

# Funktionsweise von Nebulizern und eine Neuentwicklung für organische Lösungsmittelsysteme

Andrea Pataki-Hundt

Pudernde Malschichten können mit Ultraschall- oder Druckluftverneblern gefestigt werden. Die Funktionsweise einer Reihe verschiedener Druckluftvernebler, auch unter dem Namen Nebulizer bekannt, wird anhand von schematischen Zeichnungen dargelegt. Die Druckluftvernebler sind aus Kunststoffen gefertigt, für wässrige Lösungen entwickelt und als Einmalgeräte konzipiert. Die Anwendung von organischen Lösungsmitteln ist nicht vorgesehen und auch nicht ratsam, da Kunststoffbestandteile durch Lösungsvorgänge in die zu vernebelnde Klebstofflösung gelangen könnten. Moderne Pigmentoberflächen zum Beispiel bedürfen allerdings immer mehr einer Behandlung mit lösungsmittelhaltigen Klebstoffen. Hierfür wurde ein Vernebler aus Glas und Teflon entwickelt, der an einem Kompressor angeschlossen ist. Die Teilchengröße von gängigen Lösungsmitteln und verschiedenen Klebstofflösungen wurde mit einem Streulicht-Partikel-Größen-Analysator vermessen. Sämtliche Partikel sind kleiner als 5 µm und es lassen sich Alkohole, Ketone, Benzine und eine Reihe von Klebstofflösungen wie Paraloid B72 und Klucel vernebeln. Der neu entwickelte Vernebler wurde an einem farbigen stark abblätternden Textilentwurf auf einer Kunststofffolie eingesetzt.

## *The Functioning of Nebulizers and a New Designed Device for Organic Solvents*

*The consolidation of friable and powdery pigments can be performed with either ultrasound or air pressure devices. The basic function of nebulizers is explained by technical drawings. The available nebulizers are made of plastic; they are produced for aqueous systems and are disposable. The use of solvents is not advisable, because plastic components can get dissolved during consolidation and may contaminate the adhesive. Modern pigmented surfaces for example, are calling more and more for consolidation with solvents. A newly developed device for the use of solvents is made of glass and Teflon, it is hooked to a compressor. The size of particles of common organic solvents and adhesives is measured with a scattered-light-particle-size-analyser. All particles are smaller than 5 µm. Alcohols, ketenes, benzines and adhesives such as Paraloid B72 and Klucel can be nebulized. The consolidation of friable pigments on a plastic foil for a conceptual design for textiles served as a case study.*

## 1. Einführung

Die Konsolidierung von pudernden Malschichten wurde erstmals 1989 von Stefan Michalski und Carole Dignard und seinen Kollegen vom Canadian Conservation Institute (CCI) vorgestellt.<sup>1</sup> Ein umgebauter Luftbefeuchter diente als Aerosolgerät, um wässrige und nicht-wässrige Systeme zu vernebeln. Seitdem hat sich das berührungsfreie Vernebeln als Restaurierungsmethode zur Konsolidierung etabliert; es eignet sich für Kohlezeichnungen, Gouachen und Pastelle<sup>2</sup> oder pudernde Oberflächen von modernen Kollagen<sup>3</sup>. Das Festigen von matten Gemäldeoberflächen wurde zum Beispiel durch eine lösungsmittelgesättigte Umgebung<sup>4</sup> optimiert. Zudem wurde ein Aerosolgerät speziell für den restauratorischen Bedarf entwickelt.<sup>5</sup> Jessica David<sup>6</sup> konsolidierte eine Hinterglasmalerei mit synthetischen Harzen in organischen Lösungsmitteln. Ende der 1990er Jahre wurde ein Druckluftvernebler – der Nebulizer – von Sandra Grantham<sup>7</sup> vorgestellt; sie arbeitete mit einem Sidestream-Vernebler. Grantham adaptierte die für den Medizingebrauch eingesetzten Geräte für die Restaurierung, indem sie diese mit Klebstofflösungen befüllt und für die Festigung eingesetzt hat. Die Nebulizer sind einfach im Gebrauch und eignen sich vor allem für die Vernebelung von wässrigen Lösungen. Im Folgenden werden die Funktionsweisen von Ultraschallgeräten und Druckluftverneblern erläutert.

## 2. Ultraschall- und Druckluft-Vernebler

Beide Geräte erzeugen Aerosole. Ein Aerosol ist der Definition nach „ein Gemisch aus flüssigen oder festen Partikeln, die lange genug in einem gasartigen Medium suspendiert sind, um beobachtet oder gemessen zu werden“.<sup>8</sup> In der Restaurierung werden unter Aerosolen in der Luft suspendierte vor allem flüssige oder wässrige Teilchen verstanden, wie sie beispielsweise bei der Vernebelung von Wasser oder Klebstofflösungen entstehen.

Aerosole für den Bereich der Restaurierung können entweder mit Ultraschall oder mit Druckluft erzeugt werden. Die Funktionsweisen unterscheiden sich partiell, so dass Partikelgrößen sowie Austrittsgeschwindigkeiten der Aerosole, der so genannte Gas-Partikelstrom, in den zwei Vernebelungstechniken durchaus variabel sind.

Eine ganze Reihe von Flüssigkeiten und Klebstofflösungen kann vernebelt werden, beispielsweise: Wasser basierte Systeme wie Proteinklebstoffe, Gelatine, Hausenblase<sup>9</sup> oder Celluloseether<sup>10</sup>, synthetische Polymere<sup>11</sup> oder Mischungen von Polysacchariden und Proteinen.<sup>12</sup>

Wenn die optimale Viskosität einer Flüssigkeit oder einer Klebstofflösung gewählt ist, was z.B. für Ultraschall betriebene Geräte bei etwa 100 mPa·s liegt, dann kann jede Flüssigkeit vernebelt werden.<sup>13</sup> In der Restaurierung soll die Konsolidierung von pudernden Pigmentschichten nach der Idealvorstellung folgendermaßen verlaufen: Sobald Aerosole mit Ultraschall oder Druckluft erzeugt wurden, sollen diese auf der Oberfläche auftreffen, einzelne Pigmentkörner benetzen, in das poröse Pigmentgefüge eindringen und stabile

Klebstoffbrücken in Form eines Meniskus aufbauen.<sup>14</sup> Hierbei sollen durch die Konsolidierung von pudernden Malschichten keine Farbveränderungen auftreten. Dies ist eine der Hauptanforderungen an diese invasive Restaurierungstechnik. Da pudernde Malschichten auch nach einer Festigung mechanisch instabil sind, ist eine spätere Rückführung der Festigungsmaßnahme, also die Entfernung des Konsolidierungsmittels, in den meisten Fällen technisch nicht möglich. Dies unterstreicht die Verantwortung des ausführenden Restaurators und die hohen Anforderungen an Technik und Material.

### 3. Technik des Vernebelns

Die Funktionsweise der Ultraschall und Druckluft betriebenen Geräte zum Vernebeln von Flüssigkeiten lässt sich durch die Beschreibung des allgemeinen Prinzips erläutern. Auch die Funktionsweise von marktüblichen medizinischen und von speziell für den restauratorischen Markt entwickelten Geräten ist vergleichbar.

