

# **Einflussgrößen auf den Farbeindruck von pudernden**

## **Malschichten beim Konsolidieren mit Aerosolen**

**Dissertation der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart**

zur Erlangung des Grades

**eines Doktors der Philosophie**

am Studiengang Restaurierung und Konservierung von Grafik, Archiv-und Bibliotheksgut

von

Dipl. Rest. Andrea Pataki

aus Stuttgart

Tag der mündlichen Qualifikation: 29. November 2005

Rektor:	Prof. Dr. Ludger Hünnekens
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. Gerhard Banik
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Hubert Locher

Dieser Bericht ist in schwarz-weiß gedruckt.  
Die Farbabbildungen finden Sie in der elektronischen Version:

<http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7168.pdf>

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor  
**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH**  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe  
Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren (HGF)  
ISSN 0947-8620  
urn:nbn:de:0005-071686

## Kurzfassung

Das Konsolidieren von Pigmentschichten mit Klebstoffen in wässrigen und alkoholischen Lösungsmitteln wird unter dem Aspekt der Einflussgrößen möglicher Farbveränderungen untersucht. Die Ursachen einer Verdunkelung oder Erhellung der Farbschicht auf Grund einer Konsolidierung zu bestimmen sind Gegenstand der Betrachtungen.

Die Partikelgröße der produzierten Aerosole, die Viskosität und der Brechungsindex der flüssigen Klebstoffe Gelatine, Methylcellulose, Hausenblase, Funori, JunFunori® und Klucel® wurden bestimmt, ebenso wie das Streuvermögen und die Farbigkeit von Klebstofffilmen. Mögliche Oberflächenveränderungen, hervorgerufen durch eine Konsolidierung, wurden anhand von drei ausgewählten Pigmenten mit der UV/VIS-Spektroskopie durch Auswertung der Reflexionsspektren und der Farbmessdaten bewertet. Die Aerosolpartikel werden von den Generatoren klebstoffunabhängig produziert, wobei die Volumenverteilung als Diskussionsgrundlage praxisnäher ist als die Auswertung der Teilchenverteilung. Die Viskosität, die Farbigkeit und der Brechungsindex der Klebstoffe spielen eine untergeordnete Rolle bei Farbverschiebungen. Tritt bei bunten Pigmenten eine Verdunkelung nach einem Konsolidierungsauftrag auf, liegt dies an einem Zusammensinken der Teilchen, was eine Reduzierung der diffusen Reflexion und des Weiteren eine Reduzierung der Helligkeit zur Folge hat. Bei weißen Pigmenten hingegen tritt bei einer Verdichtung des Pigmentauftrags eine Erhöhung des Deckvermögens bzw. eine Erhöhung der Helligkeit auf. Bei schwarzen Pigmenten erhöht sich die Reflexion, was als ein grauer Farbeindruck wahrgenommen wird.

Eine Aerosolbehandlung bewirkt keine Glanzbildung auf der Pigmentschicht. Bei sehr kleinen Pigmenten weit unter 1 µm besteht jedoch die Gefahr von Verklumpungen und einem spannungsreichen Auftrocknen.

Drei Objekte mit pudernden und abblätternden Malschichten dienten als Fallbeispiele und wurden, basierend auf den erarbeiteten Ergebnissen, konsolidiert. Der Materialeinsatz und die Materialikonologie fließen beim Erstellen eines Restaurierungskonzepts für zeitgenössische Kunst verstärkt ein und umfassen auch die aktive Mitarbeit des Künstlers. Da ein Konsolidierungsmittel nicht ohne Substanzverlust aus einem Pigmentgefüge zu entfernen ist, wird die Konsolidierung im Kontext des Code of Ethics diskutiert.

## **Abstract**

### **Influences on the appearance of powdery pigment layers during consolidation with aerosoles**

Friable pigments and loose particles on different supports occur on a variety of objects. Illuminated manuscripts, friable gouaches or works of modern art may be the sort of objects, where a pigment layer or single particles are not bound sufficiently to their support, or, never were intended to be bound due to the concept of the work of art.

Although the consolidation of pigments can be regarded as an historically known conservation treatment, the special case of powdery pigments needs further investigations concerning the choice and the application of the adhesive and the influences of appearance during the consolidation process. For consolidation, fine brushes were used to introduce minimal amounts of liquid adhesive between or onto the friable pigments. This is still a common practice for pigment consolidation. When dealing with powdery pigments a new techniques of introducing the consolidant were developed. Powdery pigments show no more contact between the particles themselves, but also no longer between the pigments and the support, which may be out of paper or parchment. Friable pigments might still have contact to themselves, showing more craques, thus they can be treated with a fine brush, without lifting up loose particles. The use of misted adhesives in the form of aerosols is able to introduce small amounts of adhesive, where the pigment layer can be treated contactless. This is a great advantage in comparison to the brush application. The here presented investigations are all related to the aerosol application.

Historical binding media are gum arabic and egg white in the western world and funori looking at the asian art. These binding media were also used for consolidation of loose pigments. Additionally, gelatine and sturgeon glue were applied to connect loose particles to their support. Nowadays, a wide range of consolidants are used, including the above mentioned ones and also several modified cellulose ethers. The criteria of choosing the appropriate consolidant is an open question and can be observed based upon the wide range of consolidants in use. An important question to discuss are the parameters why to choose a specific consolidant.

The appearance of pigment layers including the surface texture and the colour of the deteriorated pigment layers, should not be altered after a consolidation treatment, which is ruled by the characteristics of the pigment layer itself and the characteristics of the consolidants. A pigment layer can show different colours and different surface textures, from smooth to rough pigments. Also the size of pigment grains influences the appearance of a pigment layer. The consolidants can be sorted by their colour, their refractive index, their viscosity, their aerosol size and their penetration behaviour into a porous pigment structure.

The ageing properties of consolidants play an important role, when they are introduced to an work of art and should therefore be investigated.

Looking at the aerosol generators, basically two main systems are suitable and available.

The most common ones are the ultrasonic based aerosol generators, where an ultrasonic source is placed underneath a water reservoir which is transporting the ultrasonic waves to an adhesive container. Due to an air pump, the aerosols are transported out of the adhesive container through different tubings and a nozzle. The other system is based upon air pressure, where a medical device, the so-called Nebulizer, is connected to an air compressor. Inside the Nebulizer the adhesive is mechanically forced into aerosols and again transported through different tubings and a nozzle to the work of art.

For the sample set-up, three different pigments were selected. Vermillion, a mixture of lead white/ultramarine and brown ochre. To realize homogeneous and reproducible pigment layers, the pigments with a binding medium, i.e. gum arabic, were spincoated on either glass or perspex plates with a diameter of 2,5 cm. The liquid suspension of pigment and binding media is placed on the glass or perspex plates before the support is started to be turned with approximately 1200 turnings per minute. The binding media is needed, otherwise no opaque and homogeneous pigment layer can be achieved.

For the investigations, a preliminary selection of aqueous adhesives were undertaken, which are common in conservation, but which are also suitable for misting. Synthetic adhesives, except of Kucel® G in ethanol, are excluded, because the aerosol generators are not equipped for solvents, except of low molecular alcohols. The pre-selection includes gelatin, methylcellulose, isinglass, funori, JunFunori®, dissolved in water and Klucel® G, dissolved in ethanol. To investigate the adhesives, film sheet samples were prepared by pouring the liquid adhesive into petridishes made out of Polystyrol which turned out to be the best material for the thin film sheet samples which can be mechanically delaminated after drying. These film sheet samples are investigated by UV-vis Spectroscopy to determine their colour, their surface characteristics and by microscopically means to measure the thickness of the film sheet samples.

The colour of the adhesive that is applied as a consolidant might be of importance, when a pigment is consolidated. However, the investigations of the film sheet samples with a UV-vis Spectrometer (Shimadzu, UV/ VIS 2100), which allows colour measurement at a wavelength from 380 to 800 nm, showed, that the colour of the film sheet samples is neglectable. Only with increasing film thickness colour is occurring, but which will never be reached during a consolidation process. The film sheet samples do have an average thickness of approximately 21-36 µm. The adhesive film samples do not really represent the actual situation on an object, because a coating on pigments would never be as thick as a prepared adhesive film sample. It can be estimated, that the films of several applications of aerosol

streams do have a thickness of only several hundreds of nanometers. Aerosols of different adhesives were misted several times on silicon plates used for the production of wafers and after evaporation of the aqueous solvent, the films showed the effect of interference. This is a sign for thin films, that are only several hundreds Nanometer thick. However, the investigation of the adhesive film samples and the results can be interpreted according to the situation during pigment consolidation.

The size of the aerosol particles are measured by a scattered light particle size counting analyzer (Palas GmbH, PCS 2000) and it showed, that the size of aerosol particles is controlled by the aerosol generator, regardless of the type of adhesive. When interpreting aerosol particle sizes, particle volume distribution should be discussed instead of particle size distribution. In total, three aerosol generators were investigated with all adhesives with also different concentrations. Again the concentration showed no influence on the aerosol particle size. Therefore a schematic table with the aerosol sizes for the different generators could be established for the first time. All particles are in the range between 1 and 5  $\mu\text{m}$ , one generator shows a deviation between 2 and 10  $\mu\text{m}$ .

It can be stated that the air pressure device shows smaller aerosol particles in comparison with ultrasonic based devices. A great difference between the two types of the aerosol generators is the velocity of the aerosol production. It was measured, that the velocity of the ultrasonic based generators is much smaller than the velocity of the air pressure devices. The above given information influences the choice of type of generators for pigment consolidation.

The viscosity of all adhesives was measured and it became clear, that all adhesives show non-newtonian characteristics. This influences the misting ability. Basically the concentration, which can be misted, is regulated by the height of viscosity. As soon as an adhesive can be misted, the viscosity characteristics are overcome and only the generator influences the size of the aerosol particles. Especially funori and JunFunori® show an extremely high viscosity. The non-newtonian and thixotropic behaviour of these adhesives are the main reasons, why these adhesives can be misted at all, even with this high viscosity. Because of the viscosimetric characteristics, the viscosity get lowered, when external force, e.g. the misting process for example, is applied to these solutions. After a time without external force, the solutions gain back the former high viscosity.

The refractive index of the adhesives play a minor role, because the differences between the different adhesives are minor and do not influence the reflection behaviour based upon the Fresnel-equation. All refractive indices were measured with a Abbe-Refractometer. This is furthermore supported, when dealing with rough pigment layers such as the pigments, where mainly diffuse reflection can be observed. When having specular reflection, the refractive index might become relevant in the case of varnishes for example.

If a coloured pigment layer results in a darker appearance after consolidation, the reason therefore is an agglomeration of the pigments, which results in a reduction of the diffuse reflection and a reduction of the brightness. White pigments become even whiter after an agglomeration, because the hiding capacity is even increased in such a case. Black pigments appear gray because the reflection is increased. The measurements were performed with an Gonio-spectro-photo-colorimeter, which does perform measurements in the UV-Vis region in a contactless manner. Gloss was never detected in the course of the measurements and will not be the reason for the reduction of the brightness. A smoothening of the pigment surface might be the result of an agglomeration and a more dense packing of the pigments. When the pigments are arranged originally very loose as a pigment layer, the danger of agglomeration might be increased, as it is the case with the pastels for example. Coloured pigments tend to become darker in appearance when an agglomeration occurred. The more loosely the pigments are originally arranged, the higher is the risk of a shift of appearance after consolidation because the smallest amounts of consolidants might result in an agglomeration of the loosely arranged pigments.

These findings and relations between colour and appearance are shown for the first time in schematic models to further explain the possibilities and the risks of a consolidation treatment. Additionally, the term of pigment-volume-concentration (PVC) is also incorporated in the discussion and a separate graphic model is developed. Based upon further investigations it could be showed, that an aerosol treatment does not lead to the critical-pigment-volume-concentration (CPVC). The reaching of the critical-pigment-volume-concentration would mean, that a complete embedding of the pigment after a consolidation treatment does occur, which will not happen in the case of aerosols. This case might happen when the brush application is used and the viscosity of the consolidant is too high. When comparing the different adhesives looking at the influences of appearance, they showed all more or less the same characteristics during pigment consolidation. None of them can be described as the best consolidant. Only Klucel® seemed to create the most darkening after consolidation.

However, the adhesive strength and the surface characteristics are different when looking at the adhesives. The drying of the consolidant, that includes the cohesion and adhesion action, is based upon physical reactions, not chemical ones. Until now, it is not possible to measure the adhesive strength of consolidated pigment layers. Based upon empirical studies, it is known, that the proteinacious adhesives realize a stronger bonding such as the modified cellulose ethers. Funori und JunFunori® realizes the weakest connection between single pigments, but also between pigments and support.

When looking at the surface texture it can be stated, that on rough surfaces all adhesives show diffuse reflection, i.e. a matte appearance. Gelatine and Methylcellulose do create gloss, when they are applied on a smooth surface such as glass for example. Funori and JunFunori® will realize on all substrates, smooth ones or rough ones, a matte appearance, because the film sheet samples show a rough and uneven surface, which results in scattering of the reflected light, which is described as a matte characteristic.

The investigations for the artificial ageing of the film sheet samples is inconclusive. After intensive cycles of six different ageing modi, it can be stated, that the chemical and physical reactions because of the artificial ageing deviates so much, that the results can not be compared and the samples can not be used for further spectroscopic, mechanical and visual examinations. That means, that further investigations are needed to establish artificial ageing conditions, which should be standardised for guaranteeing further investigations.

Unfortunately no industrial standards can be transferred to the needs of conservation.

However, when looking at the ageing properties of the adhesives, which were applied on the pigment samples and artificially aged, no detectable changes of appearance could be measured.

When consolidating a pigment layer, the analysis of the pigment is of importance. By these data, the main characteristics such as the chemical composition, the morphology and the approximate grain size can be gathered with the help of secondary literature. The grain size of the pigment does influence the size of the voids between individual pigments. The higher the grain size, the larger are the voids between these pigments. Until now, it is supposed, that if the aerosol particles do have the same size or are smaller than the voids of individual pigments, a proper penetration will be established.

The size of the aerosol particle, that is produced from a generator, becomes important, to estimate a proper penetration of the consolidant into the porous structure of the pigments. Any coating because of too large aerosol particles should be avoided, because this will result in a smoothening of the pigment surface. In the case of black soot, it can be observed that the aerosols created with the known aerosol generators are still too large to realize a proper penetration reaction. The too large aerosols create cracks and an increase of reflected light, because the surface has changed its surface texture. The slightly oily character of soot further complicates a successful consolidation treatment with aqueous adhesives. At this point, drawings performed with soot can not be consolidated with aerosols.

The coating is not only dependent on the size of aerosol particles, but also on the amount of consolidant that is applied to the pigment layer. This is basically controlled by the conservator and his technique of how many times the pigment layer is treated with the aerosol stream.



To support the scientific investigations and to transform the gained results to practice, three case studies were treated. Two watercolours on transparent paper from Erich Mendelsohn, Staatliche Museen zu Berlin, Kunstbibliothek, and a drawing by Uli Peter with black charcoal, Staatsministerium Stuttgart. The third case study is performed by Ross Sinclair as part of an installation, Hamburger Kunsthalle, of a drawing with white chalk on black painted card board boxes.

The red and blue pigments of the watercolours from Erich Mendelsohn were treated by using an ultrasonic aerosol generator and a 1% Gelatin solution. After two to three applications a sufficient adhesion between the pigment and the support could be reached without any change of appearance. A minimum of application was needed, because the transparent paper is sensitive against raised humidity and aqueous treatments.

The black charcoal drawing from Uli Peter was consolidated with an ultrasonic aerosol generator and Funori (0,2%) to prepare the object for a subsequent aqueous conservation treatment, because the work of art is heavily degraded by mold and needed some bleaching. Again, the consolidation could be performed without any shift of colour and appearance.

The third case study represents an installation of Ross Sinclair *The journey to the edge of the world- the new republic of St. Kilda*, which consists in total of 132 card boxes, but only 54 are painted with black acrylics and white chalk on top. One card box measures 49,5 x 49,5 x 49,5 cm. The 54 boxes, that are painted are arranged in the shape of a wall, nine boxes as a basis and six rows in the height. The boxes are not connected one to each other, they are just arranged closely one on top of the other.

The white chalk adheres only slightly on the support, because the artist did not fix any of his drawings. Due to the upright position of the drawing, loose particles are falling downwards. In addition, the installation needs to be moved from time to time, with the result that the drawing at the edges of the boxes are sometimes detached by fingers or, in the case of an exhibition, parts of the drawing are smeared, because the visitor's clothing are dislocating parts of the work of art.

The goal of a treatment is the consolidation of the drawing, that should neither alter the appearance of the white drawing nor lower the contrast between the black underpaint and the white drawing. The consolidation should be as strong as a slight rubbing with a finger does not dislocate any of the white chalk. At this point, an elaborate discussion based upon ethical considerations took place, if it is possible to consolidate the white chalk which does not contain any original binding media. The artist, the curator and the conservator of the Hamburger Kunsthalle were involved in the decision-making process. Because the fragility is not part of the intention of the work of art, a consolidation treatment could be performed.

The artist performed three different ways for his drawings, which needed also three different approaches to consolidate the work of art. Some parts are drawn with heavy strokes,

especially when words and contours are performed. A relatively high amount of the white pigment is locally present on the black support. Other parts are drawn in a lighter manner. These parts are hatched and are drawn as complete areas, where relatively less chalk is applied. In this case, the drawing is covering entire areas and is not locally restricted, in comparison to the first drawing mode.

The third way of drawing style, is probably not performed with the chalk bars, but with the hands of the artist. To indicate the equator or wind directions within his painting, the artist applied the chalk with his fingers or with parts of his hand. Here, an extremely thin layer is present on the support. These parts are nearly invisible and are most sensitive.

For this consolidation treatment an ultrasonic powered aerosol generator is chosen to perform the treatment, because the velocity can be regulated gradually and the velocity is low in comparison to the air pressure devices that are available on the market, such as the Nebulizer. The AGS 2000, a device from Becker Preservotec, has a velocity between 1050 and 1192 ml/ min, in comparison with the Nebulizer of 7100 ml/ min at 1 bar air pressure. The low velocity is an important criterium, because the white chalk is adhering only slightly on the support. If the velocity of the aerosol stream is too high, there will be the danger that particles are dislocated due to the aerosol stream, that is determined to consolidate the pigment. Both the ultrasonic power and the air stream can be gradually regulated at the aerosol generator from Becker Preservotec.

Gelatin in a 1% concentration is selected, because a sufficient adhesive strength could be realized after a single application of consolidant. All other adhesives would have needed several layers of consolidant. This increases the danger of an overwetting and a solvation-process of the pigment, because it was measured that the white chalk is made out of Calcium Sulfate, which has a very lower solubility in water. To keep the risk of solvation as low as possible, a minimum of adhesive applications should be realized.

The aerosol particles of a 1% aqueous gelatin solution were measured with the AGS 2000. The measurement is performed with a scattered light particle size counting analyzer where the volume distribution can be given as a result. The volume distribution shows the total of volumes of the aerosol particles per  $\mu\text{m}$ . The  $\mu\text{m}$  expresses the average diameter. In the case of the aerosols for consolidation, it seems reasonable to show the volume distribution of the particles, because this information gives an idea, of how much adhesive can be applied on the pigments. The maximum of the volume distribution is located at approximately  $5\mu\text{m}$ . It can be expected, that the aerosol particles, which do have their maximum in volume at about  $5\mu\text{m}$  should realise a good penetration into the coarse white pigment although the grain size of the pigment is not analysed. There is no suitable tool to measure the grain size in-situ.

For this project, a nozzle from a Nebulizer was chosen, because it creates a regular and round-shaped aerosol stream. Other nozzles apparently do create an aerosol stream, that are shaped like an horseshoe. This might result in an uneven deposition of the consolidant onto the pigment.

The treatment was successful without any visible shift of contrast between the white drawing and the black support in most parts. The white drawing with the first drawing style could be consolidated with a nozzle by saturating the drawing, until the white chalk got wet and transparent. After drying, the white appearance is gained back and a sufficient adhesion is realized.

Problems arised in the areas of the lighter drawing, that is applied over entire areas. In these parts, the aerosol stream is applied without a nozzle, to avoid any overwetting. However, the contrast between the white drawing and the black support is slightly increased. The reason might not be an uneven deposit of the consolidant, but probably still too much consolidant onto a loose pigment layer. During the consolidation of the white chalk, the finest particles of the chalk are probably sunken inbetween the voids of the larger ones, which results in a more dense pigment layer. This is described as a sort of agglomeration. This more dense pigment layer appears whiter than before the consolidation. The hiding capacity of the white pigment is increased and results in an higher amount of reflected light.

Another reason for the increase of contrast might be the surface cleaning of the black support. Dust has been removed from the black surface, so that the black appears even more black.

Looking at the very thin layer of white chalk, another phenomena was observed. After the attempts of applying the conslidants, the drawing visually dissapeard. The reason therefore is the refractive index of gelatin and chalk. Both media do have the same refractive index of  $n=1,52$ . By applying too much of consolidant onto the very fine single particles of white chalk, visually the drawing is no longer visible, because of the same refractive indices. This problem could be overcome by applying only the smallest possible amount of aerosols. A fog of aerosols are let falling down onto the drawing. This can be performed by lowering the outcome of aerosols to a minimum and only using the tubing without a nozzle. This application adaption realizes a sucessful consolidation of the finest pigment layers of white chalk on the black support.

The latter case study showed the more complex approach when treating modern objects, because the intention of the artist and of the work of art needs to be taken into consideration. For the conservation of modern art, a variable media questionnaire is developed from the Guggenheim Museum in New York to combine a survey of materials, but also statements from the artists for the works of art, formulated by the artists themselves. The variety of media and the complex intentions within installations need to be incorporated during a

conservation, especially a consolidation treatment. The code of ethics which is formulated for the care of art objects is hard to cover all needs and requirements for a decision-making process, when dealing especially with modern art. A discussion should not only reach the pure technical possibilities, but should combine the intention and the concept of the work of art. An interdisciplinary approach and a broad communication should take place between the artist, the art historians, the conservators and the scientists.

## Danksagung

Meinen Berichterstatern der Dissertation an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (SABK) und meinem externen Betreuern am Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für instrumentelle Analytik (FZK-IFIA), danke ich für die inhaltlichen Anregungen und für die zahlreichen Diskussionen während der gesamten Promotionszeit:

Prof. Dr. Gerhard Banik (SABK)  
Prof. Dr. Hubert Locher (SABK)  
Dr. Ekkehard Willin (FZK-IFIA)  
Dr. Werner Faubel (FZK-IFIA)

Viele Kollegen haben mir die Möglichkeit gegeben, verschiedenste Messgeräten zu nutzen, haben mir Zugang zu Sammlungen erleichtert und in Gesprächen wertvolle Informationen weitergegeben. Diesen allen soll in alphabetischer Reihenfolge gedankt sein:

Priscilla Anderson, MSc, *Harvard University Library, Cambridge, USA*  
Prof. Irene Brückle, MA, *Buffalo State University College, Buffalo, NY, USA*  
Helmut Bomm, *Grafiker, Backnang*  
Prof. Dr. Mady Elias, *CNRS (Centre Nationale de Recherche Scientifique), Louvre, Paris*  
Dipl. Ing. Rudolf Erlach, *ICORT (Institut für Konservierungswissenschaften und Restaurierungs-Technologie), Universität für Angewandte Kunst, Wien*  
Prof. Dr. Bernd Evers, *Staatliche Museen zu Berlin, Kunstbibliothek*  
Dr. Robert Feller, *Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA, USA*  
Udo Geckle, *FZK-IFIA (Institut für Instrumentelle Analytik)*  
Dr. Thomas Geiger, *Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf*  
Markus Hauser, *FZK-ITC/WGT (Institut für Technische Chemie)*  
Dr. Christoph Heinrich, *Hamburger Kunsthalle, Hamburg*  
Stefan Heissler, *FZK-IFIA (Institut für Instrumentelle Analytik)*  
Prof. Dr. Hans-Dieter Huber, *SABK, Kunstgeschichte der Gegenwart, Ästhetik, Kunsttheorie*  
Prof. Dr. Christoph Krekel, *SABK, Labor für Archäometrie*  
Heide Mathieu, *FZK-IFIA (Institut für Instrumentelle Analytik)*  
Dipl. Rest. Kathrin Maushardt, *SABK, Studiengang Gemälderestaurierung*  
Dipl. Rest. Fabienne Meyer, *SABK, Studiengang Papier- und Buchrestaurierung*  
Dr. Ottmar Möhler, *FZK-IMK (Institut für Meteorologie und Klimaforschung)*  
Dr. Han Neevel, *Instituut Collectie Nederland, Amsterdam*  
Abigail B. Quandt, MSc, *The Walters Art Museum, Baltimore, MD, USA*  
Dr. Johannes Reichert, *FZK-IFIA (Institut für Instrumentelle Analytik)*  
Dipl. Rest. Martin Rossbacher, *Staatliche Museen zu Berlin, Kunstbibliothek*  
Christian Schmidt, *Photograph, Stuttgart*  
Dipl. Rest. Regina Schneller, *SABK, Studiengang Papier- und Buchrestaurierung*  
Dipl. Rest. Ingrid Schwarz, *Saarlandmuseum, Saarbrücken*  
Knut Sommerer, *Inamed Research GmbH & Co. KG, München*  
Dipl. Rest. Barbara Sommermeyer, *Hamburger Kunsthalle, Hamburg*  
Dr. Susanne Staub, *IFIA-ANKA (Angström-Quelle Karlsruhe)*  
Prof. Dr. Monika Wagner, *Kunstgeschichtliches Seminar, Universität Hamburg*  
Dr. Stefan Walheim, *FZK-INT (Institut für Nanotechnologie)*  
Dr. Bernhard Wehlen, *Saarlandmuseum, Saarbrücken*  
Dr. Paul Whitmore, *Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA, USA*  
Dr. Jan Wouters, *KIK/IRPA (Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium), Brüssel*

Meiner Familie und Wolfgang Hudel und Silvia und Martin Synold danke ich für die persönliche Unterstützung und Hilfestellungen während der Promotionszeit.



<b>Kurzfassung .....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IV</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Problemstellung.....</b>	<b>5</b>
1.1 Konsolidierung von Pigmentschichten .....	5
1.2 Technische Möglichkeiten der Konsolidierung .....	7
1.3 Beispiele pudernder und abblätternder Farbschichten .....	8
1.4 Konsolidieren mit Aerosolgeneratoren .....	12
1.5 Technische Grundlage von Aerosolgeneratoren .....	15
1.6 Vorteile und Grenzen der Aerosolanwendung.....	18
1.7 Ausbildung von Klebstoffbrücken und Risikoabschätzung .....	20
1.8 Offene Fragestellungen .....	24
1.9 Naturwissenschaftliche Herangehensweise .....	25
1.10 Beschreibung des Farbeindrucks.....	31
1.11 Eingrenzung der Materialien für die analytischen Untersuchungen .....	37
1.11.1 Exemplarische Auswahl der Klebstoffe.....	37
1.11.2 Probenherstellung der Klebstofffilme.....	41
1.11.3 Identifikation von Funori und JunFunori®.....	44
1.11.4 FTIR-Spektroskopie von Klebstofffilmen nach dem Konsolidieren.....	47
1.11.5 Exemplarische Auswahl der Pigmente .....	48
1.11.6 Probenherstellung der Pigmente .....	49
1.11.7 Identifikation der Pigmente.....	50
<b>2 Analytische Untersuchungen der Klebstoffe .....</b>	<b>53</b>
2.1 Partikelgröße der vernebelten Klebstoffe .....	53
2.2 Streuvermögen der Klebstofffilme.....	69
2.3 Farbigekeit der Klebstofffilme.....	76
2.4 Alterungsverhalten der Klebstofffilme.....	79
2.5 Viskosität und Klebkraft der Klebstoffe.....	84
2.6 Brechungsindex der Klebstoffe .....	92
2.7 Schlussfolgerung in Bezug auf die Aerosolbehandlung.....	96

<b>3 Analytische Untersuchungen der Pigment-Klebstoffgemische.....</b>	<b>98</b>
3.1 Geräteauswahl .....	98
3.2 Messung der Oberflächenbeschaffenheit.....	101
3.3 Messung mit und ohne Glanzeinschluss.....	110
3.4 Messung zur Pigmentvolumenkonzentration.....	117
3.5 Alterungsverhalten der Pigment-Klebstoffgemische.....	123
3.6 Sonderfall Ruß.....	127
3.7 Schlussfolgerung in Bezug auf die Aerosolbehandlung.....	130
<b>4 Schlussfolgerung und Risikoeinschätzung einer Aerosolbehandlung.....</b>	<b>132</b>
<b>5 Fallbeispiele .....</b>	<b>135</b>
5.1 Konservatorische Ansätze von farbtintensiven und fragilen Pigmentoberflächen.....	135
5.2 Konsolidierung von pudrenden Zeichnungen .....	145
5.2.1 Aquarelle auf Transparentpapier von Erich Mendelsohn .....	145
5.2.2 Pastell auf Papier von Uli Peter.....	150
5.2.3 Kreide auf Acryl von Ross Sinclair.....	152
<b>6 Fallbeispiele im Kontext des Code of Ethics.....</b>	<b>158</b>
<b>7 Schlussbetrachtung.....</b>	<b>164</b>
<b>8 Literatur .....</b>	<b>167</b>
<b>9 Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>177</b>
<b>10 Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>179</b>
<b>11 Abbildungsnachweis.....</b>	<b>180</b>
<b>12 Anhang.....</b>	<b>181</b>
12.1 Materialien .....	181
12.2 Instrumente.....	181
12.3 Aerosolgeneratoren .....	184
12.4 Zubereitung der Klebstofflösungen .....	186
12.5 Dickenbestimmung der Klebstofffilme .....	186
12.6 Bestimmung des Gesamtproteingehalts.....	187
12.7 FTIR-/Raman-Spektroskopie .....	187
12.8 UV/VIS-Spektroskopie .....	187
12.9 Partikelgrößenbestimmung .....	187
12.10 Klebstofffilme im Durchlicht.....	189
12.11 Rauigkeitsproben.....	190
12.12 Klimaalterung der Pigmentproben.....	190
12.13 Brechungsindex .....	192
12.14 Pigmentaufstriche für PVK.....	193
12.15 Pigmentpresslinge .....	193
12.16 Konsolidierung von Ruß.....	193
12.17a CIEL*a*b*-Farbmessdaten.....	193
12.17b CIEL*a*b*-Farbmessdaten nach beschleunigter Alterung .....	199
12.18 Variable Media Quesitionnaire .....	199
12.19 Restaurierung des Pastells auf Papier von Uli Peter.....	200
12.20 Versuche zur Restaurierung der Kreide auf Acryl von Ross Sinclair .....	201



## Einleitung

Der Farbeindruck einer bunten Oberfläche wird durch die verwendeten Medien und Pigmente, durch das einfallende Licht und die Oberflächencharakteristik bestimmt. Die Konsolidierung einer Pigmentschicht kann den Farbeindruck verändern. Die Einflussgrößen und Gründe hierfür werden sowohl naturwissenschaftlich als auch restauratorisch bewertet und mögliche Veränderungen im Kontext von kunstwissenschaftlichen Aspekten beleuchtet. Die Konsolidierung von pigmentierten Oberflächen umfasst das Einbringen von flüssigen Klebstoffen in ein Pigmentgefüge, um Klebstoffbrücken zwischen lose nebeneinander liegenden Pigmentkörnern aufzubauen. Die Haftung zwischen den einzelnen Pigmentkörnern, aber auch die Haftung einer intakten Pigmentschicht zum Untergrund kann durch die natürliche Alterung oder durch unsachgemäßen Umgang geschwächt oder abgebaut sein.

Bei einer Pigmentschicht, die sich schollig vom Untergrund löst, eignen sich Pinsel, um flüssige Klebstoffe unter die Pigmentschicht durch Kapillarkräfte fließen zu lassen. Bei pudrigen Pigmentaufträgen, die gefestigt werden sollen, eignet sich der berührungslose Eintrag von Klebstofflösungen, die durch Sprühsysteme aufgetragen werden. Die kleinsten Klebstoffpartikel werden von Aerosolgeneratoren produziert, die eine Pigmentschicht benetzen und Klebstoffbrücken zwischen den Pigmentkörnern ausbilden. Unter den Aerosolgeneratoren gibt es zwei Systeme. Die Geräte, die ein Aerosol mit Hilfe von Ultraschall erzeugen und solche, die die Klebstoffmischung mit Druckluft zerstäuben. Beide Gerätetypen werden beschrieben und untersucht.

Traditionell stehen für die Konsolidierung von Pigmentschichten auf Papier und Pergament wässrige Klebstoffsysteme zur Verfügung. Ein Hauptgrund für die Wahl von wässrigen Konsolidierungsmitteln, im Gegensatz zu synthetischen, liegt in der historischen Verwendung der Bindemittel, mit denen die Pigmente angerieben wurden. Eikläre und Pflanzengummen wie Gummiarabikum sind die meist verwendeten Bindemittel, die in wässrigen Systemen gelöst werden und für die Buchmalerei oder für Gouachen und Aquarelle verwendet wurden und bis heute verwendet werden (Kühn 2001: 383). Die physikalischen Eigenschaften der Klebstoffe, wie Viskosität, Brechungsindex und Streuvermögen von Klebstofffilmen werden instrumentell bestimmt, um die möglichen Einflussgrößen auf die Farbwirkung als Konsolidierungsmittel zu erfassen.

Trotz der mechanischen Verfestigung soll der Farbeindruck der zu konsolidierenden Pigmentschicht durch den Klebstoffeintrag nicht verändert werden. Die Restaurierung bedient sich naturwissenschaftlicher Methoden, um die Effektivität eines Eingriffs zu verfolgen und ein möglichst geringes Risiko einer Konsolidierung zu gewährleisten. Die Konsolidierung von schadhaften pigmentierten Oberflächen und im Besonderen die Parameter, die möglicherweise eine Farbveränderung durch einen restauratorischen Eingriff

bewirken, werden mit Hilfe instrumenteller Messreihen bestimmt. Farb- und Oberflächenveränderungen, die durch eine Konsolidierung entstanden sind, können auf farbmetrischem Wege aufgenommen werden, wofür hochentwickelte Farbmessgeräte zur Verfügung stehen. Veränderungen der Helligkeit, die durch einen Klebstoffeintrag nach einer Konsolidierung eingetreten sind, sollen farbmetrisch interpretiert werden. Erfahrungen über die Einflussgrößen eines Konsolidierungsmittels auf eine farbige Oberfläche werden an Testmaterialien gewonnen, die in einem anschließenden Schritt auf originale Kunstwerke übertragen werden. Es ist durchaus möglich, dass ein restauratorischer Eingriff nicht ohne eine messbare Verschiebung der Farbwerte realisiert werden kann.

Hier erscheint es notwendig, die Toleranzgrößen einer messbaren Veränderung im Dialog mit Kunsthistorikern und Naturwissenschaftlern, im Falle von zeitgenössischer Kunst auch mit den Künstlern, zu ermitteln. Nicht nur bei der Restaurierung und Konsolidierung von zeitgenössischer Kunst sind die Intentionen des Künstlers, sofern sie ermittelt werden können, im Entscheidungsprozess für eine restauratorische Maßnahme zu berücksichtigen. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Umgang mit dem Material und dessen Einsatz im künstlerischen Gestaltungsprozess. Mit diesem Feld hat sich in jüngster Zeit auch die Kunstgeschichte verstärkt unter dem Begriff der Materialikonologie befasst, mit Ergebnissen, die auch für die Restaurierungspraxis relevant sind. Die Materialikonologie untersucht die Verwendung von Materialien hinsichtlich ihrer Bedeutung im jeweiligen geistesgeschichtlichen, sakralen oder profanen Rahmen (Raff 1994: 10). Ein Werkstoff, wie z. B. Gold, das für die Herrschaftsinsignien eines Kaisers oder Königs verarbeitet wurde, repräsentiert als Material symbolisch Macht und Einfluss. Während diese Symbolik über lange Zeit auf konventionalisierter Symbolik basiert, die entsprechend interpretiert werden kann, ist dies bei moderner und zeitgenössischer Kunst schwieriger. Der Materialeinsatz geschieht oft mit Rücksicht auf eine mögliche, jedoch vielfach individuell entwickelte Symbolik, die sich mit einer ästhetischen Wirkung verbindet. Hieraus ergibt sich ein besonders vielfältiger Einsatz von Materialien im Feld der modernen und zeitgenössischen Kunst, der jeweils im Einzelfall in der Auseinandersetzung mit dem Künstler und seinem Werk zu klären ist.

Die Bedeutung des Materials von vorwiegend zeitgenössischer Kunst mit teilweise fragilen farbigen Oberflächen wirkt sich auf die restauratorische Problemlösung dahingehend aus, dass eine Farbveränderung eine Veränderung des künstlerischen Ausdrucks und der Gesamtkonzeption nach sich zieht. Die Konzeption von Kunstwerken wird in Sammlungen zeitgenössischer Kunst derzeit dokumentiert, indem die verwendeten Materialien und Techniken recherchiert, eine Stellungnahme des Künstlers zu seinem Werk eingeholt und Skizzen und Abbildungen zu Installationen gesammelt werden. Diese Dokumentationen

werden von Restauratoren in Zusammenarbeit mit Kuratoren und den Künstlern vorangetrieben und stellen eine fundierte Basis für nachfolgende Restaurierungsmaßnahmen dar.

Heinz Althöfer, Restaurator am Düsseldorfer Restaurierungszentrum a.D., gilt als ein Wegbereiter für das systematische Zusammenstellen von Arbeits- und Materialtechniken der modernen und zeitgenössischen Kunst. Seiner Auffassung nach ist es die Aufgabe der Restaurierung, die Verantwortlichkeit für das Kunstwerk vom Künstler zu übernehmen und sowohl „ideologisch“ als auch „technisch-konservatorisch“ zu arbeiten (Althöfer 1985: 12). Die Auseinandersetzung mit den Strömungen der modernen Kunst, die Bedeutung von Material und Ausdruck sind gleichermaßen relevant für eine Konservierungsmaßnahme, wie die genauen Kenntnisse der verwendeten Materialien und der Entstehungsprozesse. Mitte der 1960er Jahre wurde mit dem Aufbau einer Dokumentation zur zeitgenössischen Kunst begonnen, bei der Restaurierungs- und Untersuchungsaufgaben mit der Zusammenstellung der verwendeten Materialien vermerkt sind. Daran haben sich zudem Untersuchungsreihen von Malschichten auf Leinwand- und Papierträgern angeschlossen, die in die restauratorische Praxis übertragen werden können.

Am Museum für Moderne Kunst in Frankfurt am Main dokumentiert der Restaurator Gantzert-Castrillo (1996) in einer Neuauflage seines 1979 erschienenen Buches *Archiv für Techniken und Arbeitsmaterialien zeitgenössischer Kunst* Arbeitstechniken, Zitate, Zeichnungen und Abbildungen von Installationen zeitgenössischer Künstler. Diese Publikation basiert auf einer schriftlichen Umfrage des Autors an über 300 Künstler, die Angaben über ihre Arbeitstechniken, verwendeten Materialien, Kontakte zu Druckereien und Bezugsquellen gemacht haben. Mehr als die Hälfte der angeschriebenen Künstler hat darauf reagiert und wertvolle Informationen weitergegeben. Obgleich diese Zusammenstellung inhaltlich den Stand der 1970er Jahre widerspiegelt, so stellt diese Dokumentation eine reiche Quelle an Arbeitstechniken- und Materialien verschiedenster Künstler dar.

Am Kunstgeschichtlichen Seminar der Universität Hamburg hat die Deutsche Forschungsgesellschaft seit Sommer 2000 für eine begrenzte Zeit die Erstellung eines Archivs zur Materialikonologie gefördert. Damit soll ein Zugang zur Analyse der Moderne, insbesondere der Kunst nach 1945 geschaffen werden. Über eine Vielzahl von Materialien sind vielfältige Angaben in alphabetischer Reihenfolge systematisch zusammengestellt worden. Die historische Herkunft und die optischen Eigenschaften der Materialien sind dokumentiert. Darüberhinaus sind Künstler angegeben, die mit den jeweiligen Materialien arbeiten. In der Monografie *Lexikon des künstlerischen Materials*, von Wagner, Rübél und

Hackenschmidt herausgegeben (2002), wurde diese wissenschaftliche Arbeit publiziert. Damit wurde ein Nachschlagewerk der künstlerischen Materialien erarbeitet, um „von A bis Z“ eine Vorstellung zu gewinnen, aus was für Materialien Kunstwerke mitunter geschaffen werden. Dies dient sowohl Kunsthistorikern als auch Restauratoren bei ihrer Arbeit. Nach Auffassung der Herausgeber reicht allerdings das reine Dokumentieren der Ausdrucksmittel der verschiedenen Künstler nicht aus, um die vielschichtigen Entwicklungen der modernen Kunst mit Schwerpunkt nach 1945 zu verstehen. Ein Ansatzpunkt von Wagner (1991: 26) basiert neben dem mannigfaltigen Einsatz von hochstehenden und alltäglichen Materialien darauf, dass die physische Präsenz des Materials die Wahrnehmung maßgeblich beeinflusst und verstärkt zum Kunstwerk selber wird. Das Material besteht auch weiterhin als Träger von Bedeutung und Wirkung, sollte aber beim Analysieren von Kunstwerken, vornehmlich im Fall der Moderne, ein wesentliches Element der Charakterisierung darstellen.

Fallbeispiele unter Verwendung von farbintensiven und fragilen Pigmentoberflächen werden im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellt und unter materialikonologischen und konservatorischen Gesichtspunkten diskutiert. Drei Objekte mit pudernden Malschichten werden, basierend auf den neu gewonnenen naturwissenschaftlichen Erkenntnissen, mit Aerosolen verschiedener Klebstoffe gefestigt. Eine Objektgruppe stammt aus den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts und zwei weitere Objekte stammen von zeitgenössischen Künstlern. Die Entscheidungsfindung für eine Konsolidierung und das restauratorische Ergebnis wird in den Kontext von restaurierungsethischen- und technischen Aspekten gestellt und diskutiert.

# 1 Problemstellung

## 1.1 Konsolidierung von Pigmentschichten

Pigmentaufstriche mit wässrig gebundenen Bindemitteln auf Pergament und Papier finden sich in der Buchmalerei und der Gouache- und Aquarellmalerei. Für die Buchmalerei wurde überwiegend Eikläre und verschiedene Pflanzengummen wie Gummiarabikum, Kirsch- und Pflaumengummi (Trost 1991: 47) verwendet. Nach Reinigungsschritten wurde das natürliche wässrige Bindemittel mit den Pigmenten angerieben und vermalt. Das Bindemittel kann im Laufe der Zeit verspröden oder durch Bewegen des Pergament- bzw. Papierträgers, zum Beispiel durch Blättern der Buchseiten, mechanisch geschwächt sein. Dadurch haften die Pigmentkörner nicht mehr aneinander oder der Halt einer intakten Pigmentschicht zum Untergrund ist nicht mehr gegeben. Durch die ungenügende Haftung zwischen den Pigmentkörnern und zum Untergrund blättert die Farbschicht ab oder Pigmentkörner brechen aus dem Pigmentgefüge.

Für die Gouache- und Aquarellmalerei wird bis heute überwiegend Gummiarabikum als Bindemittel verwendet. Bei Gouachefarben liegt verhältnismäßig mehr Pigment als Bindemittel vor, im Gegensatz zu Aquarellfarben, die einen hohen Bindemittelanteil aufweisen. Bei Gouachefarben kann der Fall eintreten, dass in einer Malschicht wenig Bindemittel vorliegt, so dass die Pigmentschicht unterbunden ist und die Pigmentkörner keine Haftung untereinander mehr aufweisen. Auch in diesem Fall kann es zu Pigmentverlust kommen, wodurch die Oberflächen empfindlich gegenüber mechanischer Handhabung sind und bei Berührung abgehoben werden.

Bei Pastell- und Kreidestiften ist der Bindemittelanteil äußerst gering, da er in erster Linie eingesetzt wird, um die Pigmente als Zeichenstifte zu verarbeiten. Sobald der Strich auf dem Papier aufgetragen ist, liegen die Pigmente luftig mit geringem Halt auf dem Träger. Ein Pastell zeichnet sich durch den fragilen Charakter aus, da die Malschicht fast ohne Bindung auf Papier oder Pergament aufgetragen wurde. Die mechanische Festigkeit ist gering und es kommt dadurch häufig zu Substanzverlust.

Ein Ziel einer Konsolidierung stellt die Wiederherstellung der Haftung zwischen Pigmentkörnern und dem Untergrund dar. Das Einbringen eines wässrigen Klebstoffs soll eine *angepasste* Adhäsion zwischen losen Pigmentkörnern gewährleisten. *Angepasst* bedeutet hier, dass das Eintragen des Klebstoffs keine Spannungen hervorrufen, nicht im Überschuss erfolgen, aber auch in ausreichender Menge aufgetragen werden soll. Sowohl mengenmäßig zu viel Klebstoff, als auch ein Klebstoff mit zu hoher Klebkraft, können die charakteristische Malweise und den Farbeindruck erheblich stören.

Der Farbeindruck soll sich durch eine Konsolidierungsmaßnahme nicht verändern. Der Farbeindruck wird einerseits durch die Farbe selbst bestimmt, zum Beispiel ob das Rot vor der Festigung dem Rot nach der Festigung entspricht, und von der Oberflächenbeschaffenheit. Die Rauigkeit oder Glätte einer Oberfläche beeinflussen den Farbeindruck gleichermaßen. Diesen Zusammenhang kennt man aus dem alltäglichen Leben, wenn zum Beispiel nach einem Regen der graue Asphalt tiefschwarz und glänzend wirkt. Der Wasserfilm auf dem vormals rauen Asphalt glättet den Asphalt und verändert den Farbeindruck (Falk, Brill, Stork 1986: 49). Bei einer Konsolidierung kann derselbe Effekt eintreten, wenn auf eine raue Pigmentfläche ein flüssiger Klebstoff aufgetragen wird und sich dadurch der Farbeindruck ändert. Diese physikalischen Gesetzmäßigkeiten werden in den folgenden Kapiteln eingehend beschrieben, da eine Konsolidierung sowohl eine Farbveränderung als auch eine Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit einer Pigmentfläche nach sich ziehen kann.

## 1.2 Technische Möglichkeiten der Konsolidierung

Die Festigung von Farbschollen oder groben Pigmentkörnern kann mit Hilfe von Pinseln, die mit Konsolidierungsmittel benetzt sind, durchgeführt werden. Hierfür eignen sich lange, dünne Pinsel mit wenigen Haaren, die an den Rand der zu konsolidierenden Farbscholle gehalten werden. Lange wenige Haare sind für einen Konsolidierungspinsel von Vorteil, da die langen Haare beim Anlegen an eine Scholle weniger Druck auf die Scholle ausüben können, ohne sie zu verschieben oder zu zerbrechen. Durch Kapillarkräfte fließt das Konsolidierungsmittel aus dem Pinsel unter die Farbscholle. Dieser Vorgang kann mehrfach und an verschiedenen Stellen der losen Pigmentschicht wiederholt werden, bis eine genügende Haftung der Farbscholle an den Untergrund oder zwischen groben Pigmenten gewährleistet wird. Quandt (1996: 101) gibt dem Konsolidierungsmittel Ethanol zu, um die Benetzbarkeit des Festigungsmittels zu verbessern, um mittelalterliche Buchmalereien mit dem Pinsel zu konsolidieren.

Diese Methode eignet sich für schollige Pigmentschichten oder für grobkörnige Pigmente. Je feiner und kleiner die losen Pigmente sind, umso schwieriger wird allerdings eine Konsolidierung mit Pinseln, ohne beim Einfließenlassen des Klebstoffs die Pigmente selber nicht vor dem Trocknen abzuheben. Für pudernde oder mechanisch empfindliche Pigmentoberflächen, die konsolidiert werden sollen, ist der berührungsfreie Eintrag von Klebstofflösungen, die als Aerosol aufgetragen werden, von Vorteil. Die flüssigen Klebstoffe werden in Aerosolgeneratoren zerstäubt und in einem Abstand von 1 bis 2 cm auf die Pigmentschicht aufgetragen. Im Folgenden finden sich ausgewählte Beispiele von pudernden und ablätternden Farbschichten, bevor eine Reihe von Aerosolgeneratoren vorgestellt werden, die für das Vernebeln von flüssigen Klebstoffen zur Verfügung stehen.

### 1.3 Beispiele pudernder und abblättrender Farbschichten

Die Handschrift mit der Inventarnummer W.7 (s. Abb. 1) aus dem Bestand des Walters Art Museum, Baltimore, USA, wird der Reichenauer Schule (ca. 1040-1070) zugeschrieben und weist abpudernde und abblättrende Farbschichten auf Pergament auf. Partien der Illuminierungen wurden 1993 mit Gelatine (1 bis 2 % Massengehalt) mit dem Pinsel konsolidiert<sup>1</sup>. Die Goldauflage (s. Abb. 2) und sowohl die braune (s. Abb. 3), die hellblaue (s. Abb. 4) als auch die grüne (s. Abb. 5) Pigmentschicht haften nicht mehr genügend am Untergrund und sind abgepulvert und abgeplatzt.

Die Handschrift W. 602, ebenfalls aus dem Walters Art Museum, stellt eine islamische Papier-Prachthandschrift aus dem 17. Jahrhundert dar (s. Abb. 6). Das natürliche Pigment Ultramarin, das aus dem Stein Lapis Lazuli gewonnen wird, hat sich teilweise vom Untergrund gelöst. Darunter ist eine weiße Untermalung sichtbar. Eine Konsolidierungsmaßnahme wird bei dieser Handschrift in Erwägung gezogen.

Das Pastell auf Papier von Max Liebermann (s. Abb. 7) von ca.1920 (keine Inventarnummer) aus dem Besitz der Stiftung Saarländischer Kulturbesitz, Saarländisches Landesmuseum Saarbrücken, mit dem Titel *Baumlandschaft mit See* stellt einen Pigmentauftrag mit einem äußerst geringen Bindemittelanteil dar. Die Malerei wirkt dadurch luftig und lebendig. Die abgebildeten grünen Partien (s. Detail Abb. 7) haften nur leicht auf dem Untergrund und haben eine empfindliche Oberfläche. Obgleich ein restauratorischer Eingriff in Form einer Konsolidierung der Malerei derzeit nicht angedacht ist, stellt der Transport und das Bewegen von Pastellen in Kunstsammlungen ein häufiges Problem dar. Die lose aufliegenden Pigmente lösen sich durch Vibration und ruckhaftes Bewegen aus dem Verbund der Pigmentschicht.

Die Installation von Ross Sinclair (1999/2002, Inventar Nr. G-2002-2) *The journey to the edge of the world-the new republic of St. Kilda* besteht aus über 804 Pappkartons (49,5 x 49,5 x 49,5 cm Einzelmaß) mit drei Videos und zwei Dia-Projektionen und wird in der Hamburger Kunsthalle verwahrt. Die hier abgebildeten 54 Kartons (s. Abb. 8) hat der Künstler mit schwarzer Acrylfarbe bestrichen und darauf mit weißer Tafelkreide die Umrisse der Erdteile spiegelbildlich gezeichnet, ohne die Zeichnung zu festigen. Die Kreide haftet nur leicht auf dem Untergrund, rieselt teilweise ab, da die Installation stehend präsentiert wird. Sie ist empfindlich gegenüber jeglicher Berührung. Dies macht jedes Handling und den Transport des Objekts schwierig. Eine Konsolidierung der weißen Kreide wird vom Künstler, von den Kuratoren und von den Restauratoren der Hamburger Kunsthalle befürwortet.

---

<sup>1</sup> Restaurierungsbericht vom 25. 10. 1993, The Walters Art Museum, Abigail B. Quandt



Dieses Objekt dient für die Untersuchungen der Arbeit als praktisches Beispiel einer Konsolidierungsmaßnahme mit Aerosolen und wird im Kapitel 5.2.3, S. 152 noch eingehend vorgestellt.

Die Beispiele, bei denen eine Konsolidierung bereits durchgeführt oder angedacht ist, zeigen eine Breite an Pigmenten und Schadensfällen. Die Exponate stammen aus ottonischer Zeit, aus dem islamischen Kulturkreis bis hin zur Malerei der Jahrhundertwende und der Moderne. Die technische Vorgehensweise einer Konsolidierungsmaßnahme ist, ungeachtet des Kulturkreises und der zeitlichen Entstehung des Kunstwerks, vergleichbar, wenn es um das Wiederherstellen einer ungenügenden Haftung von Pigmentauflagen zum Untergrund oder wenn es um das erstmalige Einbringen eines Bindemittels geht. Geringe Mengen an Klebstoff sollen in das Pigmentgefüge eingetragen werden, um eine genügende Haftung zwischen den Pigmentkörnern und zum Untergrund zu gewährleisten und ohne dabei den Farbeindruck zu verändern. Als Farbeindruck werden die Farbe selbst und die Oberflächenbeschaffenheit wahrgenommen.

Für die Konsolidierung der schadhafte Pigmentaufträge der Handschriften W. 7 und W. 602 bietet sich eine Kombination einer Pinsel- und Aerosolapplikation an, da sowohl Farbschollen als auch pudernde Pigmente vorliegen. Bei einer Kombination der beiden Techniken ist es sinnvoll, erst mit dem Aerosol die pudernden Bereiche zu festigen und anschließend die Farbschollen mit dem Pinsel zu konsolidieren. Für die beiden anderen Beispiele, das Pastell und die Kreidezeichnung, ist die Pinselapplikation nicht durchführbar, da Pigmente schon durch Berühren mit dem Pinsel angehoben werden. Der berührungsfreie Eintrag des Klebstoffs mit Aerosolen ist hier die geeignete Applikationsmethode.

Bei der Installation von Ross Sinclair ist im Vorfeld der Erarbeitung einer Konsolidierungstechnik mit den Kuratoren und dem Künstler zu klären, ob nicht gerade der fragile Charakter der Kreidezeichnung Bestandteil des Kunstwerks ist und somit eine Konsolidierung der Kreide nicht der Konzeption des Kunstwerks widersprechen würde. Bei diesem Beispiel müssen nicht nur die restauratorisch-technischen Möglichkeiten abgewogen werden, sondern auch die konzeptionelle Auffassung des Künstlers in die Erarbeitung einer Restaurierungsmethode mit einfließen. Die Konsolidierung der weißen Kreide dieses Objekts verdeutlicht die restauratorische Herausforderung, eine weiße teilweise dünn aufgetragene Pigmentschicht auf einem schwarzen Untergrund zu festigen und die konzeptionelle Auffassung des Künstlers mit in die Erarbeitung eines Restaurierungskonzepts einfließen zu lassen.



Abb. 1: Evangeliar (Gospels), 11. Jhd. (Invent. Nr. W.7), Evangelist Matthäus dargestellt, Seite 15 verso, Maße 23 x 16,6 cm, ganzseitige Illuminierung, Tempera auf Pergament, die vier eingezeichneten Quadrate kennzeichnen die Detailansichten (s. Abb 2- 5).

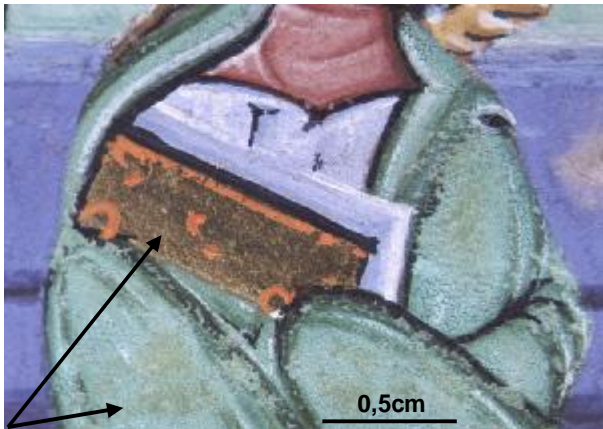


Abb. 2: Detailansicht der Abb. 1, abblätternde Goldauflage und pudernde grüne Malschicht.



Abb. 3: Detailansicht von Abb. 1, abblätternde blaue und braune Pigmentschicht.

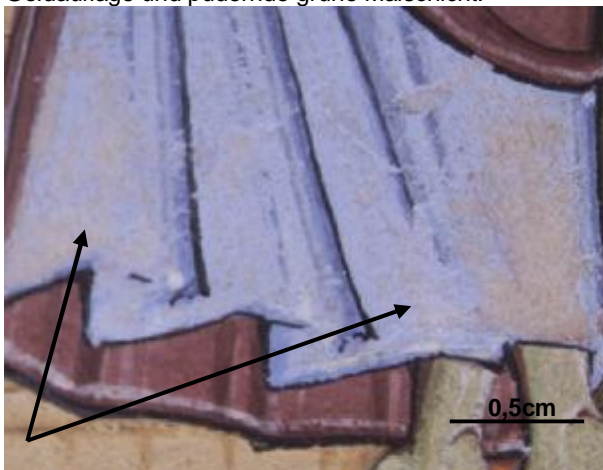


Abb. 4: Detailansicht von Abb. 1, abpudernde blaue Malschicht.

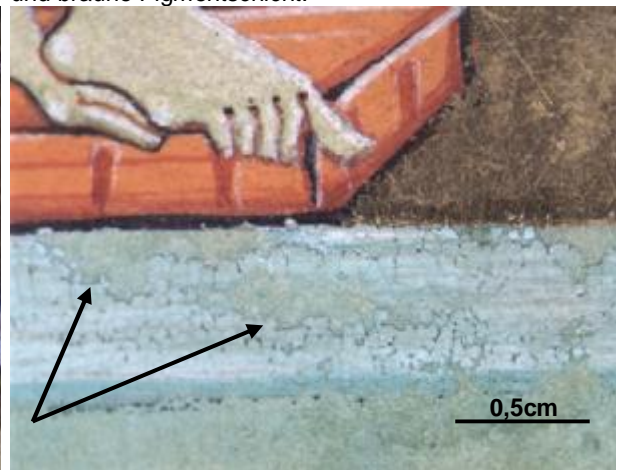


Abb. 5: Detailansicht der Abb. 1, abblätternde grüne Malschicht.



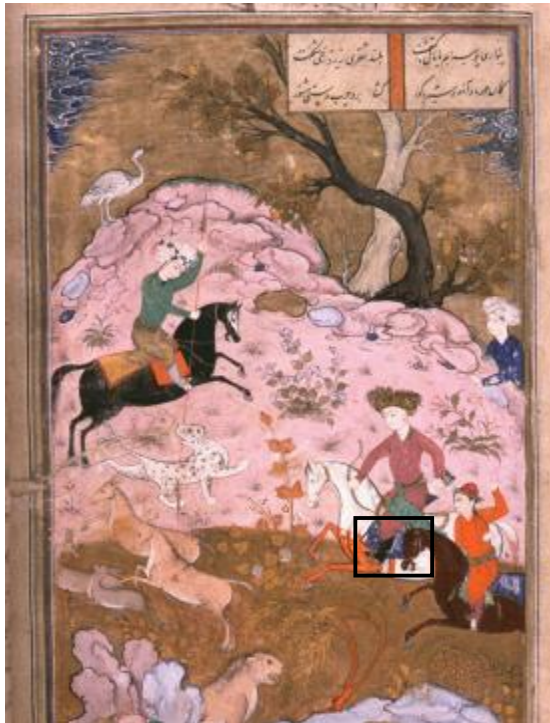


Abb. 6: Firadawsi, Persische Handschrift, 17. Jhd. (Invent. Nr. W.602), Seite 494 verso (links), Maße 28 x 16 cm, Malerei auf gestrichenem Papier. In der Detailansicht rechts pudert das natürliche Pigment Ultramarin. Der Pigmentauftrag ist teilweise abgeplatzt und eine weiße Untermauerung kommt zum Vorschein.

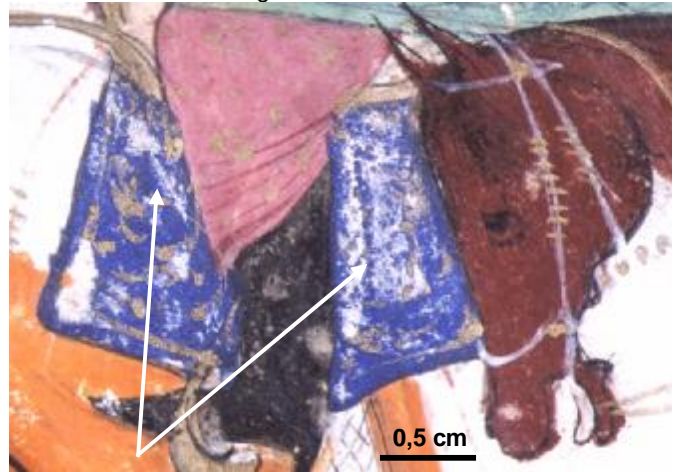


Abb. 7: Max Liebermann *Baumlandschaft mit See*, 1920 (?), (keine Invent. Nr.), Gesamtansicht links, Maße 29,5 x 41,5 cm, Pastell auf Papier, rechts Detailansicht von grüner leicht pastoser Pastellkreide mit geringer Haftung auf dem Untergrund.



Abb. 8: Installation von Ross Sinclair *The journey to the edge of the world-the new republic of St. Kilda*, 1999/2002 (Invent. Nr. G-2002-2), Tafelkreide auf mit Acryl bemalten Pappkartons (insgesamt 54 Stück abgebildet), links Aufnahme von Teilen der Installation, Größe der abgebildeten Installation 2,94 x 4,41 m. Rechts Detailansicht des spiegelbildlichen Schriftzuges „Terra del fuego“. Weiße Kreide liegt lose auf dem schwarzen Untergrund.

## 1.4 Konsolidieren mit Aerosolgeneratoren

Flüssige oder feste Schwebstoffe in einem Gas, zum Beispiel in Luft, werden als Aerosol bezeichnet. Liegen feinst verteilte flüssige Teilchen vor, so spricht man von Nebel oder von Wolken. Feste Teilchen, die in der Luft vorliegen, werden als Rauch definiert. Man geht von Größen zwischen 0,001 µm bis zu 100 µm aus (Griffiths, Mark, Marshall 1998: 4).

