial auf gefassten und materialsichtigen Objekten der Kunst und Denkmalpflege von großem Nutzen sein. Durch ihren Aufbau und die in der Schaumstruktur stattfindenden physikalischen Prozesse sind sie in der Lage, ohne mechanische Einwirkung die zu reinigende Oberfläche kontrolliert zu benetzen, den Schmutzabtrag zu forcieren und die gelösten Schmutzpartikel in die Schaummatrix aufzunehmen. Im Anschluss an den autonomen Reinigungsprozess kann der Schaum mit den gelösten Schmutzkomponenten von der Oberfläche abgesaugt oder mit anderen Hilfsmitteln weitgehend rückstandsfrei abgenommen werden. Für die Formulierung von Reinigungsschäumen ist es daher wesentlich, die Komponenten, die für die Bildung eines stabilen Schaums und für die Lösung der spezifischen Schmutzkomponenten notwendig sind, mengenmäßig möglichst gering zu halten und verbleibende Rückstände in einem Nachreinigungsvorgang vollständig von der Oberfläche zu entfernen. Dies gelingt am besten, indem anionische, amphotere und nichtionische Tenside mit einem ausgewählten Verdickungsmittel und anderen Zugschlagstoffen kombiniert werden. Dabei ist die Erkenntnis von Bedeutung, dass die Mengen der für

eine Schaumreinigung notwendigen Komponenten bei richtiger Formulierung den Mengen, die sich für die Reinigung von Kunstwerken mit wässrigen Systemen etabliert haben, entsprechen bzw. sogar darunterliegen.

Maßgeschneiderte Reinigungsschäume sind damit sehr flexible, viskose, selbstreinigende Systeme, deren Formulierung sich nicht nur gut an die spezielle Reinigungsproblematik anpassen lässt, sondern die sich auch ohne größere Schwierigkeiten weitgehend rückstandsfrei von der Oberfläche entfernen lassen. Zusätzlich können sie in Situationen eine große Hilfe sein, bei denen eine äußere Mobilisierung des abzunehmenden Materials, beispielsweise durch Wattestäbchen, Pinsel oder Schwämme, schon zu invasiv erscheint.

Peter Kopp

KOPP Restauratoren GmbH/Akademie der bildenden Künste
Wien, Österreich
p.kopp@kopp-restauratoren.at
p.kopp@akbild.ac.at



9d Hofburg Wien, Wohn- und Schlafzimmer Kaiserin Elisabeth: Endzustand Februar 2021

Anmerkungen

- 1 BANIK/KRIST 1984
- 2 WOLBERS 2000
- 3 KOPP 2017
- 4 HALLER 1995
- 5 ANGELOVA ET AL. 2017; CREMONESI 2013
- 6 KOPP 2017, S. 249
- 7 MOLLET/GRUBENMANN 2000, S. 125 f.
- 8 SCHRAMM 2014, S. 10 f.
- 9 https://en.wikipedia.org/wiki/Plateau%27s_laws [Zugriff: 4.11.2023]
- 10 BIKERMANN 1965, S. 57
- 11 https://de.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Ostwald [Zugriff: 4.11.2023]
- 12 BIKERMANN 1965, S. 58
- 13 MOLLET/GRUBENMANN 2000, S. 127
- 14 BIKERMANN 1965, S. 58
- 15 SCHRAMM 2014, S. 126
- 16 DENKOV 2012, S. 91 f.
- 17 MOLLET/GRUBENMANN 2000, S. 323 f.
- 18 SCHRAMM 2014, S. 132
- 19 SCHRAMM 2014, S. 133
- 20 MOHAMMADI 2018, S. 59
- 21 WOLBERS 2020, S. 520
- 22 MITRINOVA ET AL. 2012, S. 197; ABBOTT 2015, S. 144
- 23 MARINOVA ET AL. 2017, S. 55
- 24 ABBOTT 2015, S. 147
- 25 WOLBERS 2000
- 26 CREMONESI 2001
- 27 WOLBERS ET AL. 2020, S. 526–548
- 28 MITRINOVA ET AL. 2012, S. 196
- 29 ABBOTT 2015, S. 171
- 30 WOLBERS ET AL. 2020, S. 529
- 31 <https://inci.guide/glucosides/decyl-glucoside> [Zugriff: 22.11.2023]
- 32 MARINOVA ET AL. 2017, S. 56
- 33 SCHAD ET AL. 2022, S. 378
- 34 STAVROUDIS 2013
- 35 SCHELLMANN 2007

Literatur

ABBOTT 2015:

Steven Abbott, *Surfactant Science: Principles and Practice*. 2015/20 <https://www.stevenabbott.co.uk/index.php> [Zugriff: 16.3.2024]

ANGELOVA ET AL. 2017:

Lora Angelova, Bronwyn Ormsby, Joyce H. Townsend und Richard C. Wolbers, *Gels in the Conservation of Art*. London 2017

BANIK/KRIST 1984:

Gerhard Banik und Gabriela Krist, *Lösungsmittel in der Restaurierung*. Wien 1984

BIKERMAN 1965:

Jacob Joseph Bikerman, *Foams and Emulsions – Formation, Properties and Breakdown*. In: *Industrial and Engineering Chemistry*, Bd. 57(1), 1965, S. 56–62

CREMONESI 2001:

Paolo Cremonesi, *L'uso di tensioattivi e chelanti nella pulitura di opera policrome*. Padova 2001

CREMONESI 2013:

Paolo Cremonesi, *Rigid Gels and Enzyme Cleaning*. In: *New Insights into the Cleaning of Paintings*. In: *Proceedings from the Cleaning 2010 International Conference Universidad Politecnica de Valencia and Museum Conservation Institute*, 2013, S.179–183

DENKOV ET AL. 2012:

Nikolai D. Denkov, Slavka D. Tcholakova, Reinhard Höhler und Sylvie Cohen-Addad, *Foam Rheology*. In: Paul Stevenson (Hrsg.), *Foam Engineering. Fundamentals and Applications*. Chichester 2012, S. 91–120

HALLER 1995:

Ursula Haller, *Herstellung und Anwendung von Lösungsmittel-Gelen, -pasten und -kompressen in der Restaurierung*. Institut für Museumskunde an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Weiße Reihe, Bd.11. Stuttgart 1995

KOPP 2017:

Peter Kopp, *Reinigung von Möbeloberflächen und Oberflächen architekturgebundener Holzausstattungen*. In: Paul Bernhard Eipper (Hrsg.), *Handbuch der Oberflächenreinigung*. München 2017, S. 241–252

MARINOVA ET AL. 2017:

Krastanka G. Marinova, Kristina T. Naydenova, Elka S. Basheva, Frederic Bauer, Juergen Tropsch und Juergen Franke, *New surfactant mixtures for fine foams with slowed drainage*. In: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Bd. 523, 2017, S. 54–61

MITRINOVA ET AL. 2012:

Zlatina Mitrinova, Slavka Tcholakova, Konstantin Golemanov, Nikolai Denkov, Martin S. Vethamuthu, Kavssery und P. Ananthapadmanabhan, *Surface and foam properties of SLES+CAPB+fatty acid mixtures: Effect of pH for C12-C16 acids*. In: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Bd. 438, 2013, S. 186–198

MOHAMMADI 2018:

Shahrazad Mohammadi, *Untersuchungen zum temperaturabhängigen Schaumverhalten und zur Schaumstruktur von ausgewählten Tensidsystemen aus dem Bereich der tertiären Erdölforschung*. Bachelorarbeit Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Hamburg 2018

MOLLET/GRUBENMANN 2000:

Hans Mollet und Arnold Grubenmann, *Formulierungstechnik. Emulsionen, Suspensionen, Feste Formen*. Weinheim 2000

SCHAD ET AL. 2022:

Tamara Schad, Natalie Preisig, Wiebke Drenckhan und Cosima Stubenrauch, *Foam-based cleaning of surfaces contaminated with mixtures of oil and soot*. In: *Journal of Surfactants and Detergents*, Bd. 25, 2022, S. 377–385

SHELLMANN 2007:

Nanke C. Schellmann, *Animal glues: a review of their key properties relevant to conservation*. In: *Reviews in Conservation*, Nr. 8, 2007. S. 55–66

SCHRAMM 2014:

Laurier L. Schramm, *Emulsions, Foams, Suspensions, and Aerosols. Microscience and Applications*. Weinheim 2014

STAVROUDIS 2013:

Christopher Stavroudis, *pH adjusted water recipes, technical note*. Washington DC 2013
https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/teaching/caps_ph_adjusted_h2o.pdf [Zugriff: 16.3.2024]

STEVENSON 2012:

Paul Stevenson (Hrsg.), *Foam Engineering. Fundamentals and Applications*. Chichester 2012

WOLBERS 2000:

Richard C. Wolbers, *Cleaning Paintings: Aqueous Methods*. London 2000

WOLBERS 2020:

Richard C. Wolbers, Christopher Stavroudis und Matthew Cushman, *Aqueous methods for the cleaning of paintings*. In: Joyce H. Stoner und Rebecca Rushfield (Hrsg.), *Conservation of Easel paintings*, 2020, S. 526–548, <https://doi.org/10.4324/9780429399916>

Abbildungsnachweis

Abb. 2

MOLLET/GRUBENMANN 2000, S. 127; überarbeitete Grafik © Sara Picchi

Abb. 3

SCHRAMM 2014, S. 157; überarbeitete Grafik © Sara Picchi

Abb. 4

DENKOV 2012 ET AL., S. 91; überarbeitete Grafik © Sara Picchi

Alle übrigen Abbildungen:

Autor

Titel:

Detail aus Abb. 8b

Lizenz

Dieser Beitrag ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-NC-ND 4.0 veröffentlicht.