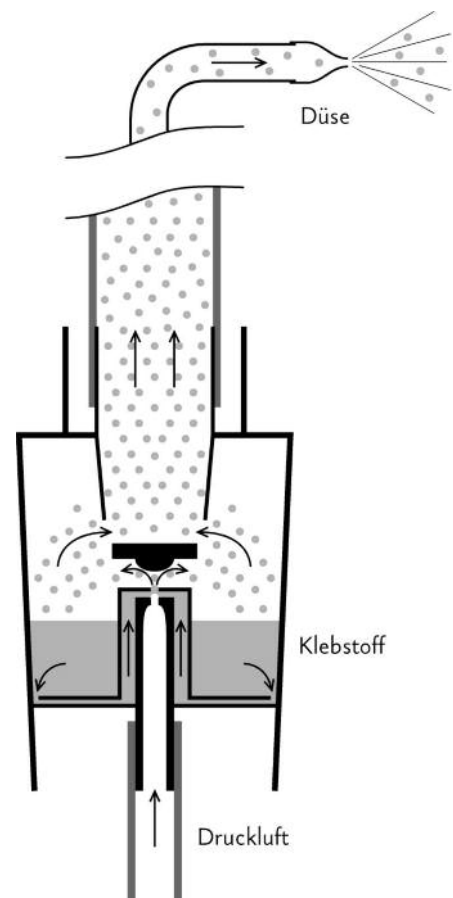
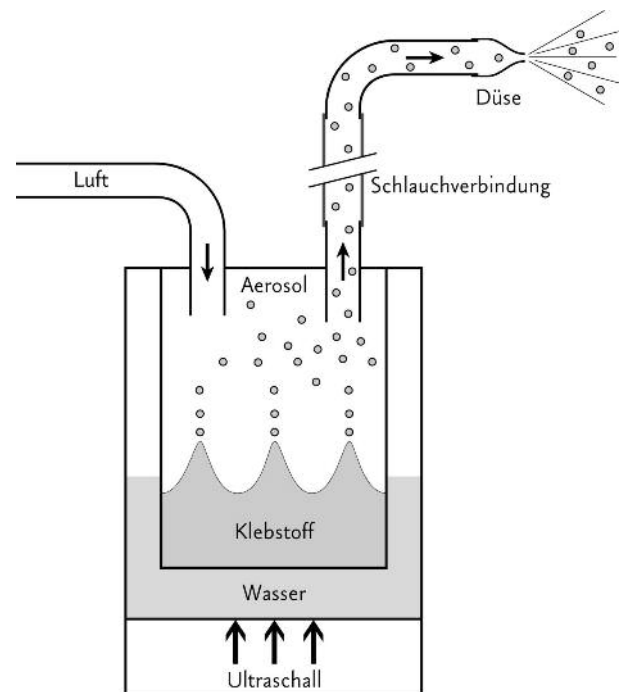
Eine Ultraschallquelle – auch Ultraschallschwinger genannt – emittiert Ultraschallwellen, die Materialien wie Glas, Metall oder Kunststoff passieren können, was allerdings von der Bauweise des Aerosolgerätes abhängig ist (Abb. 1). Die Ultraschallwellen durchdringen anschließend ein Wasserreservoir, das bei allen bekannten Geräten vorliegt. Die zu vernebelnde Flüssigkeit oder Klebstofflösung wird in einem Kunststoffbehälter verwahrt, zu welchem wiederum die Ultraschallwellen gelangen. Die Flüssigkeit gerät durch die Ultraschallwellen in Bewegung, es entstehen Wellen, woraufhin sich kleinste Tröpfchen an der Spitze der Wellenkronen abscheiden. Das Aerosolpartikel ist geformt. Das produzierte Aerosolpartikel besitzt eine Rotationsenergie und eine Ladung, zeigt allerdings keine eigene Bewegungsrichtung.<sup>15</sup> Dies bedeutet, dass die Tröpfchen träge sind und beispielsweise nicht aufsteigen können. Aus diesem Grund ist in allen Gerätetypen eine Luftpumpe eingebaut, mittels der die Tröpfchen aus dem Flüssigkeits- oder Klebstoffbehälter herausgetrieben und weiter in die Schläuche bis zur Austrittsdüse geleitet werden.

Bekannte Ultraschall betriebene Aerosolgeneratoren sind der umgebaute Luftbefeuchter von Michalski und seinen Kollegen<sup>16</sup>, der Mini-Vernebler von der Firma Deffner & Johann und der AGS 2000, vertrieben durch die Firma Zentrum für Bucherhaltung. Eine Zusammenstellung verschiedener Geräte kann an anderer Stelle nachgelesen werden.<sup>17</sup>

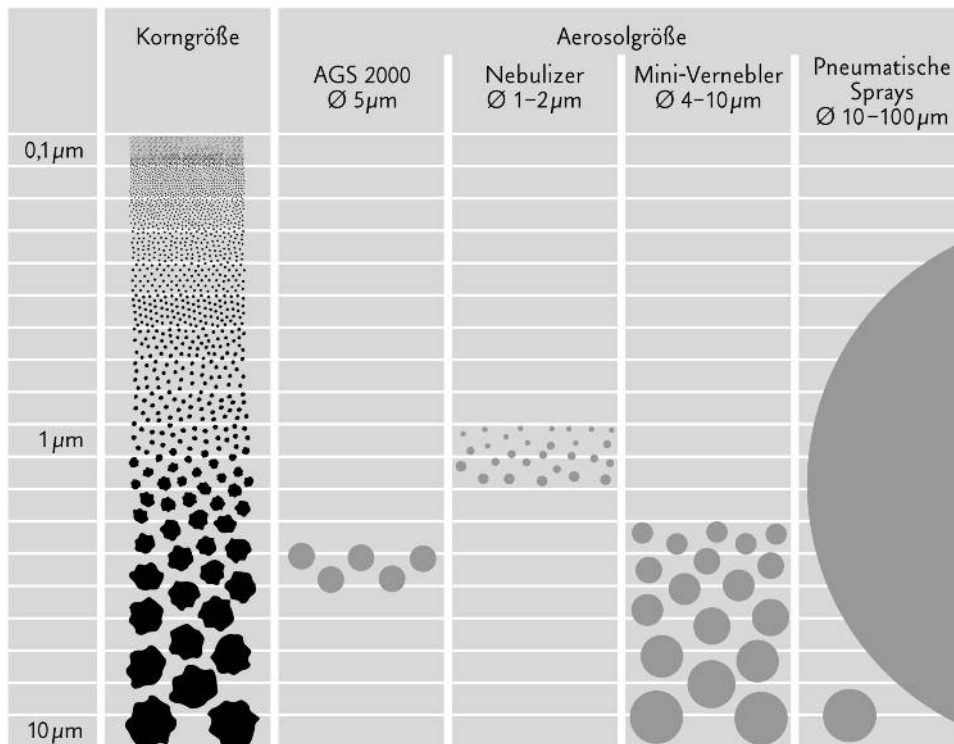
Grantham<sup>18</sup> stellte die Anwendung eines Sidestream Nebulizers der Firma Medic Air, West Sussex, UK, für die Festigung von japanischen Wandschirmen vor. Dieser Einweg-Nebulizer ist aus Kunststoff gefertigt und über eine Messing-Kupplung mit einem Kompressor verbunden. In Abbildung 2 ist die Funktionsweise eines vergleichbaren Nebulizers dargestellt (B&P-Produkte).