Aerosolgeneratoren, die kleinste Partikel erzeugen, können in zwei Kategorien eingeteilt werden. Die eine Gruppe, die die Partikel mittels Ultraschall erzeugt und die andere, die die Teilchen durch Druckluft produziert. Die folgende Reihenfolge entspricht der zeitlichen Entwicklung der verschiedenen Geräte und nicht einer qualitativen Bewertung. Abbildungen der Geräte und der möglichen Düsen sind im Anhang 12.3 gezeigt.

Michalski und Dignard (1997: 111) untersuchen den Farbeindruck und das Penetrationsverhalten einer Auswahl von Klebstoffen, die als Aerosol auf verschiedene Pigmente aufgebracht werden. In dieser umfangreichen Arbeit erzielen die Autoren gute Resultate mit Gelatine, warnen aber auch vor Übersättigung der Pigmentschicht, was sich durch einen veränderten Farbeindruck bemerkbar macht. Sie weisen auch auf besonders empfindliche Pigmente wie zum Beispiel Grüne Erde hin. Im Zuge dieses Projekts haben Dignard, Douglas, Guild (1997: 129) einen Ultraschall betriebenen Befeuchter zu einem Aerosolgenerator umgebaut. Da diese beiden Publikationen durch Mitarbeiter vom Canadian Conservation Institute (CCI) verfasst wurden, wird dieser Ultraschall betriebene Vernebler CCI-Mister genannt. Die Einbuchtung oberhalb der Ultraschallquelle wird mit Wasser gefüllt und darauf eine Plastikflasche mit Hals platziert. Der Aerosolnebel, der in der Flasche entsteht, wird durch den Luftdruck einer Aquariumpumpe durch Polyvinylchlorid-Schläuche aus der Flasche befördert. Als Düsen eignen sich Glaspipetten oder Reduzierventile.

Dierks-Staiger, Hassel, Becker (1997: 280) haben nach dem gleichen System einen Aerosolgenerator (AGS 2000) entwickelt, der ebenfalls mit Ultraschall betrieben wird. Ein Wasserreservoir dient als Übertragungsmedium für die Ultraschallwellen, die sodann auf einen Becher als Klebstoffbehälter treffen. In diesem Becher wird das Aerosol erzeugt und wieder mittels einer stufenlos regulierbaren Pumpe durch gewundene Schläuche, die bei diesem Gerät auch beheizbar sind, befördert. Die Düsen wurden aus Teflon-Vollmaterial gedreht bzw. gefräst. Die Autoren beschreiben die erfolgreiche Konsolidierung einer pudernden Gouache mit einer 0,25 %igen Methylcellulose.

In der Medizintechnik stehen vor allem für an Asthma Erkrankte sogenannte Nebulizer zur Verfügung. Die Vernebelungsaufsätze sind steril verpackt, für den einmaligen Gebrauch

konzipiert und können mit passenden Messingkupplungen an einen Kompressor angeschlossen werden. Die zu vernebelnde Flüssigkeit wird auf eine Prallplatte geleitet, wodurch die Klebstoffflüssigkeit in kleinste Teilchen zerschlagen wird. Grantham und Cummings (2002: 202) stellten dieses Gerät für die Festigung der Pigmente auf asiatischen Papier-Stellwänden vor. Die Nebulizer sind kostengünstig und arbeiten ohne großen technischen Aufwand. Als Quelle für die Druckluft eignet sich ein Kompressor, der einen Druck von 1 bar bis 2 bar realisiert.

In Deutschland wurde ein transportabler Nebulizer, der Porta-Neb, recherchiert<sup>2</sup>, der einen integrierten Kompressor aufweist, woran der Nebulizer angeschlossen wird. Der Porta-Neb ist als Inhaliergerät für unterwegs oder für zu Hause gedacht und stellt eine Alternative zu den oben beschriebenen Geräten dar.

Ein weiterer Ultraschall betriebener Aerosolgenerator ist im Zuge der Seminararbeit von Demuth (2000: 20) entwickelt worden. Eine Vierkantflasche, worin sich der Ultraschallsensor und das in den Deckel anschraubbare Klebstoffreservoir befinden, ist an eine Luftpumpe angeschlossen. Bei diesem Gerät ist die Luftpumpe stufenlos regulierbar. Er wurde von Günther Engelbrecht<sup>3</sup> technisch weiterentwickelt und wird als Mini-Vernebler WAV vertrieben.

Lawson (2000: 74) stellt eine Variante des oben beschriebenen Nebulizers vor. Die Autorin betreibt einen Nebulizer anstatt mit einem Kompressor mit einer starken Aquariumpumpe, um ein Aerosol zu bilden. Wichtig sei einerseits, dass die Pumpe einen ausreichenden Druck aufbaut und des weiteren, dass sie regulierbar sei.

Eine weitere technische Variation stellt Fischer (2003: 134) vor. Für die Konsolidierungsarbeiten einer Malerei auf Papier aus dem 15. Jahrhundert kombiniert die Autorin den CCI-Mister mit einem Kompressor und dem Dosiergerät. Der Kompressor liefert die Zuluft, um das Aerosol aus der Plastikflasche zu befördern. Diese Zuluft wird dann vom Dosiergerät reguliert, welches mit einem Fußpedal ausgestattet ist.

Maheux und McWilliams (1995: 20) ersetzen die ursprünglich angedachte Aquariumpumpe ebenso wie Fischer, nur dass die Autoren in ihrem Aufbau die Zuluft bzw. Druckluft von einer Airbrush-Anlage eines Saugtisches (Museum Services®) einsetzen. Die Druckluft der Airbrush-Anlage ist stufenlos regulierbar und wird in die Plastikflasche geleitet, in der das Aerosol erzeugt wird.

Ein weiteres Gerät erzeugt zwar kein Aerosol zum Konsolidieren von Farbschichten, liefert aber reproduzierbare Tröpfchen, die mit Druckluft erzeugt werden. Als Klebstoffreservoir

---

<sup>2</sup> Praxisseminar "Anwendung von Aerosolen in der Restaurierung" durchgeführt von Andrea Pataki, Regine Dierks-Staiger, Barbara Sommermeyer, Gerhard Banik vom 16. bis 18. Juli 2001 an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Außenstelle Fellbach.

<sup>3</sup> Günther Engelbrecht GmbH, Gräfin Justitia Straße 3, 82544 Thanning

dienen Spritzen mit unterschiedlich feinen Kanülen, aus denen die Tröpfchen gelangen und auf die Pigmentschicht aufgesetzt werden können. Fuchs (1999: 151) bezeichnet dieses Gerät als Dosiergerät und konnte eine Reihe von Objekten mit abplatzenden Farbschichten erfolgreich mit einer Mischung aus Störleim und Gummitraganth konsolidieren.

Alle Geräte und auch Kombinationen derselben haben ihre Vorzüge und Schwächen und werden je nach Anforderung eingesetzt. In Tabelle 1 sind die Geräte mit Angabe der Vernebelungsart und der Literatur nochmals aufgelistet.

<b>Vernebler</b>	<b>Quelle (Ultraschall/Druckluft)</b>	<b>Literatur</b>
CCI-Mister	Ultraschall	Michalski, Dignard 1997
AGS 2000	Ultraschall	Dierks-Staiger, Hassel, Becker 1997
Nebulizer	Druckluft	Grantham, Cummings 2002
Porta Neb	Druckluft	Pataki 2001
Mini-Vernebler	Ultraschall	Demuth 2000
Nebulizer-Variante	Druckluft	Lawson 2000
CCI-Mister-Variante	Ultraschall	Fischer 2003
Dosiergerät	(Druckluft)	Fuchs 1999

Tabelle 1: Auflistung der Ultraschall-und Druckluft betriebenen Aerosolgeneratoren. Das Dosiergerät erzeugt kein Aerosol, aber reproduzierbare Tröpfchen, die zum Konsolidieren eingesetzt werden können.

## 1.5 Technische Grundlage von Aerosolgeneratoren

Die Ultraschall betriebenen Aerosolgeneratoren (CCI-Mister, AGS 2000, Mini-Vernebler) arbeiten alle nach demselben Prinzip. Eine Ultraschalleinheit ist unter einem Wasserreservoir platziert. Trifft ein Ultraschallstrahl von unten auf eine freie Flüssigkeitsoberfläche, so wird diese durch den Strahlungsdruck angehoben, was als Levitation bezeichnet wird (s. Abb. 9). Ist die Schallintensität hinreichend stark, so kann aus der Flüssigkeit ein Strahl oder Sprudel bzw. ein Aerosol austreten (Sorge 2002: 38). Das Wasserreservoir dient der Übertragung der Ultraschallwellen, da sich in diesem Wasserreservoir ein kleineres Behältnis befindet, in dem der zu vernebelnde Klebstoff eingefüllt wird. Dieses kleine Behältnis ist aus einem Kunststoff hergestellt, der für Ultraschallwellen durchlässig ist. Dies kann zum Beispiel Polyethylen (CCI-Mister) sein. Da das erzeugte Aerosol träge ist und nur der Schwerkraft unterliegt, wird bei allen Aerosolgeneratoren Zuluft in das Klebstoffbehältnis eingeführt, um das Aerosol über verschiedene Schläuche und Düsen zum Objekt zu transportieren (s. Abb. 10). Diese Zuluft besteht aus einer stufenlos regulierbaren Luftpumpe (AGS 2000, Mini-Vernebler) oder aus einer Aquariumpumpe (CCI-Mister).

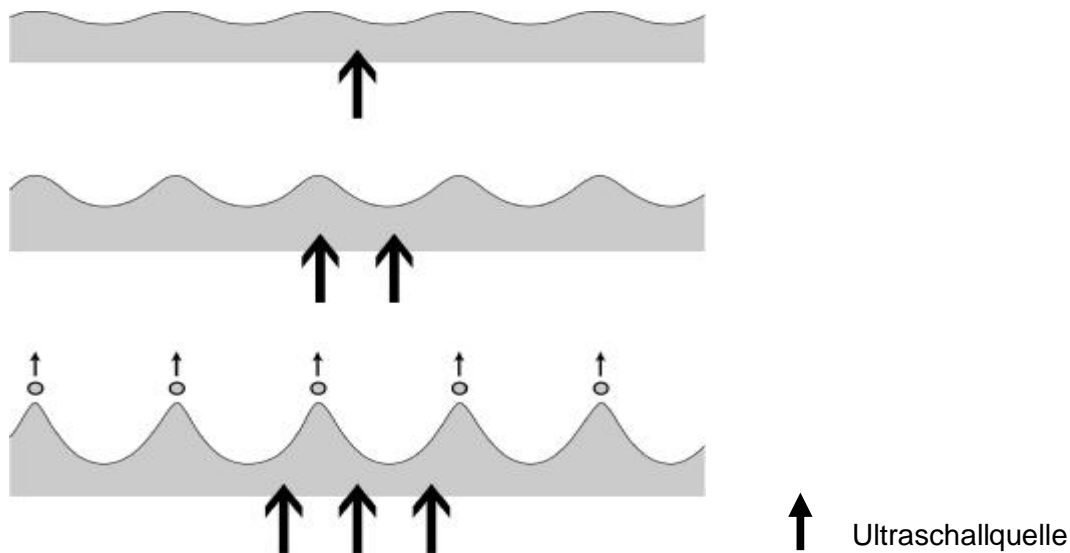


Abb. 9: Wellenbildung einer Flüssigkeits-Oberfläche durch Ultraschall. Bei ausreichender Ultraschallintensität schnüren sich Aerosoltröpfchen ab.

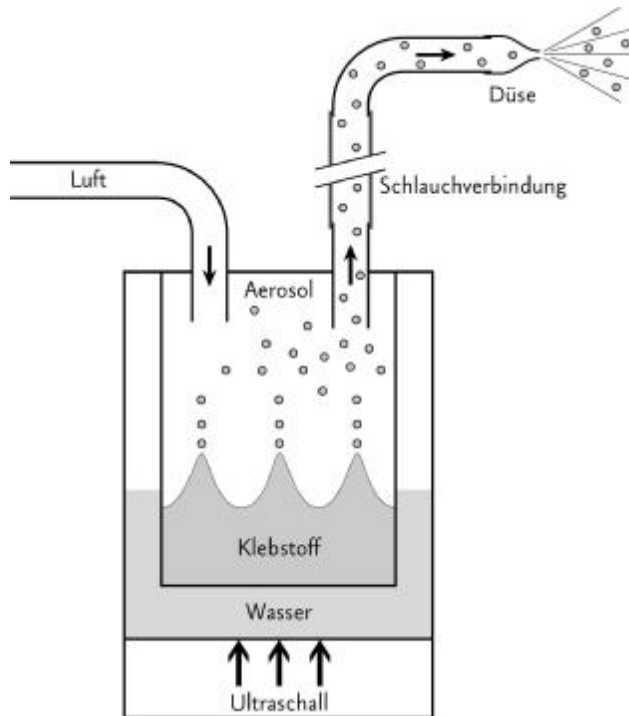


Abb. 10: technischer Aufbau eines Ultraschall betriebenen Aerosolgenerators.

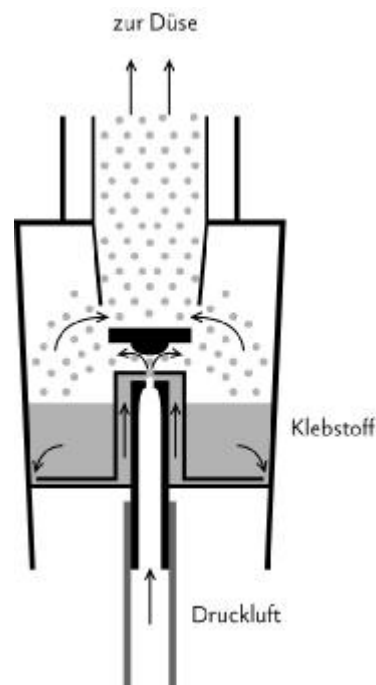


Abb. 11: technischer Aufbau eines Druckluft betriebenen Aerosolgenerators.

Die Druckluft betriebenen Generatoren (Nebulizer, Porta Neb) haben jeweils denselben Düsenaufsatz, in dem der zu vernebelnde Klebstoff eingefüllt wird. Die eingeführte Druckluft wird in einem ersten Schritt durch eine Düse geleitet, wodurch die Geschwindigkeit der Druckluft erhöht wird. Dadurch entsteht in der Vernebelungskammer ein Unterdruck, der den flüssigen Klebstoff mit sich reißt. In einem nächsten Schritt wird das Klebstoff-Luft-Gemisch



auf eine abgerundete Platte, die Prallplatte, geschleudert. Das Beschleunigen der Druckluft durch die Düse und das Auftreffen des Klebstoff-Luft-Gemisches auf die Prallplatte bewirken das Zerstäuben von Klebstofflösungen im Nebulizer (s. Abb. 11). Die erzeugten Teilchen werden weiter durch verschiedene Schläuche und durch eine Austrittsdüse bis zum Objekt transportiert.

Die Aerosole in Luft, die von den Generatoren produziert werden, werden als Gas-Partikel-Strom bezeichnet. Dieser Gas-Partikel-Strom wurde vom AGS 2000, vom Mini-Vernebler und vom Nebulizer mit einem Gilibrator-2 (Gilian Instruments, Corp.) gemessen. Die Einheit des Gas-Partikel-Stroms ist ml/min. Die Angaben in Tabelle 2 variieren, da sich der Gas-Partikel-Strom ändert, wenn beim AGS 2000 die Ultraschallquelle oder die Luftpumpe geregelt wird. Schwankungen des Gas-Partikel-Stroms beim Nebulizer kommen durch unterschiedliche Einstellungen der Druckluft zustande. Eine gute Arbeitseinstellung liegt bei einer Drucklufteinstellung von 1-2 bar.

Zwischen dem AGS 2000 und dem Nebulizer wurden erhebliche Unterschiede gemessen. Der Gas-Partikel-Strom des Nebulizers ist sieben bis neun Mal so hoch, im Vergleich zum AGS 2000. Die verschiedenen Einstellungen der Ultraschallquelle und der Luftpumpe des AGS 2000 wirken sich kaum auf den Gas-Partikel-Strom aus, sie schwanken nur zwischen 1040 und 1200 ml/min. Der Gas-Partikel-Strom des Mini-Verneblers ist mit dem des AGS 2000 zu vergleichen.

AGS 2000		Einstellung Luftpumpe	Gas-Partikel-Strom [ml/min]
	Voll	Voll	1192
	Voll	Mittel	1160
	Voll	Tief	1040
	Tief	Voll	1200
	Tief	Mittel	1170
	Tief	Tief	1050
Mini- Vernebler	Mittel	Mittel	1020
Nebulizer	Druckluft [bar]		
	1		7100
	1,5		8300
	2		9700

Tabelle 2: Gas-Partikel-Strom des AGS 2000, des Mini-Verneblers und des Nebulizers bei verschiedenen Einstellungen.

## 1.6 Vorteile und Grenzen der Aerosolanwendung

Der berührungsfreie Eintrag des Klebstoffs in Form von Aerosolen stellt den wichtigsten Vorteil dieser Konsolidierungsmethode dar. Geringe Mengen an Konsolidierungsmittel werden berührungsfrei auf die Pigmentschicht aufgetragen. Bei lose aufliegenden Pigmenten oder mechanisch empfindlichen Oberflächen ist diese Methode der Pinselapplikation vorzuziehen, da schon das Berühren einer kleinen Pigmentscholle mit dem Pinsel diese verschieben kann oder einzelne Pigmentkörner abgehoben werden können.

Aerosolaufträge können dosiert werden, indem der Aerosolstrahl mehrfach über die schadhafte Pigmentschicht geführt wird, bis eine genügende Haftung realisiert wird, wobei der Gas-Partikel-Strom bei den Ultraschall betriebenen Geräten durchwegs geringer als bei den Druckluft betriebenen Geräten ist. Ein zu hoher Gas-Partikel-Strom, vor allem bei den Nebulizern, kann zu einem Wegtragen lose aufliegender Pigmente führen. Dies stellt eine Einschränkung bei der Verwendung von Druckluft betriebenen Aerosolgeneratoren dar.

Besteht die Gefahr des Wegtragens der Pigmentkörner, eignen sich die Ultraschall betriebenen Generatoren, die geringere Gas-Partikel-Ströme aufweisen (s. Tabelle 2).

Sowohl die Ultraschall als auch die Druckluft betriebenen Aerosolgeneratoren beeinflussen die maximalen Konzentrationen, mit denen flüssige Klebstoffe vernebelt werden können. In Tabelle 3 ist eine Auswahl von Klebstoffen und ihre maximalen Konzentrationen aufgelistet, die mit den verschiedenen Aerosolgeneratoren vernebelt werden können. Hierbei handelt es sich um empirisch ermittelte maximale Konzentrationen der Klebstoffe, die mit den verschiedenen Generatoren vernebelt wurden. Diese Konzentrationen werden allerdings nicht für Konsolidierungsmaßnahmen empfohlen, da proteinhaltige Klebstofflösungen von über 3 bis 4 % Massengehalt spannungsreich in einem Pigmentgefüge austrocknen und Spannungsrisse hervorrufen können.

	<b>CCI-Mister</b>	<b>AGS 2000</b>	<b>Mini-Vernebler</b>	<b>Porta Neb</b>	<b>Nebulizer (1 bar)</b>
<b>Gelatine</b>	1,5	1,5	3	5	5
<b>Hausenblase</b>	2	1,5	1,25	5	5
<b>Funori</b>	0,3	0,2	0,5	0,8	0,8
<b>MC 1500</b>	0,3	0,2	0,5	0,8	0,8
<b>Kluacel® (Ethanol)</b>	0,6	--	0,5	0,7	0,7

Tabelle 3: Maximale Konzentrationen von Klebstoffen, die in den Aerosolgeneratoren vernebelt werden können. Hierbei handelt es sich allerdings nicht um empfohlene Konzentrationen für Konsolidierungsmaßnahmen, da diese teilweise sehr hoch sind.

Die Ultraschall betriebenen Generatoren (CCI-Mister, AGS 2000, Mini-Vernebler) können durchwegs nur geringere maximale Konzentrationen vernebeln, im Vergleich zu den

Druckluft betriebenen Aerosolgeneratoren (Nebulizer, Porta Neb). Der Druckluft unterstützte hohe Gas-Partikel-Strom ermöglicht das Zerstäuben von hohen Konzentrationen von flüssigen Klebstoffen, die bei Gelatine und Hausenblase bei bis zu 5 % Massengehalt liegen können. Das Abschnüren von Aerosolpartikeln von einer Flüssigleitsoberfläche im Falle der Ultraschall betriebenen Aerosolgeneratoren resultiert hier in geringeren maximalen Konzentrationen, da die Ultraschallwellen Hüllmaterialien wie Glas und Kunststoff und das Wasserreservoir durchdringen müssen, bevor sie auf den flüssigen Klebstoff treffen. Dies schwächt die Leistung der Ultraschallwellen ab, was zu geringeren maximalen Konzentrationen der Klebstoffe bei der Vernebelung führt.

Die geringen zu vernebelnden Konzentrationen bedeuten einerseits, dass es zu einer starken Befeuchtung der Pigmentschicht kommen kann, wenn nur Konzentrationen von beispielsweise 1 % Massengehalt bei Ultraschall betriebenen Generatoren vernebelt werden können. Der wässrige Anteil der Klebstofflösung ist sehr hoch. Andererseits muss dadurch ein Konsolidierungsauftrag zu häufig wiederholt werden, da sich die Klebkraft des Konsolidierungsmittels durch die geringen Konzentrationen reduziert und bei stärkeren Pigmentschichten unter Umständen nicht ausreichend ist.

Bei der Aerosolkonsolidierung handelt es sich immer um eine Festigung, die von oben auf die Pigmentschicht aufgetragen wird, im Gegensatz zur Pinselapplikation, die das Konsolidierungsmittel gezielt an den Rand und unter eine Pigmentscholle platziert. Bei dicken Pigmentschollen kann der Fall eintreten, dass das Aerosol zwar auf die Pigmentscholle aufgetragen wird, der Klebstoff sich aber nicht an die Ränder und unter die Scholle verteilt und somit eine Aerosolanwendung für diesen Schadensfall nicht geeignet ist.

Bei den Druckluft betriebenen Verneblern bewirkt der hohe Gas-Partikel-Strom eine Abkühlung der Klebstoffe. Bei hochkonzentrierten proteinhaltigen Klebstofflösungen kühlen diese durch die Geschwindigkeit während des Zerstäubens ab und können gelieren. Werden beispielsweise Gelatine oder Hausenblase mit Konzentrationen von über 4 % Massengehalt vernebelt, können die vormals flüssigen Klebstoffe in der Vernebelungskammer erstarren. Die Klebstoffe in einem Ultraschall betriebenen Generator werden durch die Ultraschallwellen erwärmt, was von Vorteil beim Vernebeln von proteinhaltigen Klebstoffen ist.

Eine weitere Einschränkung der Aerosolanwendung stellt die relativ geringe Menge an Klebstoff dar, die in die vorgesehenen Klebstoffreservoirs eingefüllt werden können. Diese variieren je nach Gerätetyp, liegen aber bei maximal 50 ml beim Mini-Vernebler. Dies bedeutet, dass eine Konsolidierungsmaßnahme immer wieder unterbrochen werden muss, wenn sich kein Klebstoff mehr im dafür vorgesehenen Behälter befindet.

## 1.7 Ausbildung von Klebstoffbrücken und Risikoabschätzung

Für den Einsatz eines Klebstoffs zum Konsolidieren spielen sowohl seine Penetrationseigenschaften als auch seine Klebkraft eine Rolle. Die Klebkraft zwischen zwei Pigmentkörnern wird in dieser Arbeit als ein physikalischer Vorgang betrachtet. Der Klebstoff trifft auf die Pigmentschicht auf und soll die Pigmentkörner benetzen und Klebstoffbrücken zwischen zwei Pigmentkörnern aufbauen. Der Klebstoff soll weder eine Beschichtung der Pigmentoberfläche noch ein Verklumpen der Pigmentschicht bewirken. Auf mögliche chemische Reaktionen bei der Ausbildung einer Klebstoffbrücke zwischen zwei Pigmentkörnern oder möglicher Reaktionen zwischen Klebstoff und Pigment wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da die Klebstoffe alle physikalisch durch Verdunsten des Klebstoff-Lösemittels trocknen.

Die Größe des Pigmentkorns bzw. der Abstand zwischen zwei Pigmentkörnern ist ein entscheidendes Kriterium dafür, ob ein flüssiges Aerosolteilchen dazwischen eindringen kann, eine Benetzung stattfindet und Klebstoffbrücken zwischen aneinander liegenden Pigmentkörnern ausgebildet werden. Abb. 12 zeigt schematisch die Abhängigkeit zwischen der Größe der Aerosolpartikel und der Größe der Pigmente. Sind Aerosolpartikel kleiner als die Öffnung zwischen zwei aneinander liegenden Pigmenten, findet eine Benetzung der Pigmente durch die Aerosolteilchen statt.

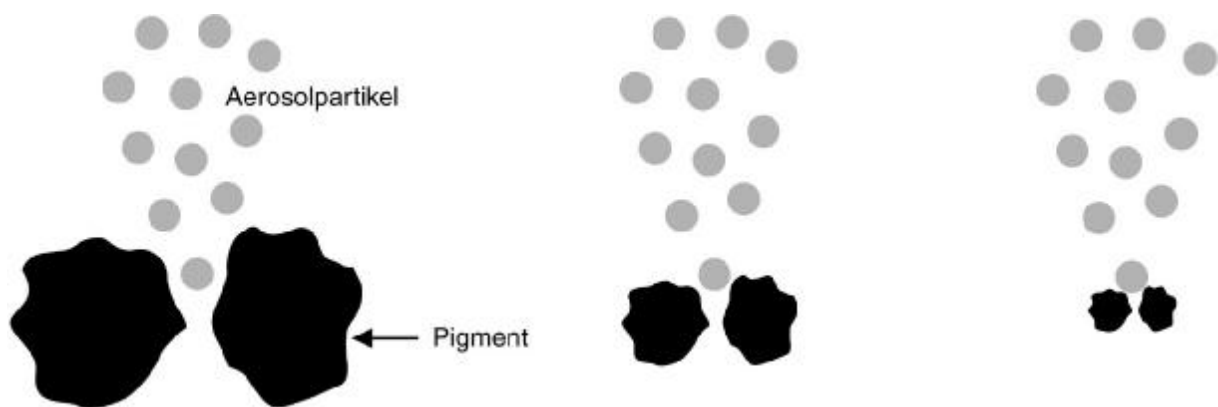


Abb. 12: Abhängigkeit zwischen der Größe der Aerosolpartikel und der Größe der Pigmente.

Sind die Aerosolpartikel klein genug, um in die Zwischenräume von Pigmenten zu gelangen (s. Abb. 13 a), benetzen sie die Pigmente (s. Abb. 13 b) und bilden an der kürzesten Entfernung zwischen zwei Pigmenten eine Klebstoffbrücke. Diese Klebstoffbrücke hat die Form eines Meniskus (s. Abb. 14), die energetisch günstigste Form einer Flüssigkeit in

einem Hohlraum (Brinker, Scherer 1990: 425). Die Ausbildung eines Meniskus konnte Kessler (1997: 58) an Ultramarin mit vierfachem Auftrag von Funori (0,25 % Massengehalt) zeigen, den sie zuvor mit dem Nebulizer zerstäubt hat (s. Abb. 15).

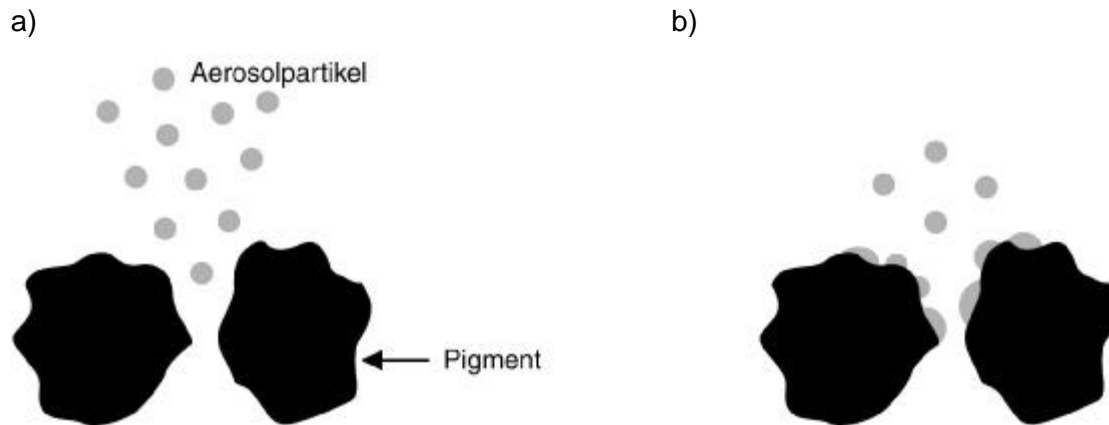
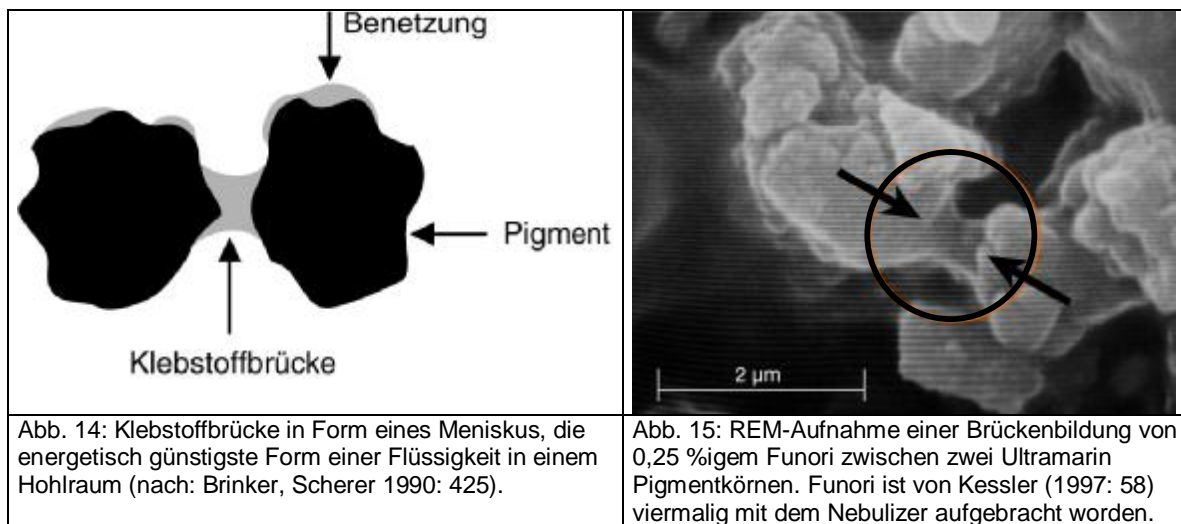


Abb. 13: Aerosolpartikel treffen auf Pigmentkörner auf (a), legen sich an die Pigmentoberfläche an und benetzen diese (b).



Gelangt weiterer Klebstoff in die Zwischenräume, so werden die Klebstoffbrücken breiter und dicker (s. Abb. 16 a), bis alle Zwischenräume mit Klebstoffflüssigkeit ausgefüllt sind (s. Abb. 16 b-c). Der Zustand c) wird als Sättigung bezeichnet (Pietsch 1991: 91). Das Konsolidierungsmittel umhüllt das Pigment vollständig und es sind keine scharfen Konturen der einzelnen Pigmentkörner mehr erkennbar.

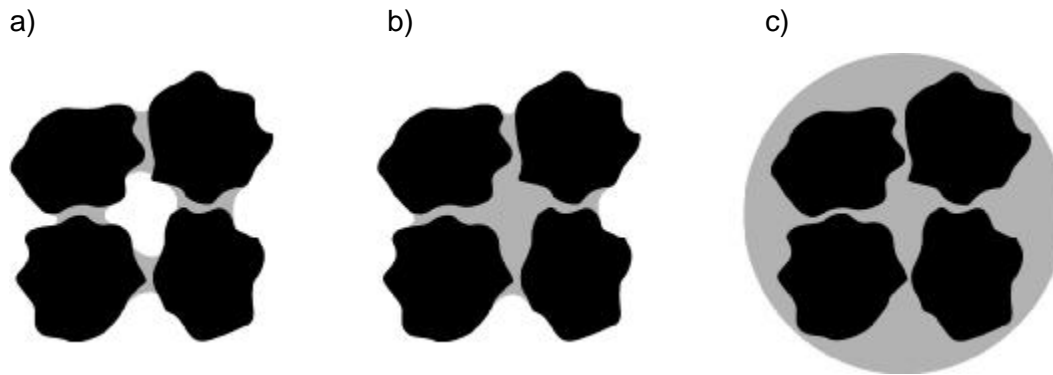


Abb. 16: Benetzte Pigmente mit Brückenbildung des Klebstoffs (a), starkes Benetzen der Pigmente, die Innenräume sind ausgefüllt (b), Sättigung der Pigmente, alle Hohlräume sind ausgefüllt und das Pigment von Klebstoff umgeben (c) (nach Pietsch 1991: 91).

In Abb. 17 links ist das reine Pigment Zinnober in einer REM-Aufnahme dargestellt. In Abb. 17 rechts ist 1g Zinnober mit 2ml 10 %iger Gelatine gemischt und auf ein geleeimtes Papier (Whatman Nr. 1 mit 2 % Gummiarabikum im Bad geleeimt) aufgestrichen worden. Nach Trocknung des Pigment-Bindemittelgemisches zeigte sich, dass das Pigment vom Bindemittel weitgehend umhüllt ist und dass keine Konturen des Pigments mehr zu erkennen sind. Dieser hohe Anteil an Bindemittel kann mit dem Zustand einer erhöhten Benetzung (s. Abb. 16 b) verglichen werden.

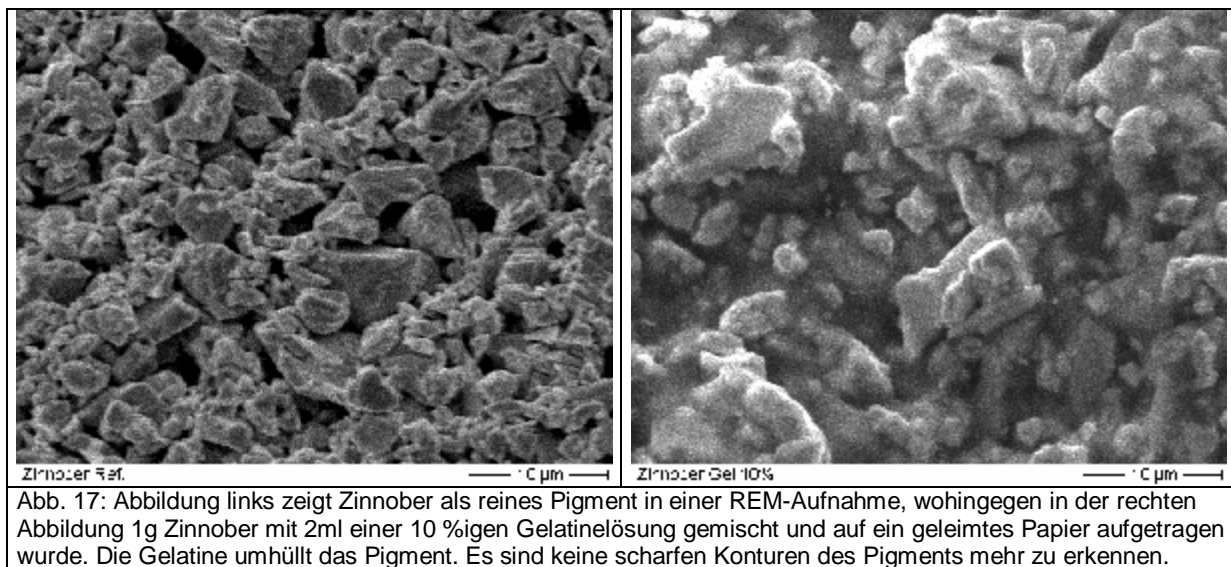


Abb. 17: Abbildung links zeigt Zinnober als reines Pigment in einer REM-Aufnahme, wohingegen in der rechten Abbildung 1g Zinnober mit 2ml einer 10 %igen Gelatinelösung gemischt und auf ein geleeimtes Papier aufgetragen wurde. Die Gelatine umhüllt das Pigment. Es sind keine scharfen Konturen des Pigments mehr zu erkennen.

Bei einer vollständigen Einbettung und Umhüllung der Pigmentkörner mit Klebstoff verändert sich die Oberflächenbeschaffenheit der Pigmentschicht drastisch. Die Pigment-Bindemittel-Oberfläche wird geglättet und die Reflexionseigenschaften verändern sich. Infolge dessen ändert sich auch der Farbeindruck einer solchen Pigmentschicht. Daniels (1998: 33) zeigt

das Zusammenfallen und das Verdichten von Pigmenten eines Pastells, die einer Wässerung und einer exzessiven Konsolidierung unterzogen wurden. Der Farbeindruck des vormals hellen Pastells war nach der Behandlung dunkler, weil die Pigmentschicht zusammengesunken war.

Das vollständige Einbetten einer Pigmentschicht mit Konsolidierungsmittel stellt ein Risiko im Zuge des Auftragens der Festigungslösung dar, da die Oberflächenbeschaffenheit und somit die Reflexionseigenschaften verändert werden können. Die Auftragsmenge wird empirisch ermittelt, bis ein genügender Halt zwischen den Pigmentkörnern realisiert wird. Es ist an dieser Stelle nicht geklärt, ob vorrangig die Menge an Klebstoff oder die Qualität des Klebstoffs Oberflächenveränderungen hervorrufen.

Ein zu hoch konzentrierter oder ein zu spannungsreicher Klebstoff kann bei der Ausbildung der Klebstoffbrücken und beim Trocknen des Konsolidierungsmittels zu Spannungen zwischen den Pigmenten oder der gefestigten Pigmentschicht führen. Wenn die Klebkraft des Konsolidierungsmittels zur Ausbildung der Klebstoffbrücken sehr hoch ist, besteht die Gefahr, dass es zu Spannungsrissen und zu einem Zusammenziehen bzw. Abheben der konsolidierten Pigmentschicht kommt.

Das Konsolidieren mit Aerosolen mit geringen Klebstoffkonzentrationen kann auf der anderen Seite zu einer starken Befeuchtung der Pigmentschicht führen, wenn eine Konsolidierungsmaßnahme auf Grund schwacher Klebkraft häufiger wiederholt werden muss. Eine starke Befeuchtung der Pigmentschicht kann zu Schwemm- oder Wasserrändern führen, wenn zu viel Konsolidierungsmittel eingetragen wird. Die Vorteile und Risiken einer Aerosolkonsolidierung werden in den folgenden Kapiteln noch weiter vertieft, um das Risiko einer Behandlung zu minimieren.

## 1.8 Offene Fragestellungen

Das Konsolidieren von pudrenden und abblätternden Farbschichten mit Aerosolen ist von Michalski, Dignard (1997: 111) und Quandt (1996: 102) in die Restaurierungspraxis eingeführt worden. Diese Technik hat sich als alternative Konsolidierungsmethode neben der Pinselapplikation entwickelt.

Mit der Vorstellung neuer Aerosolgeneratoren und neuer Anwendungsgebiete ist das Bedürfnis gewachsen, die empirischen Kenntnisse der Konsolidierung mit Aerosolen, wie es in der Praxis zum Einsatz kommt, naturwissenschaftlich zu beleuchten und Zusammenhänge zu klären.

Die Größe der Aerosolpartikel und die Penetrationseigenschaften der Klebstoffe in eine Pigmentschicht sind bislang nicht systematisch aufgearbeitet worden. Arnold (1996: 12) hat die Partikelgrößen eines Nebulizers Laser unterstützt messen lassen und stellt einen ersten Ansatz in dieser Richtung vor. Die Aerosolpartikel sollten mindestens ebenso klein oder kleiner als die zu konsolidierenden Pigmente sein, um die Ausbildung von Klebstoffbrücken zu gewährleisten. Dafür sollte die Größenverteilung der Aerosole bestimmt werden.

Das Penetrationsverhalten von Methylcellulose und Gelatine wurde von Ream (1995: 29) und Kessler (1997: 71) anhand von gefärbten Konsolidierungsmitteln bildlich festgehalten und stellen bislang die einzigen erfolgreichen Darstellungen von Penetrationsvorgängen dar.

Die verschiedenen traditionell eingesetzten Konsolidierungsmittel, wie Gelatine, Hausenblase und Methylcellulose unterscheiden sich in ihren physikalischen Eigenschaften wie Viskosität, Farbigkeit und Oberflächencharakteristik und wechselwirken auch in unterschiedlicher Weise als Konsolidierungsmittel auf einer Pigmentschicht. Inwieweit sie die Oberflächenbeschaffenheit und weiter die Farbwirkung beeinflussen, sind nicht geklärte Fragen. Die farbmetrischen und optischen Untersuchungstechniken zur Beschreibung von Oberflächenbeschaffenheit im Zuge der Konsolidierung einer Pigmentschicht sind bislang nicht untersucht worden und lassen auf die Klärung der Zusammenhänge zwischen Konsolidierungsmittel und Pigmentschicht in Bezug auf die Farbwirkung hoffen.

Die Restaurierung von zeitgenössischer Kunst muss sich mit Grenzgebieten der Pigmentkonsolidierung auseinandersetzen. Dies sind beispielsweise Monolagen von Rußaufträgen von feinsten Pigmentqualität oder die schon vorgestellten weißen dünnsten Schichten von Kreideanstrichen auf einem schwarzen Acrylgrund bei der Installation von Ross Sinclair (s. Kapitel 5.2.3, S. 152), die eine restauratorische Herausforderung darstellen, die anhand naturwissenschaftlicher Untersuchungen überwunden werden können.



## 1.9 Naturwissenschaftliche Herangehensweise

Die Bestimmung von Pigmenten auf analytischem Wege ist ein erster Schritt bei der Konsolidierung. Die Untersuchung von Pigmenten mit spektroskopischen Analyseverfahren liefert charakteristische Absorptions- und Reflektionsspektren, die anhand von Referenzmessungen auf die in Frage kommenden Pigmente schließen lassen. Bei der Malerei auf Papier und Pergament haben sich die Fourier-Transform-Raman-(FT-Raman), die Fourier-Transform-Infrarot-(FTIR) und die UV/VIS-Spektroskopie etabliert. Eine weitere Methode zur Bestimmung von Pigmenten stellen die elementspezifischen Untersuchungsmethoden dar. Hier werden die Analysen im Spurenbereich kurz erläutert, da diese Methoden ohne Probenahme und hochsensibel arbeiten. Die Kenntnis der Pigmente, die für eine Malerei in wässrigen oder ölhaltigen Bindemitteln oder für einen Druck eingesetzt worden sind, geben daraufhin anhand von Sekundärliteratur (Feller 1986) Auskunft über die chemische Zusammensetzung bei spektroskopischen Analysen, über die Morphologie der Pigmente, über die Dichte und den Brechungsindex der Pigmente und sie hilft letztlich auch bei der zeitlichen Einordnung der Exponate.

Die FT-Raman-Spektroskopie ist in der naturwissenschaftlichen Technologie eine *zerstörungsfreie* Analysetechnik. *Zerstörungsfrei* bedeutet darin, dass eine Probe vom Kunstwerk genommen wird, diese aber bei der Analyse nicht zerstört wird. Die Probe wird mit monochromatischem Licht, einem Laser, beleuchtet, wodurch Schwingungs-Anregungszustände erreicht werden. Sie wird als Schwingungs-Spektroskopie bezeichnet. Die um die Bindungsachse verteilten Elektronen werden durch den Anregungslaser kurzzeitig verzerrt, das Molekül wird polarisiert und emittiert Raman-Strahlung (Skoog, Leary 1996: 322). Die Wellenlänge des Anregungslasers bestimmt den Bereich, in dem die Raman-Strahlung gemessen werden kann. Dies kann im Mittinfrarot-Bereich (MIR) bei ca. 500 bis 4000 Wellenzahlen/cm oder im Nahinfrarot-Bereich (NIR) bei ca. 4000 bis 10000 Wellenzahlen/cm liegen.

Die Pigmentanalyse basiert auf Referenz Datenbanken, wie sie Bell, Clark und Gibbs (1997: 2160-2169) mit der FT-Raman-Spektroskopie publiziert haben und stellt die Grundlage für schwingungsspezifische Untersuchungen dar. Wird ein unbekanntes Pigment mit der FT-Raman-Spektroskopie untersucht, können die Spektren mit der vorhandenen Datenbank verglichen und kann auf ein Pigment geschlossen werden. Eine Weiterentwicklung stellt die Raman-Mikroskopie dar, bei der das Pigment in-situ, ohne Probenahme und zerstörungsfrei untersucht werden kann. Dieser Untersuchungsaufbau ist sowohl von Konservierungswissenschaftlern (Clark 1995: 424 und Davey, Gardiner, Singer 1994: 55) als auch von

Restauratoren (Porter 1992: 95 und Derbyshire, Withnall 1999: 10) erfolgreich eingesetzt worden. Illuminierte Handschriften, Miniaturen, Ölgemälde und Lithografien sind mit dieser Technik untersucht und die Pigmente bestimmt worden. Schrader (1997: 231) setzt die FT-Raman-Spektroskopie im Nahinfrarot-Bereich (NIR) ein und bestimmt zum Beispiel den Farbstoff Indigo, aromatische Verbindungen, aber auch Azurit und Zinnober einer Pergamenthandschrift. Auch Borque, Ruiz-Moreno, Lopez-Gil Serra (2004: 73) setzen die FT-Raman-Spektroskopie im Nahinfrarot-Bereich (NIR) zur Bestimmung von Pigmenten ein und können störende Fluoreszenzerscheinungen durch den Einsatz eines roten Lasers mit der Wellenlänge 632 nm stark reduzieren.

Die FT-Raman-Spektroskopie gilt als die komplementäre Methode zur FTIR-Spektroskopie. Beide Techniken versetzen Moleküle in Schwingungs-Anregungs-Zustände, allerdings sind manche Moleküle spezifisch Raman-aktiv bzw. IR-aktiv. Die IR-Spektroskopie regt ein Molekül zum Schwingen und Rotieren an, bis eine Gesamtänderung des vorhandenen Dipolmoments auftritt. Dann kann die anregende Strahlung im IR-Bereich mit dem Molekül wechselwirken und Absorption tritt ein (Skoog, Leary 1996: 276). Die Raman-Spektroskopie zeichnet sich durch die charakteristische Streuung an polarisierten Molekülen aus, die auch als Raman-Effekt bezeichnet wird. Hygroskopische Materialien lassen sich im Vergleich zur FTIR- Spektroskopie bevorzugt mit der FT-Raman-Spektroskopie analysieren, da wässrige Verbindungen Raman-inaktiv sind und dadurch die Peaks von Wasser bei der Messung nicht stören. Es liegt nahe, diese beiden Techniken ergänzend zueinander einzusetzen. Grosso (1994: 245) untersucht historische und moderne Papiere, die verschiedene Wässerungsbehandlungen erfahren haben. Mit der FTIR- und der FT-Raman-Spektroskopie konnte Grosso Oxidationsvorgänge der Cellulose nach einer Bleichbehandlung messen. Auch Trouillet, Heißler und Geckle (2000: 30) untersuchen holzschliffhaltige und holzfreie moderne und historische Papiere sowohl mit der FT-Raman als auch mit der FTIR-Spektroskopie. Eine weitere Kopplung von Untersuchungstechniken stellen Burgio, Clark, Stratoudaki (2000: 465) bei der Identifizierung und der Analyse zum Schichtaufbau einer Malerei dar. Die Emissions-Spektroskopie auf Basis von Plasmaquellen (Laser-induced-breakdown spectroscopy, LIBS) und die Raman-Mikroskopie wurden bei einer byzantinischen Ikone angewendet. Für diese Untersuchung wird zwar keine Probe entnommen, dafür werden die Untersuchungen zerstörend direkt am Objekt in  $\mu\text{m}$ -Schritten ausgeführt.

Die Anregung im ultravioletten und sichtbaren Wellenlängenbereich wird als UV/VIS-Spektroskopie bezeichnet und liefert sowohl Reflexions- als auch Absorptionsspektren. Bacci, Baldini, Carla (1991: 27) untersuchen Pigmente von Fresken, die Spektren in einem Wellenlängenbereich von 400 bis 800 nm angeben und wiederum durch Referenz-

Datenbanken auf ein Pigment schließen lassen. Diese Untersuchungen werden berührungsfrei ohne Probenahme in-situ durchgeführt. In einem weiteren Artikel (Bacci, Piccolo, Porcinai 1997: 31) werden UV/VIS-spektroskopische Untersuchungen bei Ölgemälden vorgestellt und auch die technische Weiterentwicklung von Geräten (Bacci, Piccolo, Porcinai 2000: 189) betrieben. Eine französische Forschungsgruppe unternimmt vergleichbare UV/VIS-spektroskopische Untersuchungen, allerdings bestimmen sie zudem auf rechnerischem Wege die Oberflächenrauigkeit (Elias, Menu 2000: 194). Mit dieser Analysetechnik kann Malerei auf Holz und Keramik oder Gouachen auf Papier untersucht werden und die Pigmente lassen sich identifizieren (Elias, Menu 2001: 779).

Für elementspezifische Untersuchungen im Spurenbereich mit hoher Auflösung, bietet sich ein Teilchenbeschleuniger an, die Mikro-Protonen-induzierte Röntgenemissions-Spektroskopie ( $\mu$ -PIXE), wie es Reiche, Berger, Duval (2004: 32) bei Metallstiftzeichnungen demonstriert haben. Die äußerst feinen Linien dieser Zeichnungen auf Papier können ohne Probenahme elementspezifisch gemessen werden. Herkömmliche Untersuchungstechniken erreichen nicht die erforderliche Auflösung. Herkömmliche Untersuchungsmethoden wären die Röntgen-Fluoreszenzanalyse (RFA) oder die energiedispersive Röntgenmikroanalyse (REM-EDX). Reiche, Berger, Duval (2004: 32) haben dieselben Metallstiftzeichnungen von Albrecht Dürer ebenso mit der Mikro-Synchrotron-Röntgen-Fluoreszenzanalyse ( $\mu$ -SyRFA) untersucht, die eine vergleichbare Empfindlichkeit gegenüber Spurenelementen aufweist wie die  $\mu$ -PIXE. Bei der  $\mu$ -SyRFA werden Elektronen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit auf einer gekrümmten Bahn (Kreisbahn) bewegt. Durch die hohe Geschwindigkeit und die gekrümmte Bahn emittieren die Elektronen elektromagnetische Strahlung, die ein kontinuierliches Spektrum vom Infraroten- bis in den Röntgenbereich aufweist und als Synchrotronstrahlung bezeichnet wird (Gaul, Knöchel 1994: 157). Der Unterschied der beiden Untersuchungstechniken liegt unter anderem in der Eindringtiefe. Die  $\mu$ -PIXE dringt maximal 30  $\mu$ m tief in das Objekt ein, im Gegensatz zur  $\mu$ -SyRFA, die das Objekt durchstrahlt (Reiche, Berger, Duval 2004: 32). Staub, Simon, Frieß (2003: 99) führen an der Angströmquelle Karlsruhe (ANKA) ebenfalls mit der  $\mu$ -SyRFA Pigmentanalysen im Spurenbereich durch.

Klebstoffe sind historisch als Bindemittel von Farbaufträgen und als Klebemittel zum Verbinden zweier Werkstoffe eingesetzt worden. Die Konservierungswissenschaft beschäftigt sich vorrangig mit der Gruppe der Bindemittel, um die chemische Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften zu bestimmen. Die zu untersuchenden Proben liegen überwiegend in nur geringen Mengen vor und sind bis ins 19. Jahrhundert meist natürlich organischen Ursprungs, was die analytischen Untersuchungen

erschwert. Da es sich in vielen Fällen bei den natürlich organischen Bindemitteln um Gemenge verschiedener organischer Verbindungen handelt, ist die Analytik auf hohen instrumentellen Einsatz angewiesen, um Unterschiede einzelner Klebstoffe zu analysieren. Neben mikrochemischen Untersuchungstechniken kommen chromatografische, massenspektroskopische und spektroskopische Analysen zum Einsatz. Die Molekülbruchstücke werden gemessen und daraufhin wird auf ein Bindemittel geschlossen. Diese Fragestellung wird hier jedoch nicht weiter vertieft werden.

Konsolidierungsmittel, die mit Aerosolen aufgetragen werden, stellen ein neu eingebrachtes Bindemittel dar und sind aus diesem Grund von besonderem Interesse. Die Literaturübersicht soll exemplarisch Untersuchungen vorstellen, die sich mit Klebeeigenschaften, der Wiederlösbarkeit und dem Verhalten nach einer künstlichen Alterung beschäftigen. Die optischen Eigenschaften der Klebstofffilme, wie Mattigkeit und Glanz, wären in Bezug auf die Konsolidierung von Interesse, sind allerdings nur vereinzelt Gegenstand von Untersuchungen.

Die Forschungen der Konservierungswissenschaft greifen überwiegend auf industrielle Prüfstandards zurück. Horie (1987: 39) stellt systematisch natürliche und synthetische Klebstoffe und Konsolidierungsmittel nach ihrer chemischen Zusammensetzung, ihrem Verhalten mit zu verklebenden Materialien und ihrem restauratorischen Einsatz vor. Bei der Prüfung der Klebstoffe stellt er einfache Möglichkeiten von beispielsweise Löslichkeitstests vor, die vom Restaurator ohne großen instrumentellen Aufwand durchgeführt werden können. Der Autor weist aber sogleich darauf hin, dass bei systematischeren Untersuchungen nur Industrielabors diese Daten liefern können.

Eine umfangreiche Untersuchungsreihe für modifizierte Celluloseether stellt die Arbeit von Feller und Wilt (1990: 58) dar, die mit industriellen Prüfmethode die Langzeitstabilität von modifizierten Celluloseethern testen. Eine große Breite an Celluloseethern wird als Feststoff und auch in Lösung geprüft. Hier kommen viskosimetrische und mikrochemische Untersuchungen zum Einsatz. Darüber hinaus werden Farbmessungen an ungealterten und gealterten Klebstofffilmen durchgeführt. Als Alterung wird sowohl die lichtbedingte, als auch die thermische Alterung herangezogen. Die Prüfmethode sind teilweise extrem, so dass Resultate für in der Restaurierung etablierte Klebstoffe relativ negativ ausfallen. Dies ist vor allem bei Klucel® zu beobachten (Feller, Wilt 1990: 96). Die Autoren belegen anhand zahlreicher Untersuchungen, dass sich Klucel® im Laufe der angewandten Alterungstechnik verfärben kann, weisen allerdings auch darauf hin, dass diese Verfärbungen bei Konzentrationen um 1 % Massengehalt weniger ins Gewicht fallen. Gängige Konzentrationen für Restaurierungsarbeiten liegen aber zwischen 1 % bis 3 % Massengehalt.

Hier wird die Diskrepanz zwischen industriellen Prüfmethode n und konservierungstechnisch orientierten Prüfmethode n sichtbar. Die Prüfmethode n für konservatorische Zwecke müssten für den Einsatz bei Objekten angepasst werden. Dabei spielen die oft sehr geringen Konzentrationen, der Anspruch an eine mögliche Wiederlösbarkeit einer Klebung und die Alterungseigenschaften eine Rolle.

Wouters, Gancedo, Peckstadt (1992: 69) vergleichen Celluloseether, Polysaccharide, Proteinklebstoffe und synthetische Klebstoffe miteinander, um einen geeigneten Klebstoff zur Verklebung von Pergament mit Ergänzungsmaterialien wie rekonstituiertes Pergament oder Japanpapier zu finden. Kriterien wie die Zugfestigkeit, die Wasserdampfdurchlässigkeit, Dimensionsstabilität und die Farbstabilität sind für die Auswahl entscheidend. Für die Restaurierung des Codex Eyckensis, einer durch Schimmel abgebauten Pergamenthandschrift, wurde Tylose®, eine Methyl Hydroxy Ethylcellulose, ausgewählt. Dieses Projekt untersucht das flächige Verkleben von zwei rauen Oberflächen, in diesem Falle von Pergament. Die Ergebnisse sind in Bezug auf die Alterungseigenschaften der untersuchten Klebstoffe interessant. Diese Arbeit stellt eine der wenigen systematisch durchgeführten Untersuchungen an Klebstoffen für den restauratorischen Einsatz dar. Down (1999: 112) untersucht synthetische Klebstoffe und sucht nach einer Methode, wie die Wiederlösbarkeit getestet werden kann. Die Rückführbarkeit einer restauratorischen Methode bzw. das Wiederentfernen eines eingebrachten Materials ist eine begleitende Forderung einer restauratorischen Maßnahme. Down kommt zu dem Schluss, dass Untersuchungen zum Quellverhalten durch Lösemittel und dem Gewichtsverlust nach einer thermischen Alterung die reproduzierbarsten Methoden darstellen, um die Wiederlösbarkeit eines Klebstoffs zu testen. Obwohl nur geringe Mengen an Klebstoff während einer Konsolidierung in ein Pigmentgefüge eingebracht werden, könnte der Versuchsaufbau für das Verfolgen von Konsolidierungsmaßnahmen übertragen werden.

Prüfmethode n und Strategien zur Qualitätssicherung von Klebstoffen sind zahlreich vorhanden, diese Untersuchungen dienen allerdings vornehmlich der Sicherung der Festigkeit einer Klebung und den Aushärtegraden und deren Geschwindigkeit (Habenicht 1997: 667). Die Klebstoffindustrie testet die Klebstoffe standardmäßig auf ihre Alterungsbeständigkeit als Feststoff, was als „shelf life“ bezeichnet wird. Allerdings werden nicht die Alterungseigenschaften von Klebstofffilmen in Kombination mit anderen Materialien getestet. Dies ist mit ein Grund, warum die künstliche Alterung von Klebstoffen im Bereich der Konservierungswissenschaft nicht nach einer bekannten Norm durchgeführt wird. Vorgestellte Alterungstests sind meist schwer zu vergleichen, da keine einheitlichen Temperatur- und Feuchtebedingungen eingehalten werden.

Michel, Geiger, Reichlin (2001: 96) stellten Klebstofffilme her und alterten diese mit alternierender Temperatur und Feuchte künstlich. Die Veränderung der Farbe, der Dimension und die veränderte Zugfestigkeit wurden daraufhin untersucht. Ein Klebstoff als Konsolidierungsmittel in einem Pigmentgefüge altert allerdings weniger drastisch, als der reine Klebstofffilm, wie die Autoren zeigen konnten.

Spektroskopische Verfahren werden auch für die Analyse von Klebstoffen eingesetzt. Aussagen über die Oberflächenbeschaffenheit liefert die Totalreflexion-Infrarot-Spektroskopie (ATR-IR), um chemische Verbindungen zu untersuchen (Pocius 1997: 99). Liegen transparente Filme vor, so können diese mit der FTIR-Spektroskopie untersucht werden, wie es bei Kunststofffolien gängig ist (Galinsky 2001: 102).

So etabliert die Pigmentanalyse ist und einen reichen Niederschlag in der Literatur findet, so unstimmtig ist die Betrachtung der Klebkraft und das Abschätzen des Alterungsverhaltens von Klebstoffen. Bei den hier zu untersuchenden Klebstoffen kommt erschwerend hinzu, dass die Klebstoffe sowohl aus Proteinen und Polysacchariden als auch aus Celluloseethern bestehen und daher schwierig zu vergleichen sind.

## 1.10 Beschreibung des Farbeindrucks

Die Farbreize, die das menschliche Auge wahrnimmt und verarbeitet, sind das Resultat der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie. Das sichtbare Licht in einem Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm umfasst den kleinen Teil des Spektrums der elektromagnetischen Strahlung, den das Auge als Farbreiz aufnehmen und verarbeiten kann. Ein farbiger Gegenstand, den das Auge wahrnimmt, wird anhand von drei Kriterien beschrieben. Der Farbton beschreibt eine Farbe, ob sie Rot, Blau, Gelb oder Grün ist. Neben dem Farbton gilt die Sättigung einer Farbe als ein Beschreibungsmerkmal. Die Sättigung gibt darüber Auskunft, welchen Grad an Farbigeit oder Intensität eine Farbe aufweist. Je gesättigter eine Farbe ist, desto tiefer ist der Farbeindruck und je weniger gesättigt, desto farbloser wird eine Farbe und desto mehr nähert sich der Farbton einem Grauwert an. Die Annäherung an einen Grauwert ist jedoch nicht zu verwechseln mit dem dritten Beschreibungsmerkmal, mit der Helligkeit. Je heller eine Farbe, desto mehr nähert sie sich einem weißen Farbeindruck und je dunkler eine Farbe, desto mehr Schwarzanteile sehen wir in einer Farbe (Richter 1981: 148).

Wird eine farbige Fläche, zum Beispiel das Pigment Zinnober (s. Abb. 18), mit Licht im sichtbaren Bereich bestrahlt, so reflektiert und absorbiert diese farbige Fläche das Licht.

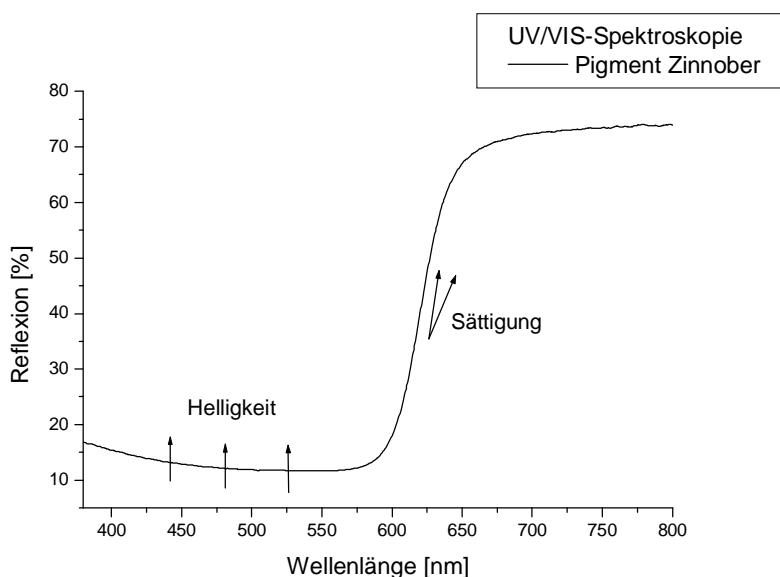


Abb. 18: UV/VIS-Spektroskopie von Zinnober. Das rote Pigment reflektiert ab einer Wellenlänge von 625 nm. Die Informationen über den Farbton, Sättigung und Helligkeit können anhand der Reflexionskurve interpretiert werden.

Diese Untersuchungstechnik wird als UV/VIS-Spektroskopie bezeichnet, bei der eine Probe in einem Spektrometer (Shimadzu, UV/VIS 2100) mit Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich bestrahlt wird. Zinnober reflektiert im roten Bereich des sichtbaren Spektrums, was

hier bei 625 nm bis 780 nm der Fall ist. Im restlichen Wellenlängenbereich von 380 nm bis 625 nm wird das Licht von der roten Farbe absorbiert und die Reflexion ist gering.

In einer Reflexionskurve finden sich die Beschreibungsmerkmale einer Farbe wieder. Der Farbton wird in der charakteristischen Form, die durch Reflexion und Absorption bestimmt wird, wiedergegeben. Die Sättigung drückt sich in der Steilheit der Reflexionskurve aus, wenn die Reflexion zunimmt. In der Abbildung ist die Sättigung mit zwei aneinander liegenden Pfeilen gekennzeichnet. Die Helligkeit wird durch die Lage des Reflexionspektrums im Diagramm ausgedrückt. Je heller eine Farbe, desto mehr verschiebt sich die gesamte Kurve parallel nach oben bzw. nach unten. Die Helligkeit ist durch die senkrechten Pfeile angedeutet (Johnston-Feller 2001: 279).

Die Farben werden in der Industrie allerdings seltener grafisch dargestellt, sondern als Zahlenwerte. Hierfür schlägt die Commission Internationale d'Eclairage (CIE) Farbsysteme vor, mit denen Farben und Veränderungen von Farben, den Farbabständen, berechnet werden können. Das meist verwendete Farbabstandssystem ist der CIEL\*a\*b\*-Farbenraum von 1976. Hierbei wird die gesamte Farbpalette auf einer Scheibe dargestellt und Farbachsen definiert. Die a\*-Achse oder a\*-Ebene beschreibt die Rot-Grün-Verschiebung, die b\*-Ebene die Gelb-Blau-Verschiebung. Die Helligkeit wird durch eine vertikale Verschiebung ausgedrückt. Eine Verschiebung nach oben bedeutet eine Erhöhung der Helligkeit, eine Verschiebung nach unten eine Verdunkelung.

Die Farbabstandsberechnungen kommen aus der Industrie, da gleiche Produkte immer gleicher Farben hergestellt werden sollen. Die Qualitätskontrolle hat die Aufgabe, das Produkt mit einem Standard zu vergleichen und die Abweichungen zu messen. Aus diesem Grund basieren die Farbabstandssysteme, mit „Δ“ gekennzeichnet, aus dem Farbvergleich einer Referenz mit einer Probe. Übertragen auf das Farbsystem bedeutet dies, dass für die Berechnung der ΔL\*-, Δa\*-und Δb\*-Werte folgendes gilt (Loos 1989: 107):

$$\Delta L^* = L_{\text{Probe}} - L_{\text{Referenz}}$$

$$\Delta a^* = a_{\text{Probe}} - a_{\text{Referenz}}$$

$$\Delta b^* = b_{\text{Probe}} - b_{\text{Referenz}}$$

Bei den Angaben der ΔL\*-, Δa\*-und Δb\*-Werte zeigt das Vorzeichen die Richtung der Farbabweichung an.

	<b>Vorzeichen Positiv</b>	<b>Vorzeichen Negativ</b>
ΔL*	heller	dunkler
Δa*	roter	grüner
Δb*	gelber	blauer



Aus diesen Farb- und Helligkeitswerten lässt sich ein weiterer Wert, der Gesamt-Farbabstandswert, der  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert, errechnen, der alle Informationen über die Farbkomponenten, aber auch über die Helligkeit in sich vereint. Die Berechnungsformel lautet folgendermaßen:

$$\Delta E^*_{ab}\text{-Wert} = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Ein Farbmessgerät liefert somit die grafische Darstellung einer farbigen Fläche in Form einer Reflexionskurve und dazu die Farbmessdaten nach dem CIEL\*a\*b\*-Farbsystem.

Der Farbeindruck wird erheblich von der Oberflächenbeschaffenheit bestimmt. Eine Oberfläche kann glatt und eben oder rau und porös sein. Die Rauigkeit einer Oberfläche trägt zum Farbeindruck einer bunten Fläche bei. Wieder werden die Reflexionseigenschaften einer bunten Fläche näher betrachtet. Trifft auf eine glatte und hochglänzende Oberfläche ein Lichtstrahl und das gesamte einfallende Licht wird von der Oberfläche im gleichen Winkel, wie er aufgetroffen ist, zum Lot reflektiert, so spricht man von einer Spiegelreflexion oder von Glanz. Die Oberfläche ist sehr glatt und es findet kaum Absorption statt (s. Abb. 19 links).

Weist eine Oberfläche mikroskopische Störungen und Unebenheiten auf, so wird das einfallende Licht winkelunabhängig an der Oberfläche und im Innern der Schicht reflektiert. Diese isotrope, in alle Richtungen gehende, Reflexion des auftreffenden Lichts wird als diffuse Reflexion bezeichnet (Völz 2001: 244). Eine Pigmentschicht stellt beispielsweise eine solche raue Oberfläche dar, bei der die auftreffenden Lichtstrahlen diffus reflektiert werden (s. Abb. 19 rechts).

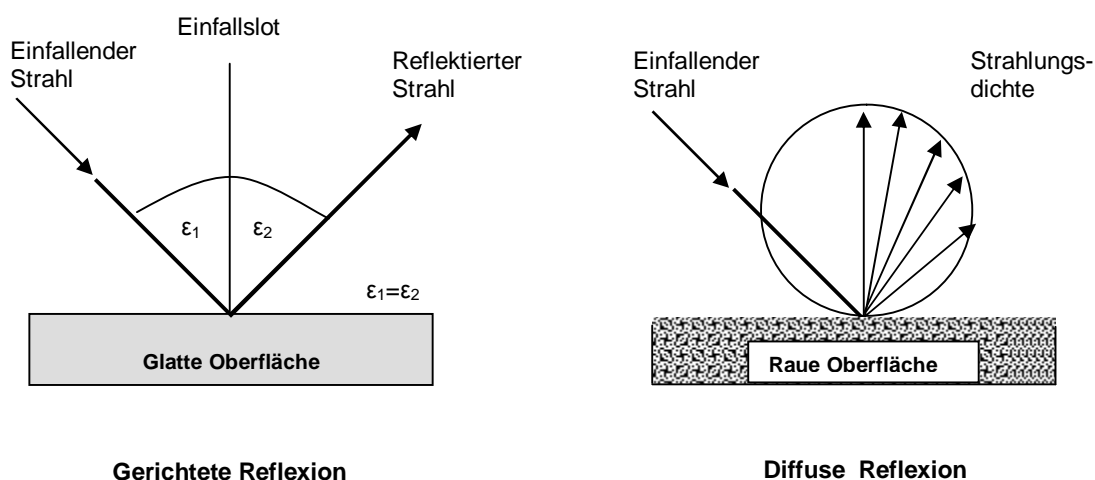


Abb. 19: Gerichtete und diffuse Reflexion ist in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit nach Völz (2001: 244) dargestellt. Links wird der reflektierte Strahl im gleichen Winkel wie der einfallende Strahl reflektiert. Rechts wird der einfallende Strahl winkelunabhängig diffus reflektiert.

Am Beispiel der Reflexionskurve von Zinnober wird der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Farbwirkung demonstriert (s. Abb. 20). Die untere durchgezogene Reflexionskurve stellt exemplarisch eine rote Pigmentoberfläche dar. Wird diese Oberfläche aufgeraut, so erhöht sich die diffuse Reflexion an der Oberfläche und im Innern der Pigmentschicht. Diese Erhöhung der diffusen Reflexion ist an einer parallelen Verschiebung der Reflexionskurve nach oben verdeutlicht. Die verschobene Reflexionskurve ist mit Sternen gekennzeichnet. Die Aufrauung einer Oberfläche bewirkt, dass eine Reflexion der Lichtstrahlen nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Innern der Schicht stattfinden kann (Feller, Kunz 2002: 271). Da sich weder der Farbton noch die Sättigung verändert, behält die aufgeraute Oberfläche die charakteristische Form der Reflexionskurve bei und es findet nur eine parallele Verschiebung statt. Dabei wird die Reflexion aus dem Innern der Schicht zur schon vorhandenen Reflexion über den gesamten Wellenlängenbereich addiert. Die Addition findet über den gesamten Wellenlängenbereich statt, da man von einem weißen Licht ausgeht, welches auf eine Probe fällt. Würde farbiges Licht auf dieselbe Probe fallen, so würde ein Teil des farbigen Lichts an der farbigen Fläche selektiv absorbiert. Dieser Versuchsaufbau entspricht nicht einer durchgeführten Messung, sondern wurde in Anlehnung an die Arbeiten von Johnston-Feller (2001: 197) auf Zinnober übertragen.

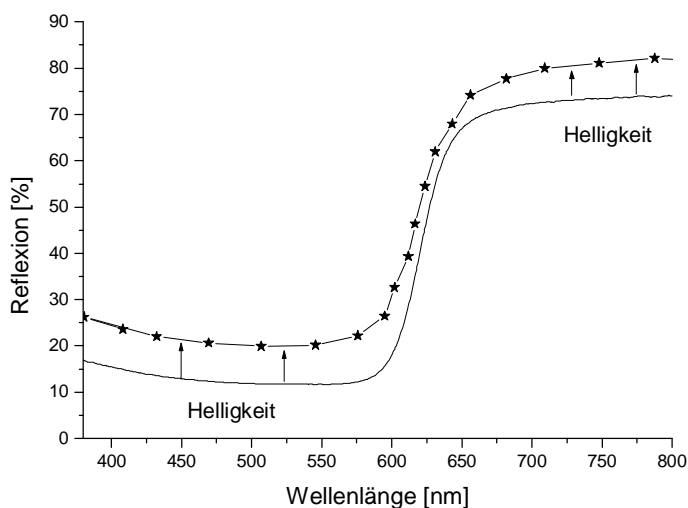


Abb. 20: Modell einer UV/VIS-Spektroskopie von Zinnober (durchgezogene Linie), der nach einer Aufrauung der Oberfläche (Linie mit Sternen) an Helligkeit gewinnt.

Die Addition von diffuser Reflexion an einer rauen Oberfläche liegt darin begründet, dass Lichtstrahlen immer an der Oberfläche, aber auch im Innern einer Schicht reflektiert werden. Dadurch, dass eine raue Oberfläche dreidimensional ist, gelangen Lichtstrahlen auch tiefer in eine Oberfläche und werden reflektiert. Bei extrem glatten Oberflächen, wie einem Spiegel oder einem neuen Autolack, die man sich als zweidimensionale Fläche vorstellt, findet keine diffuse Reflexion statt, sondern ausschließlich gerichtete Reflexion. In Abb. 21 wird der

Zusammenhang zwischen der Oberfläche und den Reflexionseigenschaften dargestellt. Je rauer eine Oberfläche, desto mehr diffuse Reflexion tritt an der Oberfläche und im Innern der Schicht auf, welche addiert wird und in einem helleren Farbeindruck resultiert, da über den gesamten Wellenlängenbereich die Helligkeit zunimmt und ins Auge fällt. Bei einer glatten Oberfläche wird der gesamte einfallende Lichtstrahl zum Lot reflektiert, so dass der reflektierte Lichtstrahl gebündelt ist und die glatte Fläche in einem dunkleren Gesamt-Farbeindruck resultiert. Nur wenn der Betrachter im genau gleichen Winkel wie das eingestrahelte Licht steht, ist die glatte Fläche hell, was wir als Glanzlicht oder Spiegelung kennen.

Bei der Interpretation des Farbeindrucks basierend auf der Oberflächenbeschaffenheit wird vorrangig der  $\Delta L^*$ - und der  $\Delta E^*_{ab}$ - Wert betrachtet, da die Helligkeitsverschiebung das Indiz für eine veränderte Oberfläche und der  $\Delta E^*_{ab}$ - Wert die Gesamt-Farbverschiebung darstellt.

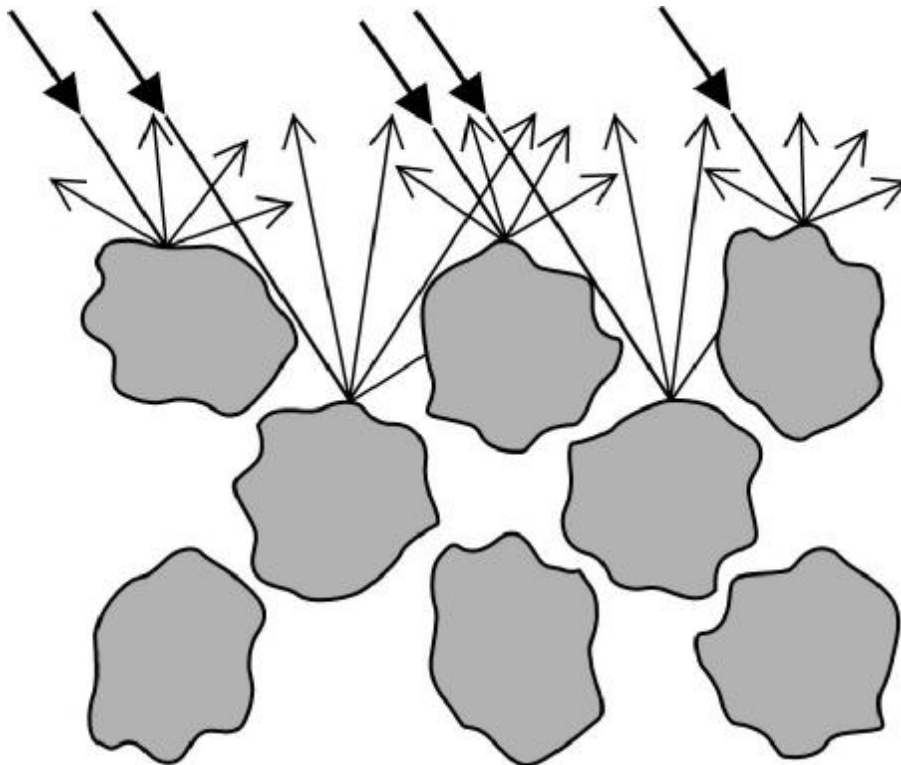


Abb. 21: diffuse Reflexion (schlanke Pfeile) an der Oberfläche und aus dem Innern der Pigmentschicht addieren sich zu einem hellen Farbeindruck.

Ein Farbeindruck einer farbigen Fläche wird somit vom Farbwert selbst, ausgedrückt in Farbton, Sättigung und Helligkeit und von der Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst. Reflexionsspektren liefern die gesamte Information hierüber und können interpretiert werden. Die Farbmessdaten, wie die  $\Delta L^*$ -,  $\Delta a^*$ - und  $\Delta b^*$ -Werte und der  $\Delta E^*_{ab}$ - Wert sind hilfreich, um Veränderungen des Farbeindrucks zwischen einer Referenz und einer veränderten Probe zusammen mit den Reflexionsspektren zu interpretieren. Allerdings sollte dem  $\Delta E^*_{ab}$ - Wert

nicht zu viel Gewicht beigemessen werden, da es sich dabei um einen Gesamtwert handelt, der Informationen über die Farbigkeit und die Helligkeit vereint. Ein  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert ist immer weniger aussagekräftig als die Interpretation der einzelnen Farbmessdaten und der Reflexionskurven.

Die Beschreibung des Farbeindrucks wurde an dieser Stelle ausführlich diskutiert, da eine Pigmentschicht eine raue Oberfläche darstellt. Durch einen Konsolidierungsauftrag können sich möglicherweise die Farbe und die Oberflächenbeschaffenheit verändern. Erfolgt die Beschichtung des Klebstoffs nicht gleichmäßig, besteht die Gefahr, dass die Oberfläche geglättet, die Oberflächenbeschaffenheit verändert und dadurch der Farbeindruck verändert wird.

## 1.11 Eingrenzung der Materialien für die analytischen Untersuchungen

### 1.11.1 Exemplarische Auswahl der Klebstoffe

Ein Klebstoff, der für die Konsolidierung eingesetzt wird, soll chemisch verträglich mit dem zu konsolidierenden Pigment sein, soll das Pigmentgefüge benetzen und soll eine gute Haftung zwischen den Pigmenten und zwischen Pigment und Substrat erreichen. Die Anforderungen beziehen sich vorrangig auf die physikalischen Eigenschaften, wie die Ausbildung von Klebstoffbrücken und dem Trocknen von Klebstoffen. Darüberhinaus soll die Farbwirkung der Pigmentschicht nach einer Konsolidierung keine Veränderung erfahren. Die nachfolgende Klebstoffauswahl stellt die in der Praxis meist verwendeten Klebstoffe für die Konsolidierung dar. Da diese Klebstoffe sich in ihren chemischen Komponenten voneinander unterscheiden, soll die Klebstoffauswahl vorgestellt und im Laufe der Arbeit relevante Kriterien beleuchtet werden, die den Einsatz eines bestimmten Klebstoffs auf ein Pigment befürworten.

#### Gelatine

Industriell hergestellte Gelatine ist hochgereinigt, ist nach den Standards der Lebensmittelqualität produziert und wird in fester Form als Pulver, als Granulat oder in Form von Platten angeboten. Gewonnen wird Gelatine aus dem Kollagen, das ein Hauptbestandteil von tierischer Haut und Knochen ist. Gelatine ist ein Polypeptid, das aus einer definierten Anzahl und Reihenfolge von Aminosäuren aufgebaut ist. Gelatine wird in Bloomgrade unterteilt, die eine Auskunft über die Gelfestigkeit liefern. Der Bloomgrad einer als Gel vorliegenden Gelatine beschreibt das Gewicht eines Stempels, der auf ein Gel gedrückt wird. Das Gewicht, in Gramm angegeben, mit dem der Stempel nach einem Standard in das Gel eindringt, wird als der Bloomgrad bezeichnet. Zudem wird die Gelatine mit Typ A und Typ B gekennzeichnet, was auf die säurebasierende (Typ A) und auf die alkalibasierende (Typ B) Vorbehandlung hindeutet. Beide Aspekte sind in dieser Arbeit nicht weiter beachtet worden, da anzunehmen ist, dass die Herstellungstechnik durch die geringe Menge an Konsolidierungsmittel keine Auswirkungen auf die Penetration und Haftung hat. Das Festigen von mittelalterlichen Illuminierungen auf Pergament und Papier beschreibt Quandt (1996: 100) in ihrer Arbeit. Gelatine in einer Konzentration von 1 % Massegehalt und mit einem geringen Ethanol-Zusatz, wird mit dem Pinsel und als Aerosol aufgetragen. Lawson und Yamazaki-Kleps (2002: 132) entscheiden sich nach kolorimetrischen Untersuchungen und Alterungstests verschiedener Klebstoffe ebenso für Gelatine, um Illuminierungen einer Handschrift aus dem 15. Jahrhundert zu festigen.

## Hausenblase

Dieser Proteinklebstoff ist in einer großen Breite an Qualitäten, wie Farbe und Feinheit, auf dem Markt. Die Hausenblase würde dem Namen nach von der Schwimmblase des Hausenfisches gewonnen. Allerdings kann nur die genaue Information eines Händlers die Herkunft vom Hausen oder dem artverwandten Stör belegen. Auch bei dem hier untersuchten Produkt ist die Herkunft nicht eindeutig geklärt. Vermutlich sind das Alter und die Größe des Fisches, von dem die Schwimmblase gewonnen wird, letztlich ausschlaggebender für die Qualität des Klebstoffs als die genaue Bestimmung des Fisches (Haupt 2000: 12). Es handelt sich auch hier um ein Polypeptid, das aus dem Kollagen der Schwimmblase entweder des Hausens oder des Störs gewonnen wird.

Petukhova und Bonadies (1993: 24) beschreiben den Einsatz von Störleim für eine Malschichtfixierung, ebenso wie Fuchs, Meinert, Schrempf (2001: 91), die diesen Klebstoff zur Konsolidierung von mittelalterlichen Buchmalereien einsetzen.

## Modifizierte Celluloseether

Modifizierte Celluloseether werden aus Cellulose gewonnen und in der Industrie als Verdicker, Binder, als filmgebender Überzug oder als wasserrückhaltendes Medium eingesetzt. Die Vielfalt an Produkten rührt vom breiten industriellen Einsatz her und unterscheidet sich unter Anderem durch den chemischen Aufbau und durch variierende Kettenlängen (DOW Chemical 2002: 1). Als Konsolidierungsmittel hat sich die Methylcellulose (MC) und bei wässrig empfindlichen Objekten die Hydroxy Propylcellulose (Klucel®) etabliert. MC lässt sich in demineralisiertem Wasser lösen und Klucel® sowohl in demineralisiertem Wasser als auch in Ethanol. Klucel® ist einer der wenigen modifizierten Celluloseether, der sich in niedermolekularen Alkoholen löst.

Als Konsolidierungsmittel für ein Aquarell kann Methylcellulose in geringen Konzentrationen (0,25 % Massengehalt) vernebelt werden (Dignard, Douglas, Guild 1997: 134). Der Klebstoff wird auf Grund seiner Farblosigkeit geschätzt. Sommermeyer und Banik (1999: 901) setzen eine Methylcellulose zur Fixierung einer Kreidezeichnung auf einer Schultafel von Joseph Beuys erfolgreich ein.

## Funori

Funori stammt ursprünglich aus dem asiatischen Raum und wird schon seit dem 17. Jahrhundert unter Anderem als Konsolidierungsmittel eingesetzt (Winter 1984: 119). Er wird aus verschiedenen Algensorten gewonnen und stammt aus der Gruppe der Polysaccharide (Horie 1987: 142), kann aber einen Proteingehalt von bis zu 12 % aufweisen (s. Kapitel 1.11.3, S. 44). Die unterschiedliche Anwendung im nicht-restauratorischen Bereich hat zu

einer großen Breite an Produkten geführt, wie es Michel, Geiger, Reichlin (2002: 262) in ihrer Arbeit zeigen. Funori weist selbst bei einer nur 1 %igen Lösung eine leichte Gelbfärbung auf. Evans (1984: 59) gibt ein Rezept zur Zubereitung und Vorschläge zur Anwendung als Konsolidierungsmittel, ebenso wie Smith (1990: 119) für die Fixierung von islamischen Miniaturen an. Grantham und Cummings (2002: 201) vergleichen verschiedene Konsolidierungsmittel, unter Anderem auch Funori und setzen ihn bei asiatischen Objekten zum Festigen der Malschicht ein.

#### JunFunori®

JunFunori® ist ein gereinigtes Klebstoffprodukt, das ausschließlich aus den Rot-Algen *gloiopeltis furcata* gewonnen wird und verschiedene Reinigungsschritte erfährt (Michel, Geiger, Reichlin 2002: 265). Das Produkt ist farblos und eignet sich zum Festigen von Malerei. Hauptbestandteil sind Polysaccharide, vergleichbar mit dem Funori. Nach Messung des Gesamteingehalts zeigte sich, dass JunFunori® 1.3 % Protein enthält (s. Kapitel 1.11.3, S. 44).

Masson und Ritter (2004: 96) stellen die Festigung einer Kollage von Kurt Schwitters mit einer Mischung aus JunFunori® und Störleim vor, die sie als Aerosol und mit dem Pinsel auf die abpudernde und abplatzende Malschicht aufbringen.

Die proteinhaltigen Klebstoffe Gelatine und Hausenblase wurden ausgewählt, da sie dem originalen Bindemittel von Buchmalereien und Gouachen ähnlich sind, Methylcellulose weist eine sehr gute Langzeitstabilität auf und Klucel® ist der einzige Klebstoff der modifizierten Celluloseether, der in einem niedermolekularen Alkohol löslich ist. Funori ist ein Klebstoff, der im asiatischen Kunsthandwerk als Festigungsmittel bekannt ist und daher historische Bedeutung hat. JunFunori® ist die gereinigte Variante des Funori und wird daher als ein neu entwickeltes Produkt mit in die Versuchsreihe aufgenommen.

Es werden keine synthetischen Klebstoffsysteme untersucht, da deren Langzeitstabilität nicht hinreichend bekannt ist und die Erfahrungen mit natürlichen Klebstoffsystemen eine lange Tradition aufweisen und sich diese in der Praxis bewährt haben.

Die Klebstoffe, die in dieser Arbeit untersucht werden, sind in Tabelle 4 aufgelistet und mit Abkürzungen versehen, die in der Arbeit synonym verwendet werden. Die Reihenfolge entspricht nicht einer qualitativen Bewertung, sondern gibt die Häufigkeit des restauratorischen Einsatzes wieder. In Abb. 22 sind die Klebstoffe in fester Form dargestellt. Die genauen Angaben zur Zubereitung der Klebstoffe sind im Anhang (12.4) nachzulesen.

Klebstoff	Abkürzung
Gelatine	Gel
Methylcellulose	MC
Hausenblase	Hbl
Funori	Fun
JunFunori®	Jfun
Klucel®	Kluc

Tabelle 4: Klebstoffauswahl, die für die folgenden Untersuchungen herangezogen wurden mit den Abkürzungen, die in Grafiken und Tabellen verwendet werden.



Abb. 22: Sechs Klebstoffe in fester Form, die traditionell für die Konsolidierung eingesetzt und hier untersucht werden.



### 1.11.2 Probenherstellung der Klebstofffilme

Die Klebstoffe Gelatine, Methylcellulose, Hausenblase und Funori wurden mit 1 % Massengehalt in demineralisiertem Wasser (s. Anhang 12.4) zubereitet. Klucel® G wurde 1 %ig in Ethanol hergestellt. Die 1 %igen Lösungen waren mindestens nötig, um ausreichend stabile Klebstofffilme herzustellen. Wird die Konzentration zu gering gewählt, können die eingetrockneten Klebstofffilme nicht mehr vom Untergrund gelöst werden. Das Material des Gefäßes, worin die Klebstoffe eingefüllt und getrocknet werden, spielt auch eine Rolle. Glasschalen weisen beispielsweise eine zu raue Oberfläche auf, weshalb sich die Klebstofffilme nicht mehr ablösen lassen. Polystyrol ist zur Herstellung von Filmen gut geeignet.

6ml des flüssigen Klebstoffs wurden in Petrischalen aus Polystyrol (PS) mit einem Bodendurchmesser von 4 cm eingegossen. Zum Austrocknen der Klebstofffilme sollten diese offen stehen, ohne einem hohen Luftzug zu unterliegen, da sonst unregelmäßig dicke Filme entstehen. Die Trocknungszeit betrug etwa vier Tage. Anschließend wurde mit dem Skalpell der äußerste Rand des Klebstofffilms auf dem Polystyrolboden eingeritzt. Die Ränder der Polystyrol-Petrischale wurden weggebrochen und der Klebstofffilm mit einem Spatel oder Skalpell abgehoben (s. Abb. 23). In Tabelle 5 werden die ungefähren Dicken der verschiedenen Klebstoff-Proben angegeben. Die Dicken der Klebstofffilme wurden mit einem Lichtmikroskop und einem dazugehörigen µm-Fokussierad gemessen (s. Anhang 12.5).

<b>Klebstoff</b>	<b>Dicke [µm]</b>
Gelatine	~ 36
Methylcellulose	~ 32
Hausenblase	~ 36
Funori	~ 33
JunFunori®	~ 34
Klucel®	~ 21

Tabelle 5: Dickenbestimmung der Klebstofffilme



Abb. 23: Klebstofffilme aller Klebstoffe mit 1 % Massegehalt nach Ablösen von den Petrischalen aus Polystyrol (PS).

Die Klebstofffilme unterscheiden sich leicht in ihrer Transparenz. Gelatine und Methylcellulose sind transparent und wirken dunkel auf dem schwarzen Untergrund. Die anderen vier Klebstofffilme wirken heller und milchig, da sie eine matte Oberfläche aufweisen.

Die Dicke der Filme ist nicht mit der Dicke einer möglichen Beschichtung auf einer Pigmentoberfläche zu vergleichen. Selbst ein mehrfacher Aerosolauftrag eines Klebstoffs würde wesentlich dünnere Klebstoffschichten hervorrufen.

Hierfür wurden die Klebstoffe als Aerosol mehrfach auf Silicium-Plättchen aufgenebelt und es wurde beobachtet, dass die Klebstoffe in schillernden Farben interferieren. Dies deutet auf die spezifischen Reflexionseigenschaften von dünnen Filmen auf glatten Oberflächen hin. Dieses Phänomen ist aus dem täglichen Leben als Regenbogenfarbe auf einem Ölfilm und bei newtonschen Ringen oder den schillernden Farben der Panzer von Käfern oder den Flügeln von Schmetterlingen bekannt (Tilley 2000: 85). Die Voraussetzung für Interferenzerscheinungen sind dünnste Filme, die nur einige hundert Nanometer stark sind und sich auf glatten Untergründen befinden. Eine konstruktive Interferenz, visuell durch schillernde Farben zu beobachten, entsteht, wenn die Filmdicke halb so stark ist, wie die Wellenlänge des auftreffenden Lichts auf die glatte Fläche lang ist (Falk, Brill, Stork 1986: 313). Eine destruktive Interferenz bedeutet, dass sich die rückgestreuten Lichtstrahlen nicht überlagern, sondern auslöschen. Eine konstruktive Interferenz wird noch gefördert, wenn der Brechungsindex zwischen dünnem Film und Untergrund weit auseinanderliegt

(Pfaff 1997: 8). Der Brechungsindex der Klebstoffe liegt zwischen  $n=1,4$  bis  $n=1,5$  (s. Kapitel 2.6, S. 93), das Silicium hat einen Brechungsindex von  $n=3,4$  (Carius, Dittrich 2003: 88). Die verschiedenen Interferenzfarben bedeuten unterschiedliche Dicken, die von 50 nm bis 500 nm reichen (Pfaff 1997: 12). Diese Versuche sind nicht systematisch durchgeführt worden, geben jedoch einen Hinweis auf die nur einige hundert Nanometer dicken Filmstärken von mehrfachen Aerosolaufträgen auf glatten Untergründen.

### 1.11.3 Identifikation von Funori und JunFunori®

Die Klebstoffauswahl besteht aus Protein haltigen Klebstoffen (Gelatine und Hausenblase), aus modifizierten Celluloseethern (Methylcellulose und Hydroxy Propylcellulose-Klucel®) und aus einem Gemisch aus Polysacchariden und Proteinen (Funori und JunFunori®). Bei JunFunori® handelt es sich um ein relativ neu eingeführtes Konsolidierungsmittel (Michel, Geiger, Reichlin 2002: 265), welches im Gegensatz zu den anderen Klebstoffen (s. Kapitel 1.11.1, S. 37) noch wenig bekannt und derzeit noch nicht in der Restaurierungspraxis etabliert ist. JunFunori® wird ausschließlich aus den Rot-Algen *gloiopeltis furcata* gewonnen und ist dem Funori ähnlich. Funori wird aus verschiedenen Sorten der *gloiopeltis*-Familie gewonnen, was jedoch nicht immer eindeutig ist. Diese beiden Klebstoffe wurden in Bezug auf ihre chemische Zusammensetzung untersucht. Von beiden Klebstoffen wurden Filme hergestellt (s. Kapitel 1.11.2, S. 41) und mit der FTIR-Spektroskopie (Bruker IFS 66/S) untersucht. In Abb. 24 sind die beiden Spektren der Klebstofffilme dargestellt. Die beiden Spektren zeigen keine Unterschiede, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich die chemische Zusammensetzung gleicht.

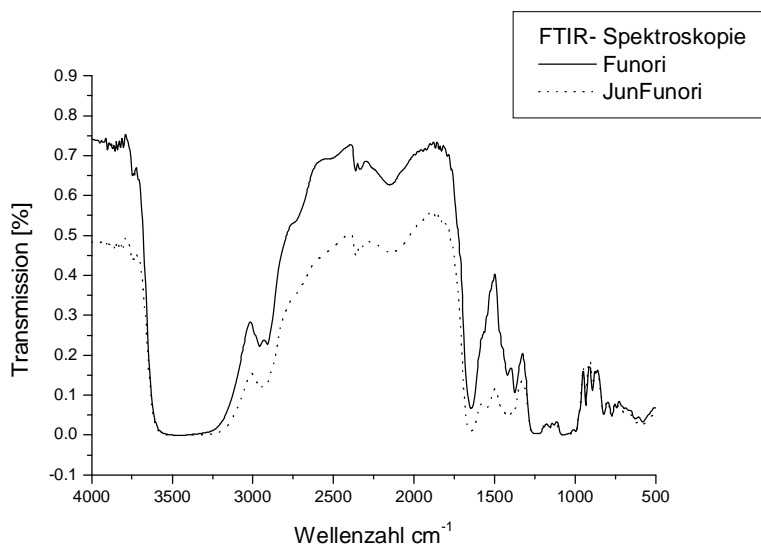


Abb. 24: FTIR-Spektroskopie der Klebstofffilme von Funori und JunFunori®. Es sind keine Unterschiede zu erkennen. Man kann davon ausgehen, dass sie sich in ihrer chemischen Zusammensetzung gleichen.

Die beiden Klebstoffe wurden auch auf den Gesamteingehalt hin untersucht. Diese Untersuchung wurde von Jan Wouters<sup>4</sup> durchgeführt. Der Gesamteingehalt wurde durch Messung der Aminosäuresequenz mit Hilfe der Hochdruckflüssig-Chromatografie (HPLC) bestimmt (Wouters, Van Bos, Lamens 2000: 107).

<sup>4</sup> Dr. Jan Wouters, Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium/Institut Royale du Patrimoine Artistique (KIK/IRPA), Jubelpark 1, 1000 Brüssel, Belgien.

Funori besteht überwiegend aus Galactose-Einheiten, die zudem an den Hydroxydgruppen Schwefelverbindungen aufweisen (Winter 1984: 120). Auf den Proteingehalt wird in der Literatur nicht hingewiesen. Sommermeyer (1998: 32) ließ den Gesamtproteingehalt im Rahmen ihrer Diplomarbeit erstmals am KIK/IRPA bei Jan Wouters untersuchen. Bei Sommermeyer stand die Fragestellung im Vordergrund, wie sich der Proteingehalt des Funori durch verschiedene Zubereitungsmethoden verändert. Der Proteingehalt des Rohmaterials (Funori\_a) wurde im Vergleich zu einer gereinigten Version (Funori\_b) gemessen (Sommermeyer 1998, Anlage Analyse von Proteinen). Die Reinigung beinhaltete das Quellen des Funori, das Erwärmen, die Filtrierung und das anschließende Trocknen als Film auf einer Folie (Sommermeyer 1998: 114). Dieser Funorifilm wurde anschließend als Basis für Klebstofflösungen herangezogen. Der Funori\_a (Rohmaterial), welcher nur in Wasser gequollen, erwärmt und filtriert wurde, wies einen Gesamtproteingehalt von 11,7 %, im Gegensatz zu 3,5 % des Funori\_b (gereinigte Version) auf.

Bei der hier vorgenommenen Bestimmung des Gesamtproteingehalts des Funori im Vergleich zum JunFunori® weist Funori einen Gesamtproteingehalt von 12 % und JunFunori® von 1,3 % auf. Funori wurde in demineralisiertem Wasser gequollen, filtriert und erwärmt (s. Anhang 12.4). JunFunori® wurde in demineralisiertes Wasser eingerührt, gequollen und erwärmt. Der Vergleich der Bestimmung des Gesamtproteingehalts zwischen Sommermeyer und den hier untersuchten Klebstoffen bestätigt die Annahme, dass der Reinigungsprozess des JunFunori®, der unter Anderem ein Spülen, ein Entsalzen und ein mechanisches Zerkleinern beinhaltet, den Gesamtproteingehalt stark reduziert.

Die Reduzierung des Gesamtproteingehalts zeigte sich in einer Abnahme der Gelbfärbung. Wasserlösliche und färbende Bestandteile werden durch den Reinigungsprozess herausgenommen. In Tabelle 6 werden die ermittelten Ergebnisse von Sommermeyer den hier vorliegenden Ergebnissen des Gesamtproteingehalts von Funori und JunFunori® gegenüber gestellt. Die Farbigkeit der Lösung ist ein Indiz für die Präsenz des Proteingehalts, da die gereinigte Version von Sommermeyer und von JunFunori® wenig bzw. keine Färbung aufweist und auch der Gesamtproteingehalt relativ geringer ist im Vergleich zu den ungereinigten Produkten.

<b>Bezeichnung</b>	<b>Zubereitung</b>	<b>Farbigkeit</b>	<b>Gesamtproteingehalt [%]</b>
Sommermeyer, Funori_a	Rohmaterial Quellen, Erwärmen, Filtrierung	Gelblich	<b>11,7</b>
Sommermeyer, Funori_b	Gereinigte Version Quellen, Erwärmen, Filtrierung, als Film ausgießen	Leicht gelblich	<b>3,5</b>
Pataki_Funori	Zubereitung nach Anlage 12.4 Quellen, Erwärmen, Filtrierung	Gelblich	<b>12</b>
Pataki_JunFunori®	Zubereitung nach Gebrauchsanleitung Quellen, Erwärmen	Farblos	<b>1,3</b>

Tabelle 6: Untersuchungen von Sommermeyer (1998: 32) in Bezug auf verschiedene Zubereitungen des Funori (Funori\_a und Funori\_b) wurden den hier durchgeführten Messungen (Pataki\_Funori und Pataki\_JunFunori®) gegenüber gestellt.

Die FTIR-Spektroskopie zeigte, dass sich Funori und JunFunori® chemisch nicht unterscheiden. Erst die Messung der Aminosäuresequenz zeigte, dass die Zubereitung des Funori nach traditioneller Art (Funori\_a und Pataki\_Funori) einen Gesamtproteingehalt von um die 12 % aufweist. Das manuelle Reinigen, wie es Sommermeyer vorstellte (Funori\_b) und die kommerziell gereinigte Version des Funori (Pataki\_JunFunori®), hat eine Reduzierung des Gesamtproteingehalts auf 3,5 % bzw. 1,3 % zur Folge. Diese Reduzierung des Proteingehalts geht mit einer Reduzierung der Gelbfärbung einher.

Der hohe technische Aufwand zum Reinigen des Funori, um den JunFunori® herzustellen, resultiert in einem entsalzten, pH-neutralen und zubereitungsfreundlichen Klebstoff mit einem deutlich reduzierten Proteingehalt.

Ein ähnliches Resultat in Bezug auf den Gesamtproteingehalt kann man durch mehrfaches Spülen und Ausgießen des Funori in der Restaurierungswerkstatt erreichen.

#### 1.11.4 FTIR-Spektroskopie von Klebstofffilmen nach dem Konsolidieren

Der Klebstoff Gelatine wurde als Klebstofffilm vor und nach dem Vernebeln mit der FTIR-Spektroskopie untersucht. Diese Messung geht der Frage nach, ob das Vernebeln eines Klebstoffs den molekularen Aufbau verändert. In Abb. 25 wird der Klebstofffilm (s. Kapitel 1.11.2, S. 42) von einer unbehandelten Gelatine gezeigt. Der Film wurde in den Strahlengang des FTIR-Spektroskops freitragend montiert (Gelatine\_Referenz). Im Vergleich dazu wurde der Klebstofffilm von Gelatine nach dem Vernebeln untersucht. Der Aerosolnebel von Gelatine wurde 10 Minuten lang auf eine Melinexfolie<sup>5</sup> gehalten, bis sich die einzelnen Tropfen zu einem Flüssigkeitsfilm auf der Melinexfolie sammelten. Dieser Flüssigkeitsfilm trocknete ein und wurde als Klebstofffilm (Gelatine\_vernebelt) untersucht. Die beiden Transmissionsspektren von Gelatine weisen keine Unterschiede auf, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich die Gelatine durch die Vernebelung chemisch nicht verändert hat.

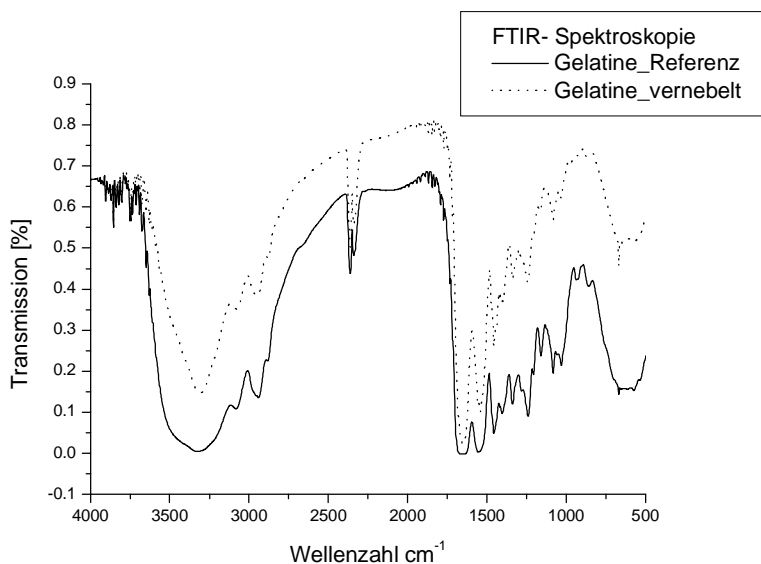


Abb. 25: FTIR-Spektroskopie von zwei Gelatinefilmen. Gelatine\_Referenz ist der unbehandelte Gelatinefilm und Gelatine\_vernebelt stellt den Klebstofffilm dar, der aus dem Aerosolnebel von Gelatine gewonnen wurde. Es sind keine Unterschiede zu erkennen.

<sup>5</sup> Melinexfolie ist eine transparente glatte Polyethylen- Folie (s. Anhang Materialien)

### 1.11.5 Exemplarische Auswahl der Pigmente

Für die Untersuchungen zur Anwendung von Aerosolen bei der Konsolidierung von Farbschichten wurden drei Pigmente ausgewählt, an denen exemplarisch die Wirkungsweise von Klebstoffaufträgen untersucht werden soll. Die drei Pigmente sind Zinnober, eine Mischung aus Ultramarin/Bleiweiß sowie brauner Ocker.

Zinnober wurde ausgewählt, da dieses Pigment bei mittelalterlichen Malereien viel verwendet wurde und ein Abpudern regelmäßig beobachtet werden kann.

Die Mischung aus gleichen Gewichtsteilen Ultramarin und Bleiweiß (1:1) wurde gewählt, da einerseits beide Pigmente einzeln, aber auch in Mischung traditionell verwendet wurden und andererseits die helle Farbwirkung sensibel gegenüber Farbverschiebungen durch Aufträge von Konsolidierungsmitteln ist. Anhand dieser Pigmentmischung können die Klebemittel und die Aerosolaufträge anhand analytischer Verfahren bewertet werden.

Brauner Ocker wurde mit in die Versuchsreihe aufgenommen, da dieses Pigment ebenso traditionell eingesetzt wurde und ein Pigment mit dunkler Farbwirkung darstellt. Farbverschiebungen sind an dunklen Pigmentaufträgen prinzipiell ausgeprägter als an hellen Pigmentaufträgen zu beobachten.

In Tabelle 7 sind die ausgewählten Pigmente, die gewählte Abkürzung, die Herstellungsart und die Summenformel (Schramm, Hering 1988: 28) angegeben.

<b>Pigment</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Gewinnung</b>	<b>Summenformel</b>
Zinnober	ZI	künstlich	HgS
Ultramarin/ Bleiweiß	UBW	künstlich/ künstlich	$\text{Na}_{8...10}\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{S}_{2...4}/2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$
Brauner Ocker	BrO	natürlich	$\text{Fe}_2\text{O}_3$

Tabelle 7: Darstellung der Pigmente, die für Untersuchungen mit Konsolidierungsmitteln exemplarisch ausgewählt werden. Angegeben sind auch die Abkürzung, die Herstellungsart und die Summenformel.



### 1.11.6 Probenherstellung der Pigmente

Ziel der Probenpräparation der drei ausgewählten Pigmente Zinnober, die Mischung Ultramarin/Bleiweiß und brauner Ocker war eine reproduzierbare Dicke der Pigmentschicht. Auf einem saugenden Untergrund wie Papier ist dies nicht zu realisieren. Aus diesem Grund wurden die Pigmente mit einem Bindemittel auf runden Glas- und Plexiglasplättchen ( $\varnothing$  2,5 cm) auf einer Zentrifuge (Heraeus, Biofuge) mit dem Spincoat-Verfahren hergestellt. Das Spincoat-Verfahren gewährleistet die gleichmäßige Verteilung eines Flüssigkeitsfilms auf einer sich schnell rotierenden Platte. Durch die Zentrifugalkraft breitet sich eine Flüssigkeit von der Mitte eines Trägers zu den Rändern hin gleichmäßig aus und trocknet dabei. Die Pigmente Zinnober, die Mischung Ultramarin/Bleiweiß (1:1, nach Gewichtsteilen) und brauner Ocker wurden mit Gummiarabikum (2 % Massengehalt) zu einer leicht viskosen Aufschlämmung vermischt, auf die Mitte eines Trägers getropft und bis zu drei Minuten bei 1000 Umdrehungen/min auf Glas- und Plexiglasträgern gedreht. Pro Träger wurde ca. 1 ml aufgetropft. Brauner Ocker und die Mischung Ultramarin/Bleiweiß lässt sich gut auf Glasplättchen aufbringen. Zinnober gelingt besser auf Plexiglas. Die Dicken der Pigmentschichten liegen zwischen 15  $\mu\text{m}$  und 25  $\mu\text{m}$ . Zu den Außenrändern hin tritt eine apparativ bedingte Verstärkung der Pigmentschicht durch die Fliehkraft auf. Die Proben pudern nur leicht. Das Bindemittel Gummiarabikum ist notwendig, damit eine durchgehende, opake Pigmentschicht hergestellt werden kann. Das Aufbringen des Pigments nur mit Wasser als Bindemittel war aus diesem Grund nicht möglich, da die Haftung zwischen den Pigmentkörnern und zum Untergrund durch die hohe Umdrehung ungenügend ist und kein durchgehender Film erzeugt werden kann. In Abb. 26 sind die Proben dargestellt.



Abb. 26: Zinnober, Mischung Ultramarin/Bleiweiß und brauner Ocker auf Glas-bzw. Plexiglasträger mit dem Spincoat-Verfahren hergestellt.

### 1.11.7 Identifikation der Pigmente

Die Pigmente, die für die Proben ausgewählt sind, wurden spektroskopisch und elementspezifisch identifiziert. Die UV/VIS-Spektroskopie eignet sich dafür, die Reflexionsbereiche zu bestimmen. Der Wellenlängenbereich des UV/VIS-Spektrometers von Shimadzu UV/VIS 2100 liegt zwischen 190 nm und 900 nm mit einer Auflösung von 5 nm. Zinnober, die Mischung Ultramarin/Bleiweiß und brauner Ocker wurden auf Glas mit dem Spincoat-Verfahren aufgetragen und als Proben in den Strahlengang montiert. Bariumsulfat ( $\text{BaSO}_4$ ), das ebenfalls auf ein Glasplättchen mit dem Spincoat-Verfahren hergestellt wurde, wurde als Weißstandard eingesetzt und wird als 100 % Reflexion herangezogen. Das Ergebnis ist ein Reflexionsspektrum (s. Abb. 27). Der Messbereich liegt zwischen 380 nm und 800 nm, wobei Zinnober ab einer Wellenlänge von 625 nm reflektiert. Die Mischung Ultramarin/Bleiweiß reflektiert bei 475 nm und 775 nm. Brauner Ocker zeigt nur eine schwache Reflexion, am ausgeprägtesten ab 600 nm.

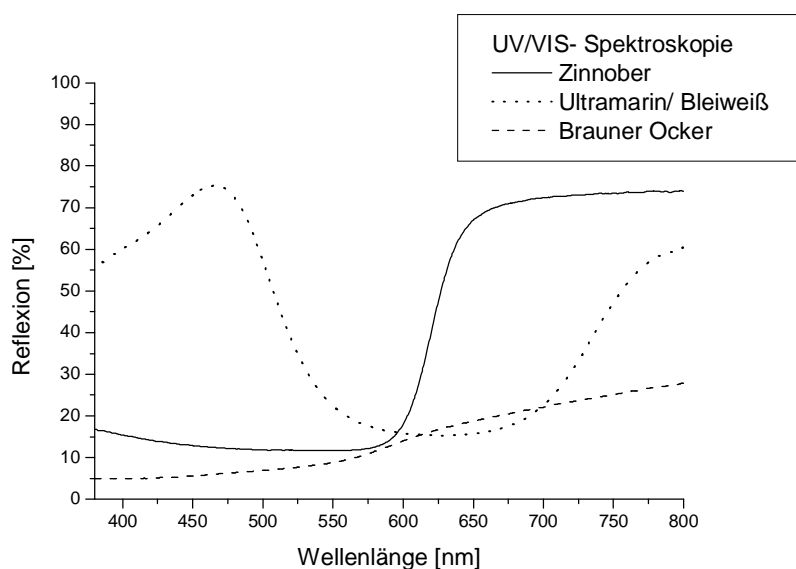


Abb. 27: UV/VIS-Spektroskopie der Pigmente Zinnober, der Mischung Ultramarin/Bleiweiß und brauner Ocker.

Zinnober wurde als Feststoff auch mit der FT-Raman-Spektroskopie (Bruker IFS 66/S, Raman Modul FRA 106) analysiert (s. Abb. 28). Die Messergebnisse decken sich mit den Literaturdaten, die bei Burgio und Clark (2001: 1506) angegeben werden. Die größten Intensitäten von Zinnober liegen bei  $253\text{ cm}^{-1}$ ,  $284\text{ cm}^{-1}$  und  $343\text{ cm}^{-1}$  Wellenzahlen. Die Autoren haben über 60 Pigmente mit der FT-Raman-Mikroskopie untersucht und eine Anregung von 1064 nm gewählt und sind somit mit den hier durchgeführten Messungen zu vergleichen.

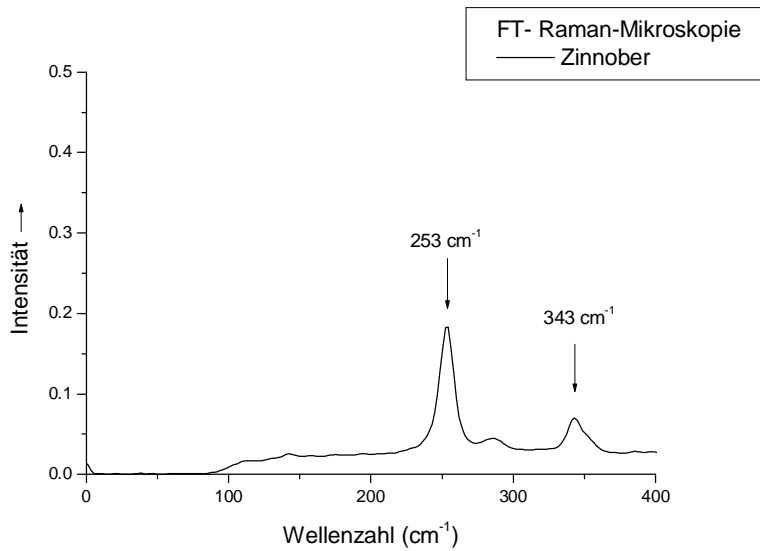


Abb. 28: FT-Raman-Spektroskopie von Zinnober, Laseranregungswellenlänge von 1064 nm, die Ramanbanden liegen bei  $253\text{ cm}^{-1}$  und bei  $343\text{ cm}^{-1}$ .

Die elementspezifischen Untersuchungen wurden mit der  $\mu$ -Synchrotron-Röntgen-Fluoreszenzanalyse ( $\mu$ -SyRFA) durchgeführt. Die Pigmente wurden ebenso wie für die UV/VIS-Spektroskopie mit dem Spincoat-Verfahren hergestellt. Zinnober wurde auf einen runden Plexiglasträger aufgetragen. Abb. 29 zeigt das Spektrogramm von Zinnober (HgS), welches die Quecksilber-Peaks (Hg-L) eindeutig zeigt. Die Messdauer beträgt 1000 Sekunden.

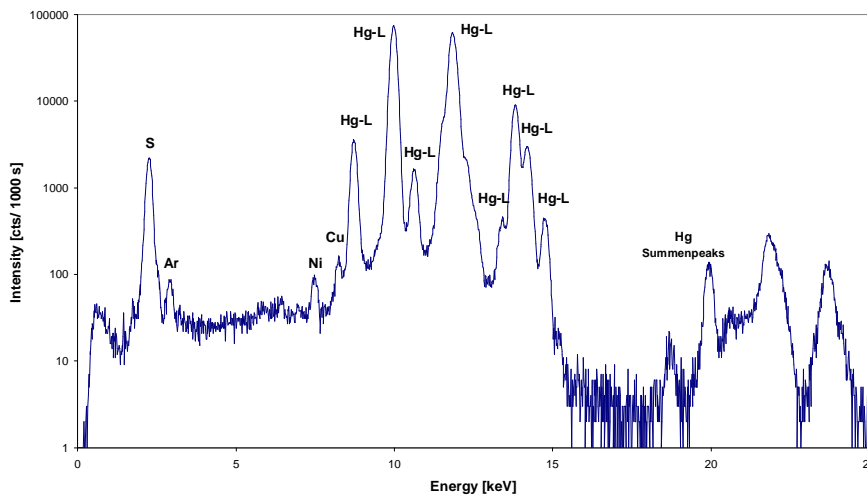


Abb. 29:  $\mu$ -SyRFA-Spektrum der Quecksilberbanden (Hg-L) von Zinnober (HgS), Messbedingungen: Strahldurchmesser:  $40 \times 40\ \mu\text{m}^2$ , Monochromatische Anregungsenergie: 21.5 keV, Absorber: 2 mm Al, Messzeit: 1000 sec.

Die Mischung Ultramarin/Bleiweiß wurde 1:1 nach Gewichtsteilen auf einen Plexiglasträger mit dem Spincoat-Verfahren aufgetragen. Abb. 30 zeigt das Spektrogramm mit einer Messdauer von 100 Sekunden. Am deutlichsten sind die Elemente Blei (Pb) und Schwefel (S) zu detektieren.

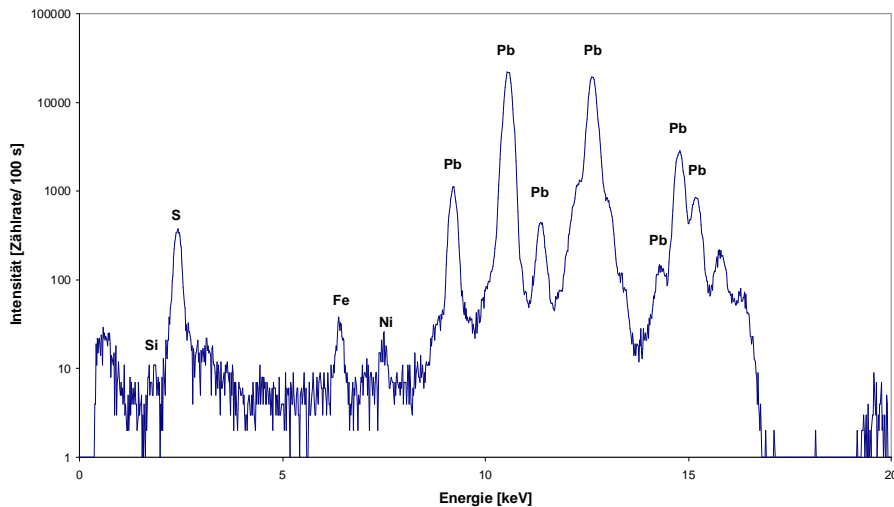


Abb. 30:  $\mu$ -SyRFA Spektrum von Ultramarin/Bleiweiß ( $\text{Na}_{8...10}\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{S}_{2...4} / 2\text{PbCO}_3 \times \text{Pb}(\text{OH})_2$ ), Messbedingungen: Strahldurchmesser:  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ , Monochromatische Anregungsenergie: 16.5 keV, Absorber: 1 mm Al, Messzeit: 100 sec.

Brauner Ocker ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ist auf einen Quarzglasträger mit dem Spincoat-Verfahren aufgetragen. In Abb. 31 sind sowohl die Eisen-Peaks (Fe) als auch andere Elemente, wie Calcium (Ca), Blei (Pb), Zink (Zn) und Mangan (Mn), zu erkennen. Die sehr genaue Methode weist in dem natürlichen Mineralpigment weitere Bestandteile auf. Hierbei handelt es sich um natürlich vorkommende Verunreinigungen neben dem Element Eisen.

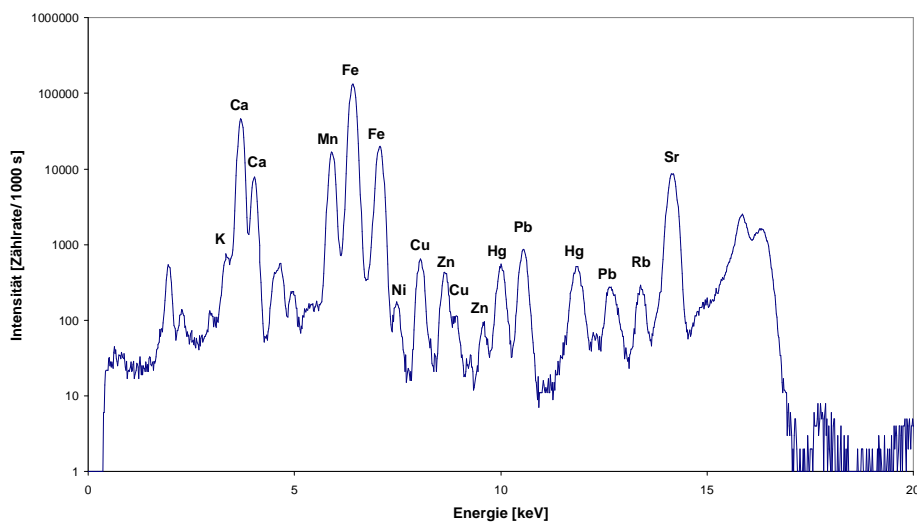


Abb. 31:  $\mu$ -SyRFA Spektrum von braunem Ocker ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Messbedingungen: Strahldurchmesser:  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ , Monochromatische Anregungsenergie: 16.5 keV, Absorber: 1 mm Al, Messzeit: 100 sec.

## 2 Analytische Untersuchungen der Klebstoffe

### 2.1 Partikelgröße der vernebelten Klebstoffe

Aerosolpartikel sollten klein genug sein, um zwischen die Pigmentkörner zu gelangen, diese zu benetzen und eine Klebstoffbrücke in Form eines Meniskus auszubilden. Eine exakte Bestimmung der Größe von Pigmentkörnern ist schwierig, weil Pigmente immer in einer Breite an Größen vorliegen und in Primärteilchen, in Aggregate und in Agglomerate (DIN 53 206) eingeteilt werden. Diese Begriffsgruppen beschreiben die Form von Pigmenten, geben aber keinen Aufschluss über die wahre Größe. Auch in der Standardliteratur werden keine Angaben zu Pigmentgrößen gegeben (Feller 1986). Zudem ist eine Teilchengrößenbestimmung in einem Pigment/Bindemittelgemisch ungleich schwieriger und ungenauer als die Bestimmung der Teilchengröße in fester Form als Pulver, auf die die Normen abgestimmt sind. Was allerdings gemessen werden kann, sind die Aerosolpartikel, die in ein Pigmentgefüge gelangen sollen.

#### Beständigkeit von Aerosolteilchen

Die relative Feuchte wird in Abhängigkeit der Temperatur als der Prozentsatz des maximalen Wasserdampfgehalts definiert. Sie ist eine entscheidende Einflussgröße auf die gleichbleibende Größe eines flüssigen Teilchens vom Zeitpunkt der Tropfenbildung an. Der Partialdruck des Wasserdampfes in der umgebenden Luft beeinflusst die Größe eines flüssigen Teilchens. Entspricht der Partialdruck des Wasserdampfes des einen Teilchens, so wird dieses Teilchen seine Größe nicht verändern. Ist die umgebende Luft feucht und der Partialdruck des Wasserdampfes größer als der des Teilchens, so kondensiert Wasserdampf an dem Teilchen und es „wächst“. Das größte Wachstum von Aerosolen von Salzlösungen beispielsweise in Luft ist ab einer relativen Feuchte von 95 % zu beobachten.

Je trockener die umgebende Luft ist, also der Partialdruck der Wasserdampfteilchen der Luft kleiner als der des Teilchens, desto stärker „trocknen und schrumpfen“ flüssige Aerosolteilchen (Jähnert 1982: 8).

Hansen, Lowinger, Sadoff (1993: 5) arbeiten mit Lösemitteldämpfen bei der Konsolidierung von pudernden Farbschichten, die in ein Zelt über dem Objekt eingeleitet werden. Damit soll eine Sättigung der das Objekt umgebenden Luft mit Lösungsmitteln realisiert werden, um die Größe der Aerosolteilchen zu stabilisieren. Es ist fraglich, ob der Versuchsaufbau eine Größenstabilisierung gewährleistet, da die Teilchen möglicherweise schneller schrumpfen, als dass sie ihre Größe beibehalten. Wie die Gesetzmäßigkeiten des „Wachsens“ und des „Schrumpfens“ sich bei Lösungsmitteln gestalten, ist noch ungeklärt.

Das Eintrocknen und Schrumpfen von flüssigen Teilchen ist zudem von deren Größe abhängig. Dieser sogenannte Kelvin-Effekt besagt: „je kleiner die Teilchen ( $< 2 \mu\text{m}$ ) sind, desto schneller verdampfen sie (Gebhart, Porstendörfer 1974: 3)“. Überdies belegen Gebhart und Porstendörfer, dass Teilchen kleiner als  $2 \mu\text{m}$  selbst bei 100 % relativer Feuchte in der Luft nicht stabil sind.