Druckluft mit etwa 1 bis 1,5 bar strömt durch Schläuche in die Unterseite des Nebulizers. Am Ende dieses Einführkanals verengt sich dessen Durchmesser, wodurch die Geschwindigkeit des Luftstromes steigt. Dieses Phänomen basiert auf dem Gesetz nach Bernoulli und Venturi, welches besagt,

1  
Schematische Zeichnung der Funktionsweise von Ultraschall betriebenen Aerosolgeneratoren



2  
Schematische Zeichnung der Funktionsweise eines Nebulizers (B&P-Produkte)



3  
Messung der Partikelgrößen von Ultraschall betriebenen Aerosolgeneratoren (AGS 2000 und Mini-Vernebler) und einem Druckluftvernebler (Nebulizer) im Vergleich zu pneumatischen Sprühern

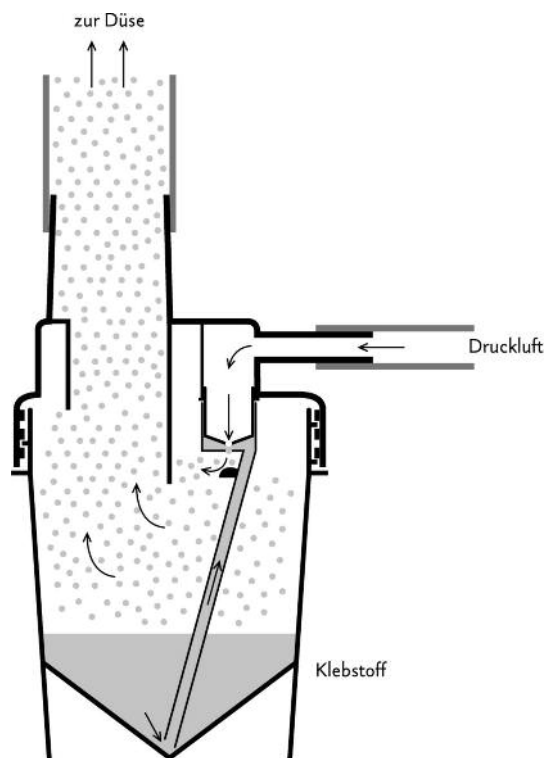
dass sich die Strömungsgeschwindigkeit in einem Kanal erhöht, wenn der Durchmesser reduziert wird; hierbei fällt allerdings auch der Druck ab. Der Druckabfall etabliert sich zu einem Unterdruck. Dieser Unterdruck bewirkt, dass die Flüssigkeit oder die Klebstofflösung angezogen wird (siehe hierzu Abb. 2, Pfeile in Grau). Das nun vorliegende Gemisch aus Luft und Flüssigkeit wird im nächsten Schritt gegen eine halbkreisförmige Prallplatte geschleudert (siehe Abb. 2). Sobald das Luft-Flüssigkeits-Gemisch die Prallplatte passiert hat, strömt das produzierte Aerosol durch Schläuche aus dem Gerät heraus. Die Druckluftvernebler benötigen also keine Luftpumpen zum Transport des Aerosols, da die Druckluft eine ausreichende Strömungsgeschwindigkeit aufweist. Der Gas-Partikelstrom des Ultraschall betriebenen Aerosolgenerators AGS 2000 liegt bei etwa 1200 ml/min. Im Vergleich hierzu weist der Nebulizer (B&P-Produkte) einen Gas-Partikelstrom von etwa 7100 ml/min auf, d.h. im Nebulizer liegt circa eine sechsfache Strömungsgeschwindigkeit vor.<sup>19</sup>

Liegt in Druckluftverneblern wie im Nebulizer (B&P-Produkte) eine Prallplatte vor, entlang welcher das Luft-Flüssigkeits-Gemisch geleitet wird, handelt es sich um einen Sidestream-Nebulizer (oder Seitenstrom-Vernebler) (siehe Abb. 2). Ein Ventstream-Nebulizer hat prinzipiell denselben technischen Aufbau, allerdings ist die Anwendung des vor allem im medizinischen Bereich gebräuchlichen Gerätes verschiedenartig. In der medizinischen Anwendung werden zusätzlich Filter eingesetzt, so dass kein Aerosol in die Atmosphäre gelangt und der Patient das Inhalat aktiv einatmen muss. Dadurch ist die Aerosolausbeute wesentlich höher und der Verlust von Medikamenten geringer. Die notwendige aktive Ansaugung des Aerosols spricht gegen die Verwendung in der Restaurierung, da hier das Aerosol selbstständig austreten muss.

In der Restaurierung ist für die Konsolidierung von Objekten mittels Aerosolen wünschenswert, dass das Verneblungsgerät möglichst kleine, gleichmäßig große und reproduzierbare Aerosolpartikel erzeugt und hierbei die Strömungsgeschwindigkeit nicht zu hoch ist. Abbildung 3 bietet einen Überblick über Partikelgrößen und deren Verteilung der unterschiedlichen Verneblungsgeräte. Die ursprüngliche Abbildung wurde der Literatur entnommen<sup>20</sup> bzw. die Messung mit einem Streulicht-Partikel-Größen-Analysator der Firma Palas GmbH erweitert.<sup>21</sup> Wie das Diagramm zeigt, weisen Künstlerpigmente ungefähre Korngrößen von 0,1 µm bis 10 µm auf (Spalte links außen). Die Partikelgrößen des AGS 2000 liegen bei etwa 5 µm, der Nebulizer (B&P-Produkte) erzeugt Partikel von 1–2 µm Größe. Die Partikel des Mini-Verneblers liegen zwischen 4–10 µm. Hierbei handelt es sich um ein Gerät, welches von Petra Demuth und Renate Kühnen entwickelt, von Günther Engelbrecht zusammengebaut und von der Firma Deffner & Johann vertrieben wird. Sowohl der Mini-Vernebler als auch der AGS 2000 sind Ultraschall betriebene Geräte, im Gegensatz zum Druckluft betriebenen Nebulizer.

Die dargestellten Aerosol-Partikelgrößen stellen Durchschnittswerte dar. Es zeigt sich allerdings, dass der AGS 2000 Aerosolpartikel mit der gleichmäßigsten Größe erzeugt, gefolgt vom Nebulizer, der schon eine etwas breitere Größenstreuung erkennen lässt. Der Mini-Vernebler erzeugt Aerosolpartikel im Bereich zwischen 4–10 µm, was bedeutet, dass er die weiteste Partikelgrößenstreuung aufweist. Im Vergleich zu pneumatischen Sprühern, die Inge Stark<sup>22</sup> in einem Beitrag beschrieb, können die drei vorgestellten Aerosolgeneratoren allerdings ausreichend kleine Partikel, d.h. unter 10 µm, erzeugen. Bei diesem Diagramm wurden allerdings die Gas-Partikel-Ströme nicht berücksichtigt. Die sehr kleinen Partikel des Nebulizers gehen einher mit einem hohen Gas-Partikel-Strom, was unter Umständen bei extrem

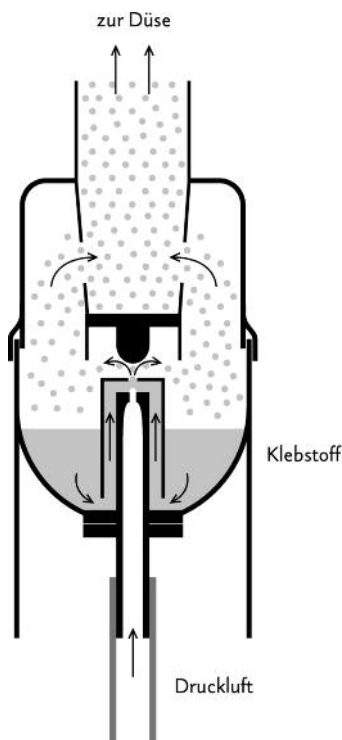
4  
Schematische Zeichnung der Funktionsweise des B&F Aero Mist Nebulizers (Allied Healthcare)



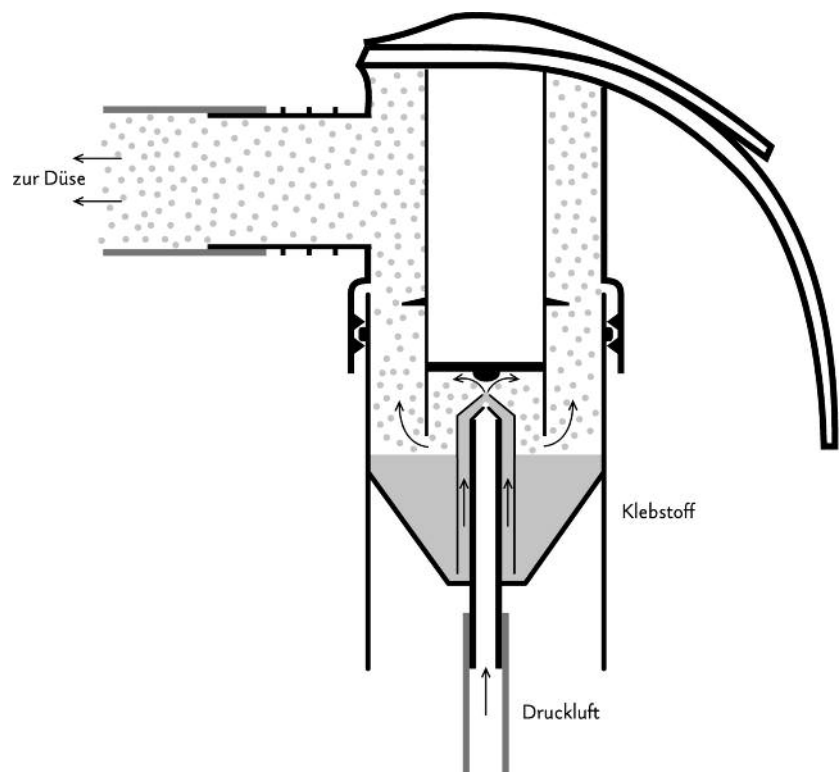
pudernden Malschichten zu einem Problem werden kann, da der Luftstrom durchaus Pigmente bzw. Malschichtschollen abheben und wegblasen kann.

#### 4. Weitere Nebulizer

Der Markt für medizinische Geräte vertreibt eine Anzahl von Nebulizern, von denen drei weitere vorgestellt werden sollen. Diese können auch für den restauratorischen Gebrauch genutzt werden. Julie Dennin Ream benutzt in Fortbildungsseminaren in den USA einen B&F Aero Mist Nebulizer (Allied Healthcare). In dem Kunststoffgerät wird die Druckluft von der Seite eingeführt und durch eine Verengung gepresst. Der so entstandene Unterdruck zieht die zu vernebelnde Flüssigkeit aus dem Reservoir durch ein Rohr nach oben (Abb. 4). Nachdem das Luft-Flüssigkeitsgemisch durch eine zweite Öffnung geleitet wurde, wird es an der Prallplatte zerschlagen. Das Aerosol wird anschließend durch das Gerät zu den Schläuchen und Düsen geleitet. Der obere Teil des Gerätes lässt sich abschrauben, um neue Flüssigkeit einzufüllen. Die Geräte Up-Draft-Nebulizer und Pari Sinus (Abb. 5 und 6) funktionieren in vergleichbarer Weise wie die Geräte von B&P-Produkte und der B&F Aero Mist. Der einzige Unterschied liegt in der Art und Weise des Öffnens und Nachfüllens des Gerätes. Zudem können beim Pari Sinus zwei verschiedene Düseneinsätze verwendet werden. Abbildung 5 zeigt den Up-draft-Nebulizer, dessen oberer Teil nicht durch Schrauben, sondern durch Einrasten des Überwurfdeckels



5  
Schematische Zeichnung der Funktionsweise eines Up-Draft-Nebulizers (Hudson RCI)



6  
Schematische Zeichnung der Funktionsweise des Pari Sinus (Pari GmbH)



geöffnet und geschlossen wird. Die einfachste und komfortabelste Öffnung liegt beim Pari Sinus vor, bei dem eine Kunststoffflasche angehoben und niedergelegt wird, um das Gerät zu öffnen und zu schließen. Bei diesem Gerät können ebenfalls zwei verschiedene Düseneinsätze verwendet werden, welche die Größe des Aerosols beeinflussen können. Dieser Punkt wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Die Geräte messen in der Höhe maximal 8 cm und sind sämtlich aus transparentem Kunststoff gefertigt. Die Verbindung zum Kompressor erfolgt über einen Druckschlauch, an dem eine Kupplung aus Messing angebracht ist. Das austretende Aerosol wird durch strukturierte Kunststoffschläuche und aufgesetzte Düsen auf das Objekt geleitet.

## 5. Neuentwicklung

Die Ultraschall betriebenen Aerosolgeneratoren können Flüssigkeiten nur bis zu einer Viskosität von etwa 100 mPas<sup>23</sup> vernebeln. Liegt die Viskosität höher, so können sich an der Flüssigkeitswelle keine Aerosoltröpfchen abscheiden. Bei der Vernebelung von organischen Lösungsmitteln tritt ein weiteres Problem auf. Die geringere Oberflächenspannung wirkt der Abscheidung von Aerosoltröpfchen erschwerend entgegen, so dass vermutlich aus diesem Grund beispielsweise die Vernebelung von Klucel in Ethanol mit dem AGS 2000 unmöglich ist.

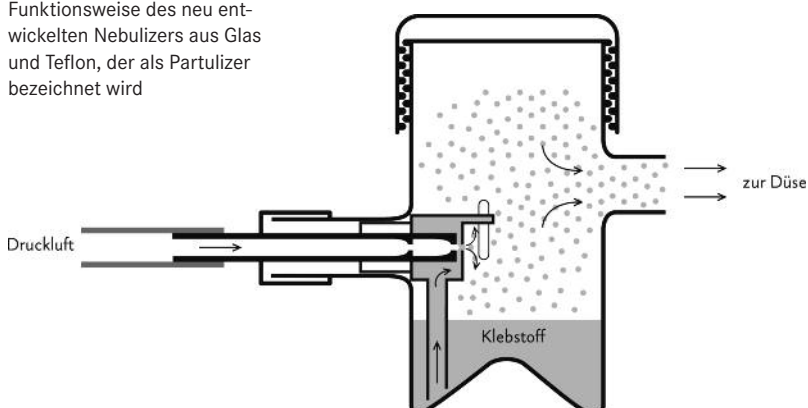
Nebulizer sind an einen Kompressor angeschlossen, was die Vernebelung von höheren Konzentrationen erlaubt. Die Druckluft von bis zu 2 bar garantiert hohe Luftstromgeschwindigkeiten und auch das erfolgreiche Zerschlagen des Luft-Flüssigkeitsgemisches an der Prallplatte. Dies geht allerdings mit einem höheren Gas-Partikelstrom einher, was als Nachteil angesehen werden kann. Ultraschall betriebene Generatoren haben prinzipiell einen geringen Gas-Partikelstrom. Das Vernebeln von organischen Lösungsmitteln ist bei den marktüblichen Nebulizern nicht anzuraten, da Kunststoffkomponenten durch die Lösungsmittel angelöst und somit die zu vernebelnden Flüssigkeiten kontaminiert werden könnten.

Das Vernebeln von organischen Lösungsmitteln und ihren Klebstofflösungen ist ein Desiderat in der Restaurierung. Da dies mit den gängigen Generatoren, sowohl Ultraschall als auch Druckluft betriebenen, nur äußerst eingeschränkt möglich ist, lag die Entwicklung eines dafür konfigurierten Gerätes nahe.