Eine weitere Einflussgröße auf die Bildung und die Stabilität von flüssigen Teilchen stellt die Zugabe von Alkohol der zu vernebelnden Flüssigkeit dar, wodurch die Oberflächenspannung des Tröpfchens reduziert wird.

Niedermolekulare Alkohole haben die Eigenschaft, die Oberflächenspannung einer Lösung herabzusetzen. Habenicht (1997: 305) beschreibt die Oberflächenspannung folgendermaßen: „Unter der Oberflächenspannung versteht man die an einer flüssigen oder festen Oberfläche wirkende Spannung, die bestrebt ist, die Oberfläche zu verkleinern, um die energetisch günstigste Form (Kugel) der Oberfläche in Bezug auf ein gegebenes Volumen einzunehmen.“ In einem wässrigen Teilchen herrscht somit immer eine Kraft nach innen, die bestrebt ist, eine Kugel zu bilden. Dieses Bestreben wird als Kraft beschrieben, die eine Fläche verkleinern will. Stellt man sich die Oberfläche als eine Haut vor, so besitzt diese Haut eine gewisse Dehnfähigkeit, die bei höherer Oberflächenspannung groß, bei geringerer Oberflächenspannung klein ist. Mit dieser Definition lässt sich erklären, dass ein Wassertropfen ohne Alkohol (relativ höhere Oberflächenspannung) die nötige Dehnfähigkeit hat, große und kleine Tröpfchen auszubilden, im Gegensatz zu einem Wassertropfen mit Alkohol (relativ geringere Oberflächenspannung), der, um die energetisch günstigste Form einzunehmen, nur wenig Kraft und Dehnfähigkeit zur Verfügung hat, eine relativ große Kugel zu bilden. Somit muss dieses Teilchen den nach innen gerichteten Kräften nachgeben und kann nur eine relativ kleinere Kugel ausbilden (s. Abb. 32 und 33).

Pickroth (1963: 7) erläutert den Einfluss auf die Größenstabilität von destilliertem Wasser im Vergleich zu Salzlösungen. Er misst bei der Vernebelung von Salzlösungen eine Abnahme der Größe der Aerosolteilchen im Gegensatz zu Aerosolteilchen, die bei der Vernebelung von destilliertem Wasser entstehen. Da bei der Konsolidierung niedermolekulare Alkohole wie Ethanol oder Propanol zur Verbesserung der Benetzbarkeit der Pigmentschicht eingesetzt werden, ist es wichtig, die mögliche Reduzierung der Aerosolteilchen durch die Zugabe von Alkohol zu erläutern. Es ist messtechnisch zu klären, ob Flüssigkeiten mit Alkoholen ihre Größe reduzieren, wie es bei Salzlösungen gemessen wurde.

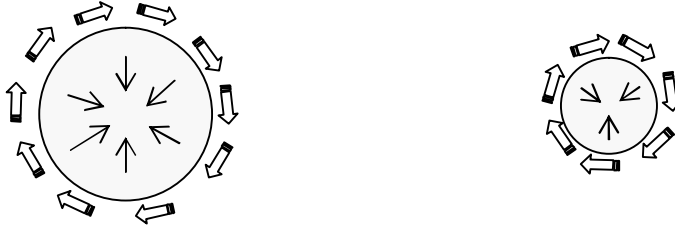


Abb. 32: Wassertropfen, die als Aerosol vorliegen, haben eine ausreichende Oberflächenspannung, sowohl große als auch kleine Tröpfchen auszubilden. Der Tropfen strebt die energetisch günstigste Form einer Kugel an, wodurch immer eine nach innen gerichtete Kraft vorliegt.

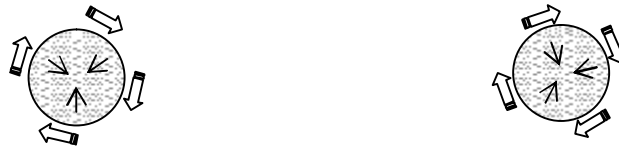


Abb. 33: Wassertropfen mit Netzmittel (zum Beispiel Alkohol), die als Aerosol vorliegen, verfügen nur über eine geringe Oberflächenspannung. Die nach innen gerichtete Kraft, um die energetisch günstigste Form einer Kugel anzunehmen, wirkt stärker als die vorhandene Dehnfähigkeit.

- ▬→ Oberflächenspannung bzw. Kraft pro Fläche
- Nach innen gerichtete Kraft

Aerosolteilchen verändern ihre Größe auf Grund der vorliegenden relativen Feuchte, wie oben beschrieben, indem sie Wasserdampf auf- und abgeben können. Daneben können sich die Teilchen aber auch gegenseitig beeinflussen. Teilchen, die einen Wasserfilm auf Grund erhöhter Luftfeuchtigkeit aufweisen, legen sich durch Adhäsionskräfte aneinander (s. Abb. 34 a). Teilchen können auch voneinander getrennt werden bzw. voneinander abprallen, wenn ein Aerosolteilchen an einen rotierenden Körper anstößt. In diesem Fall wirkt die Zentrifugalkraft auf das Teilchen ein und löst sich vom rotierenden Körper (s. Abb. 34 b). Eine weitere Variante stellt das Auftreffen eines Teilchens mit hoher Geschwindigkeit auf eine Oberfläche dar, wie es beim Vernebeln der Fall ist. Wenn die Anziehungskraft in Form von Ladung und die abstoßende Kraft in Form von Fliehkraft im Gleichgewicht steht, „springen“ (s. Abb. 34 c) die Teilchen auf dieser Oberfläche, wie es bei einem Aerosonebel häufig als eine Art Abgleiten des Nebels (s. Abb. 35) auf einer Fläche zu beobachten ist (Willeke, Baron 1993: 20). Dieser Nebel wird auch als *Gas-Partikel-Strom* bezeichnet, da die Aerosole die *Partikel* in Luft respektive dem *Gas* darstellen.

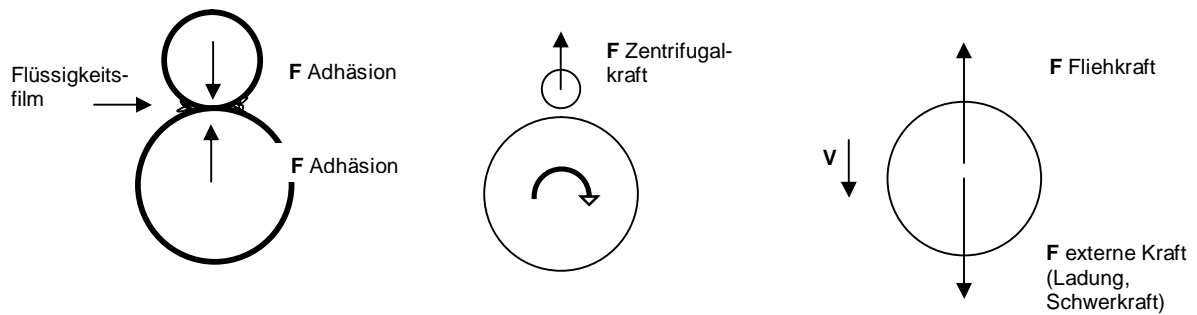


Abb. 34: Beispiele von einwirkenden Kräften auf Aerosolteilchen: Adhäsion auf Grund eines Wasserfilmes (a), Ablösen auf Grund von Zentrifugalkräften (b), Teilchen mit der Geschwindigkeit  $v$  im Gleichgewicht von Anziehungs- und Fliehkraft (c), nach: Willeke, Baron 1993: 20.

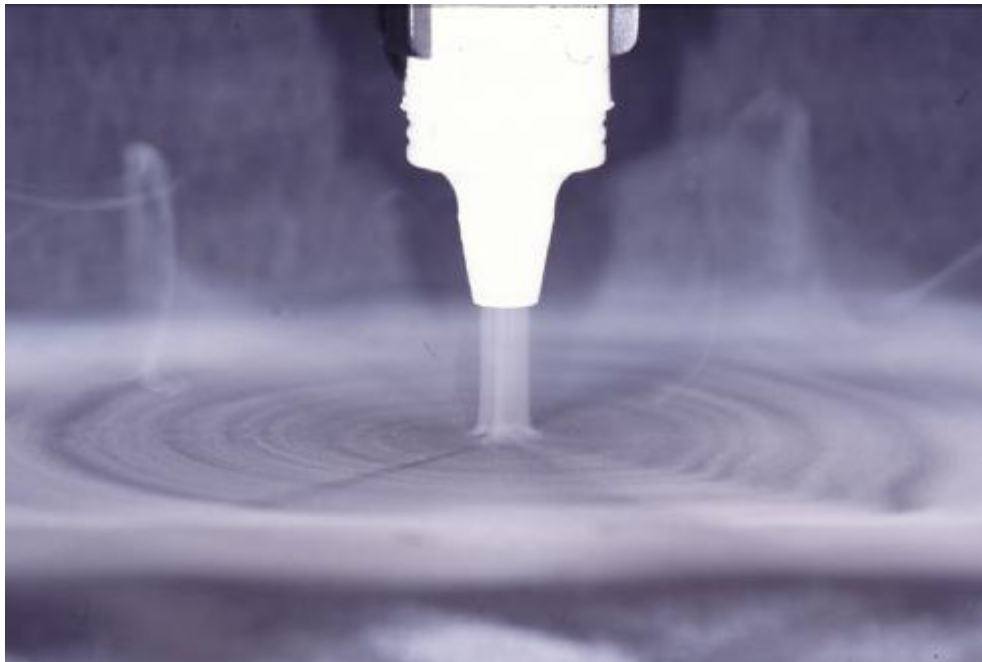


Abb. 35: Aerosolstrahl senkrecht auf eine Fläche gehalten, der Aerosolnebel breitet sich wellenförmig vom Zentrum weg aus, aus: Huhmann 2000: 45. Vergleichbar mit Abb. 40 c).

Aerosolteilchen unterliegen einer gewissen Trägheit und der Zentrifugalkraft, die sich vor allem bei Richtungsänderungen des Luftstroms bemerkbar machen. Prallt ein Teilchenstrom beispielsweise gegen eine abknickende Schlauchwand, so scheiden sich die größten Teilchen daran ab. Bei Teilchen größer als  $10\ \mu\text{m}$  spricht man von Impaktion, im Gegensatz von Teilchen in einer Größe von  $0,5$  bis  $5\ \mu\text{m}$ , deren Abscheidemechanismus als Sedimentation beschrieben wird (Holzner 1995: 2). Ebenso der Durchmesser und die Länge eines Schlauchs beeinflussen die Durchgängigkeit eines Gas-Partikel-Stroms, die rechnerisch ermittelt werden kann (s. Anhang 12.9). Prinzipiell gilt, dass je dünner und je länger ein Schlauch, desto mehr große Teilchen werden an der Wand des Schlauchs abgeschieden, was eine Reduzierung der Teilchen des Gas-Partikel-Stroms bewirkt. Eine



Verkleinerung der Aerosolteilchen wird immer angestrebt, um eine möglichst gute Benetzung der Pigmentkörner, eine gute Penetration und eine Ausbildung von Klebstoffbrücken zu gewährleisten.

Das Abscheiden der größeren Tröpfchen im Schlauchinnern stellt auf der anderen Seite auch eine Gefahrenquelle für große Tropfen dar, die plötzlich aus dem Schlauch und durch die Düse auf das Objekt gelangen können. Dies ist besonders bei den glatten Schläuchen zu beobachten (CCI-Mister, Mini-Vernebler). Aus diesem Grund sollten die Schläuche mit den Düsen immer wieder auf einem Löschkarton ausgeklopft werden, damit lose Tropfen herausgeschüttelt werden.

#### Durchgeführte Messungen

Die Messungen erfolgten am Institut für Meteorologie-und Klimaforschung (IMK) des Forschungszentrums Karlsruhe (s. Anhang 12.9) und basieren auf einer spektroskopischen Analysetechnik. Die Methode wird als Streulicht-Partikelgrößen-Zählanalyse bezeichnet, die den Gas-Partikel-Strom in-situ ohne Probenahme untersucht. Eine reproduzierbare, verlässliche Messung liegt bei einer Konzentration der zu messenden Partikel von  $10^5$  Partikel/cm<sup>3</sup> und bei Partikelgrößen von 1-10 µm vor. Es gibt zwei Partikelmesstechniken, die unterschiedliche Messergebnisse liefern. Erfolgt die Messung des gestreuten Lichts des gesamten Gas-Partikel-Stroms, wird die Volumenhäufigkeitsverteilung angegeben. Dabei fließen die Ergebnisse der durchschnittlichen Größen in µm und die Summe der Volumina in das Spektrum ein. Erfolgt die Messung des gestreuten Lichts an einzelnen Partikeln des Gas-Partikel-Stroms handelt es sich um eine reine Zählanalyse und die durchschnittliche Anzahlverteilung in µm wird angegeben. Dabei wird die Größe der gemessenen Partikel erfasst. Beide Messtechniken laufen simultan während einer Messung ab (Umhauer 1989: 213). Zur Vereinfachung der Begrifflichkeit wird der Term Volumenhäufigkeitsverteilung durch den Begriff Volumenverteilung und der Term Anzahlverteilung durch den Begriff Teilchenverteilung durchgehend im Text ersetzt.

In einem Spektrum der Volumen-bzw. Teilchenverteilung wird die durchschnittliche Größe der Partikel zwischen 1 und 10 µm logarithmisch (x-Achse) gegen die Anzahl der gemessenen Partikel (y-Achse) aufgetragen.

Die Aerosolpartikel aller zu untersuchenden Klebstoffe (Gelatine, Methylcellulose, Hausenblase, Funori, JunFunori® und Klucel®) konnten gemessen werden. Die in Tabelle 8 angegebenen Klebstoffkonzentrationen sind die Maximalkonzentrationen für den AGS 2000. Der Mini-Vernebler und der Nebulizer können höhere Konzentrationen vernebeln (s. Kapitel 1.6, S. 18). Um jedoch die Geräte und die Ergebnisse zu vergleichen, wurden jeweils die gleichen Konzentrationen der Klebstoffe vernebelt. Klucel®, welches in Ethanol gelöst ist, kann nur im Nebulizer und im Mini-Vernebler zerstäubt werden und nicht im AGS

2000. Dies liegt vermutlich an einem ungünstigen Abstand des Klebstoffreservoirs zur Ultraschallquelle und auch am erschwerten Vernebeln von alkoholischen Lösungen auf Grund der geringen Oberflächenspannung.

Klebstoff	Abkürzungen	Konzentration [%]
Gelatine	gel	1
Methylcellulose	mc	0,2
Hausenblase	hbl	1
Funori	fun	0,2
JunFunori®	jfun	0,1
Klucel®	kluc	0,2

Tabelle 8: Klebstoffkonzentrationen wurden in den drei Aerosolgeneratoren (AGS 2000, Nebulizer und Mini-Vernebler) vernebelt und untersucht.

Die produzierten Aerosolteilchen des AGS 2000 (Ultraschall betrieben), des Nebulizers (Druckluft betrieben) und des Mini-Verneblers (Ultraschall betrieben) wurden untersucht. Die Messung der Aerosolteilchen fand am Ende des jeweiligen Schlauchs statt, also nicht direkt am Entstehungsort der Partikel. Dieser Messaufbau spiegelt die Situation während des Arbeitens mit den Aerosolen am besten wider, um die Volumen- und Teilchenverteilung der Aerosole nach Austritt aus dem Schlauch zu bestimmen (s. Tabelle 9 und 10).

	Maxima der Volumenverteilung der Klebstoffe					
Geräte	Gelatine	Methyl-cellulose	Hausen-blase	Funori	JunFunori®	Klucel®
<b>AGS 2000</b>	5	<b>5</b>	5	5	5	5
<b>Nebulizer</b>	1-2	<b>1-2</b>	1-2	1-2	1-2	1-2
<b>Mini-Vernebler</b>	10	5	4	9	10	4-5

Tabelle 9: Maxima der Volumenverteilung der Klebstoffe mit drei Aerosolgeneratoren. Der AGS 2000 und der Nebulizer arbeiten regelmäßig im Vergleich zum Mini-Vernebler, der die Partikel uneinheitlich produziert. Die Fett hervorgehobenen Ergebnisse sind grafisch dargestellt.

	Maxima der Teilchenverteilung der Klebstoffe					
Geräte	Gelatine	Methyl-cellulose	Hausen-blase	Funori	JunFunori®	Klucel®
<b>AGS 2000</b>	2-3	<b>2-3</b>	2-3	2-3	2-3	2-3
<b>Nebulizer</b>	< 1	<b>&lt; 1</b>	< 1	< 1	< 1	< 1
<b>Mini-Vernebler</b>	< 1-5	< 1-4	< 1-4	< 1-5	< 1-3	< 1-4

Tabelle 10: Maxima der Teilchenverteilung der Klebstoffe mit drei Aerosolgeneratoren. Der AGS 2000 und der Nebulizer arbeiten regelmäßig im Vergleich zum Mini-Vernebler, der die Partikel uneinheitlich produziert. Der Nebulizer produziert sehr kleine Partikel. Die Fett hervorgehobenen Ergebnisse sind grafisch dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen bezüglich der Volumenverteilung, dass der AGS 2000 für alle Klebstoffe Teilchen mit einem Maximum bei 5  $\mu\text{m}$  produziert, der Nebulizer produziert durchwegs Volumenverteilungen zwischen 1  $\mu\text{m}$  bis 2  $\mu\text{m}$ . Der Mini-Vernebler generiert ein unregelmäßiges Spektrum an Aerosolteilchen, die zwischen 4  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  liegen. Die Geräte und nicht die Klebstoffe steuern die Volumenverteilungen, wie beim AGS 2000 und beim Nebulizer zu sehen ist, da jeweils die gleichen Volumen- und Teilchenverteilungen vorliegen, obgleich unterschiedliche Klebstoffe mit unterschiedlichen Konzentrationen vernebelt wurden (s. Tabelle 9 und 10). Der Mini-Vernebler produziert ein breites Spektrum an Aerosolpartikeln, die klein sind, aber stark in ihrer Volumenverteilung schwanken. In Abb. 36 ist die Volumenverteilung von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt) vom AGS 2000 und in Abb. 37 die Volumenverteilung von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt) vom Nebulizer dargestellt. Die Spektren zeigen, dass der AGS 2000 ein eindeutiges Maximum an Aerosolteilchen produziert, im Vergleich zum Nebulizer, bei dem das Maximum nicht ganz exakt zu bestimmen ist.

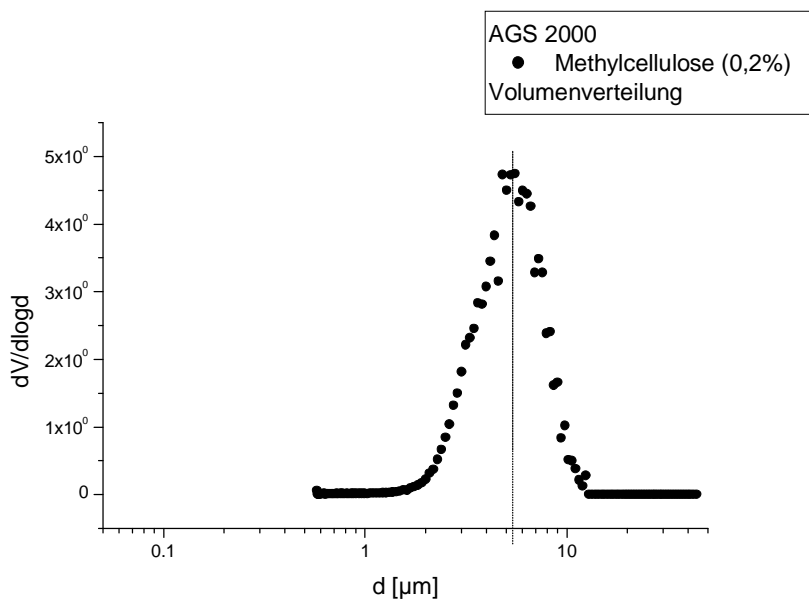


Abb. 36: Volumenverteilung der Aerosole von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt), die mit dem AGS 2000 produziert wurden. Das Maximum liegt bei 5  $\mu\text{m}$ .

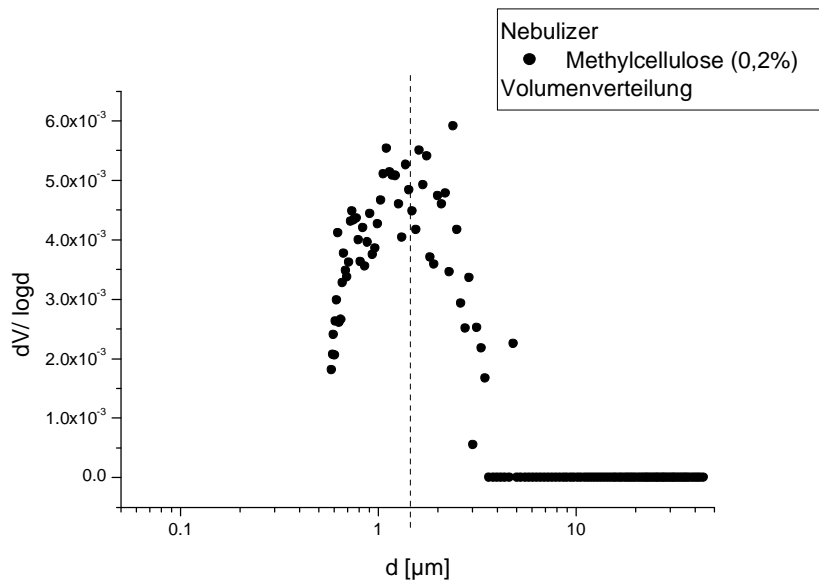


Abb. 37: Volumenverteilung der Aerosole von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt), die mit dem Nebulizer produziert wurden. Das Maximum liegt zwischen 1 µm bis 2 µm.

Die Teilchenverteilung liefert als Ergebnis durchwegs kleinere Größen an Aerosolen. Bei dieser Messtechnik werden die Aerosole im Gas-Partikel-Strom der Größe nach gemessen. Der AGS 2000 produziert Partikel in Größen um die 3 µm und der Nebulizer Partikel, die weit unter 1 µm groß sind. Der Mini-Vernebler hat ein Maximum unter 1 µm und produziert weiter Teilchen bis zu 5 µm. In Abb. 38 und Abb. 39 sind die Teilchenverteilungen jeweils von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt), die im AGS 2000 und im Nebulizer vernebelt wurden, dargestellt.

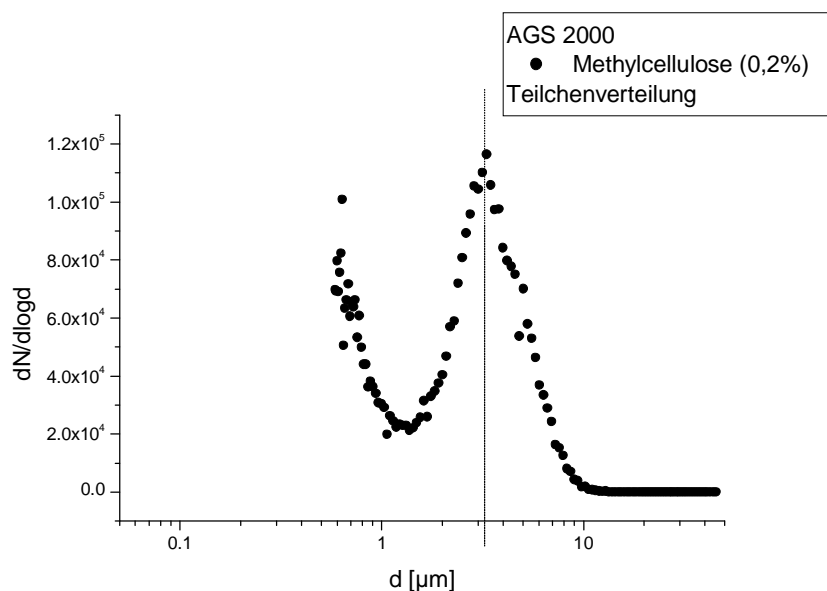


Abb. 38: Teilchenverteilung der Aerosole von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt), die mit dem AGS 2000 produziert wurden. Das Maximum liegt bei 3 µm.

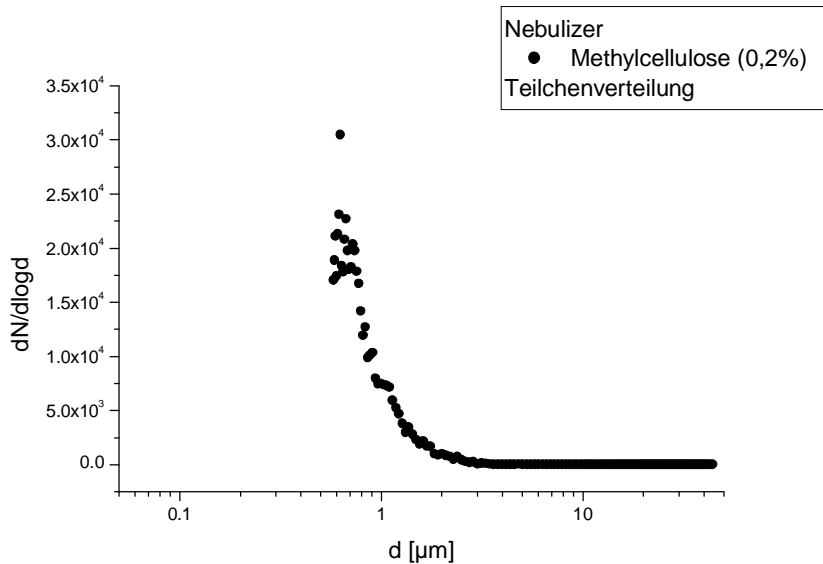


Abb. 39: Teilchenverteilung der Aerosole von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt), die mit dem Nebulizer produziert wurden. Das Maximum liegt unter 1 µm.

Die Teilchenverteilung zeigt das Spektrum an Größen, die ein Aerosolgenerator produziert. Dabei wird deutlich, dass die Werte der Teilchenverteilung ungeachtet der Klebstoffe kleiner als die Werte der Volumenverteilung sind. Dies liegt daran, dass bei der Messtechnik zur Bestimmung der Teilchenverteilung lediglich das Größenspektrum gezählt und als Ergebnis angegeben wird. Die Volumenverteilung nimmt zudem die Information des Volumens der gemessenen Aerosolteilchen mit auf, wodurch sich die Ergebnisse unterscheiden. Der Nebulizer produziert zwar kleine Partikel weit unter 1 µm, für die Summe der Volumina bedeuten viele kleine Partikel allerdings eine Volumenverteilung mit einem Maximum bei 1 µm bis 2 µm. Der AGS 2000 hat sein Maximum bei durchschnittlich 3 µm, wobei auch Partikel unter 1 µm zu beobachten sind. Diese kleineren Partikel werden vernachlässigt, da das Hauptmaximum bei höheren Partikeln liegt. Zur Interpretation der Partikel unter 1 µm müsste eine andere Messtechnik herangezogen werden, die noch kleinere Partikel messen kann. Die Streulicht-Partikel-Zählanalyse misst reproduzierbar die Partikel, die zwischen 1 µm und 10 µm groß sind.

Die Volumenverteilung stellt in Bezug auf die Konsolidierung das aussagekräftigere Ergebnis dar und sollte im Gegensatz zur Teilchenverteilung als Diskussionsgrundlage herangezogen werden. Die Information des Größenspektrums gekoppelt mit der Volumenangabe der produzierten Aerosolpartikel liefert eine Vorstellung, in welchen Größen und Mengen Aerosolpartikel auf eine Pigmentschicht auftreffen.

Die Volumenverteilung des Nebulizers ist am kleinsten bei 1  $\mu\text{m}$  bis 2 $\mu\text{m}$ , gefolgt vom AGS 2000 bei 5  $\mu\text{m}$ . Der Mini-Vernebler produziert die Aerosolpartikel unregelmäßig, die Volumenverteilung liegt zwischen 4  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$ .

Aerosolgeneratoren können prinzipiell mono- und polydisperse Aerosole erzeugen. Monodisperse Aerosole werden immer in derselben Teilchengröße produziert, im Gegensatz zu polydispersen Aerosolen, die in einer Bandbreite an Teilchengrößen vorliegen (Griffiths, Mark, Marshall 1998: 38). Die bisherigen Ergebnisse zur Bestimmung der Partikelgröße zeigten, dass bei den in dieser Arbeit diskutierten Geräten polydisperse Aerosole produziert werden.

Arnold (1996: 12) stellt Partikelmessungen von einem Druckluft betriebenen Vernebler vor, die mit einem Doppel-Laser Partikel-Zähler gemessen werden. Seiner Aussage zufolge liegen die Partikel von Gelatine und Methylcellulose zwischen 0,7  $\mu\text{m}$  und 1,1  $\mu\text{m}$ , wobei keine näheren Informationen über die Messbedingungen angegeben sind. Seine Ergebnisse stimmen im Ansatz mit den hier vorgestellten Ergebnissen überein, obgleich die Laser unterstützte Partikel-Messung sich bevorzugt für Partikelgrößen von 10  $\mu\text{m}$  und größer eignet. Die Arbeit von Arnold ist bisher die einzige Untersuchung in der Konservierungswissenschaft, in der eine Partikelanalyse durchgeführt wurde. Michalski, Dignard (1997: 111) schreibt von produzierten Aerosolpartikelgrößen zwischen 1  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$ , allerdings ohne genauere Angaben über die Untersuchungstechnik.

Methylcellulose wurde in zwei Konzentrationen, 0,2 % und 0,01 %, im AGS 2000 vernebelt (s. Abb. 40). Die Reduzierung der Konzentration wirkte sich nicht auf die Volumenverteilung aus, es werden ungeachtet der zu vernebelnden Konzentration vergleichbare Partikel in Größe und Volumen produziert.

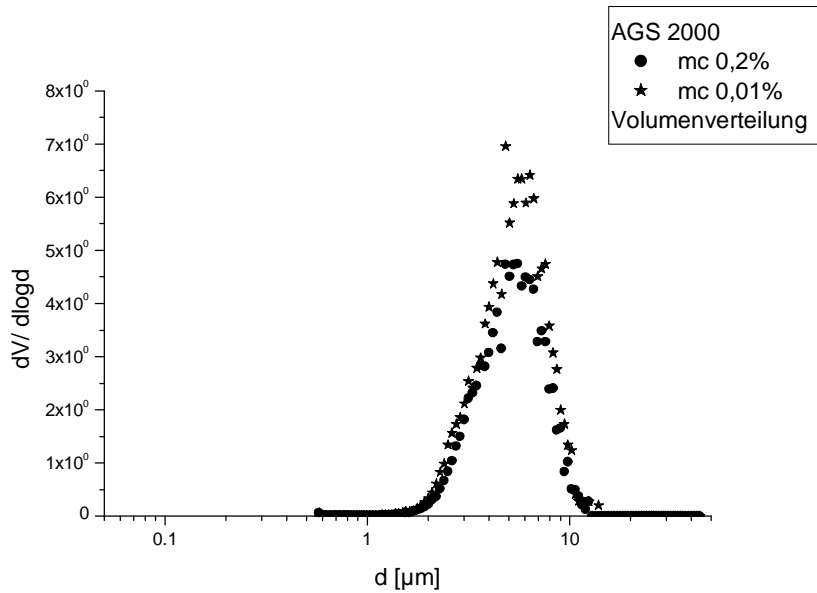


Abb. 40: Volumenverteilung der Aerosole von Methylcellulose (0,2 % und 0,01 %) im AGS 2000 vernebelt. Die Spektren liegen übereinander. Eine Verringerung der Konzentration wirkt sich nicht auf die Volumenverteilung aus.

Der Einfluss der relativen Feuchtigkeit auf die Stabilität der Aerosolpartikel von 1 %iger Gelatine wurde ebenfalls gemessen. Der zu messende Partikelstrom wurde über eine Trockenstrecke geleitet, in dem die relative Feuchtigkeit von 84 % über 16 % auf 8 % reduziert wurde. Bei extremer Trockenheit geben die flüssigen Teilchen Wasserdampf ab und verdampfen. Dieser Effekt ist bei 8 % relativer Feuchte bei der vernebelten Gelatine ausgeprägt zu beobachten. Auch reines Wasser (als H<sub>2</sub>O in der Abbildung gekennzeichnet), welches bei 8 % relativer Feuchte durch die Trockenstrecke geleitet wurde, verdampft unter den trockenen Bedingungen (s. Abb. 41). Eigentlich müsste bei der Gelatine ein Restkeim der Gelatine zu messen sein, der als Feststoffpartikel von dem Aerosolteilchen übrigbleibt. Vermutlich ist die Konzentration von 1 % Gelatine zu gering, um den Restkeim noch zu messen. Eine trockene Umgebung bewirkt eine Verkleinerung der Aerosolpartikel, da das wässrige Lösungsmittel verdampft.

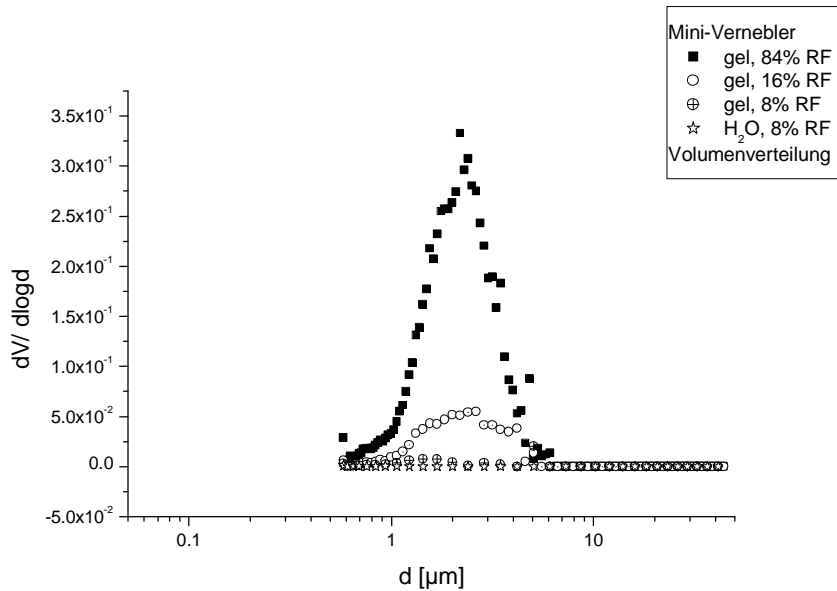


Abb. 41: Volumenverteilung der Aerosole von 1 % Gelatine, die bei abnehmender relativer Feuchtigkeit gemessen wurde. Bei 8 % relativer Feuchte sind weder Gelatine noch reine Wassertropfchen messbar.

Das Vernebeln einer Flüssigkeit mit wesentlich geringerer Oberflächenspannung lässt kleinere Partikel erwarten, wie oben theoretisch dargelegt wurde (s. Kapitel 2.1, S. 55). Im Mini-Vernebler wurde Wasser im Vergleich zu Ethanol vernebelt. Abb. 42 zeigt die Volumenverteilung der Aerosole, die mit dem Mini-Vernebler produziert wurden. Bei Wasser liegt das Maximum bei 8  $\mu\text{m}$ , im Gegensatz zu Ethanol, bei dem kein Volumen gemessen wurde.

Die Teilchenverteilung (s. Abb. 43) zeigt hingegen ein Maximum des vernebelten Wassers bei 4  $\mu\text{m}$  und beim Ethanol bei 1  $\mu\text{m}$ .

Das Vernebeln von Ethanol, welcher eine geringe Oberflächenspannung aufweist, resultiert in sehr kleinen Teilchen, wie die Teilchenverteilung zeigt. Allerdings sind diese so klein, dass auch das Volumen der Partikel nicht gemessen werden kann.



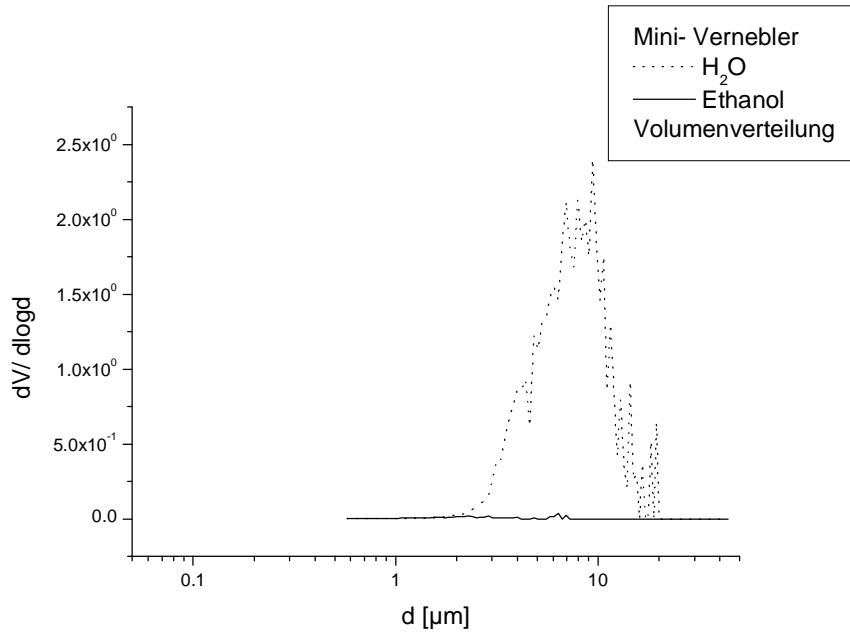


Abb. 42: Volumenverteilung der Aerosole von Wasser und Ethanol. Wasser weist ein Maximum bei 8  $\mu\text{m}$  auf. Die Volumina von Ethanol sind so gering, dass sie nicht erfasst werden konnten.

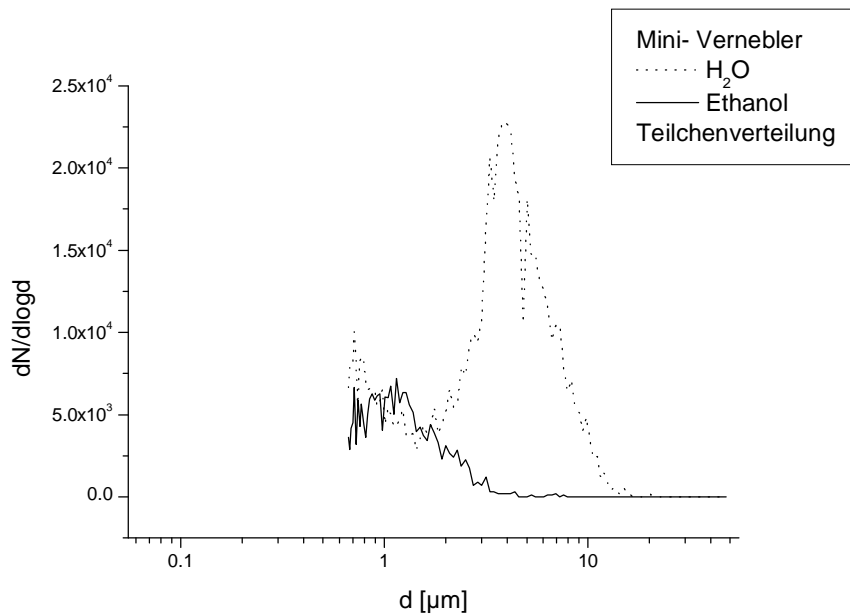


Abb. 43: Teilchenverteilung der Aerosole von Wasser und Ethanol. Wasser weist ein Maximum bei 4  $\mu\text{m}$  auf, Ethanol bei 1  $\mu\text{m}$ .

Reiner Ethanol wird für die Aerosol-Konsolidierung nicht eingesetzt, außer bei der Vernebelung von Klucel®, der als einer der wenigen Klebstoffe in Ethanol gelöst werden kann. Es stellt sich die Frage, ob Klucel® wesentlich kleinere Partikel produziert im Gegensatz zu einem wässrig gelösten Klebstoff. Die Volumenverteilung der Aerosole von Klucel® in Ethanol wurden mit denen von JunFunori® in demineralisiertem Wasser

verglichen (s. Abb. 44). Die Partikel, die im Mini-Vernebler erzeugt wurden, zeigen, dass die Aerosole von Klucel® in Ethanol zwar kleiner sind, das Maximum liegt bei 4 µm bis 5 µm, aber der Unterschied zu den Partikeln zu JunFunori® nicht so gravierend ist. Das Maximum der Volumenverteilung von JunFunori® liegt bei 9 µm. Der Einfluss der geringeren Oberflächenspannung wirkt sich beim reinen Ethanol stärker aus, als beim Klebstoff, der in Ethanol gelöst ist.

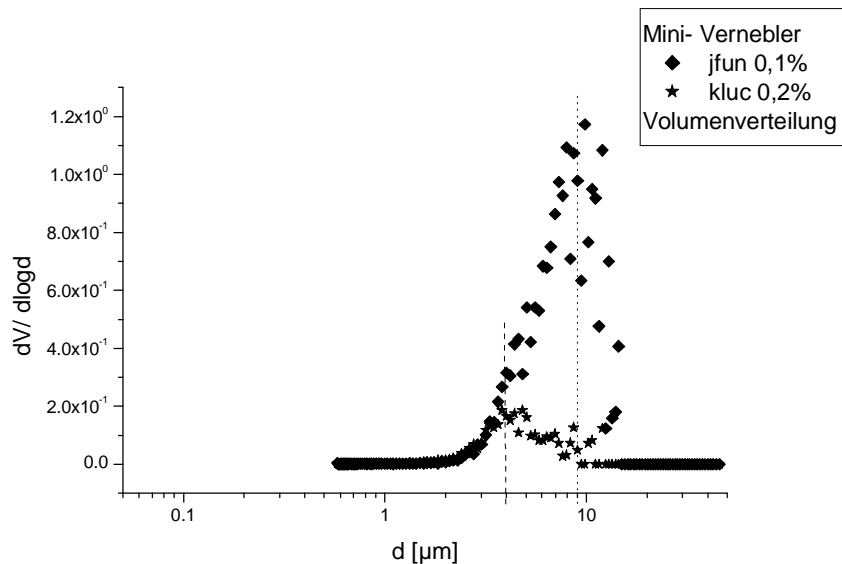


Abb. 44: Volumenverteilung von JunFunori® (0,1 %) in Wasser gelöst und Klucel® (0,2 %) in Ethanol gelöst. Das Maximum von Klucel® liegt bei 4 µm im Vergleich zum Maximum des JunFunori®, das bei 9 µm liegt.

Aus den bisherigen Messungen kann geschlossen werden, dass bei einer Vernebelung von Klucel® in Ethanol mit dem Nebulizer die kleinsten Partikel produziert werden können, da eine geringere Oberflächenspannung kleinere Partikel erzeugt und der Nebulizer darüber hinaus Volumenverteilungen mit den kleinsten Partikeln produzieren kann. In Abb. 45 ist die Volumenverteilung der Aerosole von Klucel® in Ethanol gezeigt, die mit dem Nebulizer vernebelt wurden. Das Maximum liegt in einem Bereich von 1 µm bis 2 µm.

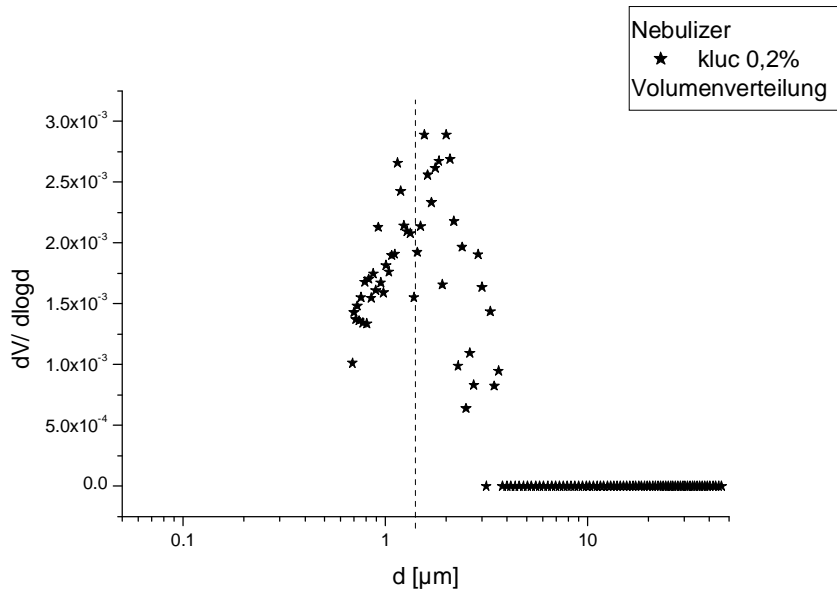


Abb. 45: Volumenverteilung der Aerosole von Klucel® in Ethanol mit dem Nebulizer vernebelt, das Maximum liegt in einem Bereich von 1  $\mu\text{m}$  bis 2  $\mu\text{m}$ .

Abb. 46 zeigt das Verhältnis zwischen Korngrößen, die in einer Pigmentschicht vorliegen können, und den produzierten Aerosolpartikeln der untersuchten Aerosolgeneratoren. Für Korngrößen ab 5  $\mu\text{m}$  eignen sich alle drei untersuchten Aerosolgeneratoren, da sie Partikel erzeugen, die klein genug sind, zwischen die Pigmentkörner zu gelangen. Liegen Korngrößen kleiner als 5  $\mu\text{m}$  vor, so eignet sich der Nebulizer am ehesten, diese Pigmentschicht zu konsolidieren, da er eine Volumenverteilung produziert, die näherungsweise bei 1  $\mu\text{m}$  liegt.

Allerdings ist nicht nur die Partikelgröße ein Kriterium für eine erfolgreiche Konsolidierung. Die Höhe des Gas-Partikel-Stroms spielt eine wichtige Rolle. Der AGS 2000 weist einen Gas-Partikel-Strom zwischen 1040 und 1200 ml/min auf, im Gegensatz zum Nebulizer, der einen Gas-Partikel-Strom von ca. 7000 ml/min erzeugt (s. Kapitel 1.5, S. 17). Beim Nebulizer kann der hohe Gas-Partikel-Strom dazu führen, dass lose aufliegende Pigmente weggetragen werden. Die Regulierung des Gas-Partikel-Stromes des Nebulizers erfolgt ausschließlich über die Druckluft-Einstellung des Kompressors in bar und kann, obgleich der kleinen Partikelgrößenerzeugung, bei sehr fragilen Objekten nicht angewendet werden. Beim AGS 2000 und beim Mini-Vernebler lässt sich sowohl die Ultraschallquelle als auch die Luftpumpe stufenlos regulieren, was einen großen Vorteil bietet. Mit diesen beiden Aerosolgeneratoren können bevorzugt pudernde und fragile Pigmentoberflächen konsolidiert werden. Ein anderer Vorteil des Mini-Verneblers und des Nebulizers ist die Fähigkeit, Klucel® in Ethanol zu vernebeln, was mit dem AGS 2000 nicht möglich ist. Alle drei Generatoren können allerdings wässrige Klebstoffe vernebeln, denen kleine Mengen Ethanol als Benetzungshilfe beim Konsolidieren zugegeben wurde.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen „wächst“ ist geringer, als dass es durch eine trockene Umgebung mit geringerer relativer Feuchte „schrumpft“. Eine trockene Umgebung wirkt sich drastischer auf die Partikel aus, als eine erhöhte relative Feuchte. Erfahrungen aus der Medizinforschung zeigen, dass sich eine Erhöhung der relativen Feuchte erst ab etwa 95 % auf eine Vergrößerung auswirkt. Während einer Restaurierung kann die relative Feuchte im Arbeitsraum erhöht eingestellt werden, dabei werden allerdings „nur“ Werte um die 75 % bis 85 % relativer Feuchte erreicht, also nicht hoch genug, um wirklich einen Einfluss auf die Größenstabilität der Partikelgröße zu nehmen.

Größere Teilchen werden zudem beim Einsatz von längeren und gewundenen Schläuchen abgeschieden, wodurch wiederum eher kleinere Teilchen produziert werden. Der Schlauch des AGS 2000 kann zudem erwärmt werden, was eine Reduzierung der Aerosolteilchen nach sich zieht. Bei JunFunori®, der ohnehin nur bei sehr geringen Konzentrationen (0,1 % Massengehalt) vernebelt werden kann, kann jedoch die Erwärmung ein zu starkes Verdampfen bewirken, so dass keine Partikel mehr aus dem Schlauch treten.

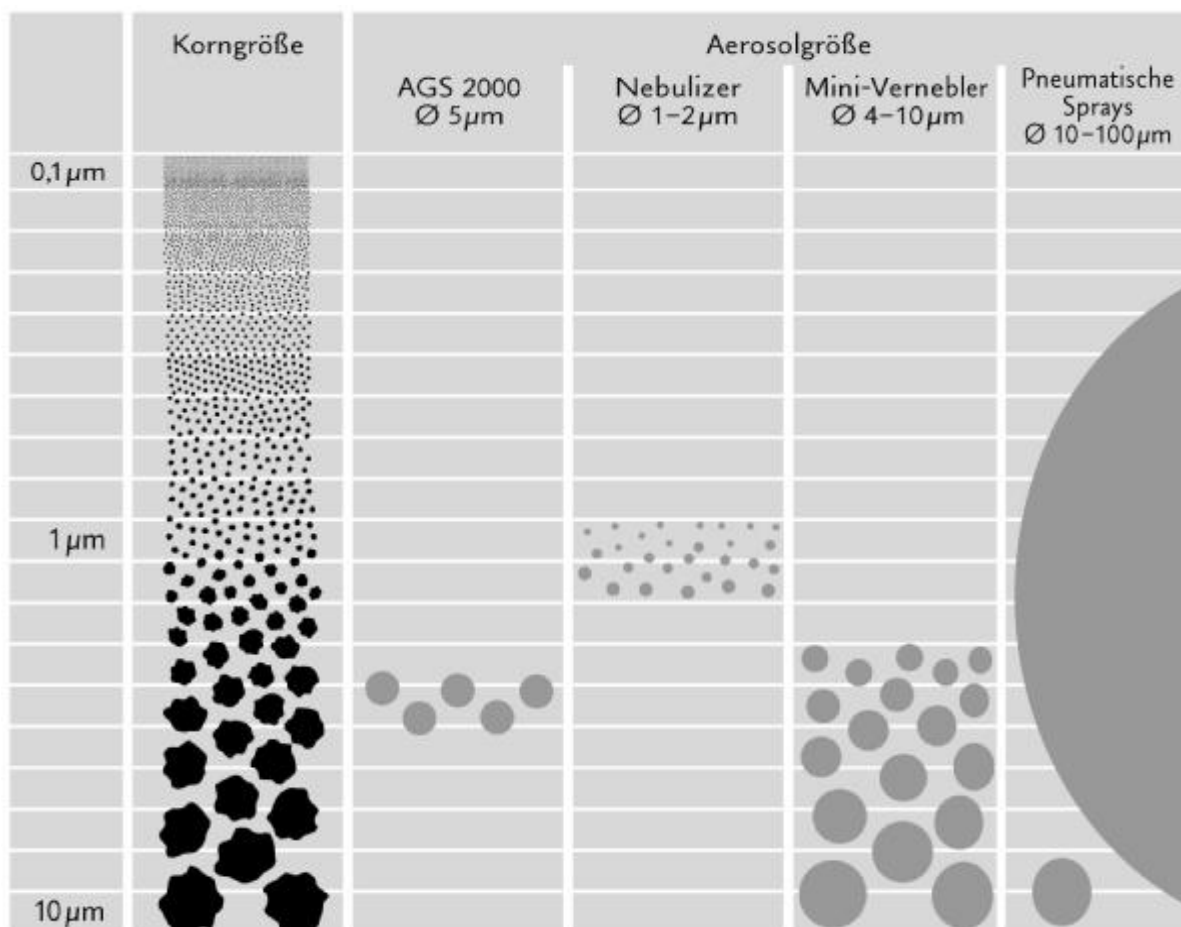


Abb. 46: Verhältnis zwischen Korngröße und produzierter Aerosolpartikel des AGS 2000, des Nebulizers und des Mini-Verneblers, grafisch in Anlehnung an: Michalski, Dignard 1997: 111.

## 2.2 Streuvermögen der Klebstofffilme

Beim Konsolidieren von pudernden Pigmentschichten werden Klebstoffaerosole aufgetragen, die die Pigmentoberfläche benetzen und bei dicht aneinander liegenden Pigmentkörnern eine Klebstoffbrücke ausbilden sollen. Das Benetzen kann zu einer Schichtbildung des Klebstoffs auf den Pigmenten führen, wenn zum Beispiel zu viel Klebstoff aufgetragen wurde. Es stellt sich die Frage, inwieweit ein Klebstofffilm, der sich auf einer Pigmentschicht befindet, sich auf die Rauigkeit eines porösen Untergrunds, wie es eine Pigmentschicht darstellt, auswirkt. Sollten die Reflexionseigenschaften des Klebstofffilms die Reflexionseigenschaften der Pigmentschicht beeinflussen, so wird sich auch die Farbwirkung der darunter liegenden Pigmente verändern. Bei dieser Fragestellung wird nicht nur die Wechselwirkung zwischen Klebstofffilm und Untergrund, sondern auch die Oberfläche und die Rauigkeit des Klebstofffilms selbst mit berücksichtigt.

Als Streuvermögen werden die Reflexion, die Beugung und die Brechung von Lichtstrahlen an einer transparenten Schicht beschrieben. Vereinfacht kann dies als eine Ablenkung des eingestrahnten Lichts, das eine lichtdurchlässige Schicht passiert, bezeichnet werden (Naumer, Heller 1997: 261). Die Rauigkeit und das daraus resultierende Streuvermögen einer lichtdurchlässigen Klebstoffschicht kann UV/VIS-spektroskopisch gemessen werden, wenn die Probe vom eingestrahnten Licht des Spektrometers durchstrahlt wird. Die Probe wird hierfür in Transmission im UV/VIS-Spektrometer gemessen und die Absorption des Lichts vom Spektrometer aufgenommen.

Die Höhe der Absorption des eingestrahnten Lichts hängt von der inneren Struktur der Probe ab. Je wolkiger und trüber eine lichtdurchlässige Schicht ist, desto mehr Anteile des senkrecht auftreffenden Lichts werden an der inneren Struktur absorbiert, so dass die Absorption bzw. die Streuung ansteigt.

Liegen hochtransparente Schichten vor, so passiert das eingestrahlte Licht ungehindert die Probe und die Absorption ist gering. Die Messung des Streuvermögens gibt keine Auskunft über die Farbigekeit der Probe, da nur die Ablenkung der auftreffenden Lichtstrahlen gemessen wird. Diese Ablenkung ist allerdings Wellenlängen abhängig, da kurzwellige Lichtstrahlen stärker streuen als langwellige, was bedeutet, dass bei abnehmender Wellenlänge, die Absorption zunimmt.

Gelatine wurde für diesen Versuchsaufbau ausgewählt, da der Klebstofffilm, der mit 1 % Massengehalt auf der Polystyrol-Petrischale getrocknet und abgezogen wurde (s. Kapitel 1.11.2, S. 42), transparent und glatt ist (s. Abb. 48). Die Polystyrol-Petrischale weist selbst auch eine sehr glatte Oberfläche und eine hohe Transparenz auf (s. Abb. 47).

Funori als Klebstofffilm, der ebenso mit 1 % Massengehalt in der Polystyrol-Petrischale präpariert wurde, weist dagegen in der Durchlichtaufnahme eine genoppte und wolkige Struktur auf (s. Abb. 49), die Transparenz ist dadurch reduziert. Diese beiden Klebstofffilme, Gelatine und Funori, stellen zwei Extreme der vorgestellten Klebstoffe in Bezug auf die klebstoffeigene Transparenz und Wolkigkeit dar (s. Anhang 12.10) und wurden aus diesem Grund für das Beschreiben des Streuvermögens der Klebstoffauswahl weiter untersucht.

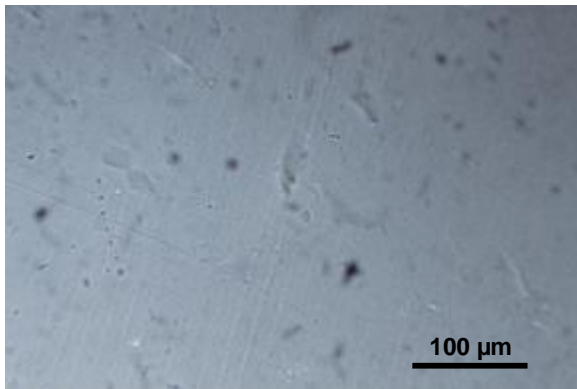


Abb. 47: Polystyrol-Petrischale, transparent und glatt.

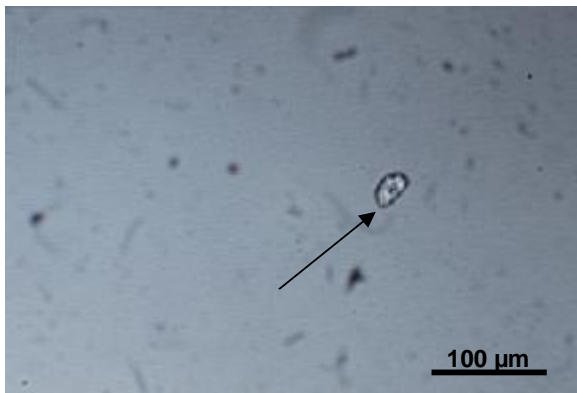


Abb. 48: Gelatine-Klebstofffilm, klar mit kleinen Verklumpungen, nach Abnahme von der Polystyrol-Petrischale.

## Durchlichtaufnahmen

200fache Vergrößerung

Die schwarzen Punkte stammen von Verunreinigungen der Untersuchungseinrichtung

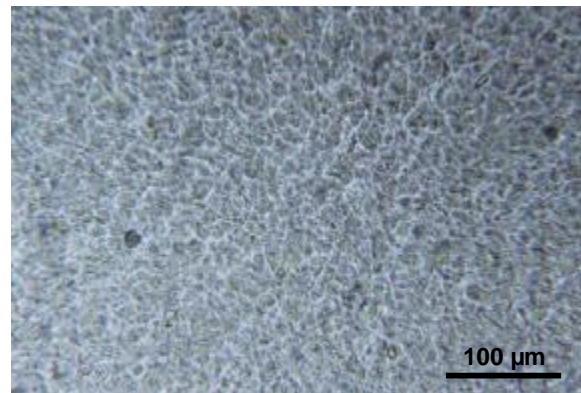


Abb. 49: Funori-Klebstofffilm, grob, wolkig und noppig, nach Abnahme von der Polystyrol-Petrischale.

Abb. 50 zeigt das Streuvermögen der Klebstofffilme von Gelatine und Funori, die auf einem glatten Untergrund, der Polystyrol-Petrischale präpariert wurden. Die Spektren wurden bei Wellenlänge 800 nm genullt, um den Wellenlängen abhängigen Anstieg der Kurven in Richtung geringerer Wellenzahlen zu verdeutlichen. Die X-Achse gibt den gemessenen Wellenlängenbereich und die Y-Achse die Absorption des detektierten Lichtes in % an. Um die Übersichtlichkeit zu verbessern, sind die Absorptionswerte bei der grafischen Auswertung gestreckt worden.

Funori streut wesentlich stärker als Gelatine, was an der noppigen und wolkigen Struktur liegt. Diese noppige und wolkige Struktur ist auch an der Abb. 49 im Durchlicht zu sehen.

Hier wird deutlich, dass der Funori-Klebstofffilm auf einem glatten Untergrund noppig lufttrocknet, im Gegensatz zum Gelatinefilm, der eine hohe Transparenz zeigt, wenn er auf einem glatten Untergrund präpariert wird.

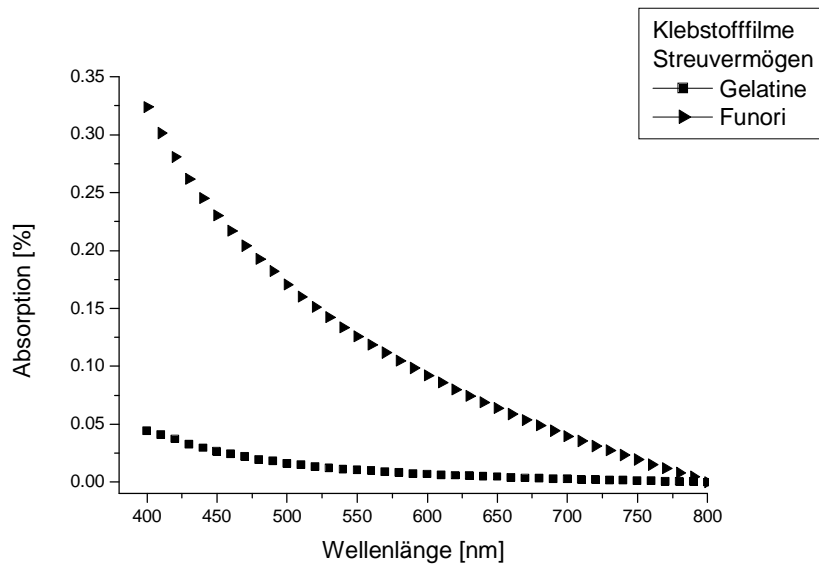


Abb. 50: UV/VIS-Spektroskopie der Klebstofffilme Gelatine und Funori, die auf der glatten Polystyrol-Petrischale hergestellt wurden. In Transmission gemessen und bei Wellenlänge 800 nm genullt. Funori streut wesentlich stärker als Gelatine.

Die flüssige Gelatine und Funori wurden in einem weiteren Versuch in eine feingeraute Probenschale eingefüllt. Der Klebstofffilm wurde nach der Trocknung UV/VIS-spektroskopisch untersucht. Diese feingeraute Probenschale ist nach empirischen Vorversuchen vermutlich auch aus Polystyrol. Abb. 51 zeigt eine REM-Aufnahme der feingerauten Probenschale, die eine sehr feine Oberflächenstruktur aufweist. Abb. 52 zeigt einen Gelatine-Klebstofffilm, der von dieser feingerauten Probenschale abgenommen wurde. Der Gelatinefilm ist genoppt und weist eine strukturierte Oberfläche auf, was bedeutet, dass die flüssige Gelatinelösung nach dem Trocknen die Oberfläche der feingerauten Probenschale angenommen hat. Der Funori-Klebstofffilm aus der feingerauten Probenschale ist nicht abgebildet, gleicht aber dem des Gelatine-Films.

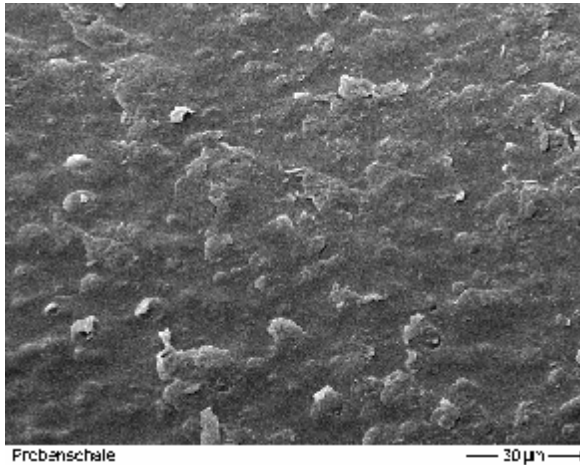


Abb. 51: REM-Aufnahme der feingerauten Probenschale (vermutlich Polystyrol), die Oberfläche ist noppig und rau.

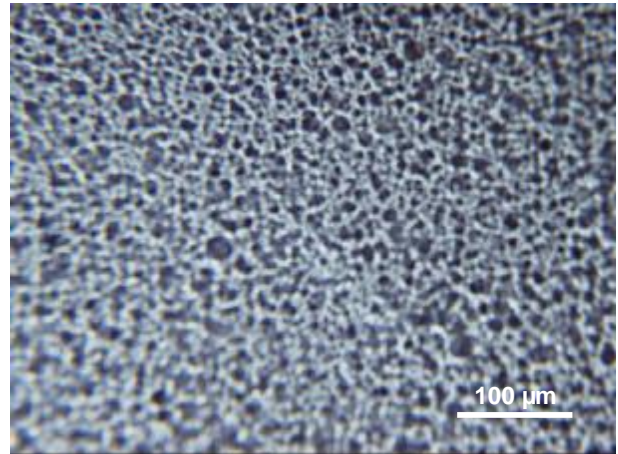


Abb. 52: Gelatine-Klebstofffilm bei 200facher Vergrößerung, nach der Abnahme von der feingerauten Probenschale (s. Abb 51).

Die Klebstofffilme von Gelatine und Funori, die in der feingerauten Probenschale präpariert wurden, sind in einem nächsten Schritt in Transmission UV/VIS-spektroskopisch untersucht worden (s. Abb. 53). Beide Klebstofffilme streuen vergleichbar, selbst der vormals so niedrig streuende Gelatine-Klebstofffilm. In der Abbildung liegen die beiden Spektren nahezu übereinander, was bedeutet, dass sie sich in ihrer Struktur ähneln. Die von der feingerauten Probenschale abgezogenen Klebstofffilme haben sich an die Oberfläche angelegt und beim Auftrocknen die feine Struktur angenommen. Dies resultiert in einer vergleichbaren und hohen Streuung.

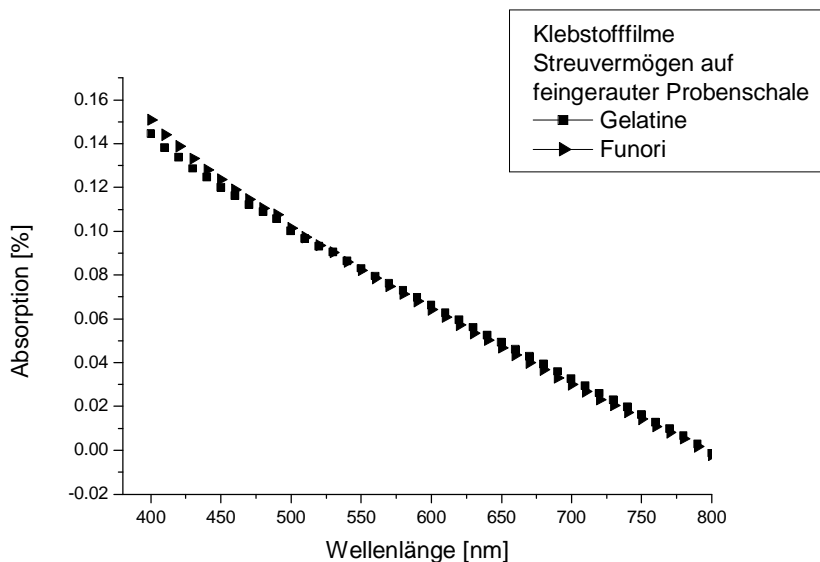


Abb. 53: UV/VIS-Spektroskopie eines Gelatine- und Funori-Klebstofffilms, die auf der feingerauten Probenschale präpariert wurden. Beide streuen vergleichbar hoch.



Eine dritte Versuchsreihe beinhaltet die Herstellung von reproduzierbar rauen Oberflächen, von denen Klebstofffilme abgenommen und UV/VIS-spektroskopisch vermessen wurden. Die oben beschriebenen Polystyrol-Petrischalen wurden hierfür mit verschiedenen rauen Schleifpapieren bestempelt. In diese Petrischalen wurden die flüssigen Klebstoffe eingefüllt, getrocknet und in Transmission gemessen (s. Anhang 12.11).

Wiederum werden die Klebstofffilme von Gelatine und Funori heraus gegriffen. Abb. 54 zeigt die reproduzierbar raue Probenschale im Durchlicht. Die dunklen Einkerbungen rühren von der Bestempelung der Probenschale mit dem Schleifpapier her. Das Schleifpapier hat eine 240er Körnung, was laut FEPA-Standard (Fédération européenne des fabricants de produits abrasifs), Sandkörnern in einer Größe von 58 µm entspricht. Der Gelatine-Klebstofffilm, der sich auf der reproduzierbar rauen Probenschale befindet (s. Abb. 55), hat sich exakt an die Einkerbungen angelegt und weist die für Gelatine typischen Haarrisse auf, da die Klebstofffilme von Gelatine spannungsreich sind. Der Funori-Klebstofffilm legt sich über die Einkerbungen der reproduzierbar rauen Probenschale (s. Abb 56) und zeigt auch hier die noppige und wolkige Struktur von Funori. Die Einkerbungen sind kaum zu erkennen.

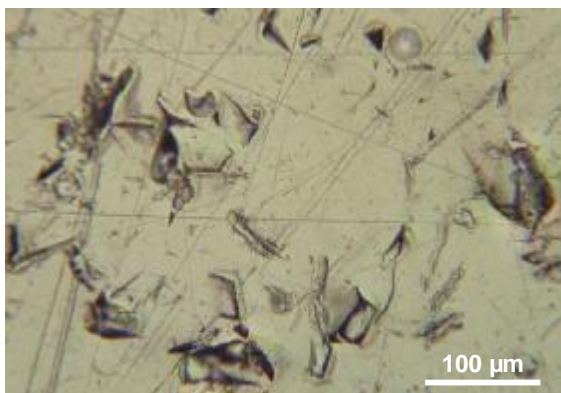


Abb. 54: Reproduzierbar raue Probenschale, die dunklen Einkerbungen stammen vom Schleifpapier

### Durchlichtaufnahmen

Reproduzierbar raue Probenschale der Rauigkeit 1  
200fache Vergrößerung

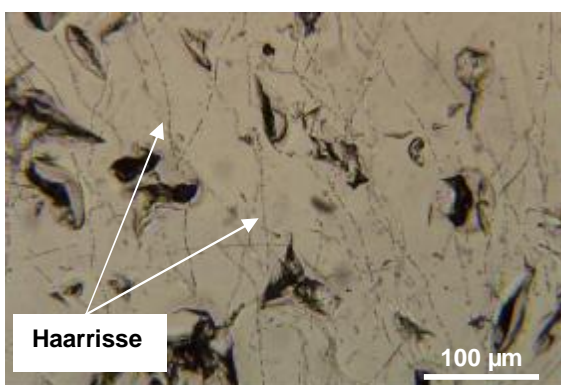


Abb. 55: Gelatine-Klebstofffilm auf der reproduzierbar rauen Probenschale, die Einkerbungen sind deutlich zu sehen und die für die Gelatine typischen Haarrisse.

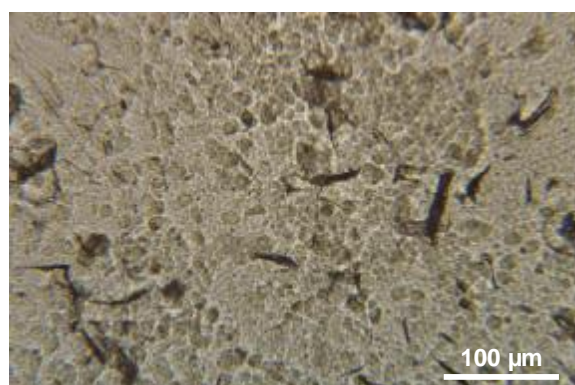


Abb. 56: Funori-Klebstofffilm auf der reproduzierbar rauen Probenschalen, die noppige Struktur des Funori überdeckt die Einkerbungen des Schleifpapiers.

Die beiden Klebstofffilme von Gelatine und Funori, die auf der reproduzierbar rauen Probenschale präpariert wurden, wurden in Transmission gemessen, um das Streuvermögen zu beobachten. In Abb. 57 sind beide Spektren zu sehen. Bei diesem Versuchsaufbau wurde in einem ersten Schritt der noch auf der Probenschale haftende Klebstofffilm spektroskopisch gemessen, anschließend mechanisch abgezogen und nur die Probenschale in Transmission gemessen. Das Streuvermögen wurde in einem weiteren rechnerischen Arbeitsschritt bestimmt. Aus diesem Grund kann der Gelatine-Klebstofffilm einen Minus-Wert aufweisen, wie an dem Spektrum zu sehen ist. Der negative Wert wird als das Auftreten von Glanz gewertet, weil keine Streuung vorhanden ist. Der Funori-Klebstofffilm streut stärker, was auch an der photographischen Dokumentation (s. Abb. 56) zu sehen ist, da die noppige Struktur von Funori sich über die Einkerbungen, die von der Bestempelung stammen, legt.

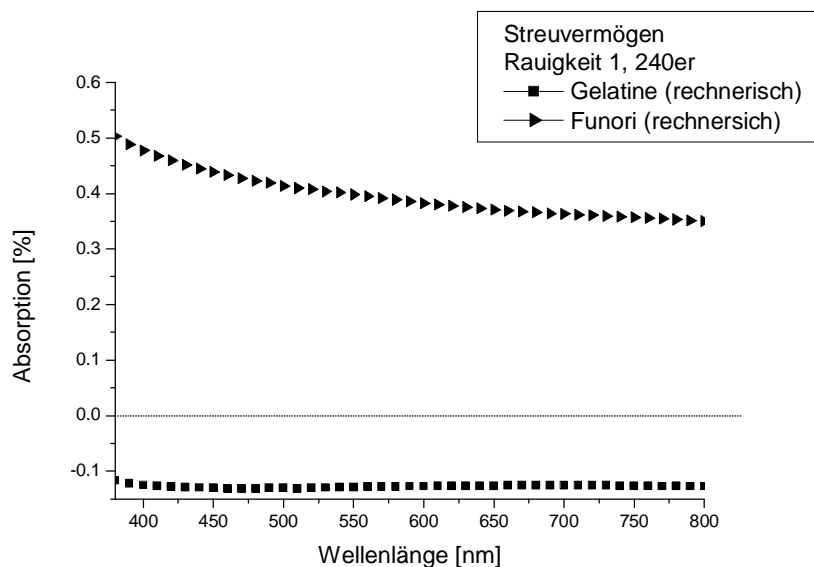


Abb. 57: UV/VIS-Spektroskopie der Funori- und Gelatine-Klebstofffilme, die auf der reproduzierbar rauen Probenschale präpariert wurden. Die Spektren wurden aus der Differenz des Verbunds Probenschale und Klebstofffilm minus Probenschale errechnet. Aus diesem Grund weist der Gelatine-Film einen Minus-Wert auf.

Die Ergebnisse zeigen, dass Funori ungeachtet der Rauigkeit des Untergrunds ein hohes Streuvermögen besitzt. Sowohl auf einem glatten, als auch auf einem rauen Untergrund streut Funori, was an der noppigen und wolkigen Struktur des Klebstofffilms liegt. Gelatine passt sich exakt an den vorliegenden Untergrund an, neigt bei glatten Untergründen zu Glanz und zu einem spannungsreichen Auftrocknen. Ist der Untergrund allerdings feingeraut, wie an der feingerauten Probenschale zu sehen, so streut Gelatine gemäß der Oberfläche des Untergrunds.

Bei einer möglichen Beschichtung einer Pigmentfläche durch ein Konsolidierungsmittel wird von einer hohen Streuung der Klebstofffilme ausgegangen, da sowohl Funori als auch Gelatine sich an die Unebenheiten anlegen und die Reflexionseigenschaften des Untergrunds nicht beeinflussen. Überdies streut Funori auf glatten und rauen Untergründen gleichermaßen, so dass die Reflexionseigenschaften von matten und porösen Pigmentschichten, die eine hohe diffuse Reflexion aufweisen, nicht gestört werden. Da das Streuvermögen als Transmissionseigenschaft einer lichtdurchlässigen Schicht beschrieben wird, kann diese laut Definition nicht mit der diffusen Reflexion verglichen werden. Allerdings stört eine hohe Streuung einer transparenten Schicht nicht die diffuse Reflexion einer opaken Fläche, da beide Reflexionsarten eine winkelunabhängige Ablenkung des auftreffenden Lichtes darstellen. Sowohl die diffuse Reflexion als auch das hohe Streuvermögen einer lichtdurchlässigen Schicht resultiert in einer Erhöhung der Helligkeit und einem matten Erscheinungsbild.

Bei Gelatine besteht die Gefahr, dass bei der Konsolidierung einer Malschicht auf einem glatten Untergrund Glanz entsteht, da sich ein Gelatinefilm exakt an den Untergrund anlegt. Ein riskantes Beispiel stellt die Malerei auf Glasträgern dar. Die Konsolidierung mit Gelatine könnte in einem solchen Schadensfall als riskant in Bezug auf die Glanzbildung eingestuft werden.

Übertragen auf die weiteren Klebstoffe, ist das Streuvermögen von JunFunori® und Hausenblase mit dem des Funori zu vergleichen und Methylcellulose und Klucel® mit dem Streuvermögen von Gelatine. Werden diese Klebstoffe jedoch auf feingeraute Untergründe aufgetragen, nehmen sie die Unebenheiten an und streuen gemäß des Untergrunds, wie der Versuch mit der feingerauten Probenschale gezeigt hat.

## 2.3 Farbigkeit der Klebstofffilme

Sowohl Funori-als auch Gelatinelösungen sind in Konzentrationen über 1 % Massengehalt gelblich gefärbt. Der Einfluss der Eigenfarbe der Klebstoffe, die auf ein buntes oder unbuntes Pigment aufgetragen werden, soll UV/VIS-spektroskopisch untersucht werden. Dabei steht die Frage im Vordergrund, ob dünnste Klebstofffilme, die nur einige Hundert Nanometer dick sind (s. Kapitel 1.11.2, S. 42), die möglicherweise bei einer Benetzung bzw. Beschichtung auftreten, sich auf die Farbwirkung des Pigments auswirken.

Es wurden Klebstofffilme aller Klebstoffe mit einem Massengehalt von 1 % zubereitet (s. Kapitel 1.11.2, S. 41). Diese Konzentration der Klebstofflösungen ergibt auf den Petrischalen aus Polystyrol (PS) einen ausreichend stabilen Klebstofffilm, der nach Verdampfen des wässrigen oder alkoholischen Lösemittels vom Boden der Petrischalen abgelöst werden kann. Bei geringeren Konzentrationen hat sich gezeigt, dass der Klebstofffilm zu stark am Boden haftet und nicht abzulösen ist.

Die Farbigkeit dieser Klebstofffilme wurde untersucht. Die Filme wurden auf eine weiße Teflonscheibe montiert und im UV/VIS-Spektrometer (UV/VIS 2100, Shimadzu) untersucht. Die weiße Teflonscheibe wurde zuvor als Weißstandard aufgenommen und entspricht 100 % Reflexion. Der Wellenlängenbereich der UV/VIS-spektroskopischen Untersuchung reicht von 380 nm bis 800 nm, mit einer Auflösung von 5 nm. In Abb. 58 sind die Reflexionsspektren aller Klebstofffilme abgebildet. Die Klebstoffe Gelatine, Methylcellulose, Hausenblase, JunFunori® und Klucel® zeigen eine Reflexion von 80 % bis 95 %. Dies bedeutet, dass diese Filme nahezu farblos sind. Funori zeigt in einem Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 550 nm eine reduzierte Reflexion, die als Gelbfärbung visuell zu beobachten ist.

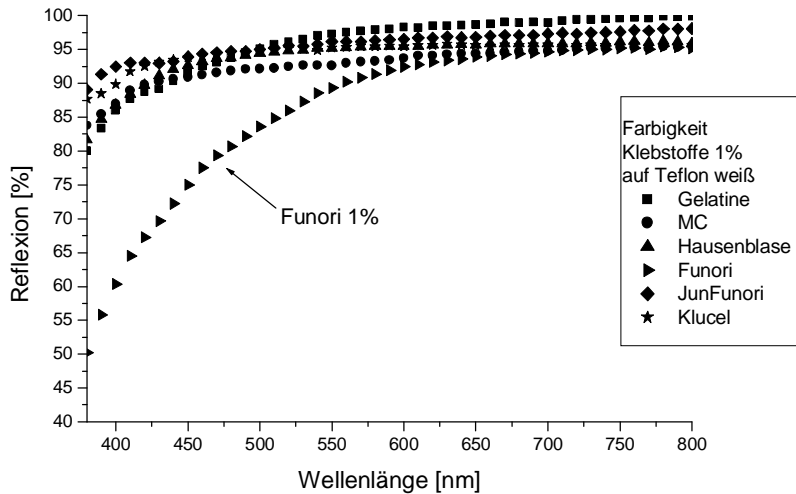


Abb. 58: UV/VIS-Spektroskopie der Klebstofffilme, die auf eine weiße Teflonplatte montiert sind. Das weiße Teflon dient als Weißstandard und entspricht 100 % Reflexion. Funori reflektiert zwischen 380 nm und 550 nm, was bedeutet, dass es gelblich gefärbt ist.

Die Konzentration, mit der Funori vernebelt werden kann, liegt bei ca. 0,2 %, und nicht bei 1 % wie der oben untersuchte Film. Bei einer Reduzierung der Schichtdicke und der Abnahme der Konzentration von farbgebenden Komponenten einer lichtdurchlässigen Schicht, wie es Klebstofffilme sind, tritt das Lambert-Beersche Gesetz in Kraft. Dieses beschreibt die Abhängigkeit der Lichtdurchlässigkeit von der Konzentration an farbgebenden Komponenten. Je höher konzentriert ein Farbstoff in einem transparenten Medium vorliegt, desto mehr Licht wird von seinen Molekülen absorbiert und desto weniger Transmission tritt ein. Die Transmission gibt an, welcher Bruchteil des in die Probe eingestrahnten Lichts wieder austritt. Bei niedrig konzentrierten Lösungen gelangt das Licht ungehinderter durch das Medium. Neben der Konzentration spielt auch die Dicke des Mediums eine Rolle. Je dicker das Medium, desto weniger Transmission erfolgt. Das Lambert-Beersche Gesetz fasst diese Gesetzmäßigkeiten zusammen (Gottwald, Puff 1990: 175):

$$- \lg I / I_0 = \varepsilon \cdot c \cdot d \cdot \lg e$$

$I / I_0$  gibt die Transmission an, wobei  $I_0$  die Lichtintensität vor der Probe und  $I$  die Lichtintensität nach der Probe angibt. Als  $\varepsilon$  wird der molare Extinktionskoeffizient (Stoffkonstante) angegeben, als  $c$  die Konzentration der farbgebenden Komponenten, als  $d$  die Dicke der Probe und  $\lg e$  der dekadische Logarithmus der Zahl  $e=2,718$  als Konstante. Das bedeutet, dass wenn sowohl die Dicke als auch die Konzentration der Farbstoffe einer transparenten Schicht reduziert werden, dass sich dann innerhalb der Gültigkeit des Lambert-Beerschen Gesetzes die Transmission erhöht. Diese Erhöhung der Transmission wird als ein farbloser Eindruck wahrgenommen.

Abb. 59 zeigt die Abhängigkeit zwischen der Konzentration und der Dicke eines transparenten Mediums und die daraus resultierende Durchlässigkeit (Transmission).  $I_0$  bezeichnet die Strahlenleistung, die auf ein transparentes Medium fällt. Als  $I$  wird die abgeschwächte Strahlenleistung gekennzeichnet, die bei (a) bei einem relativ dicken und hochkonzentrierten Medium stark abgeschwächt wird. Je weniger konzentriert (b) und je dünner (c) die Schicht ist, desto weniger wird die einfallende Strahlung  $I$  abgeschwächt bzw. desto mehr erhöht sich die Transmission.

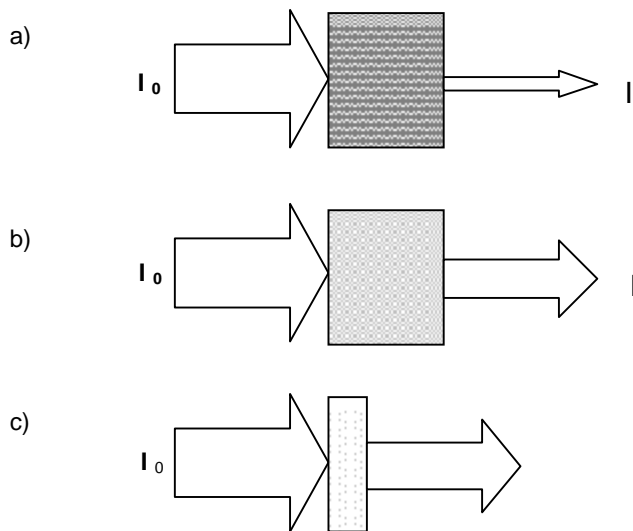


Abb. 59: Schwächung eines Lichtstrahls durch eine absorbierende Lösung,  $I_0$  entspricht der Strahlenleistung,  $I$  der abgeschwächten Strahlenleistung, die Schraffierung entspricht variierenden Konzentrationen der Lösung, nach: Skoog, Leary 1996: 134.

Übertragen auf eine mögliche Beschichtung der Pigmentkörner kann eine Eigenfarbe der Klebstoffe als ein wirksamer Faktor für eine Verfärbung ausgeschlossen werden, da Funori nur in Konzentrationen von 0,2 % vernebelt wird und die Schichtdicke eines möglichen Klebstofffilms auf einem Pigment nur einige hundert Nanometer dick ist. Ein Einfluss auf die Farbwirkung durch die Eigenfarbe von Funori oder weiter übertragen auf Gelatine kann auf Grund der Gesetzmäßigkeiten des Lambert-Beerschen Gesetzes ausgeschlossen werden.

## 2.4 Alterungsverhalten der Klebstofffilme

Die beschleunigte Alterung von Klebstofffilmen soll die natürliche Alterung simulieren. Die Temperatur und die relative Feuchte sind die häufigsten Variablen bei dieser Alterungstechnik. Die Veränderungen der Farbigkeit, der Größe und der Planlage der Klebstofffilme werden bewertet, um die Langzeitstabilität einzuschätzen und sie daraufhin in der Restaurierung einzusetzen. Sowohl die Alterungsbedingungen als auch die Bewertungskriterien in Bezug auf die Langzeitstabilität sind für Klebstoffe für Restaurierungsarbeiten nicht festgelegt. Die Vorgehensweise und die Feststellung der Alterungsbedingungen sind vielfältig. Feller und Wilt (1990: 66) legen in ihrer umfangreichen Arbeit zur Evaluierung von modifizierten Celluloseethern dar, dass sich die farbliche Veränderung nach einer thermischen Alterung vom trockenen Feststoffgranulat wesentlich ausgeprägter zeigt, im Gegensatz zur thermischen Alterung von dünnen Filmen. Auf der einen Seite ist demnach die Aufbereitung der Klebstoffe festzulegen, in welcher Form diese gealtert werden sollen, und auf der anderen Seite die Temperatur- und Feuchte-Bedingungen der Alterung zu wählen.

Die Bedingungen für die Temperatur- und Feuchte-Einstellungen variieren erheblich. Feller und Wilt (1990: 66) altern auf Glas aufgestrichene Celluloseether thermisch bei 90 °C, für 139 Stunden, knapp sechs Tage lang. Daneben gibt es die statische Alterung, eine Kombination von Temperatur und Feuchte, wie es die ISO-Norm 5630, Part 3 (80 °C und 65 % relative Feuchte, Käßberger 1998: 34) für Papier und Pappe vorgibt. Käßberger (1998: 43) erarbeitete eine dynamische Alterung, was bei gleichbleibender Temperatur bedeutet, dass die relative Feuchte alle drei Stunden schwankt. Neevel (1999: 97) wendet die dynamische Alterung bei 90 °C mit zyklischer Schwankung zwischen 80 % und 35 % relativer Feuchte zur Alterung seiner Proben aus dem Bereich der Tintenfraßforschung an. Michel, Geiger, Reichlin (2001: 88) verwenden für die künstliche Alterung von Klebstoffen ein Schnellbewitterungsgerät, das pigmentierte Proben und Klebstofffilme nahezu sechs Wochen lang zwischen 42 °C und 32 °C und 32 % und 68 % relativer Feuchte alterten. Simultan wurden die Proben einer UV-Bestrahlung in einem Wellenlängenbereich zwischen 290 nm und 400 nm ausgesetzt.

Für die Alterung von Klebstofffilmen werden in einem ersten Schritt die Bedingungen der Papierrestaurierung übernommen. Dies liegt nahe, da in einem Cellulosevlies Additive und Leimungssubstanzen, die dem Papier bei der Herstellung zugefügt werden, vorliegen. Diese Zusätze wechselwirken mit der Cellulose bei einer beschleunigten Alterung und sind mit den hier zu untersuchenden Klebstoffen vergleichbar, wenn sich ein Klebstofffilm in geringen Mengen auf oder in einem Pigmentgefüge als Konsolidierungsmittel befindet.

In Tabelle 11 sind die Bedingungen der verschiedenen *Alterungsreihen*, die in Klimaschränken (Heräus Vötsch VC 0020, HC 0020) durchgeführt wurden, dargestellt. Ein Klimaschrank realisiert sowohl eine vorgegebene Temperatur, als auch eine relative Feuchte. Die Proben wurden berührungsfrei in den Schrank gehängt. Alle Proben verblieben fünf Tage im Alterungsschrank, außer *Alterungsreihe 2*, die für sechs Tage gealtert wurde. *Alterungsreihe 1* wurde nicht im Klimaschrank, sondern im Wärmeschrank (Memmert), ebenfalls berührungsfrei, gealtert. Die Resultate der beschleunigten Alterung der Klebstofffilme ist im Anhang photographisch dokumentiert worden (s. Anhang 12.12), die Abb. 60 und 61 zeigen die Resultate der *Alterungsreihe 3* und 5.

<b>Alterungsreihe</b>	<b>Temperatur [°C]</b>	<b>relative Feuchte [%]</b>
1	93	10
2	90	30/85 (alle 3h alternierend)
3	80	65
4	70	50
5	30	85
6	98	30

Tabelle 11: Alterungsreihen der Klebstofffilme bei unterschiedlichen Einstellungen der Temperatur und der relativen Feuchte.

Die verschiedenen Alterungsbedingungen wirkten sich in unterschiedlichster Weise auf die Planlage, die Farbigkeit und die Größe der Klebstoffe aus, so dass von weiteren physikalischen und farbmtrischen Untersuchungsmethoden bislang Abstand genommen wurde. Zu diesem Zeitpunkt herrscht weder Klarheit darüber, welche Veränderungen als Bewertungskriterien zur Beurteilung der Langzeitstabilität herangezogen und welche Alterungsbedingungen repräsentativ für eine natürliche Alterung angesehen werden können. Die Auswirkungen durch leicht veränderte Temperatur- und Feuchte-Einstellungen sind zu erheblich, als dass eine Methode als eindeutig repräsentativ herangezogen werden kann.

*Alterungsreihe 1* entspricht der von Feller (1990: 66) gewählten Einstellung bei hoher Temperatur (93 °C) und geringer relativen Feuchte (10 %). Die Klebstofffilme veränderten sich visuell kaum, sie wurden lediglich leicht spröder. Dies deckt sich mit Fellers Ergebnissen in Bezug auf die modifizierten Celluloseether.

*Alterungsreihe 2* lehnt sich an die Methode von Käßberger (1998: 43) an, die auch für die Alterung von Tintenfraßproben gewählt wird. Die Klebstoffe veränderten sich erheblich in ihrer Planlage, Flexibilität und Farbe, so dass davon ausgegangen werden kann, dass eine alternierende relative Feuchte in Kombination mit einer erhöhten Temperatur eine zu extreme Bedingung ist, um für Klebstofffilme anwendbar zu sein. Eine starke Schrumpfung ging mit einer Verdunkelung bei Gelatine, Funori und JunFunori® einher.

Die ISO-Norm 5630, Part 3 (*Alterungsreihe 3*) beinhaltet eine Temperatur von 80 °C und eine relative Feuchte von 65 %. Die Klebstoffe veränderten sich sowohl farblich, als auch in



ihrer Planlage erheblich (s. Abb. 60). Gelatine und Hausenblase schrumpften zusammen, Funori und JunFunori® wurden zudem gelber. Methylcellulose und Klucel® wurden spröder. Auch diese Einstellung erscheint zu extrem, als dass sich aussagekräftige Messungen anschließen könnten, die als Auswahlkriterium für die Beurteilung der Langzeitstabilität heran gezogen werden können.

*Alterungsreihe 4* wurde in Anlehnung zu der ISO-Norm 5630 gewählt, allerdings mit moderateren Bedingungen (70 °C, 50 % relative Feuchte). Die Klebstofffilme zeigten eine leicht erhöhte Spannung, veränderten sich aber nicht wesentlich in der Farbe und Größe. Bei *Alterungsreihe 5* sollte der Einfluss einer erhöhten relativen Feuchte (85 %) bei moderater Temperatur (30 °C) beobachtet werden. Es zeigte sich, dass sich nicht die Farbigkeit, aber die Planlage und die Sprödigkeit veränderten. Alle Klebstoffe sind spröder und die Kanten sind aufgeworfen. Bei diesen Bedingungen traten sichtbare Veränderungen ein, ohne die Klebstofffilme zu zerstören (s. Abb. 61).

Für die letzte *Alterungsreihe 6* wurden die Bedingungen in Anlehnung an Reihe 1 variiert, indem bei hoher Temperatur (98 °C) die relative Feuchte auch angehoben wurde (30 %). Die Klebstofffilme veränderten ihre Form und Größe erheblich und schrumpften.

Bei einer relativ hohen Temperatur (*Alterungsreihe 1*) schienen die Klebstoffproben lediglich spröder zu werden. Die Bedingungen bewirkten keine drastischen Farb- und Formveränderungen. Ähnliche Resultate wurden bei moderaten Temperatur- und Feuchte-Einstellungen der *Alterungsreihe 4* und *5* beobachtet. Die Spannungen im Klebstofffilm wurden leicht erhöht, die Farbigkeit wurde allerdings nicht drastisch verändert. Starke Veränderungen in Bezug auf die Farbigkeit, die Größe und die Planlage zeigte die *Alterungsreihe 2* und etwas abgeschwächt die *Alterungsreihen 3* und *6*. Eine Kombination aus hoher Temperatur und erhöhter relativer Feuchte scheint die Klebstofffilme zu stark anzugreifen. Bei alternierenden Zyklen waren die Veränderungen noch stärker ausgeprägt. Eine erhöhte Feuchtigkeit in Kombination mit einer moderaten relativen Feuchte, wie es in *Alterungsreihe 5* vorgestellt ist, erscheint eine sinnvolle Alterungsmethode. Veränderungen der Größe und Planlage waren deutlich eingetreten, die Farbigkeit hat sich allerdings kaum verändert.

Hier schließt sich die Frage an, welche Veränderungen als Bewertungskriterium für die Beurteilung der Langzeitstabilität heran gezogen werden sollen. Es wird in Frage gestellt, ob eine farbliche Veränderung, meist eine Verdunkelung, wirklich ein Kriterium für die Auswahl eines Klebstoffs durch eine künstliche Alterung darstellt. Proteinhaltige Klebstoffe sind bei erhöhter Temperatur nicht farbstabil (Kolbe 1999: 56) und unterliegen dem Maillard-Effekt (Reilly 1982: 161, Falbe, Regitz 1992: 2605). Der Maillard-Effekt beschreibt die Reaktion zwischen reduzierenden Zuckerderivaten und Aminosäuregruppen, die Carbonyl-Amino-Gruppen bilden, die sich durch farbbegibende Komponenten, geringe Viskosität und

Geruchsveränderungen auszeichnen. Im Besonderen bei Funori und JunFunori®, die überwiegend aus Polysacchariden und Proteinen zusammengesetzt sind, könnte die Gelbfärbung auf den Maillard-Effekt zurückzuführen sein. Bei Gelatine und Hausenblase ist eine Gelbfärbung eher bei Aufstrichen auf Papier mit dem Maillard-Effekt in Zusammenhang gebracht worden. Farbveränderungen der Klebstofffilme, die durch die beschleunigte Alterung entstanden sind, müssen nicht zwangsläufig auch bei der natürlichen Alterung auftreten und stellen in diesem Zusammenhang unter Umständen ein Artefakt dar.

Da sich die Klebstoffe auf Grund ihrer chemischen Zusammensetzung erheblich unterscheiden, können derzeit nur Tendenzen der Langzeitstabilität der Klebstoffe formuliert werden. Die Methylcellulose ist ein form-und farbstabiler Film. Die Gelatine tendiert zu erhöhter Sprödigkeit. Relativ gut, abgesehen von den sehr drastischen Bedingungen der *Alterungsreihen 2, 3 und 6*, haben sich Funori und JunFunori® gehalten, die eine hohe Flexibilität bewiesen haben. Funori tendiert zu einer Veränderung der Farbigkeit, die Gelbfärbung nimmt teilweise noch zu. Hausenblase unterliegt höheren Spannungen, ist aber ansonsten farbstabil. Kluwel® ist sowohl farb-als auch formstabil. Allerdings fühlt sich der Film ungealtert eher wie ein Kunststofffilm an, der sehr weich und dehnbar ist. Daher fällt er aus der Reihe.

Die ungealterten Klebstofffilme unterschieden sich schon vor der Alterung voneinander. Funori und JunFunori® sind weich und elastisch, Gelatine und Hausenblase schon etwas spannungsreicher. Methylcellulose ist flexibel, aber nicht elastisch.

Weitere Untersuchungen sollten sich in Bezug auf die Alterungsbedingungen anschließen, wobei die *Alterungsreihe 5* bei 30 °C und 85 % relativer Feuchte als aussagekräftig erscheint und sich daran die Aufstellung der möglichen Untersuchungstechniken anschließen sollte. Dabei spielt möglicherweise die Dehnfähigkeit/Sprödigkeit der Klebstofffilme verstärkt eine Rolle.

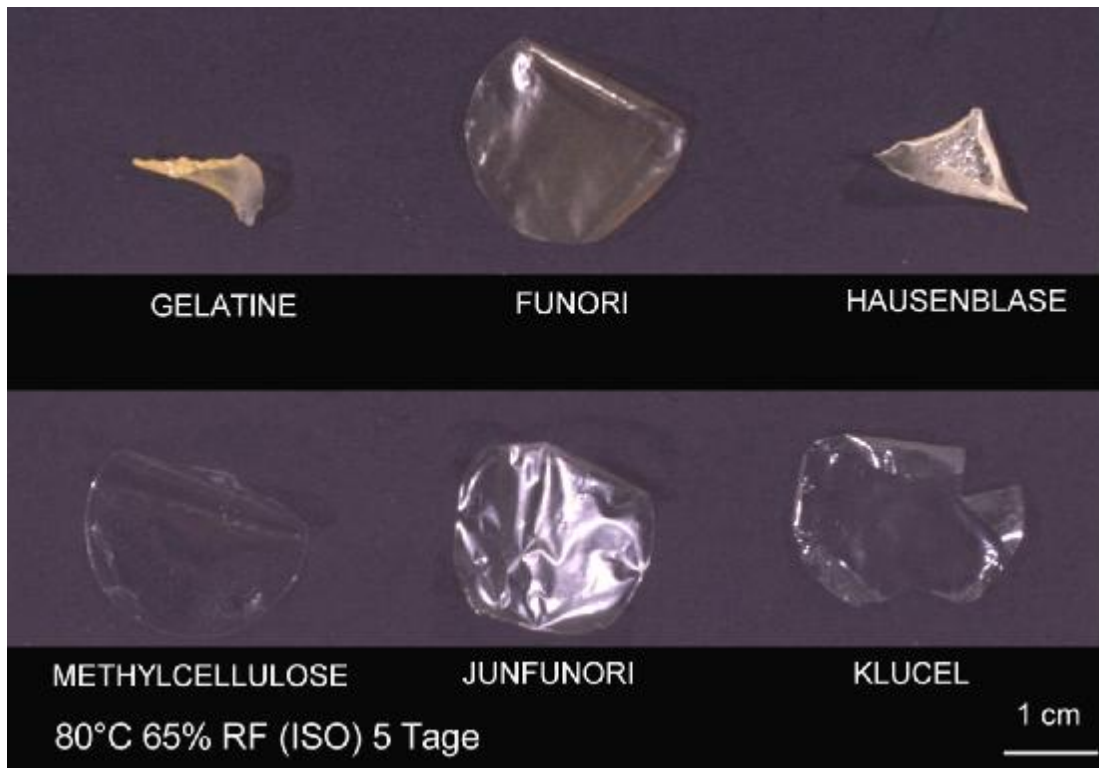


Abb. 60: Klebstofffilme nach beschleunigter Alterung bei 80 °C und 65 % relativer Feuchte für fünf Tage, diese Alterung entspricht der ISO-Norm 5630. Die Klebstofffilme haben sich erheblich in ihrer Planlage und Farbigkeit verändert (*Alterungsreihe 3*).

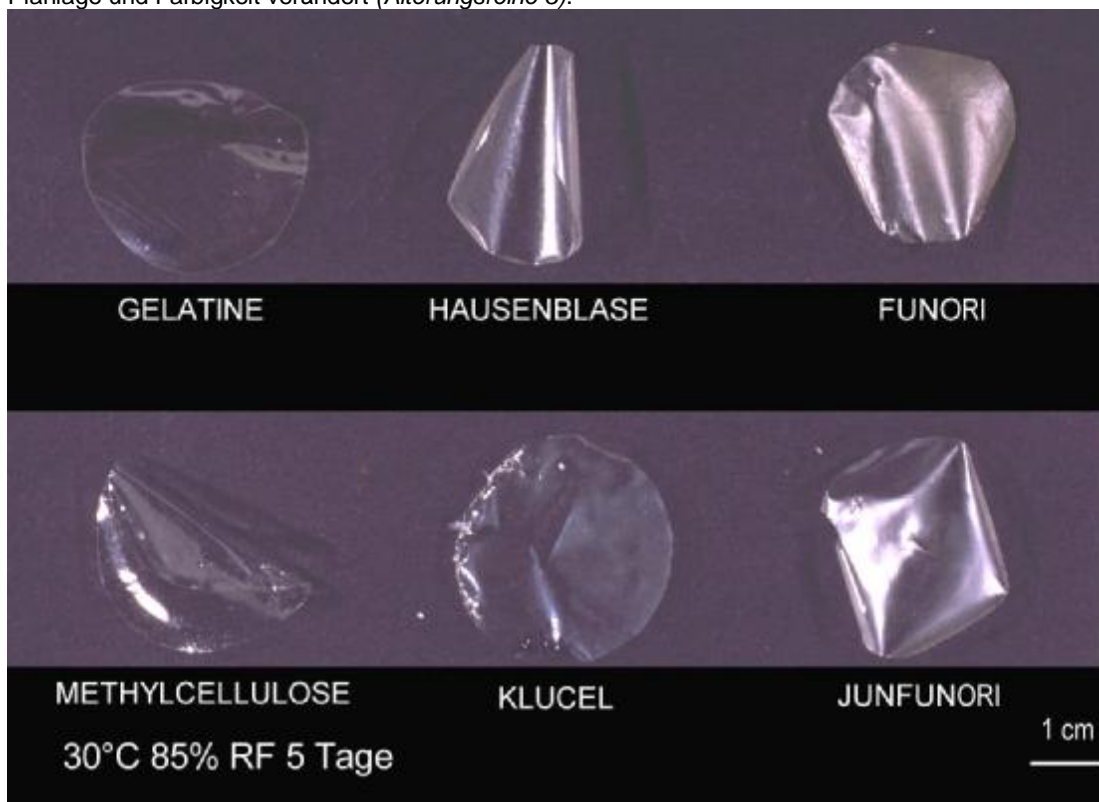


Abb. 61: Klebstofffilme nach der beschleunigten Alterung bei 30 °C und 85 % relativer Feuchte für fünf Tage. Die Klebstofffilme sind spröder geworden, könnten aber für weitere mechanische Untersuchungen verwendet werden (*Alterungsreihe 5*).

## 2.5 Viskosität und Klebkraft der Klebstoffe

Die Messung zur Viskosität dient der Beschreibung der Fließeigenschaften von Klebstoffen. Die Einflussgrößen der Viskosität auf die Möglichkeit des Vernebelns und die Auswirkungen der Viskosität auf die sich anschließende Penetrationseigenschaft des Klebstoffs als Aerosol in eine poröse Malschicht sollen näher beleuchtet werden.

Die Viskosität beschreibt den Fließwiderstand von Flüssigkeiten und von kolloidalen Systemen, wie es Klebstoffe darstellen (Habenicht 1997: 516). Das Fließen eines Stoffes stellt man sich in laminaren Schichten vor, die gegeneinander verschoben werden. Die Kraft für das Verschieben einer laminaren Schicht wird als Scherkraft bzw. Schubspannung ( $t$ ) bezeichnet. Daneben ist die Schergeschwindigkeit ( $D$ ) eine relevante Größe. Die dynamische Viskosität ( $\eta$ ) definiert sich als  $\eta = t/D$ . Die dynamische Viskosität  $\eta$  kann als das zeitaufgelöste Ansteigen und Abfallen von Druck beim Durchfließen einer Flüssigkeit durch eine Kapillare (Kapillarviskosimeter) oder bei der Belastung beim Rühren einer Flüssigkeit (Rotationsviskosimeter) beschrieben werden. Die dynamische Viskosität  $\eta$  wird in Pascalsekunden (Pa-s), eine Druckeinheit pro Sekunde, angegeben. Für Klebstoffe gelten Viskositäten im Bereich von mPa-s<sup>6</sup>. Je größer der Kraftaufwand ist, um die laminaren Schichten zu verschieben, desto zähfließender, also höher viskos, ist die Flüssigkeit. Und je geringer der Kraftaufwand, desto niedrig viskos ist die Flüssigkeit (Falbe, Regitz 1992: 4937).

Ein Rotationsviskosimeter wird für die Untersuchung von Klebstoffen bevorzugt, da die Klebstoffe das Kapillarviskosimeter auf Grund des geringen Durchmessers verstopfen können (Feller, Wilt 1990: 61). Ein Rotationsviskosimeter besteht aus einem sich rotierenden Zylinder, der in die Klebstofflösung getaucht ist. Der Zylinder hat zehn Geschwindigkeitsstufen, die als Drehzahlen bezeichnet werden. Drehzahl 1 entspricht 20 Umdrehungen/min und Drehzahl 10 entspricht 1200 Umdrehungen/min.

Flüssigkeiten werden in newtonsche und nicht-newtonsche unterteilt. Newtonsche Flüssigkeiten weisen ungeachtet der Belastung, die auf sie einwirkt, immer eine gleichbleibende Viskosität auf. Nur die Konzentration und die Temperatur der Lösung beeinflussen die Viskosität. Der Widerstand des sich drehenden Zylinders eines Rotationsviskosimeters ist immer gleichbleibend, was in einer Geraden bei der grafischen Darstellung der Viskosität resultiert (s. Abb. 62) (Horie 1987: 66).

---

<sup>6</sup> Seit 1978 gelten die Bezeichnungen Poise (P) und Centipoise (1cp = 1mPa-s) nicht mehr.

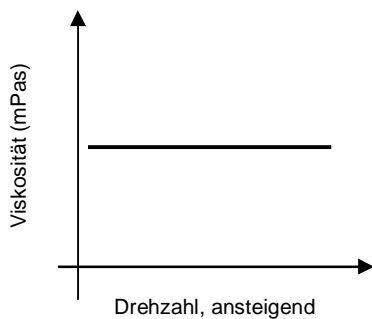


Abb. 62: Viskositätskurve einer newtonschen Flüssigkeit, bei der die Viskosität, ungeachtet der Drehzahl des rotierenden Zylinders, gleichbleibend ist.

Nicht-newtonsche Flüssigkeiten zeichnen sich dadurch aus, dass die Viskosität abhängig von der Drehzahl ist. Je höher die Drehzahl, also je höher die Belastung auf die Flüssigkeit ist, desto geringer wird die Viskosität. Bei den hier zu untersuchenden Klebstoffen spielt eine weitere Charakterisierung der nicht-newtonschen Flüssigkeiten eine Rolle. Die Strukturviskosität beschreibt die Abnahme der Viskosität bei erhöhter Belastung durch die gleichmäßige Ausrichtung von vormals ungeordneten Molekülaufbauten, die nach der Messung der Viskosität geordneter mit geringerer Viskosität vorliegen. In Abb. 63 a) ist die Viskositätskurve einer nicht-newtonschen strukturviskosen Flüssigkeit dargestellt, die typisch für gelbildende Klebstoffe, wie Gelatine, Hausenblase, Funori und JunFunori® ist. Abb. 63 b) zeigt die Viskositätskurve einer nicht-newtonschen strukturviskosen Flüssigkeit, wie es den Ceeluloseethern eigen ist.

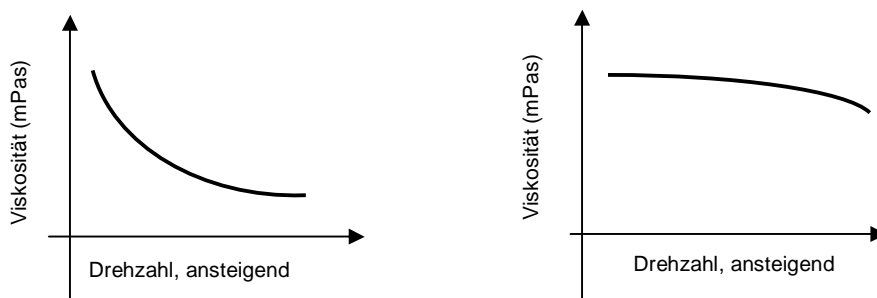


Abb. 63: schematische Darstellung von Viskositätskurven von einer nicht-newtonschen strukturviskosen Flüssigkeit, bei der die Viskosität bei höherer Drehzahl abnimmt (nach: Horie 1987: 67).

Gelatine und Hausenblase weisen eine Tripel-Helix als Grundgerüst der Polypeptide auf. Diese Struktur wird als Knäuelstruktur bezeichnet. Funori und JunFunori® gehören der Gruppe der Polysaccharide an, die ebenso ungeordnete Molekül-Knäuel aufweisen. Te Nijenhuis (1997: 4) fasst Proteine, wie Gelatine und Hausenblase, und Polysaccharide, wie Funori und JunFunori®, in die Begriffsgruppe der Biopolymere mit einer charakteristischen

Knäuelstruktur zusammen. In Abb. 64 ist der Molekülaufbau dieser Biopolymere grafisch dargestellt. Wird die ungeordnete Knäuelstruktur bei einer Viskositätsmessung durch den sich drehenden Zylinder eines Rotationsviskosimeters in Bewegung gesetzt, ordnen und richten sich die vormals heterogen vorliegenden Molekül-Knäuel gleichmäßig aus, wodurch die Viskosität abfällt. Nach einer Zeit der Ruhe verknäueln sich die Biopolymere wieder und liegen ungeordnet vor. Die Viskosität steigt wieder an.

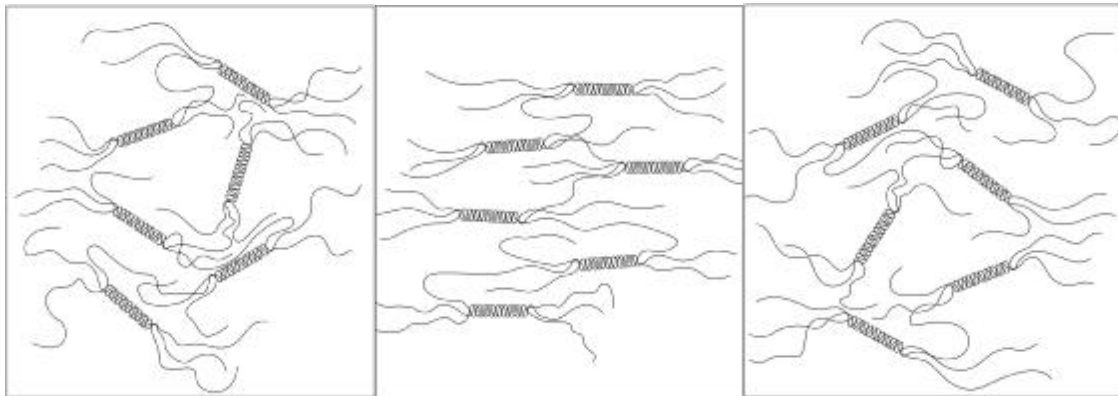


Abb. 64: schematische Darstellung von Biopolymeren, die eine Knäuelstruktur aufweisen, wie es bei Gelatine, Hausenblase, Funori und JunFunori® der Fall ist. Bei Belastung richten sich die Moleküle aus, liegen nach einer Zeit der Ruhe dann wieder ungeordnet vor (in Anlehnung an: Te Nijenhuis 1997: 4).

Die Viskosität der Celluloseether wird vorrangig vom durchschnittlichen Polymerisationsgrad ( $\overline{DP}$ ) und vom molekularen Gewicht bestimmt. Als Polymerisationsgrad wird die durchschnittliche Anzahl der Monomere oder Grundbausteine bezeichnet, aus der eine polymere Verbindung besteht. Daraus errechnet sich das Molekulargewicht bzw. die Molmasse, das die Summe der vorliegenden Atomgewichte der Elemente darstellt. Bei langkettigen synthetischen Polymeren wird keine exakte Mengenangabe gemacht, sondern es wird die mittlere Molmasse in g/mol angegeben. Eine Methylcellulose 400 beispielsweise, weist eine Viskosität von 400 mPa·s bei 21 °C und einer Konzentration von 2 % Massengehalt auf. Der  $\overline{DP}$  liegt bei 220 und die mittlere Molmasse beträgt 41.000 g/mol (DOW Chemical 2002: 18). Je höher das Molekulargewicht, desto höher ist auch die Viskosität. Eine weitere Einflussgröße auf die Viskosität ist die Konzentration eines angesetzten Klebstoffes. Je höher konzentriert die Klebstofflösung angesetzt wird, desto höher viskos ist diese Flüssigkeit. Bei Celluloseethern ist das strukturviskose Verhalten weniger ausgeprägt als bei den oben beschriebenen Biopolymeren, was sich an dem weniger starken Viskositätsabfall bei erhöhter Belastung bemerkbar macht. Aus diesem Grund fällt die Viskositätskurve bei erhöhter Belastung auch nur leicht ab (s. Abb. 63 b). Je niedrig viskos ein Celluloseether angesetzt wird, desto mehr nähert er sich den Eigenschaften einer newtonschen Flüssigkeit an (DOW Chemical 2002: 16). Von allen Klebstofflösungen wurden die Viskositäten in einem Rotationsviskosimeter (Thermo Haake, VT 500/501) gemessen. Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zu

erzielen, wurden 2 %ige Klebstofflösungen in Anlehnung an DIN EN 12092 hergestellt. Nur im Falle von JunFunori® wurde eine Konzentration von 1 % gewählt. JunFunori® bei einer Konzentration von 2 % weist eine so hohe Viskosität auf, dass nicht derselbe Durchmesser des Zylinders verwendet werden konnte, was die Vergleichbarkeit der Messergebnisse erschwerte. 40ml der jeweiligen Klebstoffflüssigkeit wurde in das Viskosimeter gefüllt und eine Temperatur von 23 °C eingestellt. Alle Klebstoffe wurden vor der eigentlichen Messung einer maximalen Belastung von 1200 Umdrehungen/min für 30 Sekunden ausgesetzt, um dann bei der niedrigsten Belastung von 20 Umdrehungen/min zu starten und die Messungen bis zur maximalen Umdrehung durchzuführen. Diese Vorausbelastung wurde in Anlehnung an die Arbeit von Michel, Geiger, Reichlin (2001: 56) vorgenommen, um das starke Abfallen der Viskosität auf Grund der Strukturviskosität abzuschwächen.

Abb. 65 zeigt die Viskositätskurven aller Klebstoffe. Alle zeigen die Eigenschaften von nicht-newtonschen und strukturviskosen Flüssigkeiten, da die Viskosität, in mPa·s angegeben, bei erhöhter Drehzahl abfällt. Funori weist bei einer Konzentration von 2 % bei geringster Belastung die höchste Viskosität auf, gefolgt von JunFunori®, Methylcellulose, Hausenblase, Gelatine und Klucel®. Die Viskosität von JunFunori® wurde nur bei einer Konzentration von 1 % gemessen, um denselben Durchmesser des Zylinders für die Messung zu verwenden, da JunFunori® eine sehr hohe Viskosität aufweist.

Das strukturviskose Verhalten ist am ausgeprägtesten bei Funori und JunFunori® zu beobachten, was an einem starken Abfallen der Viskositätskurve von über 1000 bzw. 1300 mPa·s auf ca. 100 mPa·s zu sehen ist. Die gemessene Methylcellulose trägt die Bezeichnung Methylcellulose 400. Die Zahl hinter der genauen Bestimmung des Celluloseethers beschreibt die durchschnittliche Viskosität, die, wie man in der Abbildung sehen kann, bei geringster Belastung 400 mPa·s beträgt.

Das hier verwendete Klucel® G hat eine mittlere Molmasse von 370.000 g/mol und eine Viskosität zwischen 75 mPa·s und 400 mPa·s bei einer Konzentration von 2 % Massegehalt, gelöst in Ethanol<sup>7</sup>. Basierend auf diesen Angaben müsste die gemessene Viskosität höher sein. Vermutlich liegt die geringere Viskosität an den ohnehin variierenden Angaben über die Viskosität, so dass die Literaturwerte nicht nachgemessen werden können.

---

<sup>7</sup> Aqualon Produktinformation über Klucel®, Hydroxy Propylcellulose, Physical and Chemical Properties, 1999

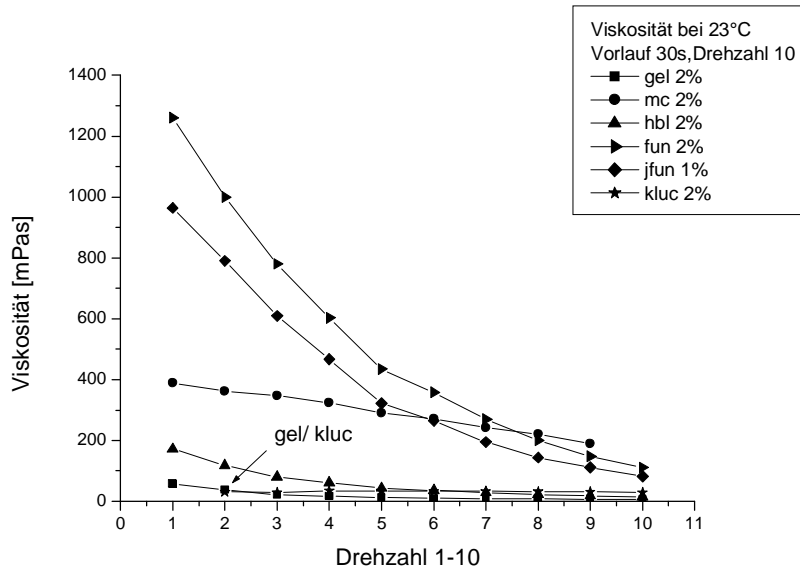


Abb. 65: Viskositätskurven aller Klebstoffe mit einem Massegehalt von 2 %, außer JunFunori® mit 1%. Alle Klebstoffe zeigen strukturviskoses Verhalten. Die Kurven von Klucel® und Gelatine liegen mit geringen Werten unter 100 mPa-s übereinander.

Abb. 66 zeigt die Viskosität von Funori und JunFunori® im Vergleich, wenn beide Klebstoffe mit 2 % Massegehalt zubereitet werden. Bei gleicher Konzentration weist JunFunori® bei kleinster Umdrehung eine Viskosität von nahezu 12000 mPa-s auf, die dann bei höherer Umdrehung abfällt. Funori hat eine Viskosität von knapp über 1300 mPa-s, die bei steigender Belastung weiter abfällt. Der höhere Polysaccharidanteil bei JunFunori® im Gegensatz zu Funori könnte für die wesentlich höhere Viskosität von JunFunori® verantwortlich sein. Bzw. könnte der höhere Proteinanteil von Funori die Viskosität herabsetzen, da die proteinhaltigen Klebstoffe durchwegs geringere Viskositäten aufweisen.

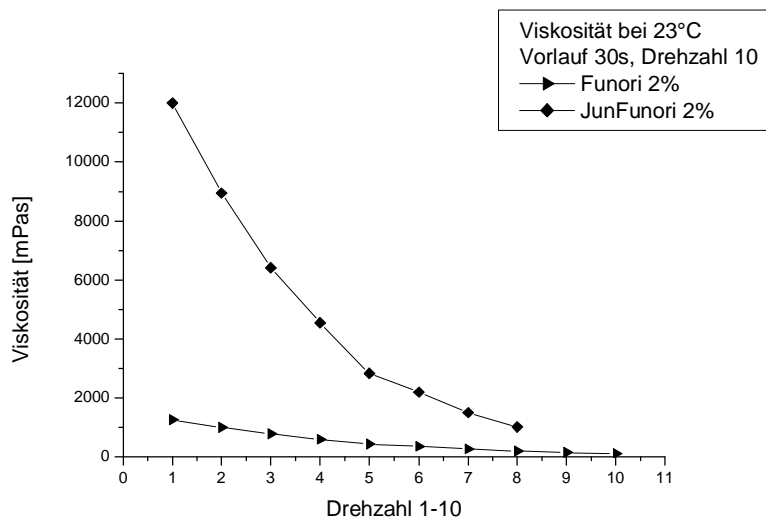


Abb. 66: Viskositätskurve von Funori und JunFunori®. JunFunori® (2 % Massegehalt) zeigt eine sehr hohe Viskosität auf.



Die Einflussgröße des  $\overline{DP}$  der Methylcellulose wurde oben schon angedeutet. Die Methylcellulose 400 weist einen  $\overline{DP}$  von 220 und eine mittlere Molmasse von 41.000 g/mol auf. Im Vergleich dazu weist eine Methylcellulose 50 einen  $\overline{DP}$  von 110 und eine mittlere Molmasse von 20.000 g/mol auf. Das molekulare Gewicht beeinflusst die Viskosität dahingehend, dass je höher das molekulare Gewicht ist, desto höher ist auch die Viskosität. Abb. 67 zeigt die Viskositätskurve einer Methylcellulose 400, die bei geringster Drehzahl eine Viskosität von ca. 400 mPa·s aufweist und bei ansteigender Belastung auf ca. 200 mPa·s abfällt. Die Methylcellulose 50 hat eine Anfangsviskosität von ca. 70 mPa·s, die bei ansteigender Belastung leicht abfällt.

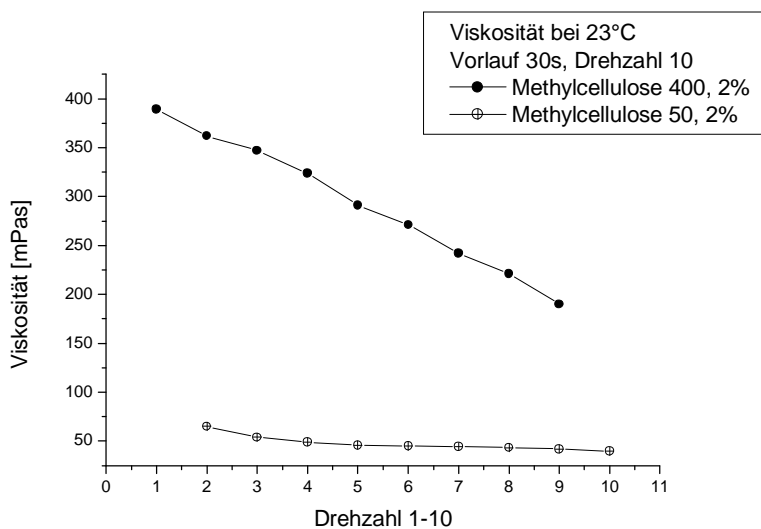


Abb. 67: Viskositätskurven von Methylcellulose 400 und 50 mit 2 % Massengehalt. Bei einem geringeren Polymerisationsgrad (MC 50) verringert sich die Viskosität.

Das Vernebeln eines Klebstoffs ist von dessen Konzentration abhängig, wie empirisch ermittelt werden kann. Die maximalen Konzentrationen der Klebstoffe, die mit dem AGS 2000 und dem Nebulizer zerstäubt werden können, sind in Tabelle 12 angegeben. Klucel® kann im AGS 2000 nicht vernebelt werden. Damit bestätigen die Ergebnisse der Viskositätsmessungen den Zusammenhang zwischen der Konzentration eines Klebstoffs und der Möglichkeit des Vernebelns.