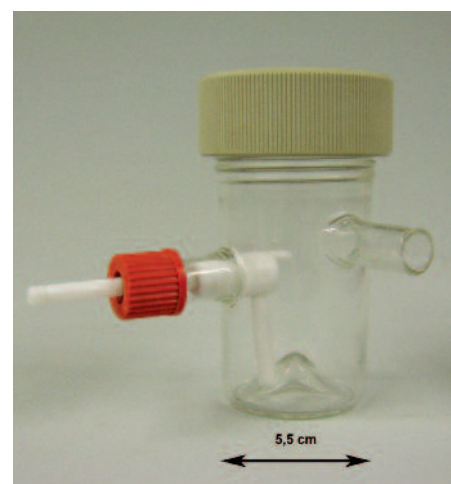
Der neu entwickelte Generator wird im folgenden Partulizer genannt. Das eigentliche Gerät besteht ausschließlich aus den inerten Materialien Glas und Teflon. Die Funktionsweise ist in Abbildung 7 dargestellt und entspricht den oben beschriebenen Druckluft betriebenen Geräten. Der einzige Unterschied liegt in zwei hintereinander gelegenen, sich verengenden Düsen, die eine weitere Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bewirken. Das Gerät ist mit einem Schraubdeckel versehen, welcher mit Teflon ausgebetet ist. Der Schlauch und die Austrittsdüse sind aus PP-Kunststoff und nicht aus Teflon gefertigt. Ein Anlösen des Kunststoffs durch die Aerosole ist allerdings nicht zu befürchten. Insgesamt fasst das Gerät etwa 100 ml. Das neu entwickelte Aerosolgerät kann sowohl organische Lösungsmittel als auch wässrige Systeme vernebeln. Das Material Glas hat den Vorteil, dass es leicht zu reinigen ist, aber auch den Nachteil, dass eine Bruchgefahr vorliegt. Abbildung 8 zeigt den Partulizer ohne Befüllung und Schläuche. In Abbildung 14 ist der Partulizer in der Anwendung zu sehen.

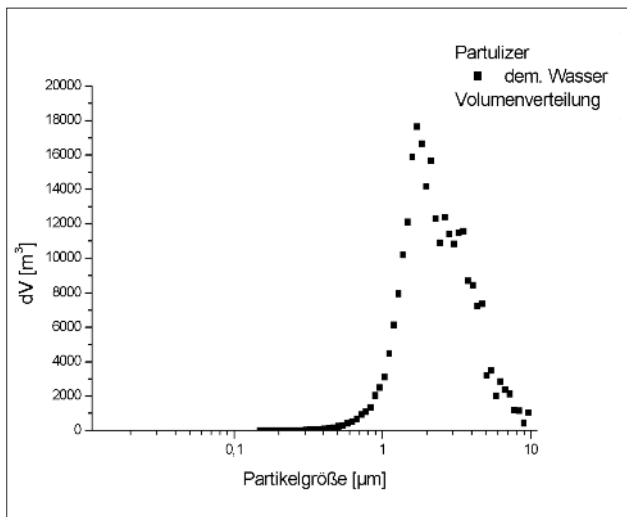
Beim Einsatz von organischen Lösungsmitteln werden Aerosolpartikel freigesetzt, die so klein sind, dass sie lungengefährlich sind. Das bedeutet, dass der Anwender sich mittels einer Mundmaske aus Aktivkohle schützen muss und im besten Fall auch unter dem Abzug arbeiten sollte. Diese Sicherheitsvorkehrungen sind unbedingt zu beachten. Beim Vernebeln von wässrigen Systemen bietet eine Mundmaske, die gegen Stäube vorgesehen ist, ausreichend Schutz.

7  
Schematische Zeichnung der Funktionsweise des neu entwickelten Nebulizers aus Glas und Teflon, der als Partulizer bezeichnet wird

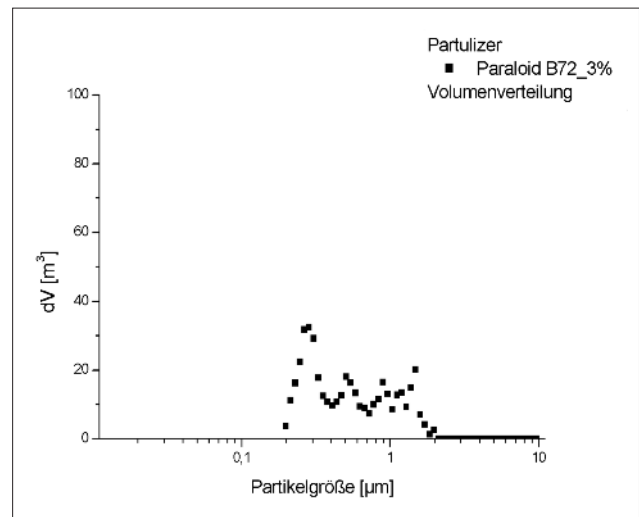


8  
Partulizer ohne dazugehörige Schläuche. Von links wird der Druckschlauch zum Kompressor angesetzt, rechts ist das Rohr, aus dem das Aerosol herausgeleitet wird. Oben befindet sich der Schraubverschluss für die Befüllung.

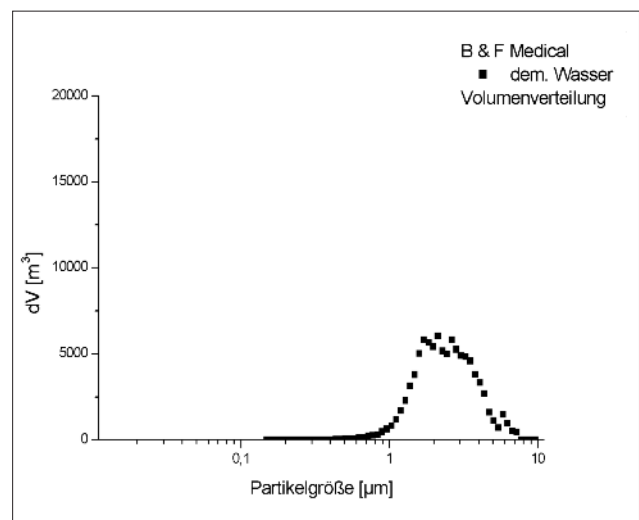
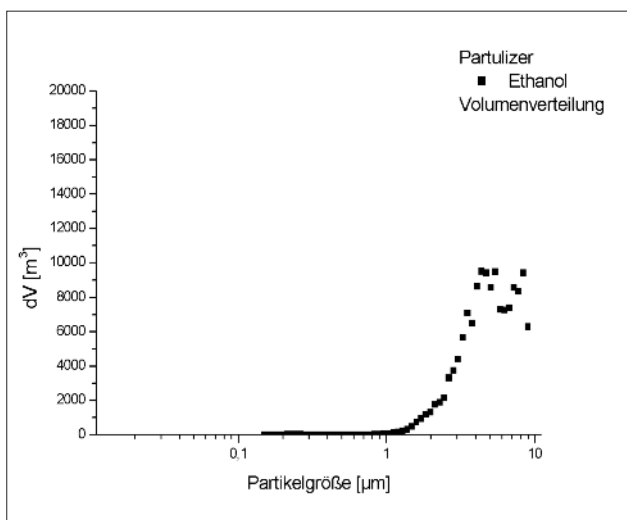




9  
Volumenverteilung von demineralisiertem Wasser des Partulizers, wobei ein Maximum bei 2 µm zu erkennen ist.



10  
Volumenverteilung von Ethanol des Partulizers, wobei ein Maximum zwischen 4 bis 6 µm zu erkennen ist.



11  
Volumenverteilung von Paraloid B 72, 3 %ig in Ethylacetat und Propylacetat (1:1) des Partulizers, wobei ein Maximum bei 0,3 µm und 1 µm zu erkennen ist.

12  
Volumenverteilung von demineralisiertem Wasser des B & F Aero Mist Nebulizers, wobei ein Maximum zwischen 2 und 3 µm zu erkennen ist.