Klebstoff	Maximale Konzentration [%] AGS 2000	Maximale Konzentration [%] Nebulizer
Gelatine	1	5
Methylcellulose	0,2	0,8
Hausenblase	1	5
Funori	0,2	0,8
JunFunori®	0,1	0,7
Klucel®	-	0,7

Tabelle 12: Maximale Konzentrationen der Klebstoffe, die im AGS 2000 und im Nebulizer vernebelt werden können. Klucel® kann im AGS 2000 nicht vernebelt werden. Gelatine und Hausenblase können mit den höchsten Konzentrationen vernebelt werden.

Gelatine und Hausenblase können mit den höchsten Konzentrationen sowohl im AGS 2000 als auch im Nebulizer vernebelt werden. Diese beiden Klebstoffe weisen eine geringe Viskosität auf. Die Methylcellulose und Funori können in ähnlichen Konzentrationen vernebelt werden, was der gemessenen Viskosität entspricht. JunFunori® kann nur bei noch geringeren Konzentrationen zerstäubt werden, da auch die Viskosität extrem hoch ist. Klucel® fällt bei dieser Betrachtung aus dem Rahmen, da die Möglichkeit des Vernebelns bei einem in Ethanol gelösten Klebstoff stärker von der geringen Oberflächenspannung bestimmt wird, als durch die angesetzte Konzentration. Ethanol weist eine reduzierte Oberflächenspannung im Gegensatz zu Wasser auf und daher können sich schwerer Tröpfchen aus der Flüssigkeitsoberfläche bei der Aerosolbildung abschnüren (s. Kapitel 1.5, S. 15).

Für alle Klebstoffe, außer dem Sonderfall Klucel®, beeinflusst demnach die Viskosität die Möglichkeit des Vernebelns. Je höher viskos eine Flüssigkeit, desto geringer muss die Konzentration des Klebstoffs gewählt werden, um diesen zu vernebeln.

Betrachtet man sich die hohen Viskositäten von Funori und JunFunori® müsste man allerdings annehmen, dass sie nur bei noch viel geringeren Konzentrationen oder gar nicht zu vernebeln sind. Diesen Klebstoffen mit einem hohen Polysaccharidanteil kommt jedoch das strukturviskose Verhalten zugute. Die hohe Belastung auf die Flüssigkeit, was die Aerosolbildung durch die Ultraschallwellen oder die hohe Geschwindigkeit im Nebulizer darstellen, bewirkt eine Ausrichtung der Knäuelstruktur, wodurch die hohe Viskosität überwunden werden kann. Ein Vernebeln von JunFunori® ist trotz der 10fach höheren Viskosität im Vergleich zu den anderen Klebstoffen möglich, was an den strukturviskosen Eigenschaften dieses Klebstoffs liegt.

Die Viskosität bestimmt vorrangig die Konzentration, mit der ein Klebstoff in einem Ultraschall-oder Druckluft betriebenen Aerosolgenerator vernebelt werden kann. Diese Aerosolgeneratoren erzeugen die Aerosole klebstoffunabhängig, da ungeachtet des zu vernebelnden Klebstoffs immer eine vergleichbare Volumenverteilung vom jeweiligen Aerosolgenerator produziert wird (s. Kapitel 2.1, S. 58). Dieser klebstoff unabhängige Aerosolbildung bewirkt, dass eine höhere Konzentration eines Klebstoffs, der vernebelt werden soll, eine Erhöhung an Klebstoff in einem gebildeten Aerosolpartikel nach sich zieht. In einem Gelatine-oder Hausenblasepartikel liegt relativ mehr Klebstoff vor, als in einem Funori-oder JunFunori®-Partikel, da die erstgenannten Klebstoffe bei höheren Konzentrationen vernebelt werden können. Diese Konzentrations abhängigen Klebstoffanteile in einem Aerosolpartikel bestimmen letztlich die Klebkraft eines Aerosols,

wenn das Lösungsmittel verdampft ist. Die Viskositätsmessungen geben derzeit keinen Hinweis auf die Penetrationseigenschaften eines Klebstoffs, da die Viskosität sich vorrangig auf die Konzentration des zu vernebelnden Klebstoffs und daraus resultierend auf die Klebkraft auswirkt. In der Literatur wird wiederholt beschrieben (Ream 1995: 27), dass die Viskosität der Klebstoffe ein Kriterium in Bezug auf die Penetration ist. Im Falle der Aerosole kann dies nicht bestätigt werden. Bei Klebstoffen, die zur Festigung mit dem Pinsel aufgetragen werden, spielt die Viskosität im Gegensatz zu den Aerosolen sicher eine Rolle.

## 2.6 Brechungsindex der Klebstoffe

Die Klebstoffe werden als Aerosol auf bunte und unbunte Pigmente aufgetragen. Der Klebstoff soll das Pigment benetzen und an der Stelle der kürzesten Entfernung zum daneben liegenden Pigment eine Klebstoffbrücke aufbauen. Eine mögliche Beschichtung des Pigments mit einem dünnen Klebstofffilm könnte auf Grund des Brechungsindex des jeweiligen Klebstoffs die Farbwirkung beeinflussen. Es stellt sich die Frage, ob die unterschiedlichen Brechungsindizes der Klebstoffe einen Einfluss auf die Farbwirkung der darunter liegenden Pigmente darstellen, wenn es zu einer Beschichtung kommen sollte. Sowohl die Klebstoffe als auch die Pigmente zeichnen sich durch unterschiedliche Brechungsindizes aus.

Der Brechungsindex ( $n$ ) beschreibt die Differenz der Durchlässigkeit von Licht durch zwei optisch verschieden dichte Medien. Wenn zum Beispiel Licht auf eine Glasplatte fällt (s. Abb. 68), passiert der Lichtstrahl die Luft, ein optisch dünnes Medium, und gelangt weiter durch die Glasplatte, einem im Vergleich zur Luft optisch dichteren Medium. Der Lichtstrahl wird zu einem kleinen Teil reflektiert, der größere Teil gelangt weiter durch das Glas. An der Grenzfläche Luft zu Glas wird der Lichtstrahl zum Lot des Einfallswinkels gebrochen und abhängig von der Differenz der Brechungsindizes der beiden Medien abgelenkt (Römpf online 2004 „Refraktion“).

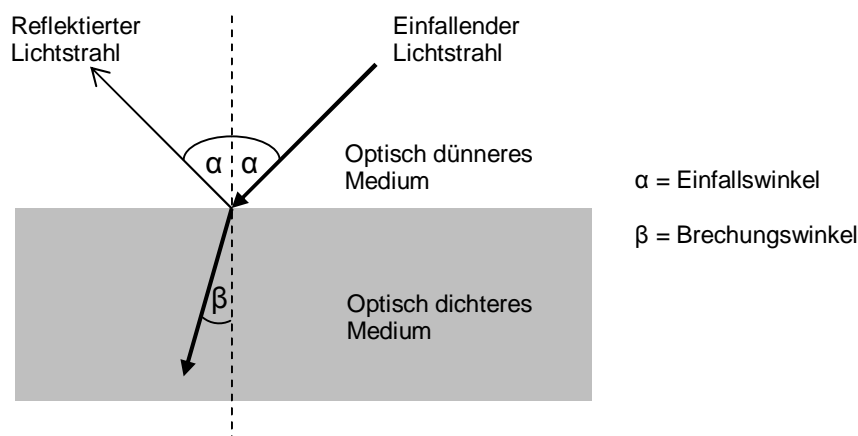


Abb. 68: Brechung bzw. Refraktion eines Lichtstrahls beim Übergang vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium.

Das optisch dünnste Medium, das Vakuum, wird mit dem Wert 1 gleichgesetzt und dient als Referenz zu allen anderen Medien. Da die Luft dem Vakuum hinsichtlich der optischen Dichte ähnlich ist, wird Luft auch als Wert 1 definiert. Je größer der Unterschied der

Brechungsindizes zwischen zwei optischen lichtdurchlässigen Medien ist, desto stärker nimmt das menschliche Auge diesen Unterschied als Trübung, Schleier oder als optisches Phänomen wahr.

Der Brechungsindex ist von der Temperatur des zu messenden Mediums, der Konzentration einer Lösung und von der Wellenlänge, unter der der Brechungsindex ermittelt wird, abhängig. Da kurzwelliges Licht stärker gestreut wird als langwelliges und sich somit auf den Brechungsindex auswirkt, muss bei einer Messung des Brechungsindex neben der Untersuchungsmethode und der Temperatur auch die Lichtquelle benannt werden, um Ergebnisse vergleichen zu können.

Angaben zu den Brechungsindizes, der hier zu untersuchenden Klebstofflösungen, wurden in der Literatur nur teilweise gefunden, so dass auf eigene Untersuchungen zurückgegriffen wird. Die Werte von Pigmenten können der Literatur entnommen werden (Wülfert 1999: 222).

Die Untersuchungen zur Bestimmung des Brechungsindex wurden mit einem Abbe-Refraktometer (Carl Zeiss, Germany) bei einer Temperatur von 21° C und einem Licht der Wellenlänge von 589 nm (Natrium-Lampe) durchgeführt (s. Anhang 12.13). In Tabelle 13 sind die errechneten Brechungsindizes angegeben.

<b>Klebstoff</b>	<b>Lösungsmittel</b>	<b>Brechungsindex</b>
Gelatine	wässrig	1,523
Methylcellulose	wässrig	1,473
Hausenblase	wässrig	1,493
Funori	wässrig	1,433
JunFunori®	wässrig	1,533
Klucel®®	alkoholisch	1,572
Wasser*		1,333
Ethanol*		1,362

Tabelle 13: Brechungsindex-Werte liegen zwischen 1,433 und 1,533 (wässrig) und bei 1,572 (alkoholisch)  
 \* Literaturwert Wasser: 1,333, Literaturwert Ethanol: 1,3617 (Römpp online 2004 „Refraktion“)

Der Einfluss der Temperatur zur Bestimmung des Brechungsindex wurde in einer weiteren Versuchsreihe untersucht, da die Klebstoffe Gelatine und Funori in den hohen Konzentrationen (s. Anhang 12.13) auf 38 °C erwärmt wurden, damit sie niedrig viskos sind. Exemplarisch wurde der Brechungsindex von Methylcellulose mit einem Massegehalt von 5 % bei ansteigender Temperatur mit dem Abbe-Refraktometer gemessen (s. Tabelle 14). Der Brechungsindex veränderte sich bei ansteigender Temperatur von 20 °C bis 35 °C nur in der dritten Stelle hinter dem Komma, und somit kann der Einfluss der Temperatur als sehr gering eingeschätzt werden. Am stärksten variierte er bei Ethanol, was womöglich am schnelleren Verdampfen des Lösungsmittels liegt.

<b>Brechungsindex bei ansteigender Temperatur von Methylcellulose (MC), Wasser und Ethanol</b>						
	<b>20 °C</b>	<b>25 °C</b>	<b>28 °C</b>	<b>30 °C</b>	<b>32 °C</b>	<b>35 °C</b>
<b>MC 5 %</b>	1,341	1,342	1,341	1,341	1,340	1,340
<b>Wasser</b>	1,333	1,333	1,333	1,333	1,332	1,332
<b>Ethanol</b>	1,362	1,360	1,359	1,359	1,358	1,357

Tabelle 14: Brechungsindex von Methylcellulose mit 5 % Massengehalt wird mit dem Abbe-Refraktometer bei ansteigenden Temperaturen gemessen, daneben auch die Werte von Wasser und Ethanol.

Im Vordergrund der Diskussion um den Brechungsindex steht die Frage, ob die größten Unterschiede zwischen den Brechungsindex-Werten von 1,433 von Funori und 1,533 von JunFunori® im wässrigen Lösungsmittel und 1,572 von Klucel® in Ethanol die Reflexion am Klebstofffilm dahingehend verändert, dass sie für das Auge sichtbar ist.

Arbeiten aus der Gemälderestaurierung wurden herangezogen, die sich mit transparenten Firnissschichten auf ölgebundenen Pigmentschichten befassen. De la Rie (1987: 6) geht von Firnisdicken von ca. 20 µm aus, wohingegen Klebstofffilme durch Aerosolaufträge nur einige Hundert Nanometer dick sind (s. Kapitel 1.11.2, S. 42).

Feller (1957: 1143) vergleicht traditionelle und zu seiner Zeit moderne Firnismaterialien hinsichtlich des Brechungsindex. Feller zeigt, dass die unterschiedlichen Brechungsindizes von verschiedenen Firnissen die Reflexionseigenschaften nur so gering verändern, dass das Auge die Unterschiede visuell nicht wahrnehmen kann. Seine Theorie leitet er von der vereinfachten Fresnelschen Gleichung bei senkrecht einfallendem Licht und dem reflektierten Licht in Abhängigkeit des Brechungsindex ab. Die Formel lautet:

$$I = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

$I$  entspricht der Intensität des reflektierten Lichts und  $n$  entspricht dem Brechungsindex des transparenten Mediums. Die Intensität kann als die *Ablenkung* des Lichtstrahls beschrieben werden. Je größer die Differenzen dieser *Ablenkung*, desto stärker sichtbar ist dies für das Auge, was oben als Schleier oder Trübung bezeichnet wurde.

Ein Brechungsindex von  $n=1,433$  bei Funori bedeutet nach der Fresnelschen Gleichung eine prozentuale Reflexion von 3,1 %. Für JunFunori®, der einen Brechungsindex von  $n=1,533$  besitzt, bedeutet dies eine prozentuale Reflexion von 4,4 %. Klucel® in Ethanol hat einen Brechungsindex von  $n=1,572$ , was eine prozentuale Reflexion von 4,9 % ergibt. Die Differenz der prozentualen Reflexionen zwischen den beiden Extremen von Funori und Klucel® liegt bei 1,8 %. Feller (1957: 1143) argumentiert, dass absolute Differenzen im Bereich von 1 % bis 2 % mit dem Auge nicht unterscheidbar sind.

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die Unterschiede der Brechungsindizes der verschiedenen Klebstoffe die Reflexionen von auftreffendem Licht auf mögliche Klebstoffbeschichtungen nicht in dem Maße verändern, als dass sie für das Auge sichtbar wären. Das bedeutet, dass das Licht eine mögliche Klebstoffschicht auf einem Pigment passiert, aber für das Auge nicht sichtbar abgelenkt wird. Der Brechungsindex und die Reflexionseigenschaften des Pigments sind vorrangig ausschlaggebend für die Farbwirkung und nicht die Unterschiede der Brechungsindizes der aufgetragenen Klebstoffe.

Berns und de la Rie (2002: 215) gehen der Frage des Einflusses des Brechungsindex verschiedener Firnisarten weiter nach und selbst mit hohem instrumentellen Aufwand kommen sie zu dem Schluss, dass der Brechungsindex von verschiedenen Firnissen, die zudem wesentlich dicker als Konsolidierungsaufträge sind, auf Gemäldeoberflächen die Reflexionseigenschaften nicht visuell verändert. Dies zeigt, dass die vereinfachte Fresnelsche Gleichung ihre Gültigkeit hat.

## 2.7 Schlussfolgerung in Bezug auf die Aerosolbehandlung

Die Aerosolgeneratoren bestimmen die Partikelverteilung ungeachtet der vernebelten Klebstoffe. Der Nebulizer produziert Partikel in Größen zwischen 2  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$ , gefolgt vom AGS 2000, der Partikel in einer Größe von  $\varnothing$  5  $\mu\text{m}$  produziert. Der Mini-Vernebler arbeitet unregelmäßig und produziert Partikel zwischen 4  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$ . Obgleich die Partikel des Nebulizers am kleinsten sind, schließt sich dieses Gerät für eine Konsolidierung oftmals aus, da der Gas-Partikel-Strom zu hoch ist und die Gefahr besteht, dass Pigmente weggetragen werden. Die Partikel der gemessenen Geräte sind aber durchwegs klein genug, um zwischen Pigmente mit Größen über 5  $\mu\text{m}$  einzudringen und Klebstoffbrücken auszubilden. Die Variante von Lawson (2000: 74), die den Nebulizer an eine Aquariumpumpe anschließt, weist, basierend auf den Angaben in ihrer Publikation, einen geringen Gas-Partikel-Strom auf. Dies wird sich jedoch unweigerlich auf eine Vergrößerung der Aerosolpartikel auswirken, da die geringe Größe der Aerosole beim Nebulizer, der an einen Kompressor angeschlossen ist, vorrangig darauf zurückzuführen ist, dass das Klebstoff-Luft-Gemisch mit hoher Luftgeschwindigkeit gegen die Prallplatte stößt. Eine Aquariumpumpe erzeugt eine geringere Luftgeschwindigkeit als ein Kompressor. Die Aerosolpartikel sind zwar nicht gemessen worden, aber, basierend auf der technischen Funktionsweise des Nebulizers, ist dieser Schluss zulässig.

Die Varianten von Fischer (2003: 134) und Maheux, McWilliams (1995: 20) entsprechen dem Aufbau des CCI-Misters, deren Aerosolgrößen ebenfalls nicht gemessen wurden. Diese drei Vernebler-Systeme sind mit den Daten des AGS 2000 zu vergleichen, da der CCI-Mister dem Aufbau des AGS 2000 am nächsten kommt.

Die Farbigkeit und der Brechungsindex der Klebstoffe haben keinen Einfluss auf die Farbwirkung bei einer Beschichtung der Pigmentschicht, da nach dem Lambert-Beerschen Gesetz bei sehr dünnen Klebstofffilmen keine Farbigkeit mehr vorliegt. Des Weiteren sind die Unterschiede des Brechungsindex zwischen den Klebstoffen zu gering, als dass sie eine Auswirkung auf den Farbeindruck haben könnten.

Auch das Streuvermögen der Klebstofffilme hat keinen negativen Einfluss auf das Streuvermögen der Pigmentschicht, da sich die Klebstoffe an die Oberfläche anpassen und die Reflexionseigenschaften der Pigmentschicht nicht beeinflussen. Funori und JunFunori® weisen ein hohes Streuvermögen auf, was hinsichtlich des Einflusses auf die Farbwirkung mit einer hohen diffusen Reflexion zu vergleichen ist und somit die Reflexionseigenschaften der porösen Pigmentschicht nicht entgegenstehen. Gelatine bildet nur auf glatten Untergründen einen glatten und glänzenden Klebstofffilm auf, was bei der Konsolidierung einer Pigmentschicht auf einem glatten Untergrund, wie Glas, die Gefahr in sich bergen



kann, einen glänzenden Klebstofffilm zu hinterlassen. Auf einer rauen Oberfläche, wie einer Pigmentschicht, passt sich der Gelatine-Klebstofffilm allerdings an und führt nicht zu einer glänzenden Schicht.

Die Viskosität limitiert im Falle der Aerosole die maximale Konzentration, mit der die Klebstoffe vernebelt werden können. Je höher viskos ein Klebstoff, desto geringer konzentriert kann er nur vernebelt werden. JunFunori® und Funori sind sehr hochviskos, gefolgt von Methylcellulose und Klucel®. Gelatine und Hausenblase können mit den höchsten Konzentrationen vernebelt werden, da sie niedrig viskos sind. Die verschiedenen hohen Konzentrationen bewirken, dass bei höher konzentrierten Klebstoffen relativ mehr Klebstoff in einem Aerosolpartikel und damit eine höhere Klebkraft gewährleistet werden kann. Insofern wirkt sich die Viskosität auf die Konzentration der Klebstoffe beim Vernebeln und auf die Klebkraft der Aerosolpartikel aus. Ein Bezug zwischen Viskosität und Penetrationsverhalten kann zu diesem Zeitpunkt nicht gezogen werden, da die Viskosität vorrangig die Konzentration und die Klebkraft der Klebstoffe, die in Abhängigkeit der Geräte vernebelt werden, bestimmt.

Die Druckluft betriebenen Aerosolgeneratoren (Nebulizer, Porta Neb) können wiederum analog höhere Konzentrationen vernebeln, im Vergleich zu den Ultraschall betriebenen Aerosolgeneratoren (CCI-Mister, AGS 2000, Mini-Vernebler). Diese höhere Vernebelungsleistung resultiert allerdings wieder in einem erhöhten Gas-Partikel-Strom, der die Gefahr des Wegtragens von Pigmenten in sich birgt.

Basierend auf den bisherigen Ergebnissen kann keinem Klebstoff ein Vorzug als Konsolidierungsmittel gegeben werden, da sie sich alle vergleichbar verhalten. Selbst die Versuchsreihe zur Langzeitstabilität der Klebstofffilme kann derzeit keine eindeutigen Ergebnisse liefern, da die Alterungsbedingungen noch weiter für die Alterung von Klebstoffen ausgearbeitet werden müssen, da schon geringste Veränderungen der Alterungsbedingungen zu drastischen Veränderungen der Planlage und Dimensionsstabilität geführt haben.

### 3 Analytische Untersuchungen der Pigment-Klebstoffgemische

#### 3.1 Geräteauswahl

Der Farbeindruck einer farbigen Fläche wird sowohl vom Farbton, von der Sättigung und von der Helligkeit, als auch von der Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst. Wird eine Pigmentschicht mit einem Klebstofffilm beschichtet, so stellt sich die Frage, ob diese Benetzung und Beschichtung einen Einfluss auf die Reflexionseigenschaften und weiterführend auf die Farbwirkung der darunter liegende Pigmentschicht hat.

Eine Pigmentschicht stellt eine raue Oberfläche dar, die auftreffende Lichtstrahlen diffus reflektiert. Verändert sich diese diffuse Reflexion durch einen Konsolidierungsauftrag, so müsste dies an einer Verschiebung der Reflexionskurve sichtbar sein, wie oben bei der Beschreibung des Farbeindrucks ausgeführt wurde. Es wird davon ausgegangen, dass eine Konsolidierungsmaßnahme nicht das Auftreten von Glanz bewirkt, also eine gerichtete Reflexion eintritt, weil bei einer Konsolidierung mit Aerosolen nicht so viel Klebstoff auf eine Pigmentschicht aufgetragen wird, was in einer glatten und ebenen Pigmentschicht resultiert, die völlig von Klebstoff umhüllt ist. Diese Überlegungen werden angestellt, da sich die Messgeräte für die gerichtete Reflexion von den Messgeräten für die diffuse Reflexion unterscheiden und im Vorfeld eine Geräteauswahl stattfinden muss.

Zur Messung der gerichteten Reflexion stehen Goniophotometer zur Verfügung, die den Winkel der einfallenden Lichtstrahlen auf die Probe stufenlos zwischen  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  variieren können. In Abhängigkeit des Einstrahlungswinkels wird der reflektierte Lichtstrahl, die gerichtete Reflexion, an einer glatten Oberfläche gemessen. Dabei ist der Abstrahlungswinkel gleich dem Einstrahlungswinkel zum Lot. Nach DIN 67530 wird vorgeschlagen, hochglänzende Prüfkörper mit einem Einstrahlungswinkel von  $20^\circ$  (Lackschichten), Prüfkörper mit mittlerem Glanz mit  $60^\circ$  (Folien) und matte Prüfkörper (auch Papier) mit  $85^\circ$  zu messen (Völz 2001: 246).

Um die diffuse Reflexion zu bestimmen, standen für die durchzuführenden Messungen zwei Farbmessgeräte zur Verfügung. Der Gonio-spectro-photo-colorimeter, ein Prototyp entwickelt am Centre nationale de recherche scientifique (CNRS), der von Elias, Dupuis und Simonot (2002: 420) zur Dickenbestimmung von Firnissen vorgestellt wurde, und ein Farbmessgerät von Minolta CM 2600d, das ein Standard-Industrie-Gerät für die Farbmessung darstellt.

Der Gonio-spectro-photo-colorimeter wurde von den Autoren eingesetzt, um eine Firnisabnahme anhand der Interpretation der spezifischen Reflexionsspektren des Firnisses

zu verfolgen. Ein Firnis stellt eine glänzende Schicht auf einem Pigment dar. Während der Abnahme wurden die Reflexionsspektren des Firnisses kontinuierlich gemessen. Als diese Reflexionsspektren nicht mehr zu messen waren, wurde daraus geschlossen, dass der Firnis vollständig abgenommen war. Übertragen auf das Konsolidieren von porösen Pigmentschichten müsste eine Beschichtung mit Konsolidierungsmitteln in umgekehrter Weise, nämlich von einer rauen zu einer weniger rauen Oberfläche anhand der Reflexionsspektren zu beobachten sein. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit ziehen, die bei einer übermäßigen Beschichtung der Pigmentschicht an einer Verschiebung der Reflexionskurven nach oben oder unten zu erkennen sein sollten.

Abb. 69 a) zeigt den schematischen Versuchsaufbau zur Messung der diffusen Reflexion des Gonio-spectro-photo-colorimeter. Ein Lichtstrahl trifft unter einem definierten Winkel auf die Probe. Ein Detektor misst unter einem definierten, aber vom eingestrahlichten Licht abweichenden Winkel, die diffuse Reflexion. Die Messung erfolgt berührungsfrei mit den folgenden Einstellungen: das Anregungslicht stammt von einer 100 W Halogenlampe, gemessen wird in einem Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm mit einer Auflösung von 3 nm, in einem Beobachtungswinkel von 2° und Normlichtart D65. Diese Einstellungen folgen den Richtlinien nach CIE 1976 und liefern die Farbmessdaten basierend auf dem CIEL\*a\*b\*-Farbsystem.

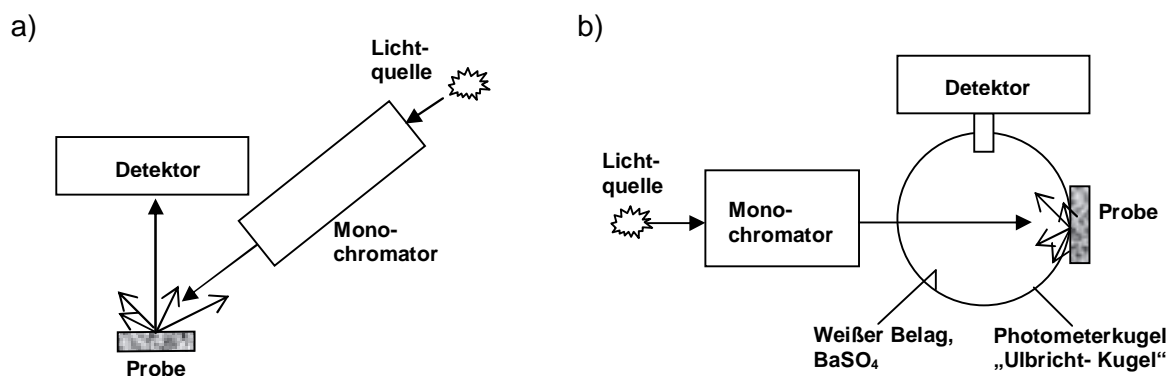


Abb. 69: Schematische Darstellung zweier Versuchsaufbauten zur Aufnahme der diffusen Reflexion (nach: Naumer, Heller 1997: 262)

Der Spektralphotometer CM 2600d von Minolta ist nach dem Schema (b) in Abb. 69 aufgebaut. Das Licht einer Halogenlampe wird in einem Monochromator aufgefächert, um einen Wellenlängenbereich im sichtbaren Bereich von 380 nm bis 800 nm und einer Auflösung von 10 nm zu gewährleisten. Für die Messung der diffusen Reflexion wurde die Standard-Einstellung mit einem Beobachtungswinkel von 10° und das Normlicht D65 ausgewählt. Eine Besonderheit stellt die eingebaute Ulbricht-Kugel dar, die mit Bariumsulfat

(BaSO<sub>4</sub>) ausgekleidet ist. Sie ermöglicht die Messung der diffusen Reflexion und hat zudem eine Glanzfalle. Dabei wird ein Lichtstrahl simultan zur Messung der diffusen Reflexion auf die Probe gerichtet und im gleichen Winkel zum Lot detektiert. Diese Einstellung wird als Messung mit Glanzeinschluss (SCI=specular component included) bezeichnet und erlaubt die Messung der diffusen und der gerichteten Reflexion. Bei der Einstellung mit Glanzausschluss (SCE=specular component excluded) wird die gerichtete Reflexion aus der Ulbricht-Kugel heraus geleitet, die Glanzfalle ist geöffnet. Dabei wird nur die diffuse Reflexion ohne Reflexionsanteile der gerichteten Reflexion gemessen.

Bei glatten Oberflächen gibt es einen Unterschied zwischen der Einstellung SCI und SCE. Bei der Einstellung SCI wird relativ mehr reflektiertes Licht gemessen als bei der SCE-Einstellung, da die Reflexionsanteile der gerichteten Reflexion nicht erfasst werden. Dies wirkt sich in einer geringeren Helligkeit und in einem dunkleren Farbeindruck aus.

Bei rauen Oberflächen besteht kein Unterschied zwischen der Einstellung mit und ohne Glanzeinschluss, da keine gerichtete Reflexion vorliegt und das gesamte Licht, welches auf die Probe fällt, diffus reflektiert und gemessen wird.

Das Spektralphotometer CM 2600d ist ein Standard-Industrie Farbmessgerät, welches unter anderem zur Qualitätskontrolle von Autolacken oder sonstigen farbigen Beschichtungen herangezogen wird. Die Messung erfolgt nicht berührungsfrei, da das Gerät mit den verschiedenen Blenden auf die Probe aufgesetzt werden muss.

Werden Messungen begleitend zu einer Konsolidierungsmaßnahme am Objekt durchgeführt, ist der Gonio-spectro-photo-colorimeter dem Minolta-Spektralphotometer vorzuziehen, da die Messung berührungsfrei stattfindet. Das Spektralphotometer von Minolta wird in direktem Kontakt auf die Farbfläche aufgelegt, damit kein Licht von außen die Farbmessung stört. Bei Testmaterialien ist das direkte Auflegen auf die Probe tolerierbar, bei einem originalen Exponat, das während der Konsolidierung gemessen werden soll, allerdings nicht. Huet (2003: 95) verfolgt Konsolidierungsmaßnahmen auf pudernden Pigmentschichten mit dem Gonio-spectro-photo-colorimeter, um anhand der parallelen Verschiebung der Reflexionsspektren die Veränderung der Helligkeit während der Konsolidierung von Farbschichten zu verfolgen. Die berührungsfreie Messung ist ein wesentlicher Vorteil des Gonio-spectro-photo-colorimeters, wenn das Gerät im Zuge einer Konsolidierung an einem originalen Exponat eingesetzt wird. Bislang ist das Gerät jedoch nur als Prototyp des Centre nationale de recherche scientifique (CNRS) am Louvre in Paris verfügbar.

### 3.2 Messung der Oberflächenbeschaffenheit

Der Einsatz von Klebstoff-Aerosolen soll eine gute und gleichmäßige Penetration in das Pigmentgefüge gewährleisten. Beim Auftreffen der Aerosole wird die Pigmentoberfläche mit Klebstoff benetzt und zwischen den Pigmentkörnern sollen sich Klebstoffbrücken ausbilden. Der Einfluss auf die Farbwirkung der Pigmentschicht nach einer Benetzung eines Klebstoffs steht im Mittelpunkt der nachfolgenden Untersuchungen. Es stellt sich die Frage, ob bestimmte Pigmente oder die Klebstoffauswahl für eine Veränderung der Farbwirkung verantwortlich sind oder vielmehr die Klebstoffapplikation ein ausschlaggebendes Kriterium für eine Verdunkelung oder Erhellung der Pigmentschicht nach einem Klebstoffauftrag ist.

Der Gonio-spectro-photo-colorimeter eignet sich für die Messung der diffusen Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich von pudernden Proben, die mit dem Spincoat-Verfahren hergestellt wurden, da dieses Gerät berührungsfrei in einem Abstand von ca. 2 cm misst. Dabei werden sowohl das Spektrum der Farbe als auch die Farbmessdaten nach CIE 1979 aufgenommen. Anhand der Spektralkurven und der Farbmessdaten wird die unbehandelte Referenz mit der behandelten Probe verglichen und interpretiert.

Die mit dem Spincoat-Verfahren hergestellten Pigmentproben Zinnober, die Mischung Ultramarin/Bleiweiß und brauner Ocker (s. Kapitel 1.11.6, S. 49) werden mit allen ausgewählten Klebstoffen (s. Kapitel 1.11.1, S. 40) konsolidiert. Für die Konsolidierung wurden fünf Auftragsarten, die repräsentativ für Aerosol-Applikationen sind, auf die Pigmentproben angewendet. Der Aerosolstrahl wurde jeweils in einem Abstand von 1 bis 2 cm von der Probe entfernt auf die zu konsolidierende Fläche gehalten.

*Auftragsart 1:* Die Pigmentprobe wurde mit einem vierfachen Aerosolauftrag konsolidiert. Dabei benetzte der Aerosolstrahl die Probe vier Mal hintereinander, ohne dass eine Verdunkelung aufgetreten ist und ohne dass der Klebstoff zwischen den Aufträgen getrocknet ist. Diese Auftragsart wird als „4x“ bezeichnet.

*Auftragsart 2:* Die Pigmentprobe wurde mit einem achtfachen Aerosolauftrag konsolidiert. Dabei benetzte der Aerosolstrahl die Probe acht Mal hintereinander, ohne dass eine Verdunkelung aufgetreten ist und ohne dass der Klebstoff zwischen den Aufträgen getrocknet ist. Diese Auftragsart wird als „8x“ bezeichnet.

*Auftragsart 3:* Die Pigmentprobe wurde mit dem Aerosolstrahl konsolidiert, bis sich die Farbe der Pigmentschicht durch Benetzung deutlich verdunkelt hat, was ca. 2 bis 3 Sekunden gedauert hat. Diese Auftragsart wird als Sättigung bezeichnet und mit „1xges“ abgekürzt.

*Auftragsart 4:* Diese Konsolidierung entspricht der Auftragsart 3, nur dass die Pigmentprobe ein zweites Mal sättigend konsolidiert wurde, bis sie sich wiederum sichtbar durch Benetzung verdunkelt hat. Diese Auftragsart wird mit „2xges“ abgekürzt.

*Auftragsart 5:* Die Pigmentprobe wurde solange mit dem Aerosolstrahl behandelt, bis sich ein sichtbar nasser Klebstofffilm auf der Pigmentoberfläche gebildet hat. Dies kann pro Probe ca. 5 bis 10 Sekunden dauern. Diese Auftragsart wird als Tränkung bezeichnet und mit „1xgetr“ abgekürzt.

Die Klebstoffe wurden in den maximal zu vernebelnden Konzentrationen, die im AGS 2000 realisiert werden können, vernebelt. Gelatine und Hausenblase mit 1 % Massengehalt, Methylcellulose, Funori und Klucel® mit 0,2 % Massengehalt und JunFunori® mit 0,1 % Massengehalt.

Der AGS 2000 wurde für alle Klebstoffaufträge verwendet, da er am regelmäßigsten von allen Aerosolgeneratoren arbeitet. Im Vergleich zu den anderen Aerosolgeneratoren ist die Tropfenbildung am geringsten, wenn über einen langen Zeitraum konsolidiert wird. Da Klucel® mit dem AGS 2000 nicht vernebelt werden kann, wurden die Pigmentproben für den Klucel®-Auftrag mit dem Mini-Vernebler konsolidiert.

Alle drei Pigmentsorten wurden mit den fünf Auftragsarten und mit allen Klebstoffen konsolidiert, was eine Probenmenge von insgesamt 90 Proben ausmacht. Es wurde immer nur die rechte Hälfte der mit dem Spincoat-Verfahren hergestellten Pigmentproben mit den Klebstoffen behandelt, damit die unbehandelte Referenz immer neben der behandelten Probe liegt und gemessen werden kann. Von jeder Pigmentsorte wird ein Beispiel heraus gegriffen, um einen repräsentativen Fall zu beschreiben. Die Farbmessdaten aller Proben sind im Anhang zusammengestellt (12.17a).

Von den Zinnoberbeschichtungen wird hier diejenige beschrieben, die mit Gelatine, 1 % Massengehalt, zwei Mal sättigend (*Auftragsart 4, 2xges*), behandelt wurde. Das Reflexionsspektrum der unbehandelten Referenz und der behandelten Seite der Probe sind in Abb. 70 dargestellt. Tabelle 15 gibt die dazugehörigen Farbmessdaten an.

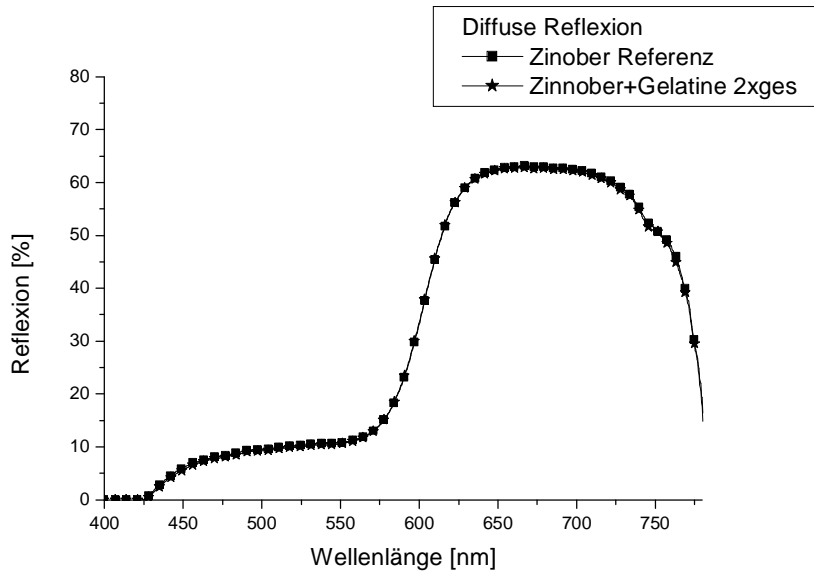


Abb. 70: UV/VIS-Spektroskopie von Zinnober als Referenz und zwei Mal gesättigt (2x ges) mit Gelatine, 1 % Massengehalt, aufgetragen. Die beiden Kurven liegen übereinander.

Probe	L*	$\Delta L^*$	a*	$\Delta a^*$	b*	$\Delta b^*$	C*	h*	$\Delta E^*_{ab}$
Zinnober Referenz	50,1894		40,744		36,6582		41,9784	54,8078	
Zinnober 2x ges+Gelatine	50,065	<b>-0,1244</b>	41,1252	0,3812	37,7365	1,0783	42,5395	55,8151	<b>1,15</b>

Tabelle 15: Farbmessdaten von Zinnober als Referenz und zwei Mal gesättigt (2x ges) mit Gelatine behandelt. Der  $\Delta L^*$ -Wert ist negativ, was andeutet, dass die Helligkeit zwischen Referenz und Probe abgenommen hat. Die Empfindlichkeit des  $\Delta L^*$ -Wertes liegt allerdings bei 0,1 Einheiten.

Die Reflexionsspektren der Referenz und der behandelten Probe liegen übereinander. Der  $\Delta L^*$ -Wert gibt Auskunft über die Differenz der Helligkeit zwischen Referenz und behandelter Probe. Dieser Wert liegt bei  $-0,1244$  (s. Tabelle 15). Das bedeutet, dass die Helligkeit leicht reduziert wurde. Die Empfindlichkeit des  $\Delta L^*$ -Wertes liegt allerdings bei 0,1 Einheiten (Elias, Dupuis, Simonot 2002: 420), so dass dieser Wert an der Nachweisgrenze liegt. Es kann keine Verschiebung der Reflexionskurven und keine sichtbare Veränderung des Farbeindrucks an der Probe selbst beobachtet werden. Da die Literatur keine eindeutigen Beschreibungsrichtlinien für die Interpretation des  $\Delta E^*_{ab}$ -Werts angibt, bedeutet der hier angegebene Wert von 1,15 keine sichtbare Veränderung zwischen Referenz und behandelter Probe, obgleich der  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert nicht bei Null liegt.

Abb. 71 zeigt die Zinnoberbeschichtung, die mit Gelatine (1 % Massengehalt) mit den fünf Auftragsarten konsolidiert wurde. Bei keiner Probe ist eine Veränderung des Farbeindrucks zu sehen. Abb. 72 zeigt eine REM-Aufnahme von Zinnober auf dem Glasträger, welcher 8x mit Gelatine konsolidiert wurde. Es ist weder eine Schichtbildung noch ein Zusammensinken der Pigmentfläche zu beobachten, was mit der photographischen Dokumentation übereinstimmt.



Abb. 71: Pigmentproben von Zinnober, jeweils die rechte Hälfte ist mit Gelatine behandelt worden. Visuell sind keine Veränderungen zu erkennen.

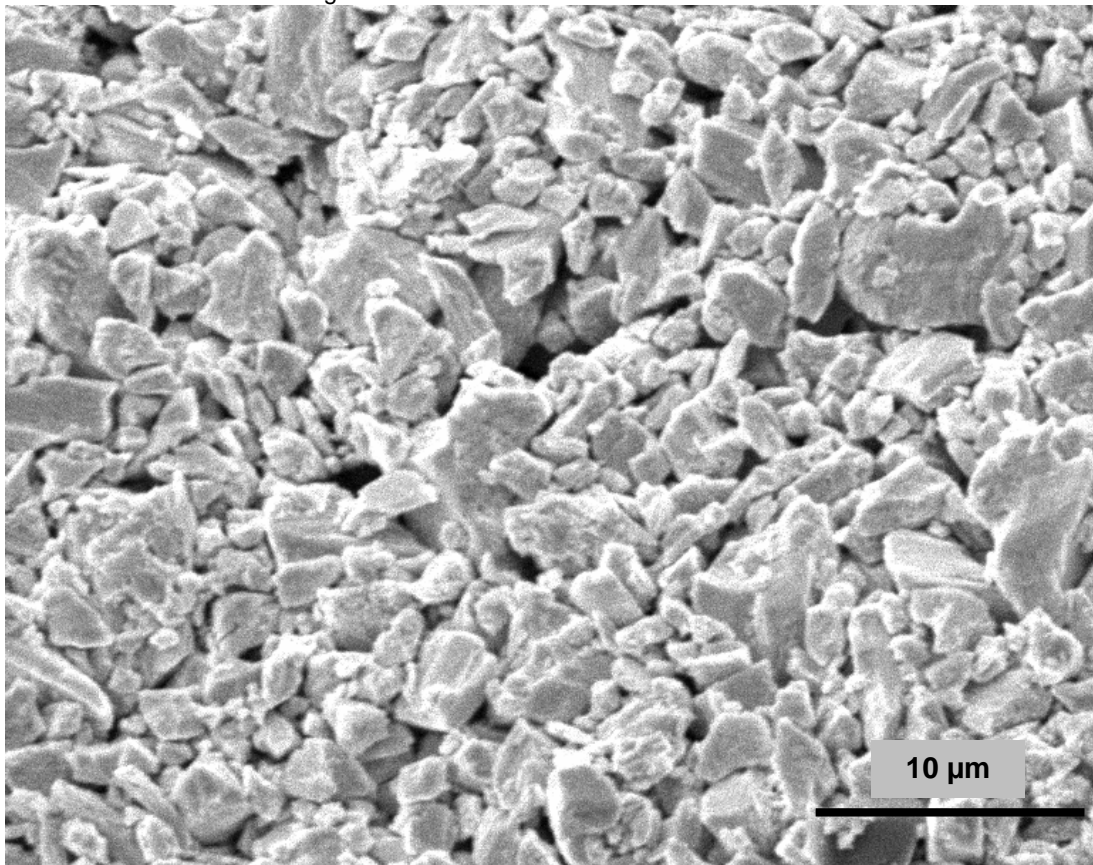


Abb. 72: REM-Aufnahme (3300 fache Vergrößerung) von Zinnober, welcher mit dem Spincoat-Verfahren auf Glas aufgetragen und 8x mit Gelatine (1 % Massengehalt) konsolidiert wurde. Es ist keine Beschichtung von Klebstoff zu erkennen.



Von der Ultramarin/Bleiweiß-Beschichtung (UBW) wurde das Beispiel genommen, bei dem die Pigmentschicht mit Klucel® einmal tränkend (*Auftragsart 5, 1xgetr*) aufgebracht wurde. Das Reflexionsspektrum des unbehandelten Pigments und der konsolidierten Hälfte sind parallel voneinander verschoben (s. Abb. 73), haben aber nicht ihre Form verändert. In Tabelle 16 sind die dazugehörigen Farbmessdaten angegeben.

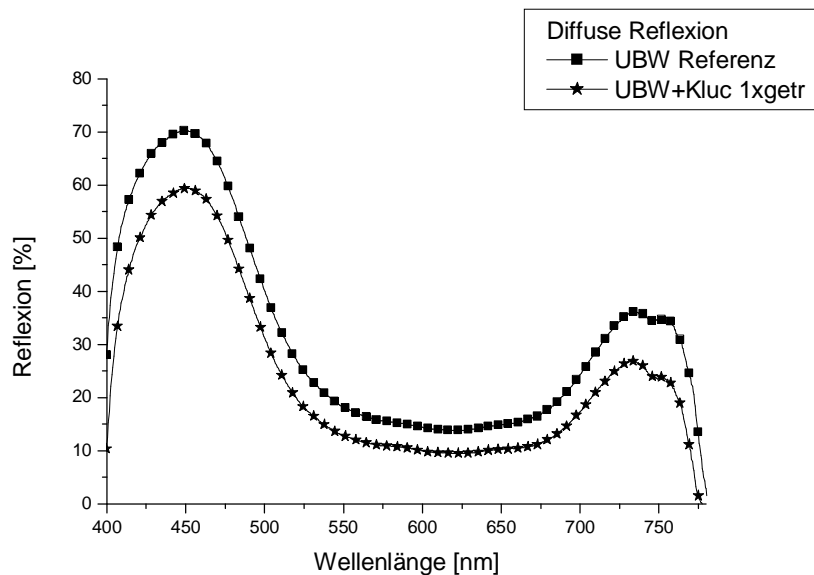


Abb. 73: UV/VIS-Spektroskopie von der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) als Referenz und ein Mal mit Klucel® getränkt (1xgetr). Die Reflexionskurve der behandelten Probe wurde parallel nach unten verschoben.

Probe	L*	$\Delta L^*$	a*	$\Delta a^*$	b*	$\Delta b^*$	C*	h*	$\Delta E^*_{ab}$
UBW Referenz	53,9526		15,083		-51,4055		-73,6476	53,5726	
UBW 1xgetr+Klucel®	47,1387	<b>-6,8139</b>	17,4441	2,3611	-52,9527	-1,5472	-71,7667	55,752	<b>7,31</b>

Tabelle 16: Farbmessdaten von der Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) als Referenz und ein Mal getränkt mit Klucel® (1xgetr). Der  $\Delta L^*$ -Wert ist negativ, was bedeutet, dass die Helligkeit zwischen Referenz und Probe abgenommen hat.

Die beiden Reflexionskurven sind parallel zueinander verschoben, wobei die Reflexionskurve der behandelten Probe parallel nach unten gerückt ist. Die Form der beiden Kurven ist vergleichbar. Eine parallele Verschiebung der Reflexionskurve nach unten bedeutet, dass die Helligkeit abgenommen hat, der Farbton und die Sättigung bei gleichbleibender Form sich aber nicht verändert haben. Die Reduzierung der Helligkeit ist am  $\Delta L^*$ -Wert zu sehen, der bei  $-6,8139$  liegt. Wird die behandelte Probe betrachtet, so hat sich der Farbeindruck verdunkelt (s. Abb. 74). Dies entspricht auch dem  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert, der bei  $7,31$  Einheiten liegt. Der Grund der parallelen Verschiebung der Reflexionskurve der behandelten Probe liegt an einer Glättung der Oberfläche. Der Klebstoff verursacht ein Zusammensinken der Pigmente, so dass die Oberfläche glatter und weniger Unebenheiten aufweist. Bei der Ausbildung der Klebstoffbrücken werden die Pigmentkörner zusammen gezogen, so dass

das Pigmentgefüge verdichtet und die Oberfläche leicht geglättet wird. Folgt man der Argumentation von Feller, Kunz (2002: 271), so verringert sich bei einer Glättung einer porösen Schicht nicht nur die diffuse Reflexion der Oberfläche, sondern auch die diffuse Reflexion aus dem Innern der Schicht. Bei einem Zusammensinken der Pigmentauflage durch einen Klebstoffauftrag verringert bzw. fällt die diffuse Reflexion, die aus dem Innern der Pigmentschicht kommt, weg. Dadurch verringert sich die diffuse Gesamt-Reflexion der Oberfläche.

Diese Verschiebung des Farbeindrucks stellt die höchste gemessene Veränderung in der gesamten Messreihe dar, die sowohl an den Reflexionsspektren, visuell an der Probe, als auch an den  $\Delta L^*$ - und  $\Delta E^*_{ab}$ -Werten abzulesen ist.

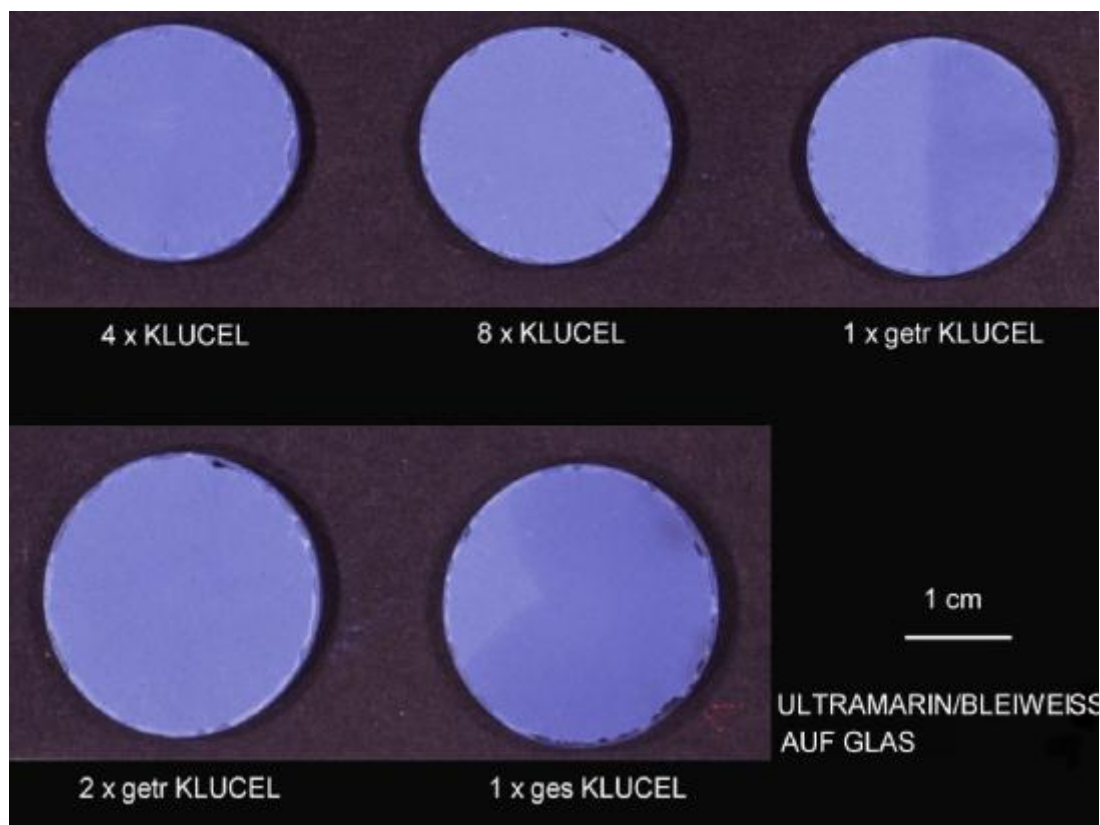


Abb. 74: Pigmentproben von Ultramarin/Bleiweiß, jeweils die rechte Hälfte ist mit Klucel® behandelt worden, Verdunkelungen sind zu erkennen.

Von der Beschichtung mit braunem Ocker wurde die Konsolidierung mit viermaligem Hausenblasenauftrag (*Auftragsart 1, 4x*) heraus gegriffen. Abb. 75 zeigt die Reflexionsspektren der unbehandelten Referenz und der behandelten Pigmentschicht. In Tabelle 17 sind die Farbmessdaten angegeben.

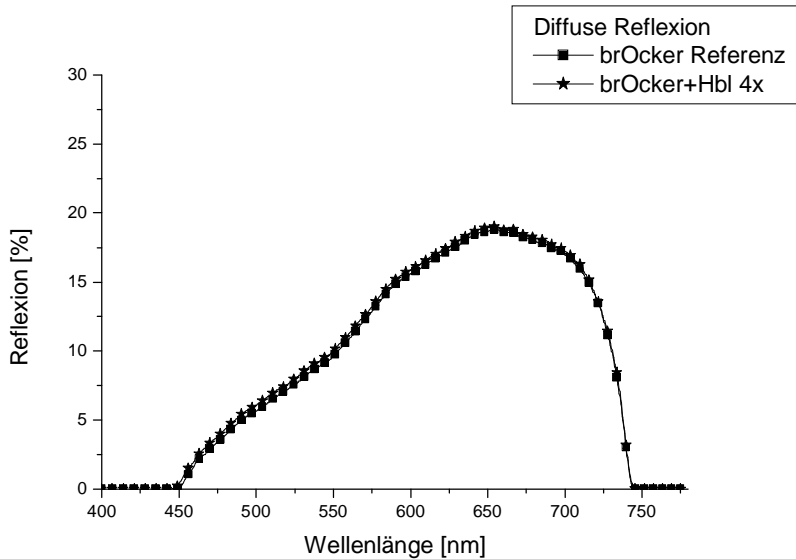


Abb. 75: UV/VIS-Spektroskopie von braunem Ocker als Referenz und vier Mal mit Hausenblase (4x) behandelt. Die Reflexionskurven liegen übereinander und die Gesamtreflexion liegt nur bei etwa 20 %.

Probe	L*	$\Delta L^*$	a*	$\Delta a^*$	b*	$\Delta b^*$	C*	H*	$\Delta E^*_{ab}$
Brauner Ocker Referenz	39,2596		9,00226		45,0024		78,6879	45,894	
Brauner Ocker 4x+Hausenblase	39,8961	<b>0,6365</b>	8,41696	-0,5853	43,6489	-1,3535	79,0854	44,453	<b>1,61</b>

Tabelle 17: Farbmessdaten von braunem Ocker als Referenz und mit Hausenblase vier Mal behandelt. Der  $\Delta L^*$ -Wert ist positiv, aber gering, wodurch auch der  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert unter 2,0 Einheiten liegt.

Die beiden Reflexionsspektren liegen übereinander und der  $\Delta L^*$ -Wert liegt bei 0,6365, was gering ist. Visuell unterscheidet sich die behandelte Pigmentschicht nicht von der Referenz, so dass auch der  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert als nicht hoch einzuschätzen ist. Bei diesem Pigment, brauner Ocker, liegt die maximale Reflexion bei nur 20 %, was an der dunklen Farbigkeit liegt, das den Großteil des eingestrahlten Lichts absorbiert. Bei so dunklen Pigmentflächen sind Veränderungen der Reflexion apparatebedingt nahe der Empfindlichkeitsgrenze, da nur wenig Licht reflektiert wird, welches verarbeitet werden kann. Die maximalen Reflexionswerte von Zinnober und der Mischung Ultramarin/Bleiweiß liegen jeweils zwischen 60 % und 70 % Reflexion. Bei höheren Reflexionswerten können die Helligkeitsverschiebungen besser ausgewertet werden.

Alle 90 Proben wurden UV/VIS-spektroskopisch vermessen und das Beispiel von der Mischung Ultramarin/Bleiweiß mit dem ein Mal getränkten Auftrag von Klucel® stellte die größte Verschiebung der Reflexionskurven dar. Diese Verschiebung machte sich auch in einem dunkleren Farbeindruck bemerkbar (s. Abb. 74).

Anhand dieses Beispiels werden Einflussgrößen der Farbwirkung an den Pigmentproben deutlich. An der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß traten die größten Verschiebungen zwischen Referenz und behandelter Probe auf. Diese Verschiebungen waren sowohl

messtechnisch als auch visuell am eindeutigsten zu erkennen. Die Verschiebungen des Farbeindrucks sind bei diesem Pigmentgemisch deutlicher zu erkennen als Farbverschiebungen der Beschichtung von braunem Ocker, bei dem keine Verschiebungen der Reflexionskurven und des visuellen Farbeindrucks zu beobachten waren.

Bei der Betrachtung der Klebstoffe fiel auf, dass bei Klucel®-Aufträgen wiederholt Verschiebungen der Reflexionskurven aufgetreten sind, wobei das oben genannte Beispiel schon die maximale Verschiebung darstellt. Das bedeutet, dass eine Reduzierung der Helligkeit mit einem Wert von  $\Delta L^*$  von  $-6,8139$  und ein  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert von über 7 als hoch einzuschätzen ist. Diese spektrale Veränderung ist auch visuell erkennbar.

Bei keinem der anderen Klebstoffe haben sich die Reflexionskurven in dem oben beschriebenen Maße verändert.

Der  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert errechnet sich aus den  $L^*$ -,  $a^*$ -,  $b^*$ -Werten (s. Kapitel 1.10, S. 33) und weist aus diesem Grund nur eine Genauigkeit von 0,3 Einheiten auf, da es sich um einen errechneten Wert aus den Einzelwerten von  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  (Genauigkeit von 0,1 Einheiten) handelt. Somit ist die Dateninterpretation eingeschränkt. Loos (1989: 111) interpretiert die  $\Delta E^*_{ab}$ -Werte, die sichtbaren Farbverschiebungen, mit eigenen Worten, wobei es hierfür keine standardisierten Vorgaben gibt:

Bis 0,2	nicht wahrnehmbar
0,2 bis 0,5	sehr gering
0,5 bis 1,5	gering
1,5 bis 3,3	deutlich
3,0 bis 6,0	sehr deutlich
6,0 bis 12,0	stark
über 12,0	sehr stark

Der Interpretation des  $\Delta E^*_{ab}$ -Wertes sollte nicht zu viel Gewicht gegeben werden, da es sich um einen Wert handelt, der sich aus vielen Einzelinformationen zusammensetzt und die sprachliche Interpretation nicht standardisiert ist. Es erscheint auch kritisch, bei zu kleinen Werten und zu geringer Varianz der  $\Delta E^*_{ab}$ -Werte diese Werte statistisch auszuwerten (Hofmann, Flamm, Kadlec 2001: 29).

In Bezug auf die verschiedenen Auftragsarten kann die *Auftragsart 5* als die extremste Applikation beschrieben werden, die die größten Veränderungen hervorruft. *Auftragsart 5* beinhaltet die Tränkung der Pigmentschicht bis sich ein sichtbarer nasser Klebstofffilm auf der Probe befindet, der nach der Trocknung bei manchen Proben einen Schwemmrind oder eine Verdunkelung bewirkt hat. Die Aufträge von Funori und JunFunori® auf die Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß haben zu Schwemmrändern und das oben angeführte Beispiel von Klucel® auf dieselbe Pigmentmischung hat zu einer Verdunkelung geführt.

Das Auftreten von Schwemmrändern kann auch auf Grund des Spincoat-Verfahrens auftreten. Die Pigmentschicht liegt auf einem nicht-saugenden Untergrund, so dass der aufgetragene Klebstoff nur nach oben oder in die angrenzende Referenz-Pigmentschicht abtrocknen kann. Bei den geringen Konzentrationen von Funori (0,2 % Massengehalt) und JunFunori® (0,1 % Massengehalt) ist der wässrige Lösemittelanteil relativ hoch, so dass viel Feuchtigkeit bei der Konsolidierung in die Pigmentschicht eingetragen wird. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass sich bei zum Beispiel feuchteempfindlichen Pigmentschichten, höherkonzentrierte Klebstofflösungen besser eignen, um weniger Feuchtigkeit während des Konsolidierens einzutragen und um Schwemmränder zu vermeiden.

Dies bedeutet darüber hinaus, dass bei nicht-saugenden Untergründen die Gefahr eines Schwemmrandes besteht, wenn niedrig konzentrierte Klebstofflösungen eingesetzt werden.

Die deutlichsten Veränderungen der Farbwirkung wurden bei der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß, dem Klebstoff Klucel® und der *Auftragsart 5* mit einmaliger Tränkung des Konsolidierungsmittels beobachtet. Diese Veränderungen sind aus einer Verschiebung der Reflexionskurve und dem  $\Delta L^*$ -Wert zu deuten. Die Interpretation des  $\Delta E^*_{ab}$ -Wertes wird von der Literatur nicht eindeutig definiert, so dass auf die hier vorliegenden Ergebnisse zurückgegriffen wird. Nur  $\Delta E^*_{ab}$ -Werte, die über 2,5 lagen, waren visuell erkennbar.

Die Messung der diffusen Reflexion und die Interpretation der Reflexionskurven in Zusammenhang mit den Farbmessdaten ist eine aussagekräftige Methode, um Veränderungen der Farbwirkung zu verfolgen.

Die Konsolidierung mit Aerosolen hat bei den hier gemessenen Pigmentproben in den wenigsten Fällen zu einer Verschiebung der Reflexionskurven zwischen Referenz und behandelter Probe geführt.

Der Klebstoff Klucel® wird allerdings nicht empfohlen, da es wiederholt zu einer Reduzierung der Helligkeit gekommen ist. Die positiven Eigenschaften des Klebstoffes beinhalten das Arbeiten im nicht-wässrigen System und dadurch die Sicherheit, dass Pigmentschichten nicht quellen können. Allerdings hat sich bei der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß und Zinnober nach einem Klucel®-Auftrag wiederholt der Farbeindruck verändert, so dass dieser Klebstoff nur für äußerst wasserempfindliche Pigmente eingesetzt werden sollte.

### 3.3 Messung mit und ohne Glanzeinschluss

Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit, ausgedrückt in Glanz und Mattigkeit, auf die Farbwirkung einer bunten Pigmentfläche wird UV/VIS-spektroskopisch mit der zusätzlichen Messeinrichtung des Glanzeinschlusses und Glanzausschlusses dargelegt.