## 6. Aerosolgrößen der Neuentwicklung und von bekannten Geräten

Die Aerosole des neu entwickelten Gerätes wurden mit einem Streulicht-Partikel-Größen-Analysator der Firma PALAS GmbH, Karlsruhe, vermessen. Abhängig von der produzierten Aerosolmenge, kamen zwei Messsysteme zum Einsatz. Das System Welas® digital 1000 wurde bei einer Partikelmenge von 1 bis  $10^6$  P/cm<sup>3</sup> angewendet. Das INAS® System kam bei Mengen über  $10^7$  P/cm<sup>3</sup> zum Einsatz. „P“ steht für die Anzahl der Aerosolpartikel, die in einem spezifischen Messraum (cm<sup>3</sup>) gemessen werden. Die Ergebnisse beider Systeme sind miteinander vergleichbar; sie nehmen Partikel von 0,2 µm bis 10 µm auf. Im Folgenden wird nur die Volumenverteilung als Ergebnis in den Diagrammen dargestellt, da es die Summe der Volumina der gemessenen Partikel in nm angibt.

Abbildung 9 zeigt die Verteilung der Partikelgrößen von vernebeltem, demineralisiertem Wasser. Das Maximum liegt

hier bei etwa 2 µm. Wird Ethanol mit dem Partulizer vernebelt, so liegt das Maximum der erzeugten Teilchen zwischen 4 und 6 µm (Abb. 10).

Das Ergebnis einer Vernebelung von Paraloid B72-Lösung (Konzentration von 3 % in Ethylacetat und Propylacetat, Verhältnis 1:1) zeigt Abbildung 11. Ein Maximum der Aerosolpartikelgrößen liegt bei etwa 0,3 µm, das andere bei etwa 1 µm. Die geringe Volumenverteilung (siehe Y-Achse) weist darauf hin, dass bei der Vernebelung der Paraloid B72-Lösung weniger Partikel erzeugt wurden. Das bedeutet, dass die Klebstofflösung eine höhere Viskosität als demineralisiertes Wasser oder Ethanol aufweist und somit schwerer zu vernebeln ist.

Um die neue Entwicklung mit einem herkömmlichen Nebulizer zu vergleichen, wurde der Druckluftvernebler von B & F Aero Mist Nebulizer mit demineralisiertem Wasser getestet (Abb. 4 und 12). Das Maximum liegt zwischen 2 und 3 µm; somit ist das Ergebnis mit dem des Partulizers zu vergleichen. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse einer Versuchsreihe mit orga-

Lösungsmittel	Beurteilung der Verneblungsmöglichkeit [+, ~, -]	Maximale Partikelgröße [µm]	Druckluft [bar]
Ethanol	+	4	~2
Propanol	+		~2
Ethylacetat	~		
Propylacetat	+		~2
Butylacetat	+		~2
Aceton	~		
Methylethylketon	+		~2
Dem. Wasser	+	0,2	~2
White spirit (40–60 °C)	–		Verdunstet, kein Aerosol
White spirit (100–140 °C)	+		~2
White spirit (140–200 °C)	+		~1
Isooctane	+		~2
Petroleumether	~		

Tabelle 1

Vernebelung verschiedener organischer Lösungsmittel mit dem Partulizer. Die Vernebelungsmöglichkeit wurde wie folgt beurteilt:  
 + gutes Vernebeln, ~ Vernebeln mit Schwierigkeiten und  
 – missglücktes Vernebeln.

Klebstofflösung	Beurteilung der Verneblungsmöglichkeit [+, ~, -]	Maximale Partikelgröße [µm]	Druckluft [bar]
Klucel in Ethanol (1 %, w/v)	+	0,2 und 1,5	~2
Klucel in Ethanol (2 %, w/v)	+	0,2 und 1,5	~2
Cyclododecan in Siedegrenzbenzin 140–200 °C (10 %, w/v)	+	0,2 – 1	~2
Paraloid B 72 in Ethyl- und Propylacetat, 1:1 (21 %, w/v)	–	– [?]	Zu hohe Viskosität, kein Aerosol
Paraloid B 72 in Ethyl- und Propylacetat, 1:1 (7 %, w/v)	+	0,3 – 1	Wenig Aerosol, aber auch weißes Pulver
Paraloid B 72 in Ethyl- und Propylacetat, 1:1 (5 %, w/v)	+	0,3 – 1	~1–2
Paraloid B 72 in Ethyl- und Propylacetat, 1:1 (3 %, w/v)	+	0,3 – 1	≤ 2
Paraloid B 72 in Ethyl- und Propylacetat, 1:1 (1 %, w/v)	+	0,3 – 1	≤ 1
Gelatine in dem. Wasser (4 %, w/w)	+		~2
MC 400 in dem. Wasser (2 %, w/w)	+		~3
Funori in dem. Wasser (1 %, w/w)	+		~2

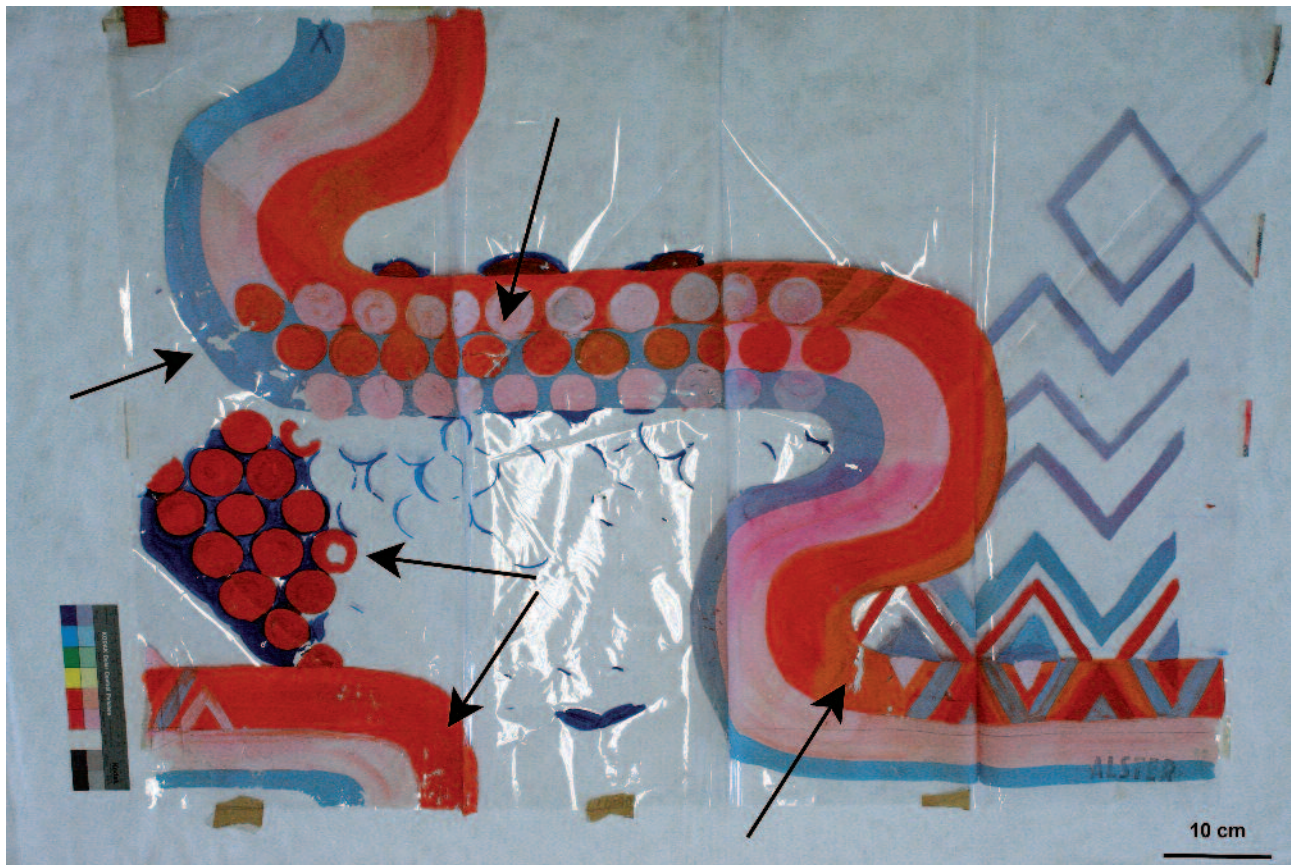
Tabelle 2

Vernebelung verschiedener Klebstofflösungen mit dem Partulizer. Die Vernebelungsmöglichkeit wurde wie folgt beurteilt:  
 + gutes Vernebeln, ~ Vernebeln mit Schwierigkeiten und  
 – missglücktes Vernebeln.

nischen Lösungsmitteln, die mit dem Partulizer vernebelt wurden: Alkohole, Ketone, Wasser, Ester und Benzinfraktionen. In erster Linie sollte geprüft werden, ob die Lösungsmittel mit dem Gerät vernebelt werden können und welcher Druck hierfür eingesetzt werden muss. Darüber hinaus wurden teilweise die Maxima der Partikelgrößen gemessen.

Es zeigt sich, dass außer White Spirit mit der geringsten Siedetemperatur (40–60 °C) alle getesteten Lösungsmittel

vernebelt werden können; allerdings zeigten Ethylacetat, Petroleumether und Aceton Schwierigkeiten beim Vernebeln. Dies liegt vermutlich daran, dass diese Lösungsmittel ebenfalls niedrige Siedetemperaturen aufweisen und deshalb bereits im Gerät oder Schlauch verdampfen und nicht als Aerosol austreten können. Im Folgenden wurden verschiedene Klebstoffe in unterschiedlichen Konzentrationen und organischen Lösungsmitteln getestet. Die in Tabelle 2 aufgeführten Ergebnisse zeigen zunächst generell: je höher



die Konzentration einer Klebstofflösung wird, desto schwieriger gestaltet sich das Vernebeln. Paraloid B 72 (gelöst in Ethyl- und Propylacetat, 1:1) kann zum Beispiel nur bis zu einer Konzentration von 5 % (w/v) vernebelt werden. In so einem Fall könnte die Druckluft weiter erhöht werden. Allerdings sind hier auch Grenzen gesetzt. Die Druckluft sollte 3 bar nicht überschreiten, ansonsten könnte das Gerät undicht werden oder sich der Druckschlauch vom Gerät lösen.

Das Vernebeln von Klucel in Ethanol oder Cyclododecan in Siedegrenzbenzin ist ebenso erfolgreich wie das Vernebeln von Paraloid B 72 in Ethyl- und Propylacetat (1:1) bis zu einer Konzentration von 5 % (w/v). Im Vergleich dazu können auch wässrig gelöste Klebstoffe vernebelt werden, wie beispielsweise Gelatine (4 %, w/w), Methylcellulose (2 %, w/w) und Funori (1 %, w/w).

Fazit: Der Partulizer stellt eine Alternative zu den bereits bekannten Aerosolgeneratoren dar. Er bietet darüber hinaus weitere Anwendungsmöglichkeiten. Im Gegensatz zu den gängigen Geräten, die entweder nicht in der Lage sind, Lösungsmittel und die darin gelösten Klebstoffe zu vernebeln, oder eine Kontaminationsgefahr mit sich bringen, ist der Partulizer in diesen Fällen gut anwendbar. Die Materialien Glas und Teflon sind inert und können leicht gereinigt werden. Die Größen der produzierten Aerosolpartikel sind relativ klein – zwischen 0,2 und 4 µm – und sind von dem Lösungsmittel bzw. dem darin gelösten Polymer abhängig. Zudem arbeitet das Gerät reproduzierbar. Nachteil ist die erhöhte Bruchgefahr und der relativ hohe Gas-Partikelstrom. Die Druckluft sollte 3 bar nicht überschreiten, damit das Gerät dicht ist und der Druckschlauch sich nicht löst.

13  
(Alternativ)entwurf (1971)  
von Angelika Lehwald auf  
transparenter Kunststoffolie.  
Die Farbe blättert teilweise  
stark ab (siehe Pfeile).

## 7. Praktische Anwendung

Der Partulizer wurde an einem Objekt aus dem Bestand der einst weltbekannten württembergischen Textildruckfirma PAUSA angewendet. Die Bestände der PAUSA wurden mit Einstellung des Betriebs 2004 als Kulturdenkmal von besonderer Bedeutung unter Schutz gestellt. Die Stadt Mössingen erwarb im Jahr 2006 das Gebäudeensemble. Mit den Firmengebäuden der PAUSA, deren Ausstattung sowie Stoffsammlungen, Stoffentwürfen und vielem mehr blieb ein Ensemble von hohem Seltenheitswert erhalten. Die Sammlung beinhaltet die Stoffmustersammlung, das Filmfolienarchiv, Stoffentwürfe, Musterbücher sowie Maschinen und Geräte. Im Rahmen des Programms zur Konservierung und Restaurierung von mobilem Kulturgut (Kulturstiftung der Länder) wurde die PAUSA-Sammlung mit dem von 2007 bis 2011 angesetzten KUR-Projekt „Konservierung und Restaurierung der PAUSA-Sammlung“ aufgenommen. Das KUR-Projekt sichert und konserviert zunächst die akut vor dem Verfall bedrohte Firmensammlung.

Bei dem Objekt handelt es sich um einen Entwurf von Angelika Lehwald mit dem Titel „Alster“ aus dem Jahre 1971, der in Mössingen in der Firma PAUSA entstanden ist. Die Arbeit





14  
Festigen der abblätternden Malschicht auf transparenter Folie mit dem Partulizer und Paraloid B72 (1 %, w/v, in Ethylacetat) mit einer feinen Düse

ist auf einer nicht näher identifizierten Kunststoffolie mit den Maßen 83 x 120 cm ausgeführt. Als Malmittel wurden Gouachefarben eingesetzt. Diesem Entwurf auf der Kunststoffolie ging ein Designentwurf der Künstlerin mit identischem Titel voraus, welcher in Gouachefarben auf Papier realisiert wurde. Die PAUSA begreift den Entwurf auf der Kunststoffolie als ‚Alternativentwurf‘, da im Werkprozess die Korrekturen des Papierentwurfs vor Drucklegung auf der Kunststoffolie vorgenommen wurden.

Der Erhaltungszustand der Malerei auf der Kunststoffolie war schlecht, es lag nur eine geringe Haftung zwischen Gouachemalerei und Kunststoffolie vor. Die aufgetragenen Farbbereiche heben und blättern sich von der Kunststoffolie ab. Paraloid B72 gelöst in Ethylacetat ist hierfür ein geeignetes Festigungsmittel, welches in einer Konzentration von 1 % (w/v) mit dem Partulizer vernebelt wurde. Der Kompressor wurde auf etwa 1,5 bar eingestellt. Vor der Konsolidierung wurden die Farbschichten auf Haftung getestet, indem mit einem weichen trockenen Pinsel darüber gestrichen wurde. Sämtliche Farbbereiche, die locker erschienen, wurden mit einer Schadenskartierung dokumentiert. Anschließend wurde ohne weitere Konditionierung (Raumtemperatur bei 22 °C und 35 % relative Luftfeuchtigkeit) mit dem Aerosol gefestigt. Pro schadhafte Stelle wurde der Aerosolstrahl drei bis vier Mal in einem Abstand von etwa 1–2 cm über die Malschicht geführt (Abb. 14). Zwischen den verschiedenen Aerosolaufträgen wurden keine längeren Trockenzeiten eingehalten, da das Lösungsmittel nach einigen Sekunden verdampft war. Die Aufträge erfolgten also in zeitlichen Abständen von etwa 10–15 Sekunden. Teilweise wurde beim abschließenden Prüfen nochmals mit dem Pinsel und dem Konsolidierungsmittel nachgefestigt, wenn die Aerosolapplikation nicht ausreichte. Empfindlich zeigten sich das Hellblau und teilweise das Orange, welche an den Rändern nach der Festigung eine leichte Verdunklung aufwiesen. Gerade bei diesen beiden Farbaufträgen, die nach der Konsolidierung an einigen wenigen Stellen eine Ver-

dunklung aufwiesen, musste mit dem Pinsel und dem Lösungsmittel nachgearbeitet werden. Hierfür wurde das reine Lösungsmittel auf die verdunkelten Stellen aufgebracht. Hierdurch konnte das Konsolidierungsmittel verdünnt und gleichmäßig verteilt werden, so dass visuell keine Unterschiede mehr erkennbar sind. Die Malschicht konnte erfolgreich mit dem Partulizer konsolidiert werden, damit bei der zukünftigen Lagerung keine weiteren Pigmentverluste mehr auftreten. Allerdings bleibt die Malschicht auf der Kunststoffolie fragil, da sich die Folie leicht knicken lässt und die Malschicht an neuen Stellen wieder ausbrechen kann.