Das Farbmessgerät von Minolta (CM 2600d) verfügt über eine Ulbricht-Kugel (s. Abb. 19), die eine Messung mit und ohne Glanzeinschluss (SCI/SCE) ermöglicht. Bei einer glänzenden Oberfläche wird bei der Einstellung SCE (specular component excluded) die gerichtete Reflexion nicht gemessen, was in einer parallelen Verschiebung der Reflexionskurve nach unten resultiert, da das Licht der gerichteten Reflexion nicht gemessen wird und daher die Helligkeit abnimmt. Diese Messung mit SCI und SCE ist bei dem Gonio-spectro-photo-colorimeter nicht möglich, da nur die diffuse Reflexion in einem bestimmten Winkel gemessen wird. Die Messung mit und ohne Glanzeinschluss ist nur bei Vorhandensein einer Ulbricht-Kugel möglich.

Für diese Untersuchungen sind die oben beschriebenen Pigmente als Pulver in einer Presse für Presslinge (Specac) präpariert worden. Gleiche Mengen Pigment und Kaliumbromid (KBr), das als nichtabsorbierendes Bindemittel für die FTIR-Spektroskopie eingesetzt wird, wurden verrieben und zu Presslingen gepresst (s. Anhang 12.15). Die runden Proben sind nur wenige Millimeter dick (s. Abb. 76). Auf Grund des Presswerkzeugs (polierter Edelstahl) und des hohen Pressdrucks (10t) weisen die Presslinge eine hochglänzende Oberfläche auf. Die linke Hälfte der Proben wurde mechanisch aufgeraut.

Die beiden Probenhälften, die raue und die glatte, wurden mit dem Minolta Spektralphotometer mit Glanzeinschluss (SCI=specular component included) und ohne Glanzeinschluss (SCE=specular component excluded) gemessen. Da die Presslinge jeweils aus denselben Pigmenten hergestellt wurden und sich nur die Oberflächen zwischen hochglänzend und rau unterscheiden, muss die Form der Reflexionskurve zwischen glatter und rauher Oberfläche dieselbe sein. Der Farbton und die Sättigung sind unverändert, nur die Helligkeit hat sich durch die mechanische Aufrauung verändert. Bei der rauhen Oberfläche liegt eine diffuse Streuung und bei der glatten Oberfläche eine gerichtete Reflexion vor.

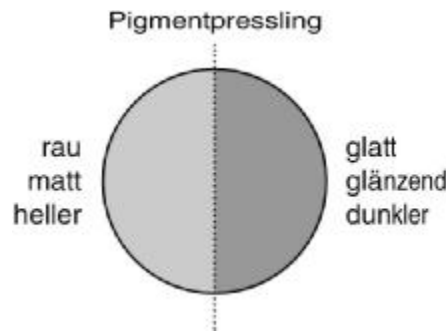


Abb. 76: Pigmentpresslinge, jeweils die linke Hälfte ist mechanisch aufgeraut, was bei Zinnober, Ultramarin/Bleiweiß und braunem Ocker an einem helleren Farbeindruck zu erkennen ist, bei Bariumsulfat nicht.

Abb. 77 zeigt die Reflexionsspektren des Pigmentpresslings der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW). Tabelle 18 gibt die  $\Delta L^*$ - und  $\Delta E^*_{ab}$ -Werte an. Die raue Probe weist insgesamt eine höhere Reflexion auf, weil eine hohe diffuse Reflexion vorliegt. Es gibt allerdings keinen Unterschied zwischen der Einstellung SCI (specular component included) und SCE (specular component excluded), was bedeutet, dass keine gerichtete Reflexion vorliegt.

Die glatte Hälfte weist eine geringere Reflexion auf, die beiden Kurven sind beide parallel nach unten verschoben, weil relativ weniger diffuse, aber eine gerichtete Reflexion vorliegt. Wenn bei der glatten Hälfte auch noch der Glanz, mit der Einstellung SCE, herausgenommen wird, dann sinkt die Spektralkurve weiter nach unten, die Helligkeit nimmt weiter ab, da das reflektierte Licht des Glanzes nicht gemessen wird.

Die Form der Spektralkurve ist dieselbe, da es sich bei der rauhen und glatten Oberfläche um dasselbe Pigment handelt und somit der Farbton und die Sättigung gleich sind. Nur die Helligkeit hat sich auf Grund der veränderten Oberflächenbeschaffenheit reduziert. Der  $\Delta L^*$ -Wert ist um  $-13,1519$  gefallen und der Farbabstandswert, der  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert, sogar um über 21 Einheiten.

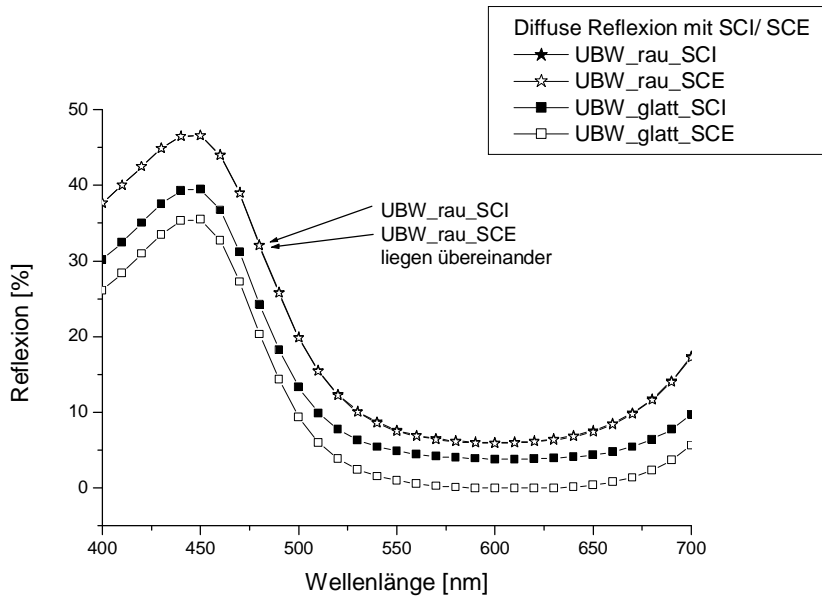


Abb. 77: UV/VIS-Spektroskopie von dem Pigmentpressling Ultramarin/Bleiweiß (UBW), dessen eine Hälfte rau, die andere Hälfte glatt ist. Beide Hälften wurden mit der Einstellung SCI und SCE gemessen. Bei UBW\_glatt mit SCE fällt die Kurve weiter ab, weil der Glanz herausgenommen wird.

Probe	Status	$\Delta L^*$	$\Delta E^*_{ab}$
UBW_rau	SCI/100		
UBW_rau	SCE/100		
UBW_glatt	SCI/100	<b>-4.9209</b>	7.4922
UBW_glatt	SCE/100	<b>-13.1519</b>	21.1194

Tabelle 18: die  $\Delta L^*$ - und  $\Delta E^*_{ab}$ -Werte sind angegeben und weisen eine Verschiebung der Helligkeit auf.

Der Unterschied zwischen einer glatten und rauhen Oberfläche macht sich an einer parallelen Verschiebung der Reflexionsspektren bemerkbar. Die Reflexionskurve der glatten Oberfläche ist parallel nach unten verschoben, da weniger diffuse Reflexion vorliegt und die Helligkeit reduziert ist.

Die Verschiebung des Reflexionsspektrums auf Grund von Glanz wurde an einer bunten Probe, der Mischung Ultramarin/Bleiweiß aufgezeigt. Bei dem weißen Pressling aus Bariumsulfat ( $BaSO_4$ ) ist dieser Zusammenhang ebenso zu sehen.  $BaSO_4$  wurde zu einem Pressling verarbeitet und die eine Hälfte wurde mechanisch aufgeraut. Beide Hälften wurden mit dem Spektralphotometer untersucht und mit und ohne Glanzeinschluss gemessen. In Abb. 78 sind die vier Messungen zu sehen. Tabelle 19 gibt die Farbmessdaten an.



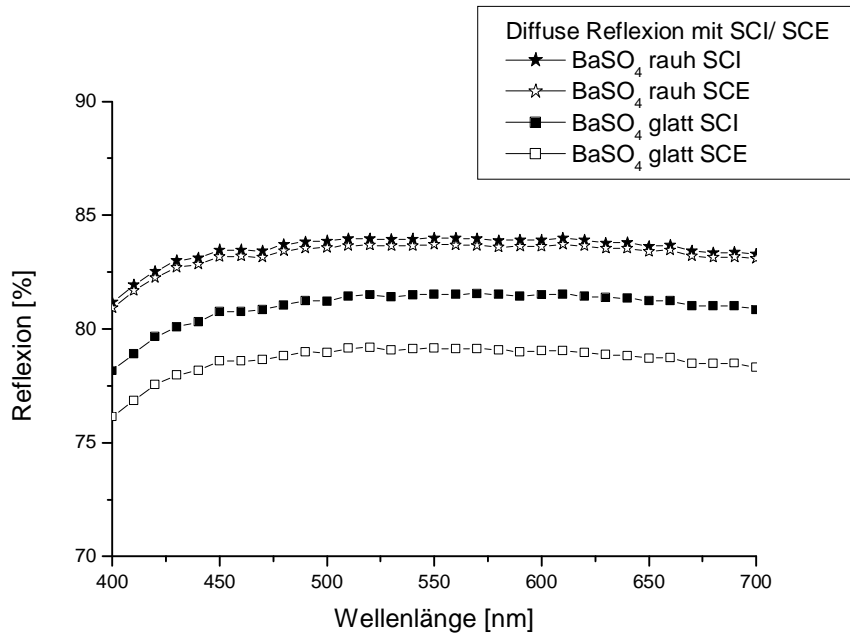


Abb. 78: UV/VIS-Spektroskopie eines Bariumsulfat (BaSO<sub>4</sub>)-Presslings, dessen eine Hälfte glänzend, die andere Hälfte matt ist. Beide Hälften wurden mit SCI und SCE gemessen. Die beiden matten Kurven liegen nahezu übereinander, die raue Hälfte, bei der der Glanz weggenommen wurde (SCE), verliert weiter an Helligkeit.

Probe	Status	$\Delta L^*$	$\Delta E^*_{ab}$
BaSO4_rau	SCI/100		
BaSO4_rau	SCE/100		
BaSO4_glatt	SCI/100	<b>-10,917</b>	11,122
BaSO4_glatt	SCE/100	<b>-20,319</b>	20,344

Tabelle 19: die  $\Delta L^*$ - und  $\Delta E^*_{ab}$ -Werte sind angegeben und weisen eine Verschiebung der Helligkeit auf.

Die Spektren der rauen Hälfte liegen nahezu übereinander, da eine diffuse Reflexion vorliegt. Bei den Spektren der glatten Hälfte weist das Spektrum mit der Einstellung SCE (specular component excluded) eine Reduzierung um 5 % Reflexion, bzw. der Helligkeit auf, da die gerichtete Reflexion der Probe herausgenommen wurde und den Detektor nicht erreicht. Die Reflexionsveränderungen sind bei der weißen Probe mindestens genauso ausgeprägt, wie bei der bunten Probe, obgleich dies mit dem Auge, s. Abb. 76, weniger wahrzunehmen ist, als bei dunklen Flächen. Dies liegt unter anderem daran, dass das Auge Verschiebungen von Reflexionen bei hohen Reflexionswerten, hier sind es Bereiche zwischen 75 % und 85 %, schlechter erkennen kann, als bei geringeren Reflexionswerten. Aus diesem Grund sind die rauen Flächen der dunklen Pigmentpresslinge von Abb. 76 besser wahrzunehmen, als die hellen.

Die mit einem Klebstoff behandelten Pigmentproben wurden mit und ohne Glanzeinschluss gemessen. Die Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß, die ein Mal tränkend mit Klucel® konsolidiert wurde und die größten spektralen und visuellen Veränderungen erfahren hat, wurde untersucht.

Die unbehandelte Referenz wurde einmal mit und ohne Glanzeinschluss gemessen (s. Abb. 79), wobei zu sehen ist, dass die Reflexionsspektren übereinander liegen. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da bei der Referenz kein Klebstoff aufgetragen wurde und eine diffuse Reflexion vorliegt.

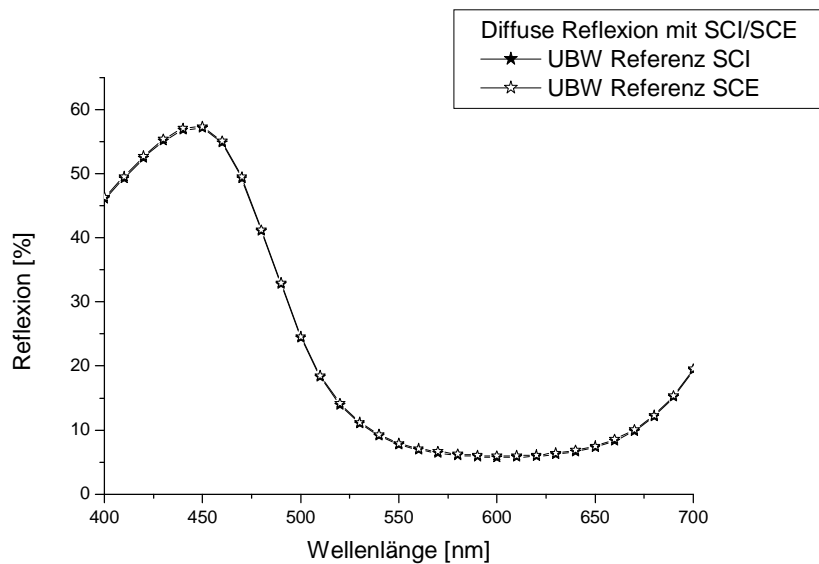


Abb. 79: UV/VIS-Spektroskopie der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW). Die unbehandelte Referenz wurde mit (SCI) und ohne (SCE) Glanzeinschluss gemessen. Durch die diffuse Reflexion liegen die Kurven übereinander.

Die mit Klucel® 1 x getränkte Probenhälfte zeigte eine Reduzierung der Helligkeit, wie anhand der Reflexionsspektren und photographisch in Abb. 74 schon dargelegt wurde. Diese behandelte Pigmentfläche wurde nun mit und ohne Glanzeinschluss gemessen (s. Abb. 80). Die beiden Reflexionsspektren liegen wiederum übereinander. Dieses Ergebnis bedeutet, dass die Verdunkelung der behandelten Pigmentschicht kein Auftreten von Glanz darstellt, sondern nur eine Reduzierung der diffusen Reflexion. Durch den Klebstoffauftrag hat sich kein glatter Klebstofffilm auf der Pigmentschicht gebildet, obgleich sich eine visuell sichtbare Verdunkelung eingestellt hat.

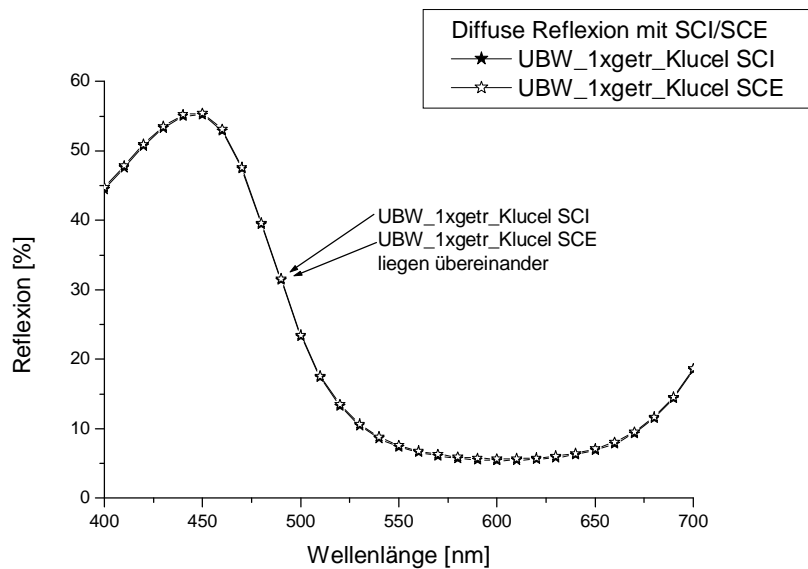


Abb. 80: UV/VIS-Spektroskopie der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW). Die Pigmentfläche wurde 1 x mit Klucel® getränkt und wurde mit (SCI) und ohne (SCE) Glanzeinschluss gemessen. Die Kurven liegen übereinander, was auf eine diffuse Reflexion schließen lässt.

Es konnte also gezeigt werden, dass eine Verdunkelung der Oberfläche nach einer Konsolidierungsmaßnahme nicht mit dem Auftreten von Glanz interpretiert werden kann. Die Messung mit und ohne Glanzeinschluss der rauen und glatten Oberflächen der Pigmentpresslinge im Vergleich zeigte, dass sich die Reflexionskurven bei Glanzerscheinungen um 5 % bis 10 % Reflexion verschieben und sich die Helligkeit verändert, obgleich es sich um dasselbe Pigment handelt. Der Farbton und die Sättigung verändern sich nicht, da die Reflexionskurve immer dieselbe Form aufweist. Eine Verdunkelung durch einen Klebstoffauftrag bewirkt lediglich eine Reduzierung der diffusen Reflexion.

Bei der Anwendung von Aerosolen bei Konsolidierungsmaßnahmen kann es zu Veränderungen des Farbeindrucks kommen, wie wiederholt bei Klucel® beobachtet wurde. Dabei wird die Oberfläche leicht geglättet, die diffuse Reflexion wird reduziert und die Helligkeit nimmt ab. Der Klebstoff bildet aber keinen glatten Film auf der Pigmentfläche, der mit dem Auftreten von Glanz verglichen werden kann. In der Literatur wird wiederholt auf diese Gefahr hingewiesen. Hansen (1993: 41; xli) diskutiert in seinem Einleitungstext seiner Bibliographie über matte Malerei die Beschichtung von Pigmentflächen durch Klebstoffaufträge. Er legt dar, dass durch das Aufbringen von Konsolidierungsmitteln die Oberflächen von matten Malschichten geglättet werden und sich Glanz bildet. Auch Schießl (1989: 302) untersucht die Festigung von wässrig gebundenen, kreadenden Malschichten auf Holz und stellt in grafischen Darstellungen die Filmbildung bzw. die Beschichtung von nicht penetriertem Konsolidierungsmittel dar. Das Fixiermittel, das sowohl in Form von Aerosolen

als auch mit dem Airbrush, also wesentlich größeren Tröpfchen, aufgebracht wird, füllt die oberen Lagen der Pigmentschicht und glättet die Oberfläche. Dieses erarbeitete Modell kann für den Fall der Aerosolfestigung nicht übertragen werden, da es selbst bei einer Sättigung der Pigmentschicht nicht zu einer Filmbildung kommt.

Die Gründe für eine Verdunkelung einer matten Pigmentschicht nach einem Aerosolauftrag liegen nicht an einer kompakten Klebstoffschicht auf dem Pigment, sondern an einem Zusammensinken und Verdichten der Pigmentschicht in Folge des Eintrocknens des Klebstoffs (s. Abb. 81). Nach einem Klebstoffauftrag mit Aerosolen verdampft das wässrige Lösemittel, es bilden sich Klebstoffbrücken aus und die Pigmentkörner rücken näher zusammen, wodurch die Pigmentschicht verdichtet wird. Die diffuse Reflexion aus dem Innern der Schicht fällt weg, wodurch sich die diffuse Reflexion im Gesamten reduziert.

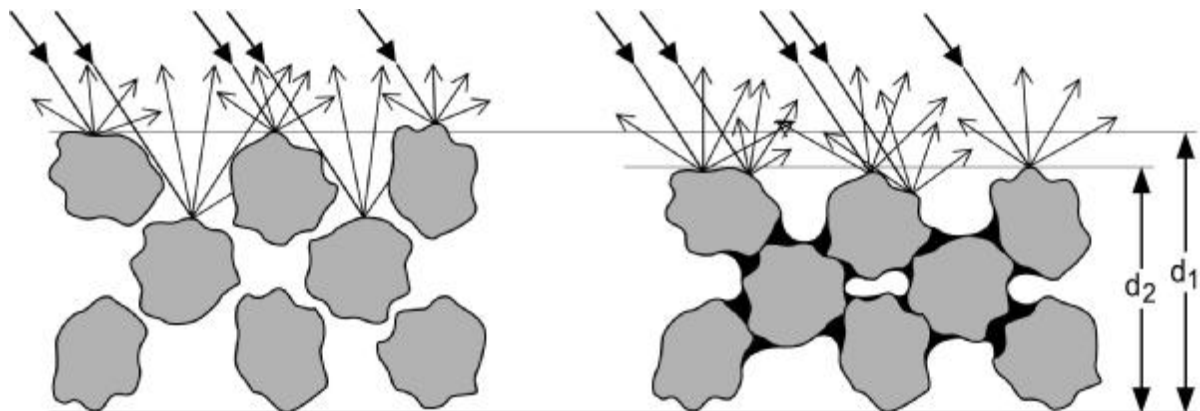


Abb. 81: Reduzierung der diffusen Reflexion durch Ausbildung der Klebstoffbrücken, was ein Verdichten und Zusammensinken der Pigmentschicht zur Folge hat. Vor der Konsolidierung Stärke der Pigmentschicht  $d_1$ , nach der Konsolidierung Stärke  $d_2$ .

Bezüglich der Interpretation sind die Reflexionsspektren aussagekräftig, die durch die Farbmessdaten unterstützt werden. Die alleinige Interpretation der  $\Delta E^*_{ab}$ -Werte kann solche Schlussfolgerungen nicht liefern, da sich bei einer Veränderung der Oberfläche zwar auch der Farbeindruck ändert, also der  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert, diesem Wert aber nicht zu entnehmen ist, ob sich der Farbton, die Sättigung, die Helligkeit oder die Oberflächenbeschaffenheit verändert hat. Aus diesem Grund sollten für die Interpretation von Farbverschiebungen die Reflexionskurven und die Farbmessdaten herangezogen und erläutert werden, um ein ganzheitliches Bild der Veränderungen zu erhalten.

### 3.4 Messung zur Pigmentvolumenkonzentration

Für die Konsolidierung von pudernden und schadhafte Pigmentaufstrichen ist das Aufbringen von flüssigen Klebstoffen in das poröse Pigmentgefüge erforderlich. Der Klebstoff soll gleichmäßig verteilt sein und eine ausreichende Adhäsion zwischen den Pigmentkörnern und dem Klebstoff gewährleisten. Eine Möglichkeit, den Zusatz von Klebstoff in ein Pigmentgefüge zu beschreiben, stellt die Betrachtung des Verhältnisses zwischen Pigment- und Bindemittelgehalt dar, was in Prozent ausgedrückt werden kann. Dies wird als die Pigmentvolumenkonzentration bezeichnet und kann zur Beschreibung von Konsolidierungsmaßnahmen herangezogen werden. Nach einem Klebstoffauftrag verändert sich das Verhältnis zwischen Pigment und Bindemittel und kann eine modellhafte Risikoabschätzung bieten.

Der Begriff der Pigmentvolumenkonzentration (PVK) stammt aus der Farben- und Lackindustrie und wird nach DIN EN 971-1:1996-09 folgendermaßen definiert (Zorll 1998: 453): „Die Pigmentvolumenkonzentration (PVK) beschreibt das Verhältnis des Gesamtvolumens der Pigmente [...] zum Gesamtvolumen der nichtflüchtigen Anteile, ausgedrückt in Prozent“. In der Lack-Industrie wird von einer Pigmentschicht ausgegangen, die vollständig von Bindemittel umhüllt ist, ohne den Einschluss von Lufpolstern zwischen den Pigmentkörnern. Dies stellt eine hochglänzende Farbschicht dar. Nimmt der Bindemittelanteil im Verhältnis zum Pigmentanteil ab, so dass sich Hohlräume zwischen den Pigmentkörnern auf tun, wird die Oberfläche rau und uneben. Der Punkt, an dem die Oberfläche nicht mehr glatt ist, sondern einzelne Pigmentkörner aus der Fläche treten, wird mit der Terminologie aus der Farben- und Lackindustrie als die kritische Pigmentvolumenkonzentration (KPVK) bezeichnet (Völz 2001: 136). Die Konzentrationen zur Angabe der Pigmentvolumenkonzentration reichen von 0 bis 100 %, wobei „unter der KPVK“ bedeutet, dass eine homogene, völlig dichte Pigmentschicht vorliegt, im Gegensatz am Punkt des „Überschreitens der KPVK“, was ein Zerklüften und eine Rauigkeit durch nicht genügend Bindemittel in der Pigmentschicht beschreibt (Abb 82, in Anlehnung an: Kress 1965: 180).

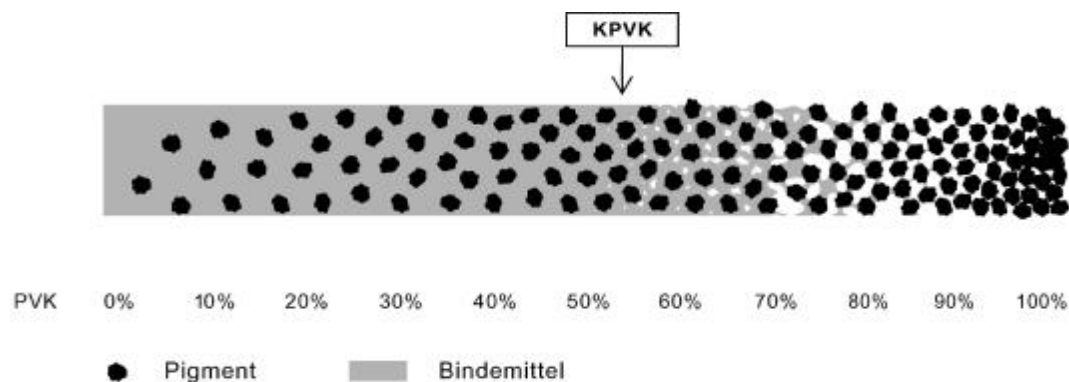


Abb. 82: Pigmentvolumenkonzentration von Pigmentkörnern, die in einem Bindemittel eingebettet sind.

Unterschiedliche Konzentrationen von Pigment und Bindemittel wirken sich auf die Oberflächencharakteristik und somit auf die Reflexionseigenschaften aus (s. Abb. 83). Bei einer sehr geringen Pigmentvolumenkonzentration liegt eine glatte Oberfläche vor. Treffen Lichtstrahlen auf diese Oberfläche, wird ein hoher Anteil gerichtet reflektiert. Diese Glanzeigenschaften nehmen mit steigender Pigmentvolumenkonzentration ab, da die Oberfläche rau und uneben wird. Bei einer sehr hohen Pigmentvolumenkonzentration werden die auftreffenden Lichtstrahlen diffus reflektiert und es liegt keine gerichtete Reflexion mehr vor. Dies wird mit den Pfeilen, die in alle Richtungen zeigen, veranschaulicht.

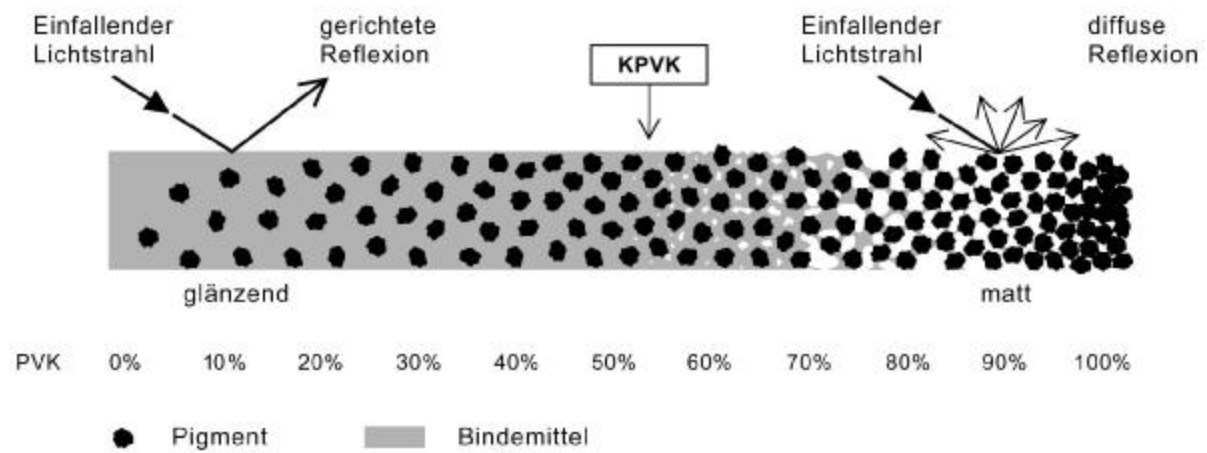


Abb. 83: Pigmentvolumenkonzentration von Pigmentkörnern, die in einem Bindemittel eingebettet sind. Je kleiner der Anteil an Pigmenten in einem Bindemittel, desto geschlossener ist das Pigment/Bindemittelsystem, was in einer glänzenden Oberfläche resultiert (geringes Prozentverhältnis) und je größer der Anteil an Pigmenten im Verhältnis zum Bindemittel, desto unebener wird das Pigment/Bindemittelsystem und desto rauer wird die Oberfläche.

Der Zusammenhang zwischen der Pigmentvolumenkonzentration (PVK) und den Reflexionseigenschaften wird im folgenden Versuch dargelegt. Es wurde 1 g Zinnober mit verschiedenen konzentrierten Klebstofflösungen gemischt und auf Papier aufgestrichen (s. Anhang 12.14). In Tabelle 20 sind die verschiedenen Konzentrationen der Klebstoffe angegeben. Die Konzentrationen entsprechen den vergleichbaren Viskositäten, wie sie als Aerosol beim Konsolidieren mit dem AGS 2000 vernebelt werden können.

Dieser Versuch stellt keine exakte Nachstellung der Pigmentvolumenkonzentrationen von 0 bis 100 % dar, weil hierfür nicht alle Daten für die Errechnung in Bezug auf die Dichte und Korngröße der Pigmente und des Bindemittels vorlagen. Die hier gewählten Abstufungen stellen extreme, aber vergleichbare Konzentrationsmischungen dar, die im Zuge einer Konsolidierung erreicht werden könnten.

1g Zinnober + 2ml Klebstoff			
Klebstoff	Konzentration des Klebstoffs [%]		
Gelatine (Gel)	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
Methylcellulose (MC)	0,2	1	2
Hausenblase (Hbl)	1	5	10
Funori (Fun)	0,2	1	2
JunFunori® (Jfun)	0,2	1	2
Klucel® (Kluc)	0,2	1	2

Tabelle 20: Mischungsverhältnisse von 1g Zinnober, der mit 2ml Klebstoff in verschiedenen Konzentrationen vermischt wurde. Die fett markierten Mischungen werden grafisch dargestellt.

In Abb. 84 sind die ungefähren Pigmentvolumenkonzentrationen der Pigment/Klebstoffmischungen von Gelatine mit 1 %, 5 % und 10 % Massengehalt in das oben beschriebene Modell der PVK eingetragen. Die Mischungen der Gelatine in drei Konzentrationen mit Zinnober entsprechen alle einer hohen Pigmentvolumenkonzentration.

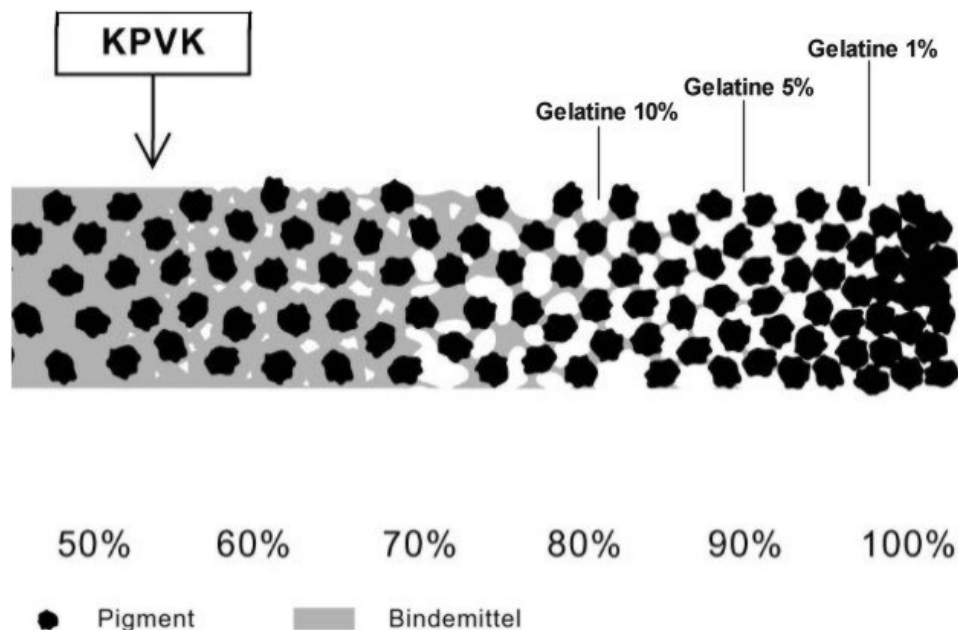


Abb. 84: Pigmentvolumenkonzentrationen von den Pigment/Bindemittelgemischen von Gelatine 1 %, 5 % und 10 %.

Die diffuse Reflexion der Aufstriche wurde mit dem Gonio-spectro-photo-colorimeter am Centre nationale de recherche scientifique (CNRS) am Louvre, Paris, gemessen. Abb. 85 zeigt die Reflexionsspektren von Zinnober, welches mit 1 %iger, 5 %iger und 10 %iger Gelatine gemischt wurde. In Tabelle 21 sind die dazugehörigen Farbmessdaten angegeben. Die Mischung mit der höchsten Pigmentvolumenkonzentration ist die 1 %ige Gelatine mit Zinnober, da bei dieser Mischung am wenigsten Bindemittel vorhanden ist. Diese Probe zeigt die höchste diffuse Reflexion. Die beiden anderen Reflexionsspektren liegen weiter unterhalb. Die Pigmentvolumenkonzentration wird von Zusatz von 5 %iger und 10 %iger Gelatine geringer, was sich in einer Verdunkelung der Probe bemerkbar macht. Je mehr Bindemittel in einer gleichbleibenden Menge Pigment vorhanden ist, desto mehr verringert

sich die Helligkeit, da der  $\Delta L^*$ -Wert um  $-6,8658$  (Gelatine 5 %) und  $-7,7276$  (Gelatine 10 %) liegt. Der  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert liegt bei  $20,93$  (Gelatine 5 %) und  $22,53$  (Gelatine 10 %), was vorrangig an einer Farbverschiebung ins Gelbliche liegt, wie man am  $\Delta b^*$ -Wert von  $20,9339$  (Gelatine 5 %) sieht. Dadurch ist auch der  $\Delta E^*_{ab}$ -Wert hoch. Dies liegt an der gelben Eigenfarbe von Gelatine bei so hohen Konzentrationen von 5 % und 10 % Massengehalt in Mischung mit dem Pigment.

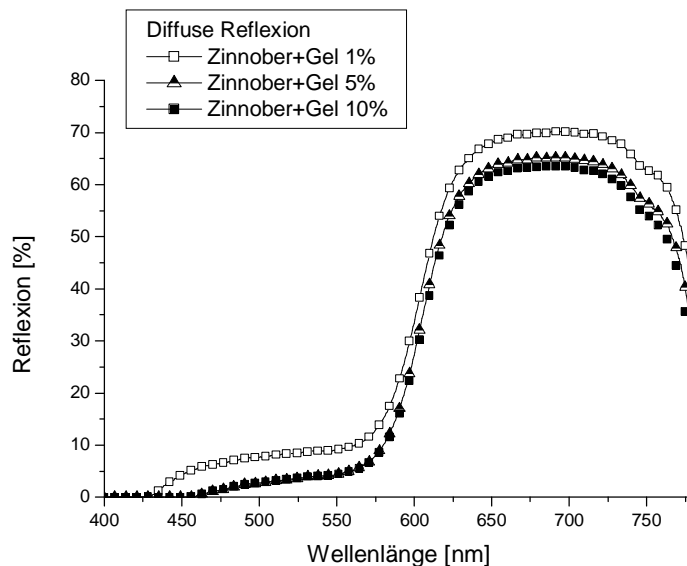


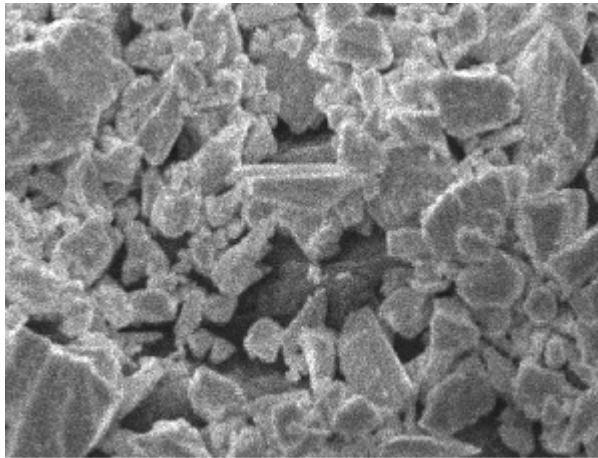
Abb. 85: UV/VIS-Spektroskopie von Zinnober (1g), welches mit je 2ml 1 %, 5 % und 10 % Gelatine (Gel) gemischt wurde. Die Mischung mit der höchsten Pigmentvolumenkonzentration (Zinnober+Gelatine 1 %) zeigt die höchste diffuse Reflexion. Die beiden anderen Kurven liegen weiter untereinander mit weniger Reflexion.

Probe	$L^*$	$\Delta L^*$	$a^*$	$\Delta a^*$	$b^*$	$\Delta b^*$	$h^*$	$C^*$	$\Delta E^*_{ab}$
Gel 1%	49.187		46.4181		42.454		42.446	62.9045	
Gel 5%	42.3212	<b>-6.8658</b>	55.4548	9.0367	63.3879	20.9339	48.819	84.2215	<b>20.93</b>
Gel 10%	41.6594	<b>-7.7276</b>	54.3898	7.9717	62.0611	19.6071	48.769	82.5217	<b>22.53</b>

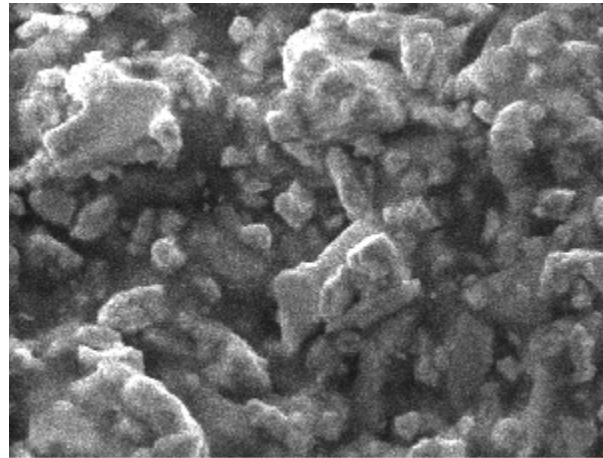
Tabelle 21: Farbmessdaten von Zinnober (1g) mit 2ml Gelatine (Gel) in den Konzentrationen 1 %, 5 % und 10 % gemischt. Zwischen der Referenz von Zinnober mit 1 % Gelatine und den geringeren Pigmentvolumenkonzentrationen sind die  $\Delta L^*$ -,  $\Delta a^*$ -,  $\Delta b^*$ -Werte relativ hoch, wodurch auch die  $\Delta E^*_{ab}$ -Werte hoch sind.

Das Absinken der Reflexionsspektren bei einem ansteigenden Bindemittelanteil untermauert den Zusammenhang zwischen der Glättung einer Oberfläche bei zunehmendem Bindemittelgehalt, was mit einer Reduzierung der Helligkeit einhergeht (s. Abb. 81). Bei dem Vermischen von 2ml einer 10 %igen Gelatinelösung mit 1 g Zinnober sind keine scharfen Konturen des Pigments mehr zu erkennen (s. Abb. 87) und das Bindemittel umhüllt das Pigment vollständig. Es liegt allerdings keine völlig plane Oberfläche vor. Die kritische Pigmentvolumenkonzentration wird nicht unterschritten. Die Mischung der 5 %igen Gelatine (s. Abb. 86) zeigt noch scharfe Kanten und Zwischenräume im Pigmentgefüge.





Zinnober-Gel 5%  
Abb. 86: REM-Aufnahme der Mischung 1g Zinnober mit 2ml 5%iger Gelatine.



Zinnober-Gel 10%  
Abb. 87: REM-Aufnahme der Mischung 1g Zinnober mit 2ml 10%iger Gelatine. Die Pigmente sind von Bindemittel umhüllt, keine scharfen Konturen des Pigments mehr zu erkennen.

Anhand dieser Versuchsreihe konnte gezeigt werden, dass veränderte Pigmentvolumenkonzentrationen zu einer Veränderung der Reflexionsspektren führen. Je höher die Pigmentvolumenkonzentration, also je weniger Bindemittel im Verhältnis zum Pigment vorliegt, desto mehr diffuse Reflexion wird gemessen. Je mehr Bindemittel um die Pigmente herum vorhanden ist, desto weniger diffuse Reflexion wird gemessen, was sich mit einem dunkleren Farbeindruck bemerkbar macht. Bei den Versuchen sind keine exakten Pigmentvolumenkonzentrationen in Bezug auf die Pigment- und Bindemiteleigenschaften errechnet worden, sondern es wurden lediglich für eine Konsolidierung vergleichbare Pigment/Bindemittelmischungen hergestellt.

Es kann aus diesen Messungen allerdings geschlossen werden, dass die Mischungen bei deutlich abnehmenden Pigmentvolumenkonzentrationen sich nicht der kritischen Pigmentvolumenkonzentration nähern und es nicht zu Glanzerscheinungen kommt. Die hier erreichten Pigmentvolumenkonzentrationen liegen sehr weit auf der rechten Seite der grafischen Darstellung der Pigmentvolumenkonzentration (s. Abb. 88), so dass dieses Modell zur Erläuterung für Konsolidierungsarbeiten nur bedingt herangezogen werden kann. In Abb. 89 und 90 wurden die Pigmentmischungen mit Gelatine und Funori photographisch festgehalten. Bei Übergängen von der 5%igen zur 10%igen Gelatine ist eine Reduzierung der Helligkeit zu beobachten, da die Pigmente mit Bindemittel umhüllt sind und die diffuse Reflexion abgenommen hat. Bei den Funori-Mischungen sind kaum Veränderungen der Helligkeit eingetreten, da hier die Konzentrationen der Klebstoffe sehr gering sind.

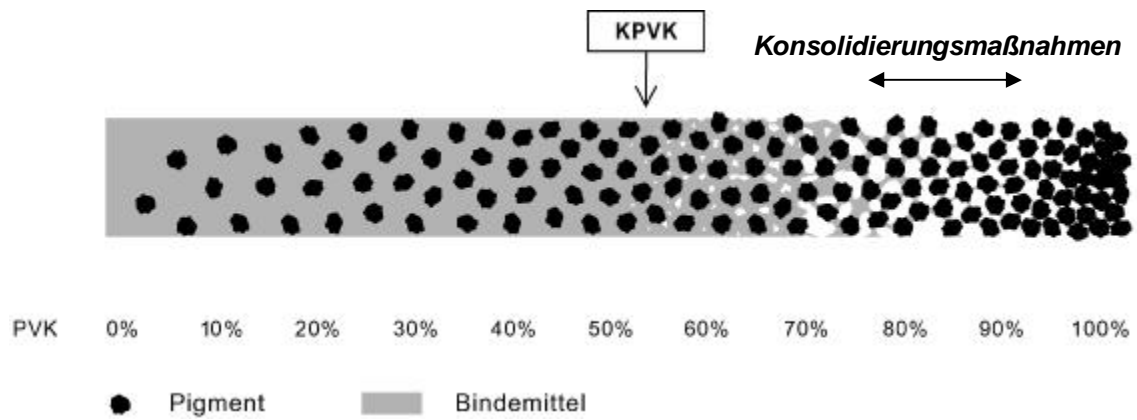


Abb. 88: Pigmentvolumenkonzentration (PVK) von Pigmentkörnern, die in einem Bindemittel eingebettet sind. Konsolidierungsmaßnahmen finden nur bei hohen PVK statt.



Abb. 89: PVK der Mischung Zinnober mit Gelatine 10 % (links), 5 % (mitte) und 1 % (rechts), bei der geringsten PVK (1 % Gelatine) ist der Farbeindruck am hellsten.

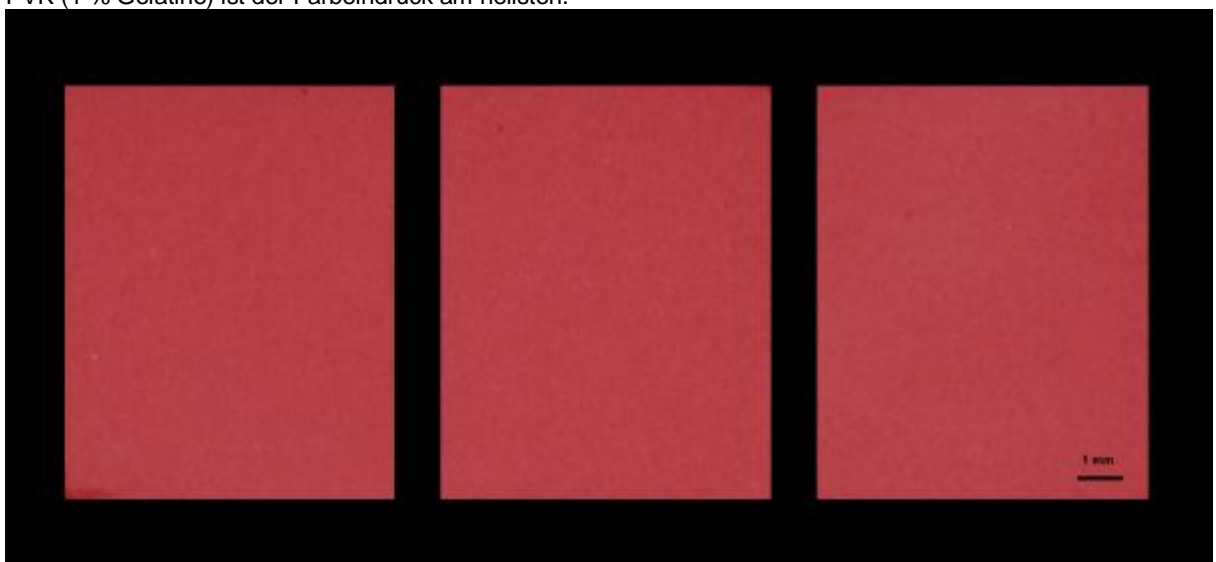


Abb. 90: PVK der Mischung Zinnober mit Funori 0,2 % (links), 1 % (mitte) und 2 % (rechts), alle drei Mischungen haben denselben Farbeindruck.

### 3.5 Alterungsverhalten der Pigment-Klebstoffgemische

Die Farbstabilität der Klebstoffe nach der beschleunigten Alterung als Konsolidierungsmittel im Pigmentgefüge steht im Mittelpunkt der folgenden Versuchsreihe. Wie in Kapitel 2.4, S. 79 besprochen, wurde die Langzeitstabilität von Klebstofffilmen in Bezug auf die Planlage, die Farbigkeit und die Flexibilität unter variierenden Alterungsbedingungen beobachtet. Diese Ergebnisse der beschleunigten Alterung sind bislang nicht aussagekräftig, da nur kleinste Änderungen der Alterungsbedingungen drastische Formveränderungen zur Folge hatten. Bei einer Konsolidierung liegt der Klebstoff im Verhältnis zum Pigment in einer Konzentration von nur einigen Prozent vor, wie anhand des Modells der Pigmentvolumenkonzentration (PVK) gezeigt wurde (s. Kapitel 3.4, S. 119). Diese geringe Menge Klebstoff gewährleistet die Ausbildung von Klebstoffbrücken, die bei entsprechender Verteilung eine genügend hohe Klebkraft zwischen den Pigmentkörnern ausbilden, um eine Malschicht zu festigen.

Die Kriterien für die Klebstoffauswahl für Konsolidierungsmaßnahmen werden neben den Einflüssen des Farbeindrucks durch einen Klebstoff auch von dessen Farbstabilität im Laufe der natürlichen Alterung abhängig gemacht.

Die Pigmentproben wurden mit den Klebstoffen benebelt, um oberflächliche und daraus resultierende farbliche Veränderungen zu beobachten.

Die mit dem Spincoat-Verfahren hergestellten Pigmentproben der Mischung Ultramarin/Bleiweiß wurden gemäß der Versuchsreihe zur Messung der Oberflächenbeschaffenheit (s. Kapitel 3.2, S. 101) mit Klebstoffen behandelt und anschließend verschiedenen Alterungsreihen der beschleunigten Alterung unterworfen (s. Tabelle 22).

<b>Pigmentprobe Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW)</b>	
<i>Alterungsreihe 2</i> <b>90 °C 35/85 % RF</b> (fünf Tage)	Gelatine 4x (gel 4x)
<i>Alterungsreihe 3</i> <b>80 °C 65 % RF</b> (fünf Tage)	JunFunori® 1xges (jfun 1xges)

Tabelle 22: Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) mit Gelatine und JunFunori®, 4x und 1xgesättigt aufgetragen, wurden in zwei Alterungsreihen beschleunigt gealtert.

Nach der beschleunigten Alterung wurde die diffuse Reflexion der Pigmentproben UV/VIS-spektroskopisch untersucht. Hier wird nur die Mischung Ultramarin/Bleiweiß herausgegriffen, da diese Pigmentmischung die größten Verschiebungen bei den bisherigen Versuchsreihen zur Oberflächenbeschaffenheit zeigte. Der Klebstoff Gelatine wird für die Farbstabilität als Konsolidierungsmittel ausgewählt, weil Gelatine als Klebstofffilm nach der

beschleunigten Alterung seine Planlage und Flexibilität stark verändert hat. Sollte ein Konsolidierungsmittel im Pigmentgefüge nach der beschleunigten Alterung ähnlich Form- und Flexibilitätsveränderungen erfahren, so müsste dies bei Gelatine als Konsolidierungsmittel gut zu messen sein.

JunFunori® zeigte eine gute Flexibilität nach der beschleunigten Alterung, verfärbte sich allerdings gelblich. Altert ein Konsolidierungsmittel im Pigmentgefüge vergleichbar zu den Klebstofffilmen, müsste eine Veränderung der Farbigkeit von JunFunori® nach der beschleunigten Alterung zu messen sein.

In Abb. 91 sind die UV/VIS-Spektren der Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) mit vierfachem Gelatineauftrag (gel 4x) nach der beschleunigten Alterung nach *Alterungsreihe 2* (90 °, 35/85 % RF alternierend) und die Referenz gezeigt. Referenz bedeutet hier, dass die Pigmentschicht nicht mit Klebstoff behandelt, aber auch beschleunigt gealtert wurde. Die Farbmessdaten sind für die zwei folgenden Beispiele im Anhang (12.17 b) angegeben.

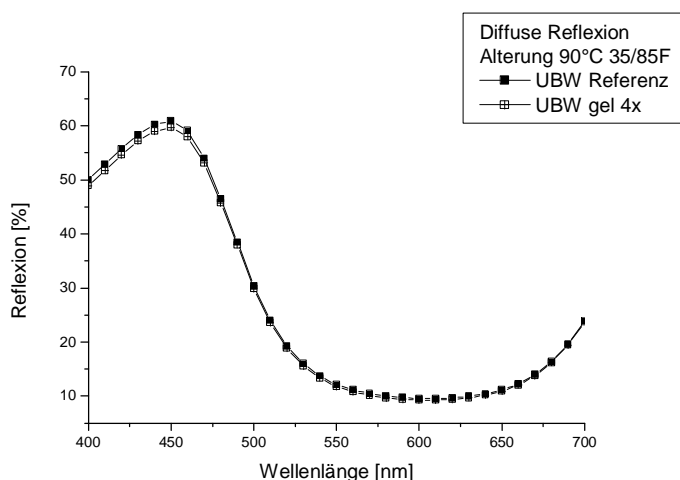


Abb. 91: UV/VIS-Spektroskopie von der Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) als Referenz und mit viermaligem Gelatineauftrag (gel 4x). Die Probe wurde für fünf Tage bei 90 °C und alternierender relativer Feuchte (alle drei Stunden) zwischen 35 und 85 % beschleunigt gealtert. Das Reflexionsspektrum der behandelten Hälfte liegt leicht unterhalb der unbehandelten.

Das Reflexionsspektrum der behandelten Hälfte liegt geringfügig unter der unbehandelten Referenz. Die Helligkeit der Pigmentprobe mit Gelatineauftrag hat leicht abgenommen, die Farbigkeit und die Sättigung sind gleich geblieben. Dies bedeutet, dass der Klebstoff, der als Konsolidierungsmittel im Pigmentgefüge vorliegt, zu einer leichten Verdunkelung der Pigmentprobe geführt hat. Der Pigmentauftrag hat seine Form und Dimension nicht verändert und ist intakt. Reine Gelatinefilme haben unter denselben Alterungsbedingungen starke Deformations- und Flexibilitätsveränderungen erfahren (s. Anhang 12.12). Das Ergebnis bedeutet, dass die Alterung eines reinen Klebstofffilms nicht direkt mit der Alterung eines Klebstoffs in einem Pigmentgefüge verglichen bzw. darauf rückgeschlossen werden kann.

JunFunori® hat sich als Klebstofffilm gut während der verschiedenen Alterungsreihen in Bezug auf die Planlage und Flexibilität verhalten (s. Anhang 12.12). Teilweise verfärbte sich der Klebstofffilm ins Gelbliche.

Bei der *Alterungsreihe 3* (80 °C und 65 % relative Feuchte), bei der JunFunori® einmal sättigend (jfun 1xges) auf die Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) aufgetragen wurde, verliert die behandelte Probe zwischen 400 nm und 475 nm leicht an Helligkeit, wie an den Reflexionskurven der UV/VIS-Spektroskopie zu sehen ist (s. Abb. 92).

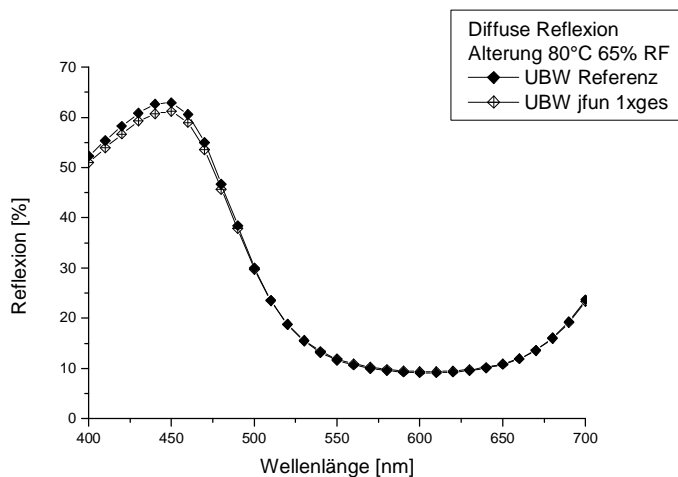


Abb. 92: UV/VIS-Spektroskopie von der Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) als Referenz und mit einmal gesättigten JunFunori®-Auftrag (jfun 1xges). Die Probe wurde für fünf Tage bei 80 °C und 65 % relativer Feuchte beschleunigt gealtert. Die Spektralkurve der behandelten Hälfte liegt leicht unterhalb der unbehandelten.

Die behandelte Probe hat an Helligkeit leicht verloren, der  $\Delta b^*$ -Wert liegt bei 1,4972 (s. Anhang 12.17b), der eine leichte Verschiebung ins Gelbliche belegt. Diese Gelbverschiebung wird bei der sehr drastischen Alterungsbedingung aber als gering eingeschätzt, da sich wiederum weder die Planlage noch die Helligkeit der Pigmentprobe stark nach der beschleunigten Alterung verändert hat.

Diese Versuchsreihe zeigte, dass die Ergebnisse der beschleunigten Alterung der Klebstofffilme nicht auf die Form- und Farbstabilität der Klebstoffe als Konsolidierungsmittel im Pigmentgefüge übertragen werden können. Die reinen Klebstofffilme verändern ihre Planlage, ihre Form und ihre Farbe unverhältnismäßig stärker, als es die beiden oben angegebenen Beispiele der Klebstoffe als Konsolidierungsmittel zeigen.

Liegt der Klebstoff fein verteilt, homogen und in geringer Konzentration in einem Pigmentgefüge vor, so bleibt die Planlage, Form und Farbe stabil. Sowohl die Klebkraft als auch die Haftungsfähigkeit des Klebstoffs bleiben ungeachtet der beschleunigten Alterung stabil. Dies zeigte sich bei allen untersuchten Pigmentproben, bei denen der Klebstoff als

Konsolidierungsmittel im Pigmentgefüge beschleunigt gealtert wurde. Basierend auf diesen Alterungsuntersuchungen verhalten sich die Klebstoffe alle vergleichbar, so dass keinem Klebstoff der Vorzug in Bezug auf die Alterungseigenschaft gegeben werden kann.

### 3.6 Sonderfall Ruß

Sommermeyer (1998: 13, 53) diskutiert das Konsolidieren von Rußflächen bei einer Installation von Janis Kounellis. Der Ruß haftet lose als Verbrennungsrückstand auf der senkrechten Wand und ist unfixiert. Rußschichten können bislang mit den zur Verfügung stehenden Aerosolen nicht konsolidiert werden, da es zu Aufhellungen des Farbeindrucks kommt.

Lampen-Rußpartikel weisen eine Größenverteilung von 0,02 µm bis 0,1 µm und der Ruß aus Brennöfen von 0,01 µm bis 0,06 µm (Buxbaum 1998: 145) auf. Die kleinsten Aerosolpartikel, die mit den hier vorgestellten Generatoren produziert werden, liegen allerdings bei 2 µm bis 3 µm, welche erheblich größer als die zu konsolidierenden Rußpartikel sind. Das versuchsweise Aufnebeln von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt) auf eine Rußschicht (s. Anlage 12.16) hat zu einer Erhellung der vormals tiefschwarzen Rußschicht (s. Abb. 93) geführt. Die eingebrachten Aerosolpartikel sind größer als das zu konsolidierende Pigment, wodurch es zu Verklumpungen und zu einem spannungsreichen Auftrocknen kommt (s. Abb. 94 und 95). Erschwerend kommt bei einem wässrigen Konsolidierungsmittel hinzu, dass Ruß unverbrannte, hydrophobe Bestandteile aufweist. Das wässrige Konsolidierungsmittel kann abperlen und nicht in die Rußschicht eindringen. Der tiefschwarze Farbeindruck erhellt sich, da die hohe Absorption einer schwarzen feinkörnigen Rußfläche reduziert und die diffuse Reflexion erhöht wurde. In Abb. 96 wurde die diffuse Reflexion einer schwarzen Rußschicht auf Glas aufgenommen. Die Reflexion liegt bei etwa 2 %. Leichte Verschiebungen dieser geringen Reflexion sind zwar mit dem Auge zu erkennen, messtechnisch aber problematisch zu erfassen, da Farbmessgeräte, die bevorzugt Reflexionskurven aufnehmen, meist eine große Ungenauigkeit bei der Messung von sehr geringen Reflexionswerten von nur einigen Prozent aufweisen. Aus diesem Grund wurden die oberflächlichen Veränderungen nur mit dem REM ohne Reflexionskurven und Farbmessdaten aufgenommen.

Rußschichten und Pigmente mit einer Größe unter 1 µm Größe stellen einen Grenzfall für die Konsolidierung dar und können mit den Aerosolen der hier vorgestellten Geräte nicht konsolidiert werden. Die Größe des zu konsolidierenden Pigments ist ein entscheidendes Kriterium, ob ein Aerosol in eine Pigmentschicht eindringen und Klebstoffbrücken ausbilden kann (s. Abb. 15). Bei Pigmenten über einer Größe von 5 µm besteht nicht die Gefahr von Verklumpungen, wie es die Konsolidierungen an den Testpigmenten von Ruß gezeigt haben. Bei Pigmentgrößen unter 5 µm besteht die Gefahr, dass das Aerosol nicht in die Pigmentschicht eindringt und es zu Spannungsrissen beim Auftrocknen kommt (s. Abb. 94).

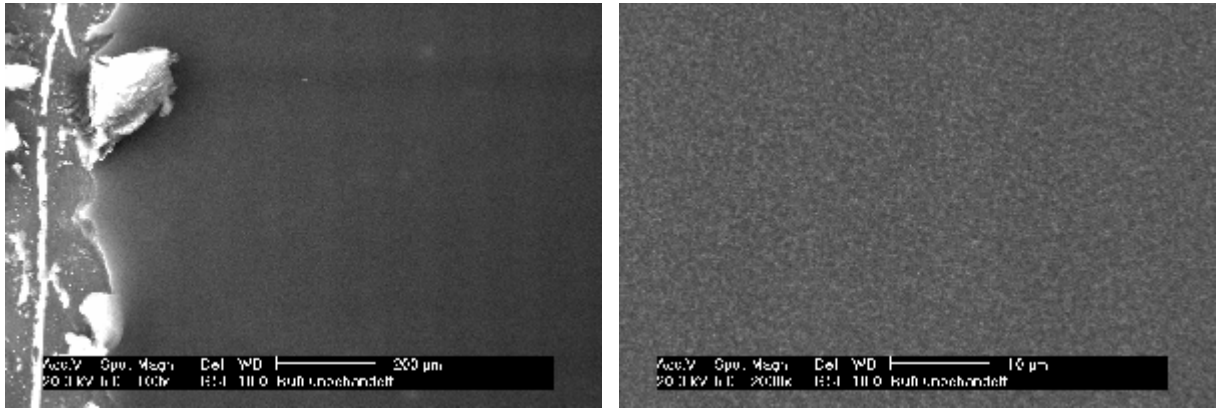


Abb. 93: REM-Aufnahmen von Ruß auf Glas, unbehandelt in 100facher (links) und 2000facher (rechts) Vergrößerung.