### Danksagung

Dank gilt der Baden-Württembergstiftung (vormals Landesstiftung Baden-Württemberg) für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeit und der darin enthaltenen Neuentwicklung des Partulizers im Rahmen des Eliteprogramms für Postdoktoranden. Helmut Bomm sei für die Anfertigung der technischen Zeichnungen gedankt, sowie Johannes Wenzel für die praktische Umsetzung des Partulizers. Dipl. Rest. Eva Hummert hat dankenswerterweise Teile der Vorversion des Textes korrigiert und wertvolle Anmerkungen eingebracht. Der Stadt Mössingen ist für die Bereitstellung des Alternativentwurfs der Sammlung PAUSA, Mössingen, herzlich gedankt, um den neu entwickelten Vernebler mit Lösemitteln einzusetzen. Die Bearbeitung erfolgte im Rahmen des KUR- Projektes (Programm zur Konservierung und Restaurierung von mobilem Kulturgut, Kulturstiftung der Länder), „Konservierung und Restaurierung der Pausa-Sammlung“. Maren Mau-Pieper dankt die Autorin herzlich für ihr Engagement und ihre Hilfestellung.

Dr. Andrea Pataki-Hundt  
Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart  
Höhenstraße 16  
70736 Fellbach

## Anmerkungen

- 1 Michalski/Dignard 1997, S. 109
- 2 Dignard et. al. 1997, S. 131 f.
- 3 Masson/Ritter 2004, S. 93
- 4 Hansen et al. 1993, S. 7
- 5 Dierks-Staiger/Hassel/Becker 1997, S. 280
- 6 David 2009, S. 228
- 7 Grantham 2002, S. 56
- 8 „Aerosol is an assembly of liquid or solid particles suspended in a gaseous medium long enough to be observed or measured“; Baron/Willeke 2001, S. 45.
- 9 Quandt 1996, S. 100
- 10 Sommermeier 2010, S. 83
- 11 David 2009, S. 226
- 12 Masson/Ritter 2004, S. 96
- 13 Pataki 2006, S. 88
- 14 Pataki 2007, S. 113
- 15 Baron/Willeke 2001, S. 58
- 16 Dignard et al. 1997, S. 129
- 17 Pataki 2006, S. 184 f.
- 18 Grantham 2002, S. 58
- 19 Pataki 2006, S. 17
- 20 Abbildung 3 wurde aus einer Arbeit von Michalski und Dignard 1997, S. 111 entlehnt und mit neuen Daten der Partikelgrößen ergänzt, Pataki 2006, S. 57.
- 21 Pataki 2006, S. 57
- 22 Stark 2005, 202 f.
- 23 Pataki 2006, S. 88

## Literatur

- Paul A. Baron und Klaus Willeke (Hg.), Aerosol measurement, principles, techniques, and applications. Hoboken 2001
- Jessica David, Case study: the treatment of six reverse paintings on glass from William Nicholson's loggia with figures and architectural fragments. In: Journal of the Institute of Conservation 32, 2009, S. 219–232
- Regine Dierks-Staiger, Barbara Hassel, Ernst Becker und Gerhard Banik, Konsolidierung von Gouachemalerei auf Papier mit Hilfe von Aerosolen. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 11, 1997, S. 276–285
- Carole Dignard, Robyn Douglas, Sherry Guild, Anne Maheux und Wanda McWilliams, Ultrasonic Misting. Part 2, treatment applications. In: JAIC 36, 1997, S. 127–141
- Sandra Grantham, Japanische bemalte Papierwände, Versuche zur Festigung abblätternder und pudernder Malschichten. In: Restauro 108, 2002, S. 52–59
- Eric F. Hansen, Rosa Lowinger und Eileen Sadoff, Consolidation of porous paint in a vapor-saturated atmosphere. In: JAIC 32, 1993, S. 1–14
- Oliver Masson und Michaela Ritter, „Fräulein Huth“ and the red seaweed: consolidation of a collage by Kurt Schwitters with JunFunori®. In: The Paper Conservator 28, 2004, S. 91–98
- Stefan Michalski und Carole Dignard, Ultrasonic misting. Part 1, experiments on appearance change and improvement in bonding. In: JAIC 36, 1997, S. 109–126
- Andrea Pataki, Einflussgrößen auf den Farbeindruck von pudernden Malschichten beim Konsolidieren mit Aerosolen, (=Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7168; zugl.: Stuttgart, ABK, Diss., 2006). Online-Publikation: <http://bibliothek.fzk.de/z/berichte/FZKA7168.pdf>
- Andrea Pataki, Konsolidierung von pudernden Malschichten mit Aerosolen. In: Restauro 113, 2007, S. 110–117
- Abigail B. Quandt, recent developments in the conservation of parchment manuscripts. In: The Book and Paper Group Annual 15, 1996, S. 99–115
- Barbara Sommermeier, Consolidation of matte, powdery paint in modern art by ultrasonic misting. In: Wege zur Konservierungswissenschaft. Hrsg. v. Gerhard Banik. München 2010, S. 82–84
- Inge Stark, Festigen kreidender, nicht gefirnisster Malschichten, Sprühgeräte und Sprühtechniken im Test. In: Restauro 111, 2005, S. 200–207

## Material

- AGS 2000  
Zentrum für Bucherhaltung GmbH  
Mommensenstraße 7  
04329 Leipzig  
Tel.: +49 (0)341 25989-0
- Ultraschall-Mini-Vernebler mit Luftschlauch  
Deffner & Johann GmbH  
Mühläcker Straße 13  
97520 Röhlein  
Tel.: +49 (0)9723 9350-0
- B&P- Produkte  
Medisize Deutschland GmbH  
Talstraße 16  
53819 Neunkirchen-Seelscheid  
Tel.: +49 (0)2247 9216-0
- B&F Aero Mist Nebulizer  
7' Tubing  
Allied Healthcare  
1720 Sublette Avenue  
St. Louis, MO 63110  
Tel.: 001 800 444 3954
- Partulizer  
Dr. Andrea Pataki-Hundt  
Unterer Birkenweg 10  
71229 Leonberg  
Tel.: +49 (0)7152 907 662
- Up-Draft II® Opti-neb™ Nebulizer  
Hudson RCI  
(deutsche Filiale)  
Teleflex Medical  
Rüsch GmbH  
P.O. Box 1180  
71385 Kernen  
Tel.: +49 (0)7151 406 0
- Pari Sinus  
PARI GmbH  
Moosstraße 3  
82319 Starnberg  
Tel.: +49 (0)8151 279-0

## Abbildungsnachweis

Die Rechte aller Abbildungen und Tabellen liegen bei der Verfasserin des Artikels.