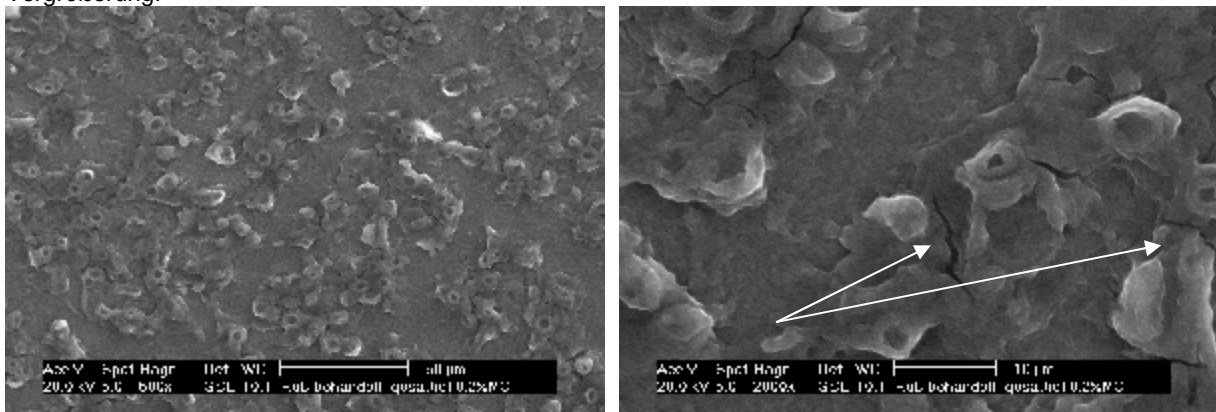


Abb. 94: REM-Aufnahmen von Ruß mit Methylcellulose (0,2 % Massengehalt) sättigend als Aerosol auf die Rußschicht aufgetragen. Die Konsolidierung hat ein Verklumpen (500fache Vergrößerung, links) und Spannungsrisse (s. Pfeile, 2000fache Vergrößerung, rechts) in der Rußschicht bewirkt.

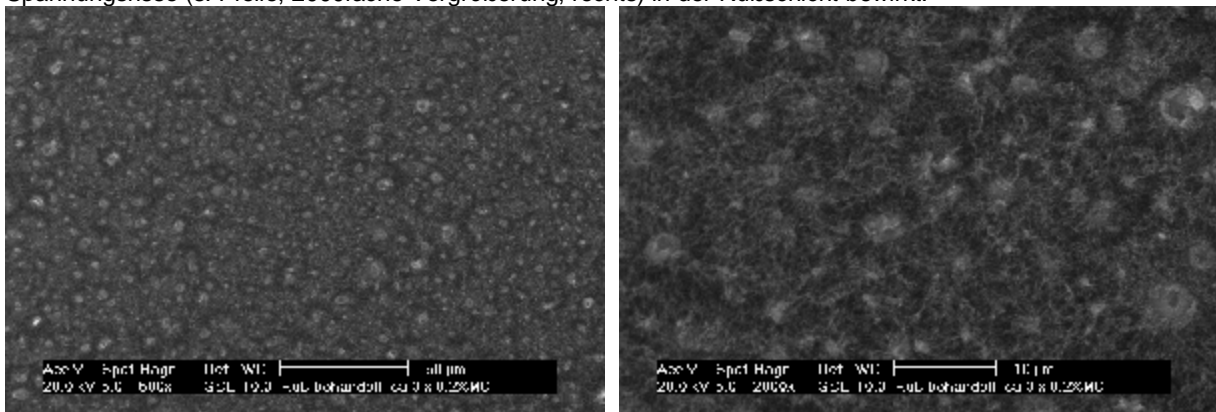


Abb. 95: REM-Aufnahmen von Ruß mit Methylcellulose (0,2 % Massengehalt) mit dreimaligem Auftrag als Aerosol behandelt. Das Konsolidierungsmittel hat ein Verklumpen der Rußschicht bewirkt. Unebenheiten bei 500facher Vergrößerung (links) sind zu erkennen, die bei 2000facher Vergrößerung (rechts) noch deutlicher werden.



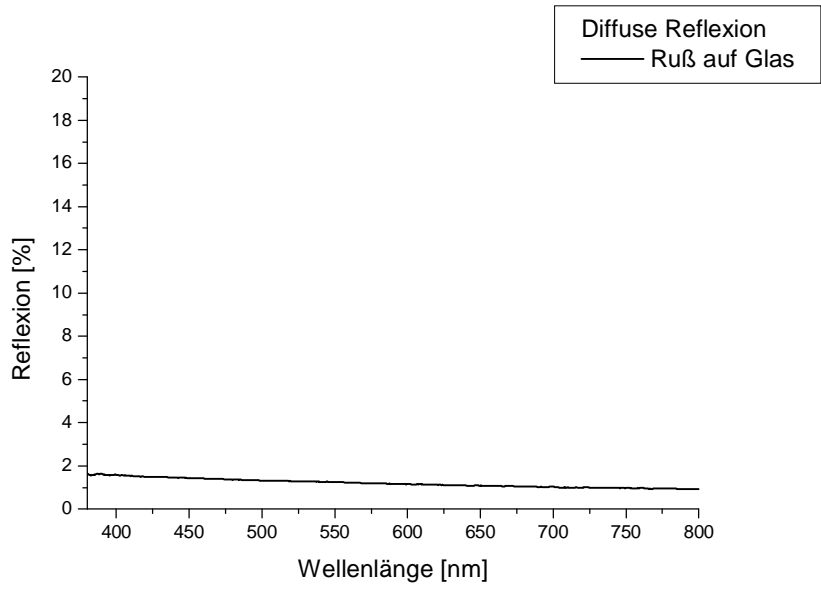


Abb. 96: UV/VIS-Spektroskopie einer Rußschicht auf Glas. Die Reflexion liegt bei etwa 2 %.

### 3.7 Schlussfolgerung in Bezug auf die Aerosolbehandlung

Anhand der Reflexionsspektren und der Farbmessdaten wurden die mit dem Spincoat-Verfahren hergestellten Pigmentproben, die mit verschiedenen Klebstoffen und unterschiedlichen Applikationsmethoden konsolidiert wurden, untersucht. Die Veränderung des Farbeindrucks fiel bei den meisten Pigmentproben gering aus, die höchsten  $\Delta L^*$ - und  $\Delta E_{ab}^*$ -Werte lagen bei 7 Einheiten, was mit dem Auge als eine Verdunkelung wahrzunehmen ist, aber einen geringen Wert darstellt. Basierend auf den hier durchgeführten Messungen erscheinen erst  $\Delta E_{ab}^*$ -Werte ab einem Wert von 2,5 Einheiten unterscheidbar für das Auge zu sein.

Eine Verdunkelung der konsolidierten Pigmentfläche kann nicht als ein Auftreten von Glanz zurückgeführt werden, wie die Messungen mit und ohne Glanzeinschluss belegen. Vielmehr wird die vormals poröse Pigmentfläche durch einen Konsolidierungsauftrag während der Ausbildung der Klebstoffbrücken leicht verdichtet, was in einer Reduzierung der diffusen Reflexion resultiert. Die Verdichtung bewirkt, dass die diffuse Reflexion aus dem Innern der Pigmentschicht reduziert wird bzw. wegfällt und sich die Helligkeit damit reduziert. Das Risiko, dass eine Pigmentschicht durch einen Aerosolauftrag bis zum Auftreten von Glanz beschichtet wird, besteht nicht. Die geringen Mengen an Klebstoff, die durch die Aerosolanwendung eingetragen werden, realisieren Klebstoffbrücken und leisten eine gleichmäßige Verteilung des Klebstoffs.

Das Modell der Pigmentvolumenkonzentration kann für den Fall der Konsolidierung nur bei sehr hohen Pigmentvolumenkonzentrationen übertragen werden, da die kritische Pigmentvolumenkonzentration nicht unterschritten wird, die mit dem Auftreten von Glanz einhergeht.

Die ausgewählten Klebstoffe sind auch nach einer beschleunigten Alterung im Pigmentgefüge dimensionsstabil. Es kommt bei keinem der untersuchten Klebstoffe zu Spannungsrissen oder zu Abhebungen der Klebstoff-Pigmentschicht. Das bedeutet, dass die hier untersuchten maximalen Konzentrationen von 1 % bei Gelatine und Hausenblase keine Spannungen im Pigmentgefüge hervorrufen und auch einen mehrmaligen Auftrag zulassen. Der Klebstoff Klucel® in Ethanol verursachte allerdings die größten Veränderungen des Farbeindrucks bei der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß. Klucel® unterliegt starken Einschränkungen und kann als Konsolidierungsmittel nur für Objekte empfohlen werden, die empfindlich gegenüber einem wässrigen Konsolidierungsmittel sind. Bei Klucel®-Aufträgen ist es wiederholt zu Verdunkelungen nach einem Konsolidierungsauftrag gekommen. Auch die *Auftragsart 5*, eine Tränkung der Pigmentschicht, bei der ein nasser Klebstoffauftrag erreicht wird, wird bei nicht-saugenden Untergründen als risikobelastet eingestuft, da es bei dieser Auftragsart zu Verdunkelungen und zu Schwemmrändern kommen kann. Bei

saugenden Untergründen wie Papier oder Pergament werden weniger Schwemmränder auftreten. Es wird allerdings trotzdem ein mehrfach hintereinander erfolgender Aerosol-auftrag empfohlen.

Pigmente, die kleiner als 1  $\mu\text{m}$  sind, können derzeit nicht mit den zur Verfügung stehenden Aerosolen gefestigt werden, da die Aerosole größer als die zu konsolidierenden Pigmente sind. Die Aerosole benetzen die Pigmente nicht und dringen nicht gleichmäßig in die Pigmentschicht ein. Rußschichten sind ein Beispiel dafür, dass es zu einem unregelmäßigen Klebstoffeintrag kommt und die obersten Schichten der Pigmentlage verklumpen und spannungsreich austrocknen, wie es an Rissen in der Pigmentschicht zu beobachten ist. Bei Pigmenten größer als 5  $\mu\text{m}$  besteht diese Gefahr nicht, da bei keiner der Proben ein derartiges Schadensbild nach einem Konsolidierungsauftrag beobachtet werden konnte und die erzeugten Aerosole über Größenverteilungen von 5  $\mu\text{m}$  liegen.

Die Veränderung des Farbeindrucks bezüglich der Farbigkeit einer Pigmentschicht, kann nur tendenziell beschrieben werden. Wie das Beispiel der Konsolidierung der schwarzen Rußfläche gezeigt hat, liegt nur eine Reflexion von 2 % vor. Eine geringe Verschiebung der diffusen Reflexion ist sofort mit dem Auge zu beobachten, da nur eine geringe Reflexion vorliegt. Apparatebedingt sind Reflexionsunterschiede schwer zu messen, da kaum Reflexion vorliegt, die verarbeitet werden kann. Das Beispiel der Glanzmessung des Bariumsulfat-Presslings (s. Kapitel 3.3, S. 113), bei dem die eine Hälfte hochglänzend und die andere rau war, hat hingegen gezeigt, dass bei sehr hohen Reflexionswerten von über 70 % Unterschiede messtechnisch erfasst werden können, für das Auge aber kaum zu unterscheiden sind. Das Auge kann Unterschiede der Helligkeit von sehr hohen Werten schlechter unterscheiden, als Unterschiede von geringen Helligkeiten. Für die Anwendung von Aerosolen auf unterschiedlich farbigen Pigmentflächen kann in großer Näherung angenommen werden, dass Helligkeitsverschiebungen bei weißen oder hellen Pigmentflächen mit dem Auge weniger zu unterscheiden sind, als in den Fällen, in denen dunkle Pigmentflächen eine Helligkeitsverschiebung erfahren.

## 4 Schlussfolgerung und Risikoeinschätzung einer Aerosolbehandlung

Das Konsolidieren von pudernden Pigmentschichten über einer Korngröße etwa 5 µm kann mit mehrfach hintereinander erfolgenden Aerosolaufträgen als ein Festigungsverfahren eingeschätzt werden, das in hohem Maße eine gleichmäßige Klebstoffverteilung und eine ausreichende Stabilisierung sicherstellt. Die produzierten Aerosole aller drei untersuchten Generatoren, der AGS 2000, der Nebulizer und der Mini-Vernebler, produzieren genügend kleine Partikel, die eine Pigmentschicht benetzen und Klebstoffbrücken ausbilden können. Bei den UV/VIS-spektroskopischen Untersuchungen konnte bei keinem der Proben Glanz gemessen werden, was auf eine ausreichende Penetration schließen lässt.

Die Partikel sind unter anderem auch deshalb klein, weil sich die größeren Aerosolpartikel an den Schlauchinnenwänden abscheiden. Dies ist zwar in Bezug auf die Produktion von kleinen Partikeln von Vorteil, birgt aber die Gefahr in sich, dass sich diese größeren Partikel sammeln und ruckhaft aus dem Schlauch und durch die Düse auf das Objekt spritzen. Aus diesem Grund werden für die Praxis strukturierte Schläuche empfohlen. Des Weiteren sollten die Schläuche und die Düsen während einer Konsolidierungsmaßnahme von Zeit zu Zeit auf einem Löschkarton ausgeklopft werden.

Der Nebulizer, als Druckluft betriebene Generator, produziert die kleinsten Partikel, weist aber den höchsten Gas-Partikel-Strom auf, was die Gefahr des Wegtragens von losen Pigmentkörnern darstellt. Aus diesem Grund wird den Ultraschall betriebenen Aerosolgeneratoren der Vorzug für die Konsolidierung von pudernden Pigmentaufträgen gegeben.

Selbst die Partikel des Nebulizers sind allerdings nicht klein genug, um Pigmente mit einer Größe kleiner als 1 µm zu festigen. Derart kleine Pigmente können derzeit nicht mit den zur Verfügung stehenden Aerosolen konsolidiert werden, da die Partikel nicht zwischen die Pigmente gelangen, die Oberflächencharakteristik deutlich verändern und dadurch spannungsreich aufdrehen. Rußschichten mit Pigmentgrößen weit unter 1 µm stellen so ein Beispiel dar, wie die Konsolidierungsversuche an Rußschichten mit Methylcellulose gezeigt haben.

Bei Pigmenten größerer Korngröße wie Zinnober, die Mischung Ultramarin/Bleiweiß und brauner Ocker, die untersucht wurden, kam es bei keinem der Klebstoffe zu Spannungsrissen nach einer Konsolidierungsmaßnahme. Selbst mehrfache Aufträge von 1 %iger Gelatine und Hausenblase führten nicht zu Spannungsrissen nach dem Trocknen oder zu einem Abheben der Pigment-Klebstoffschicht.

Die Klebstoffe Methylcellulose, Klucel®, Funori und JunFunori® werden bei Konzentrationen zwischen 0,1 % und 0,2 % Massengehalt maximal im AGS 2000 vernebelt. Bei diesen geringen Konzentrationen besteht nicht die Gefahr von spannungsreichem Auftrocknen. Ein

Risiko stellt allerdings bei mehrfachem Aerosolauftrag zu viel Feuchtigkeit dar, die in das Pigmentgefüge eingetragen wird. Die mehrfachen Aufträge sind häufig notwendig, da durch die geringen Konzentrationen die Klebkraft relativ geringer ist. Bei nicht-saugenden Untergründen kann der hohe Feuchteeintrag zu Schwemmrändern führen, wie es zum Teil bei der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß zu beobachten war oder der Fall bei Malerei auf Glas eintreten könnte. Bei saugenden Untergründen wie Papier und Pergament reduziert sich diese Gefahr, da das Papier oder das Pergament einen Teil der Feuchtigkeit aufnimmt.

Die Viskosität ist maßgeblich dafür verantwortlich, dass die Klebstoffe in den verschiedenen hohen Konzentrationen vernebelt werden müssen. Dies gilt besonders für JunFunori®, der eine extrem hohe Viskosität aufweist und dadurch nur bei einer Konzentration von 0,1 % Massengehalt im AGS 2000 vernebelt werden kann. Bei dünnen Pigmentschichten, die mit einem Klebstoff geringer Klebkraft gefestigt werden sollen, kann JunFunori® der geeignete Klebstoff darstellen.

Die Klebstoffe Funori, JunFunori® und Hausenblase weisen als Klebstofffilme ein hohes Streuvermögen auf, was den Vorteil bietet, dass sie weder auf rauen noch auf glatten Untergründen zu glänzenden Filmen aufrocknen. Gegensätzlich dazu verhält sich Gelatine, Klucel® und Methylcellulose, die auf glatten Untergründen zu glänzenden Filmen aufrocknen. Dies kann insbesondere bei einer Konsolidierung von Malerei auf Glas gefährlich sein, da der Klebstoffauftrag glänzend aufrocknen kann. Werden diese Klebstoffe allerdings auf rauen und porösen Pigmentschichten aufgetragen, besteht die Gefahr der Glanzbildung nicht, da diese Klebstoffe sich dem Untergrund exakt anpassen und die Reflexionseigenschaften des Untergrunds nicht beeinflussen.

Tritt bei einer Konsolidierungsmaßnahme eine Verdunkelung auf, so wird dies nicht auf die Bildung von Glanz zurückgeführt, sondern auf eine Reduzierung der diffusen Reflexion. Die Pigmentschicht wird durch die Ausbildung von Klebstoffbrücken leicht verdichtet, die Pigmente rücken näher aneinander und die diffuse Reflexion aus dem Innern der Schicht nimmt ab. Dieser Zusammenhang legt den Schluss nahe, dass eine Konsolidierung eines Pastells unweigerlich zu einer Reduzierung der diffusen Reflexion und des Weiteren zu einer Reduzierung der Helligkeit führen muss. Die Konsolidierung eines Pastells stellt ein hohes Risiko in Bezug auf die Veränderung des Farbeindrucks dar, weil die lose aufeinander liegenden Pigmentkörner durch den Eintrag eines Konsolidierungsmittels zusammensinken, die Helligkeit reduziert und der Farbeindruck verändert wird. Von einer Konsolidierung von Pastellen muss aus diesem Grund abgeraten werden.

Bei dünnen und kompakten Pigmentaufträgen, wie Kreidezeichnungen und Gouachen, ist das Risiko des Zusammensinkens eines Pigmentaufstrichs geringer, da die Schichtdicke geringer ist und die Pigmentschicht einen geringen Bindemittelanteil aufweist. Dies steht im

Gegensatz zu einem Pastell, das bindemittelfrei ist. Selbst geringe Reste eines noch original vorliegenden Bindemittels verhindern ein zu starkes Zusammensinken der Pigmentschicht, im Gegensatz zu einem Pigmentauftrag, bei dem kein Bindemittel vorliegt.

Bei sehr dünnen Pigmentaufstrichen oder nur einzelnen lose liegenden Pigmentkörnern besteht die Gefahr, dass zu viel Klebstoff aufgetragen wird, der das Pigment vollständig mit Konsolidierungsmittel umhüllt und sich dadurch der Farbeindruck verändert. Dieser Fall liegt bei der Kreidezeichnung von Ross Sinclair vor, der sehr dünne weiße Kreideschichten auf dem schwarzen Acrylgrund mit dem Handballen aufgetragen hat. Die Pigmentvolumenkonzentration ist sehr hoch, da kein Bindemittel zwischen den weißen Pigmentkörnern vorliegt. Diese dünnen Schichten zu konsolidieren, stellt einen weiteren Sonderfall dar, der als restauratorisches Fallbeispiel im folgenden Kapitel diskutiert wird.

## 5 Fallbeispiele

### 5.1 Konservatorische Ansätze von farbintensiven und fragilen Pigmentoberflächen

Pigmente und Pollen, die nahezu ungeschützt für Exponate moderner und zeitgenössischer Kunst verwendet werden, erfordern die eingehende Beschäftigung mit den Materialien für die Erarbeitung von Konservierungskonzepten. Schinzel (2004: 89) arbeitet in ihrem Aufsatz die zentrale Stellung des Restaurators heraus, indem sie aus restauratorischer Sicht die Bedeutung des Materials vor allem für zeitgenössische Kunstwerke erläutert. Die Moderne verlangt eine sensibilisierte Aufmerksamkeit hinsichtlich der Materialien, da die Medien vielfältig und gelegentlich unbekannter Herkunft sind. Der Begriff Medium wird im restauratorischen Sinn synonym für die Zeichen- und Malmaterialien verwendet. Bei den folgenden Fallbeispielen, mit dem Schwerpunkt auf moderne und zeitgenössische Kunst, werden farbintensive und fragile Pigmentoberflächen vorgestellt, anhand derer die Bedeutung des eingesetzten Materials diskutiert und restauratorische Maßnahmen und konservatorische Fragestellungen erläutert werden. Die Vorstellung von Fallbeispielen spiegelt die individuelle Intention des Künstlers und die darauf basierende individuelle Betrachtung des Materialeinsatzes wider.

Mark Rothko (1903-1970) zählt zu den abstrakten Expressionisten und besticht ab den 1950er Jahren durch großformatige monochrome Farbkompositionen mit fließenden Farbübergängen (s. Abb. 97). Die Arbeiten sind mit Öl auf Leinwand ausgeführt und zeichnen sich durch die Verwendung von feinen Pinseln aus (Anfam 1998: 83). Die Malschicht ist mit mehrfachen Lasuren aufgebaut. Althöfer (1985: 149) schreibt hierzu, dass es sich bei Mark Rothko um einen subtilen Oberflächencharakter handelt und eine Fehlstelle auf den Gemälden mit den traditionellen Restaurierungstechniken nicht zu retuschieren ist. Die monochromen Farbflächen und die spezifische Maltechnik erschweren eine Retusche bei Rothkos Werken. In der Rothko-Chapel in Houston, USA, hängen die überformatigen Bilder Seite an Seite und schließen sich zu einem Kreis durch die enge Hängung und achteckige Bauweise der Kapelle. Das Tageslicht fällt durch getrübbte Scheiben von der Decke in den Kapellenraum ein, das Licht ist gedämmt und es entsteht ein ganzheitliches Bilderlebnis seiner Kunstwerke (Nodelman 1997: 165). Mark Rothko selbst drückt seine Erwartung, was der Betrachter vor seinen Werken empfinden soll, folgendermaßen aus (Seymour 1987: 21): „I am not interested in relationship of colour or form or anything else. I am interested in expressing the basic human emotions. [...] The people who weep before my pictures are having the same religious experience I had when I painted them. And if you, as you say, are moved only by their colour relationship, then you missed the point. (Ich bin nicht an der Beziehung zwischen Farbe und Form oder sonst etwas interessiert. Ich bin daran interessiert, die

menschlichen Gefühle auszudrücken. [...] Die Menschen, die vor meinen Bildern weinen, haben dieselbe religiöse Erfahrung gemacht, wie ich, als ich sie gemalt habe. Und wenn Sie, wie Sie sagen, nur durch die Beziehung der Farben berührt werden, dann haben Sie das Ziel verfehlt.“ Die Wirkung auf den Betrachter ist sein vorrangiges Ziel und das Material als solches spielt eine untergeordnete Rolle für den Künstler. Der spezifische Farbeindruck und die Oberfläche sollten vor diesem Hintergrund beibehalten werden.

Für die amerikanische Kunst wird Mark Rothko als Wegbereiter der Farbfeldmalerei („color field painting“) angesehen, die sich dahingehend auszeichnet, dass sie sich in ihrer Ausdrucksweise auf Farbflächen beschränkt und seit den 1950er Jahren in den USA vertreten wird. In Deutschland nimmt Gotthard Graubner (\*1930) diese Ausdruckstechnik auf. Er kreiert ab 1963 die sogenannten Farblaiber oder Kissenbilder (s. Abb. 98), die folgendermaßen aufgebaut werden (Schmidt 1978: 33):

„Ausgangspunkt bilden die rohen noch nicht bemalten Bildkörper: den über einen Keilrahmen gezogenen Leinwandgrund (oft Nessel) deckt eine gleichmäßige Dicke Lage Synthetikwatte (variierend zwischen 4 cm und 15 cm), über die eine zweite straffe Textilbespannung so aufgebracht wird, dass sie die Seitenkanten weich rundet, doch ohne Faltenbildung mitpolstert. Flach auf dem Boden liegend wird das Gebilde von oben mit dünnflüssigen Schichten Ölfarbe (unter Verwendung von Terpentin und Aceton als Lösungsmittel) gestärkt, fleckig besprengt, in kreisenden Bewegungen bei gleichzeitigem Umschreiten von allen Seiten mit einem langstieligen Besen eingerieben, wobei die Rundformungen des Duktus die rhythmische Arm, überhaupt Körpergestik, in nachvollziehbarer Weise fixieren. An den Seiten, die später die Tiefe des senkrecht an der Wand angebrachten Bildes ergeben, darf die Farbe, wie oft bei Graubners Arbeiten in feinen Spuren ausrinnen, in Kränzen unregelmäßig verkrusten. Entsprechend dem Format werden ca. 20 Liter Farbflüssigkeit und mehr nacheinander lasierend aufgetragen, dringen auch durch die Leinwand in die Watte ein, färben sie, der Beobachtung entzogen, auch insofern unregelmäßig, als durch gelegentlich absichtlich herbeigeführten Erschütterungen in den Sickerprozess im Innern eingegriffen wird.“

Diese sehr anschauliche technische Beschreibung des Entstehungsprozesses, die in dem Ausstellungskatalog mit Abbildungen noch verdeutlicht wird, ist hilfreich, um die Wirkungsweise seiner Bild-Gebilde, wie Imdahl (1980: 10) diese umschreibt, zu verstehen. Die Kunstwerke sind nicht zwei, sondern dreidimensional, sie schaffen selbst einen Raum, ein sich wölbendes Gebilde, eine gegenstandslose Farbraum-Vision. Nach den Worten von Imdahl (1980: 11) wird die Materialität geleugnet, der Betrachter erfährt ein immaterielles Gebilde.



So ausgefeilt und speziell der technische Entstehungsprozess ist, so gegenstandslos und materiell unabhängig wirken die Arbeiten auf den Betrachter. Die offenporige Textur und pudernde Oberflächenbeschaffenheit sind Grundlage, um einen solchen Eindruck hervorzurufen, und sind demnach auch in dieser Form zu erhalten. Die Oberfläche von Graubners Gebilden und die mechanische Instabilität als dreidimensionales Werk sind gegenüber Druck und Abrieb empfindlich, wodurch allerdings gerade der spezifische Farbeindruck generiert wird. Bisher sind keine Publikationen zu Restaurierungsarbeiten von Gotthard Graubners Kissenbildern, die sich mit der fragilen Oberfläche auseinandersetzen, bekannt. Althöfer (1980: 138) bemerkt hierzu, dass die Kissenbilder auf schwankende klimatische Veränderungen reagieren und spezielle Klimakisten bei einem Transport angefertigt werden sollen.

Yves Klein (1928-1962) hat etwa ein Jahr lang an der Zusammensetzung eines Pigment/Bindemittelsystems gearbeitet, welches strahlender, leuchtender und der vollkommendste Ausdruck von Blau sein sollte. Er entwickelte das „International Klein Blue“, welches er am 31.5.1960 beim Pariser Patentamt mit der Nummer 63471 mit der Abkürzung „IKB“ patentieren ließ (Weitemeier 1994: 17). Dabei handelt es sich um ein synthetisches Ultramarin Pigment, welches mit dem Fixier-bzw. Bindemittel „Rhodapas“ angerieben wird. Heute wird ein Nachfolgeprodukt des Rhodapas mit ca. 52 % Pigmentanteilen angeboten<sup>8</sup>. Das Bindemittel ist hochverdünnt und transparent, wodurch das Pigment wie lose aufliegend auf dem Träger erscheint. Pfeiffer (2004: 57) konkretisiert die Angaben bezüglich der Benennung des „International Klein Blue“, dass Yves Klein ein Bindemittel vom Chemiekonzern Rhône Poulenc mit dem Namen Rhodapas M60A erhalten hat<sup>9</sup>. Seine monochromen Bilder, auf denen er das „IKB“ unter anderem mit der Rolle aufgetragen hat, wirken durch eine ansprechende Strahlkraft, da sie zudem ohne Rahmen präsentiert, bis an den Rand des Bildträgers mit Farbe bedeckt sind und meist mit Abstand von der Wand ausgestellt werden sollen (Weitemeier 1994: 19). In einer anderen Werkfolge arbeitet Yves Klein mit Schwämmen, die auch in das „IKB“ eingebettet sind (s. Abb. 99). Pfeiffer (2004: 76) schreibt hierzu, dass die Schwämme ihm als Hilfsmittel zum Auftragen der Farbe dienten, sie waren sowohl plastische Form als auch Naturelement. Die hohe Saugkraft und die Vorstellung des Imprägnierens der Farbe Blau steigerte noch die Ausdruckskraft für Yves

---

<sup>8</sup> Produktinformation von kt. COLOR Farbenmanufaktur, Aathaltstraße 80, 8610 Uster, Schweiz. Unter LC\*- Farben wird das Nachfolgeprodukt von Rhodapas, ein Vinylacetat, als Bindemittel der Emulsionsfarbe Innen mit einem Ultramarin nach Yves Klein vertrieben. Es liegen ca. 52% Pigment im hochverdünnten Bindemittel vor.

<sup>9</sup> Pfeiffer zitiert diese Angaben aus einem Ausstellungskatalog über Yves Klein 1928- 1962, vom Institute of the Arts, Rice University, Houston 1982.

Klein. Obgleich auch hier wieder die technische Raffinesse, das blaue Pigment mit dem damals neu eingesetzten Bindemittelzusatz, die materielle Grundlage bietet, um eine solche Farbbrillanz zu schaffen, so wollte Yves Klein mit seinem Sendungsbewusstsein die Menschen erreichen, Transzendenz und Schönheit schöpfen (Restany 1982: 8).

Für einen restauratorischen Umgang mit den Werken von Yves Klein bedeutet dies, dass neben dem Dokumentieren der Arbeitsmaterialien, der Kenntnis der Pigmente und Bindemittel die authentische Hängung und die Bewahrung der Oberflächencharakteristik bedeutend sind. Althöfer (1985: 147) gibt an, dass Yves Klein für seine Leinwand bevorzugt Fleischsäcke von den Galeries Lafayette und Messingreißzwecke verwendet hat. Die Angaben von Weitemeier decken sich mit denen von Althöfer hinsichtlich der rahmenlosen Präsentation und der Bemalung der Ränder.

Die Arbeiten von Anish Kapoor (\*1954) und Wolfgang Laib (\*1950) bestechen durch das Verwenden von mineralischen und natürlichen Pigmenten und Blütenpollen. Diese Materialien sind nicht in einem Bindemittel eingebettet, sondern sind lose in den Installationen arrangiert. Gerade der Vergleich dieser Arbeiten veranschaulicht den individuellen Zugang zu den Materialien anhand der hier herausgegriffenen Beispiele. Anish Kapoor verarbeitet in seinen Frühwerken Pigmente, die er 1979 auf einer Reise in seinem Heimatland Indien kennengelernt hat. Wohnhaft in Großbritannien kreiert Kapoor Pigmentanhäufungen in geometrischen Formen, zum Beispiel *1000 names* (s. Abb. 100) von 1979-80. Die Pigmente werden auf formgebenden Holz-oder Gipsgerüsten aufgebracht (da Costa 1999: 108) und zusätzlich über die Form hinaus mit einem Pinsel aufgelegt. Die Installationen befinden sich überwiegend auf dem Boden und beeindrucken durch die strahlende Farbigkeit in den Farbtönen Rot, Gelb und Weiß und durch ihre greifbare Körperhaftigkeit (Hedlin Hayden 2003: 36). Die Herkunft der Pigmente, ob mineralischen oder natürlichen Ursprungs, ist für den Künstler weniger relevant als die Botschaft des vergänglichen, ephemeren und verletzlichen Charakters des Kunstwerks. Dies ist mit ein Grund dafür, dass die Installationen auf dem Boden arrangiert werden (da Costa 1999: 109). „Les objets en poudre (die Gegenstände aus Puder)“, wie Anish Kapoor seine Installationen selbst nennt, werden für jede Ausstellung mit neuen Pigmenten bestückt, im Gegensatz zu den Polleninstallationen von Wolfgang Laib, der die Pollen nach einer Ausstellung siebt, von grobkörnigem Staub trennt, in Gläschen aufbewahrt und wieder verwendet (s. Abb. 101). Hier wird ein entscheidender Unterschied in der Bedeutung des Materials bei Werken von Anish Kapoor und Wolfgang Laib sichtbar. Haben die Pigmente bei Anish Kapoor überwiegend einen symbolischen Wert und sind Träger des künstlerischen Ausdrucks, so sind die Blütenpollen bei Wolfgang Laib das Kunstwerk selbst. Sie werden darüber hinaus mit einer metaphysischen Konzeption belegt. Wolfgang Laib drückt unter Anderem damit den

jahreszeitlichen Lauf des Lebens aus, basierend auf einer buddhistischen Glaubenslehre (Wagner 2001: 24). Diese variierende Einstellung in Bezug auf das verwendete Material wird bei Anish Kapoor deutlich, da er für neue Installationen auch neue Pigmente verwendet, wohingegen Wolfgang Laib seine Pollen immer wieder einsetzt.

Wolfgang Laib sammelt die Pollen im Frühjahr und im Sommer. Die verschiedenen Blütenstäube unterscheiden sich in Farbe und Struktur. Löwenzahn hat beispielsweise eine intensiv orangene Farbe und ist eher grob, wohingegen die Pollen von der Kiefer heller in der Farbe und feiner in der Struktur sind. Besonders in den ersten Stunden verströmen seine Installationen einen Duft, die sein Werk um eine Sinneswahrnehmung erweitern. Die Größe einer Installation hängt von der Verfügbarkeit der einzelnen Blütenstäube ab, da es Kiefernpollen reichlich gibt, im Gegensatz zu Löwenzahn, Hahnenfuß und Sauerampfer (Ottmann 2002: 14). Wolfgang Laib sibt seine Blütenpollen großflächig auf dem Boden, er häuft sie zu kleinen Hügeln auf (s. Abb. 102) oder präsentiert sie in geschlossenen oder geöffneten Gläsern.

Wie auch bei Anish Kapoor können die Installationen von Wolfgang Laib nicht berührt werden, da sie fragil sind und die Pigmente und Pollen leicht verwischt und weggeblasen werden. Es genügt schon ein leichter Luftzug, dass die Pigmente oder Blütenpollen von ihrer ursprünglichen Lage entfernt verteilt sind. Wolfgang Laib deckt aus diesem Grund seine Blütenpollen-Installationen nachts mit einem Fliegengitter ab, da Insekten bevorzugt von den Pollen angezogen werden und bei Kontakt mit den Pollen ihre Spuren hinterlassen (Sönmez 2003: 58).

Die Präsentationsform der Werke von Wolfgang Laib werden vom Ausstellungsort bestimmt und variieren in Bezug auf den zur Verfügung stehenden Platz und den Lichtverhältnissen (Sönmez 2003: 56). Dauerausstellungen sind auf Grund des leichten und losen Charakters ohne ständige Betreuung nicht möglich. Vor dem Hintergrund des immer wieder neu aufgebauten Kunstwerks kann der Begriff der Authentizität, solange Wolfgang Laib selbst die Installationen vornimmt, als genuine Arbeit des Künstlers betrachtet werden. Beim Ankauf und Aufbewahren eines solchen Werkes gestaltet sich allerdings das Festhalten eines originalen Zustands als sehr problematisch. Werden die Blütenstaubfelder während einer Ausstellung durch Besucher verändert, so können die Pollen nach Absprache mit Wolfgang Laib von den Restauratoren erneut gesiebt und arrangiert werden<sup>10</sup>. Eine Wiederherstellung bzw. restauratorische Bearbeitung beim Werk von Wolfgang Laib wird derzeit nur vom Künstler selbst ausgeführt, wie Sönmez (2003: 58), ohne weitere Beschreibung, angibt.

---

<sup>10</sup> Persönliche Kommunikation mit Hubert Scheck, Restaurator an der Neuen Nationalgalerie, Berlin und Hamburger Bahnhof, Berlin, am 22. Juni 2004.

Am Beispiel der Kunstwerke von Wolfgang Laib wird deutlich, dass die konservatorische Herangehensweise um ein Vielfaches komplexer wird, insbesondere wenn mögliche restauratorische Maßnahmen im Falle der Blütenstaubfelder in Erwägung gezogen werden. Die Pollenanhäufungen sind fragil, wirken nur durch ihren losen Charakter und erfordern eine permanente Betreuung. Nicht nur die Fragen nach Authentizität und Originalität müssen anhand dieser Beispiele neu betrachtet werden, auch konservatorische Konzepte und Grundprinzipien müssen an diese Situation angepasst werden. Eine Konsolidierung verbietet sich beispielsweise, da gerade der lose Charakter mit der dadurch erreichten spezifischen Wirkung wesentlich zum Kunstwerk gehört. Es ist fraglich, ob es eine technische Möglichkeit gäbe, Pollenanhäufungen zu stabilisieren. Überdies stellt sich die Frage, ob dies im Sinne des Künstlers wäre. Die Befragung Wolfgang Laibs hinsichtlich der Konzeption seines Werkes nach dem Modell des *Variable Media Questionnaire* würde sich hier anbieten, um konservatorische Überlegungen umsetzen zu können.

Am Solomon Guggenheim Museum, New York, wurde eine Strategie beim Umgang mit Installationen, Performances und NetArt zeitgenössischer Kunst entwickelt. Ippolito (2003: 47) stellt den *The Variable Media Questionnaire* vor, der eine detaillierte Befragung und Beantwortung des Künstlers über die verwendeten Materialien, über mögliche Formen der Konvertierung in neue Abspiel- und Speichermedien oder über die Raumverhältnisse bei Installationen beinhaltet. Der Fragebogen bietet ein Gerüst an möglichen Informationsgehalten bezüglich der künstlerischen Arbeit, wird aber auf jeden Künstler abgestimmt. Auf der Homepage ([www.variablemedia.net/e/images](http://www.variablemedia.net/e/images)) werden Fallbeispiele vorgestellt. Die Installation von Meg Webster, *Stick Spiral*, 1986 (s. Anlage 12.18), besteht aus Zweigen, die spiralförmig auf dem Boden ausgerichtet sind. Der Fragebogen umfasst Anweisungen, von welcher Buschart und zu welcher Jahreszeit die Zweige gesammelt und arrangiert werden, in welcher Größe, in welchen musealen Räumen und unter welchen Lichtverhältnissen die Installation montiert sein soll. Bei diesem Projekt arbeiten Kuratoren, Restauratoren und die Künstler zusammen, um die Vorstellungen des Künstlers in Bezug auf seine Installation so getreu wie möglich zu dokumentieren.

Das Dokumentieren materialtechnischer Beschreibungen und Stellungnahmen der Künstler zu ihrem Werk erscheinen wichtig beim Umgang mit zeitgenössischen Kunstwerken. Die Dokumentation kann durch analytische Messungen untermauert und belegt werden. Diese ersten Schritte können vom Restaurator und von Konservierungswissenschaftlern angegangen werden. So lässt sich die spezifische optische Wirkungsweise, wie es bei Yves Klein durch den Einsatz eines speziellen Pigment/Bindemittelsystems mit einem hohen Reflexionsvermögen und bei Gotthard Graubner durch das schichtweise Auftragen auf einen voluminösen und saugenden Grund mit hoher diffuser Reflexion gegeben ist, mit Hilfe von

physikalischen Gesetzmäßigkeiten erklären. Vor allem Aspekte der Optik kommen zum Tragen, wenn die Beschaffenheit von Textur und Oberflächen von gestalteten Flächen beschrieben werden. Von diesem Wissensstand ausgehend sollte sich ein Dialog zur Konzeption des Künstlers und zur angestrebten Wirkungsweise des Kunstwerks anschließen. Es ist elementar zu wissen, ob ein Künstler wie Anish Kapoor die Fragilität seiner Pigmentanhäufungen als Bestandteil seines Werkes zeigen möchte oder ob, wie bei Mark Rothko, vorrangig das Anregen von menschlichen Gefühlen im Vordergrund steht. Eine wichtige Voraussetzung für diese Entwicklung stellt das interdisziplinäre Arbeiten von Restauratoren, Natur- und Kunstwissenschaftlern dar.

An der Tate Gallery, London, werden die Materialkompositionen und begleitende Zustandsbeschreibungen von modernen Skulpturen dokumentiert. Diese Arbeit wurde in dem Sammelwerk *Material Matters* von Heumann (1999) veröffentlicht. Insgesamt elf Skulpturen, darunter solche von Edgar Degas (Rolfe 1999: 15), Henry Moore (Jackson 1999: 63) oder Antony Gormley (Deighton, Heuman 1999: 82) werden in ihrer Materialität vorgestellt und naturwissenschaftlich auf ihren Zustand hin untersucht. Die Untersuchungsmethoden reichen von der mikrochemischen, über die Röntgenfluoreszenzanalyse bis hin zur Rasterelektronenmikroskopie. Soweit möglich werden die Künstler bei der Erarbeitung von Konservierungskonzepten mit einbezogen, bevor ein restauratorischer Eingriff begonnen wird.

Ein Beispiel der Publikation *Material Matters* stellt die Installation von Antony Gormley *Natural Selection*, 1981, dar, bestehend aus 24 bleiummantelten Objekten, wobei 12 Inhalte natürlichen Ursprungs sind und 12 Inhalte von Menschenhand geschaffene Materialien darstellen. Die 24 Gegenstände werden nach ansteigender Größe diagonal in einer Reihe am Boden aufgelegt und die natürlichen und die von Menschenhand geschaffenen Inhalte in den Kapseln wechseln sich bei der Aufreihung ab. Die Bleiummantelung ist bei den meisten Objekten intakt, bei den Kapseln, die ein Ei und eine Kokosnuss beinhalten, haben sich jedoch Risse gebildet. Die organischen Substanzen, vor allem die Inhaltsstoffe des Eies, sind degradiert und fallen durch einen stechenden Geruch auf. Nach Einwilligung und unter Mitwirkung des Künstlers (Deighton, Heuman 1999: 86) wurden diese zwei Bleikapseln geöffnet und das Ei und die Kokosnuss sowie die Bleiummantelung gereinigt. Die physische Präsenz und die Erhaltung der organischen Materialien sind für den Künstler wichtig, da sie die Entwicklungsgeschichte des Menschen repräsentieren. Der interdisziplinäre Charakter zwischen den Restauratoren, den Künstlern, den Kunst- und Naturwissenschaftlern bezeugen den lebendigen Austausch zwischen den Wissensgebieten und stellen eine Chance für das Erarbeiten von konstruktiven Konservierungskonzepten dar, die zu fundierten Forschungsergebnissen führen kann (Banik, Pataki 2001: 48).



Abb. 97: Mark Rothko (1903-1970) *Ohne Titel*, 1962



Abb. 98: Gotthard Graubner (\*1930) *Ohne Titel*, 1977

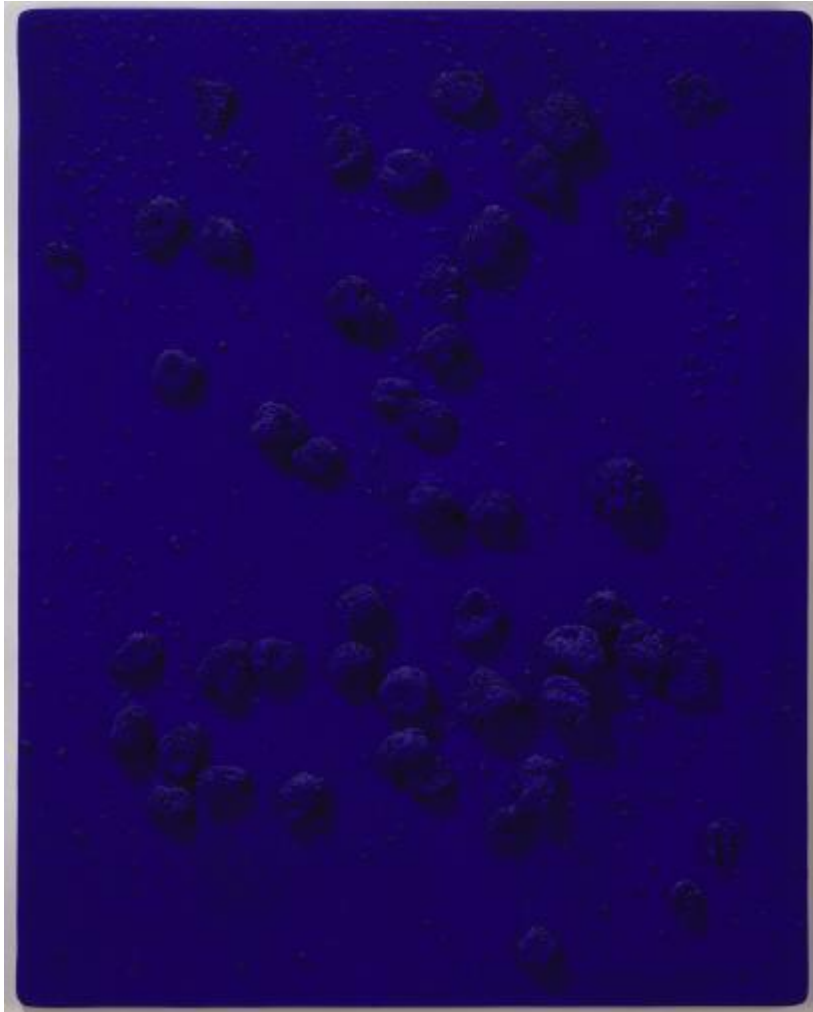


Abb. 99: Yves Klein (1928-1962) *ohne Titel*, Blaues Schwammrelief (RE6), 1961



Abb. 100: Anish Kapoor (\*1954) *1000 Names*, 1982



Abb. 101: Wolfgang Laib (\*1950) siebt Blütenpollen von Haselnuss



Abb. 102: Wolfgang Laib (\*1950) *Die fünf unbesteigbaren Berge*, 1984



## 5.2 Konsolidierung von pudrenden Zeichnungen

Drei Fallbeispiele mit unterschiedlichen Schadensfällen wurden unter dem Gesichtspunkt der Konsolidierung von pudrenden und lose aufliegenden Pigmentschichten bearbeitet. Die Leistungsfähigkeit der Methode und die neu gewonnenen Erkenntnisse über die Einflussgrößen des Farbeindrucks werden in die Praxis übertragen. Damit wird das Risiko einer Farbverschiebung während einer Konsolidierung reduziert.

### 5.2.1 Aquarelle auf Transparentpapier von Erich Mendelsohn

#### Objektbeschreibung I

Erich Mendelsohn (1887-1953) fertigte als berühmter Architekt seiner Zeit Aquarelle bzw. Skizzen auf Transparentpapier an. Bei dem Objekt E. M. 678, *Imaginäre Skizze, Variationen zu Hallenbauten*, 1915, aus dem Bestand der Staatlichen Museen zu Berlin, Kunstbibliothek, mit den Maßen 6,9 x 7,7 cm (s. Abb. 103) sind bei der Ansicht eines Gebäudes Höhungen mit roter Aquarellfarbe sehr wässrig ausgeführt worden, so dass es schon beim Auftragen zu einem Wasserrand gekommen ist (s. Abb. 104). Das Bindemittel ist leicht glänzend. Die Zeichnung wurde zu einem früheren Zeitpunkt auf einen Untergrund montiert, wobei die Randbereiche der Zeichnungen flächig fixiert sind und die Innenbereiche lose, aber gespannt auf einem Untergrundkarton liegen.

#### Problemstellung

Die rote Höhung liegt als kristalline Aquarellmalerei auf einem feuchteempfindlichen glatten Transparentpapier. Die rote Höhung hat keinen Halt mehr zum Träger und bedarf einer Konsolidierung, da es schon zu Substanzverlust gekommen ist. Die übrigen Bereiche des Aquarells benötigen keine Festigung.

#### Konsolidierung und Diskussion

Eine Pinselapplikation schließt sich aus, da sich schon beim Testen der Pigmentschicht einzelne Pigmentkörner aus dem Pigmentauftrag gelöst haben. Eine Aerosolanwendung mit einem geringen Feuchteintrag ist erforderlich, da das Transparentpapier auf Feuchtigkeit durch spontanes Dehnen reagiert.

Die rote Höhung des Blattes E.M. 678 wurde mit einer 1 %igen Gelatinelösung als Aerosol gefestigt. Hierfür wurde der AGS 2000 verwendet. Der Nebulizer hätte für dieses Objekt auch eingesetzt werden können, da der hohe Gas-Partikel-Strom bei diesem Objekt nicht gestört hätte. Allerdings ist der AGS 2000 schneller aufgebaut und kommt ohne technische

Zusatzgeräte aus, da der Nebulizer erst noch an den Kompressor angeschlossen werden muss. Die Gelatine wurde gewählt, da ein Klebstoffauftrag mit relativ hoher Klebkraft gewährleistet ist. Bei dieser dünnen Pigmentschicht reichen wenige Aerosolaufträge, um eine ausreichende Festigung zu erzielen.

Der Aerosolauftrag erfolgte vier Mal hintereinander, wobei zwischen jedem Klebstoffauftrag die Feuchtigkeit mit einem Hollytex und einem Löschkarton durch Auflegen auf die rote Höhlung reduziert wurde. Nach dem vierten Auftrag waren die kristallin aufliegenden Pigmentkörner gefestigt und der Farbeindruck hat sich visuell nicht verändert (s. Abb. 105). Es hat sich kein glänzender Film der Gelatine auf dem glatten Transparentpapier gebildet, da das Konsolidierungsmittel leicht in das hydrophile Transparentpapier eingedrungen ist.

### Objektbeschreibung II

Das Blatt E.M. 231 (s. Abb. 106), Aquarell auf Transparentpapier von Erich Mendelsohn *Projekt Haus Becker, Chemnitz, 1915*, mit den Maßen 20,8 x 20,5 cm zeigt die Innenansicht eines Wohnraums und stammt auch aus dem Besitz der Staatlichen Museen zu Berlin, Kunstbibliothek. Die Zeichnung wurde zu einem früheren Zeitpunkt auf einen Untergrund montiert, wobei die Randbereiche der Zeichnungen flächig fixiert sind und die Innenbereiche lose, aber gespannt auf einem Untergrundkarton liegen.

### Problemstellung

Das Aquarell weist zahlreiche schadhafte Stellen auf. Bei stark aufgetragenen Farbbereichen hebt sich die blaue und gelbe Malschicht vom glatten Transparentpapier ab (s. Abb 107). Daneben gibt es bereits ausgebrochene Stellen, deren Ränder eine Festigung benötigen.

### Konsolidierung und Diskussion

Die Festigung der ausgebrochenen Pigmentpartien wurde in zwei Arbeitsschritten durchgeführt. *Arbeitsschritt 1* beinhaltete eine Aerosolkonsolidierung mit einer 1 %igen Gelatine, die kurz hintereinander drei Mal auf die ausgebrochenen Partien aufgetragen wurde. Damit wurden die pudrigen und lose aufliegenden Pigmente in einem ersten Schritt gefestigt. Wieder wurde der AGS 2000 verwendet. In diesem Fall war der geringe Gas-Partikel-Strom von Vorteil, um Verluste zu vermeiden. Die Gelatine wurde eingesetzt, weil mit wenigen Klebstoffaufträgen eine relativ hohe Klebkraft realisiert wird.

Im *Arbeitsschritt 2* wurden die Ränder der ausgebrochenen Partien mit dem Pinsel (da vinci „00000“, Best. Nr. 11033) konsolidiert. Einer 1 % Gelatinelösung wurde 10 % reiner Ethanol zugegeben, um die Penetration des Klebstoffs unter die Pigmentschollen zu fördern. Der Pinsel wurde in die Klebstofflösung getaucht, an einem Löschkarton einmal abgestrichen, damit sich nicht zu viel Klebstoff im Pinsel befindet und an den Rand der Pigmentschollen

gehalten. Der Klebstoff fließt aus den Pinselhaaren und gelangt durch Kapillarkräfte unter die Pigmentschichten. Dieses Einfließenlassen des Klebstoffs wurde zwei bis drei mal wiederholt.

Der Farbeindruck hat sich visuell nach dem Konsolidierungsauftrag nicht verändert (s. Abb. 108). Die ausgebrochenen Pigmentpartien sind gefestigt und haften auf dem Transparentpapier.

Beide Blätter (E.M. 678 und E.M. 231) wurden in-situ konsolidiert, ohne vom Untergrundkarton abgelöst zu werden. Auch nach der Festigung verbleiben die Blätter auf dem Untergrundkarton, da eine Abnahme für die fragile Malerei riskant ist, obgleich die Blätter in früheren Zeiten wellig auf den Untergrundkarton aufgezogen wurden.

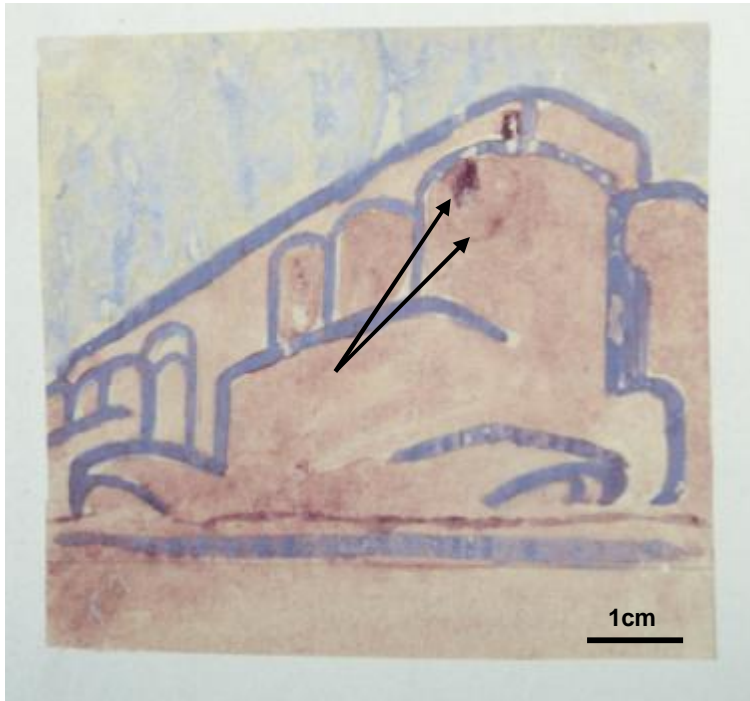


Abb. 103: Aquarell auf Transparentpapier von Erich Mendelsohn, *Imaginäre Skizze*, 1915, (Invent. Nr. E.M. 678, Kunstbibliothek Berlin), vor der Konsolidierung, die Höhlung, mit dem kräftigen Rot ausgeführt (s. Pfeile), hat schon beim Auftrag einen Wasserrand hervorgerufen.



Abb. 104: Detail von Abb. 103, vor der Konsolidierung, die rote Höhlung liegt kristallin auf dem Träger und pudert.



Abb. 105: Detail von Abb. 103, nach der Konsolidierung der roten Höhlung mit 1% Gelatine, viermaliger Auftrag, der Wasserrand entstand beim Zeichnen des Aquarells.

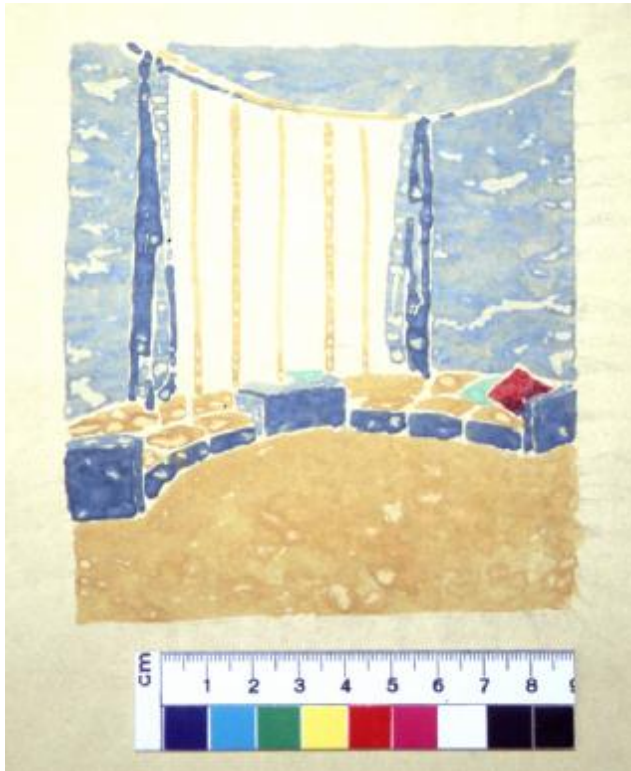


Abb. 106: Aquarell auf Transparentpapier von Erich Mendelsohn, *Projekt Haus Becker, Chemnitz, 1915*, (Invent. Nr. E.M. 231, Kunstbibliothek Berlin), vor der Konsolidierung, die dunklen blauen und braunen Partien sind dick aufgetragen und heben sich vom Träger ab, teils schollig, teils pudrig.

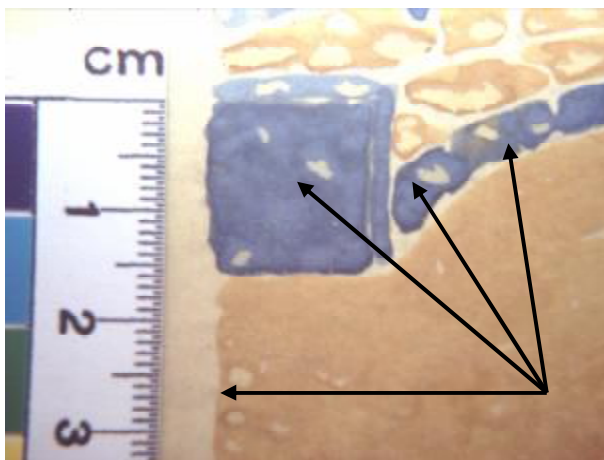


Abb. 107: Detail von Abb. 106, vor der Konsolidierung, die Pfeile deuten die dick aufgetragenen Partien an, deren dünne Malschichten teilweise abblättern und abpudern.

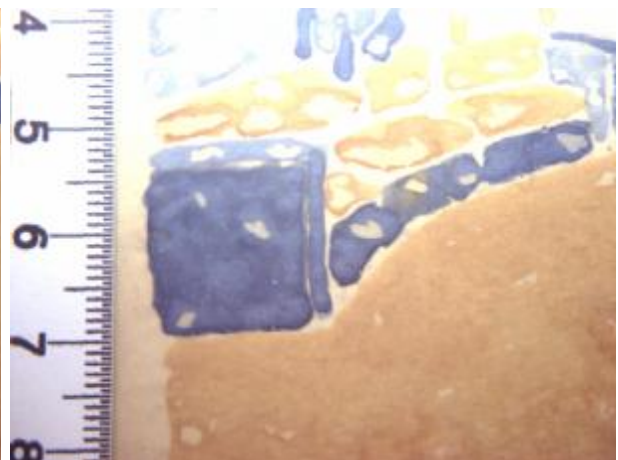


Abb. 108: Detail von Abb. 106, nach der Konsolidierung, die blauen und die braunen Partien wurden teils mit dem Pinsel, teils mit dem Aerosol mit Gelatine (1 % Massengehalt) gefestigt.

## 5.2.2 Pastell auf Papier von Uli Peter

### Objektbeschreibung

Das grafische Blatt von Uli Peter (\*1954), *Ohne Titel*, 1987, aus dem Besitz des Staatsministeriums Stuttgart, stellt eine Zeichnung mit schwarzer Pastellkreide auf einem ca. 150g/m<sup>2</sup> dicken modernen geglätteten Zeichenpapier dar. Die Maße sind 29 x 20 cm. Das Blatt weist vor allem im unteren Bereich (s. Abb. 109) einen starken Schimmelschaden auf, der mit einer rötlich-gelben Verfärbung und lose aufliegenden Sporen einhergeht.

### Problemstellung

Der Schimmelschaden verlangt das mechanische Abheben der Schimmelsporen und eine wässrige Bleichbehandlung, um die Verfärbungen im Papier zu reduzieren. Die Zeichnung der schwarzen Pastellkreide sollte vor einer Bleichbehandlung durch einen Klebstoffauftrag geschützt werden, da die Papierfasern im Bereich der Zeichnung durch den Schimmelschaden abgebaut wurden und das Zeichenmedium in diesem Bereich weniger kompakt auf dem Papier aufliegt.

### Konsolidierung und Diskussion

Die Pigmentsporen wurden in einem ersten Schritt mechanisch abgenommen (s. Anhang 12.19), bevor die Zeichnung konsolidiert wurde. Die Pastellkreide wurde im Bereich des Schimmelschadens konsolidiert, da die Papieroberfläche durch den Schimmelbefall offenporig, fasrig und abgebaut war. Dadurch haftete auch die Pastellkreide weniger kompakt auf dem Papieruntergrund. Die Konsolidierung erfolgte mit dem AGS 2000, da dieses Gerät eine gleichmäßige Aerosolproduktion gewährleistet. Es wurde die maximale Konzentration von Funori, 0,2 % Massengehalt, verwendet, um die schwarze Pastellkreide zu festigen. Funori besitzt eine geringe Klebkraft. Das Konsolidierungsmittel wird nicht vorrangig zum Festigen eingesetzt, sondern um eine Schutzschicht um die Pigmente zu legen, da sich eine wässrige Bleichbehandlung anschließt. Bei stark abgebauten Papierfasern besteht die Gefahr, dass die schon fasrige Papieroberfläche weiter destabilisiert wird. Bei Funori besteht keine Gefahr, dass sich durch den Klebstoffauftrag auf dem schwarzen Pigment Glanz bildet, da Funori ein hohes Streuvermögen aufweist. Der 0,2 %ige Funori wurde vier Mal hintereinander auf die abgebauten Zeichenbereiche aufgetragen. Das Konsolidierungsmittel drang gut in die Malschicht und in das Papier ein. Visuell war keine Veränderung des Farbeindrucks zu beobachten. Auch nach der Bleichbehandlung (s. Anhang 12.19) hat sich die schwarze Pastellkreide farblich nicht verändert. Das Papier hat durch die Bleichbehandlung seine ursprüngliche Helligkeit wieder erlangt (s. Abb. 110 und 111).





Abb. 109: Uli Peter, *Ohne Titel*, 1987 (Staatsministerium Stuttgart), links vor der Restaurierung mit starkem Schimmelbefall, rechts nach der Restaurierung, konsolidiert und gebleicht.



Abb. 110: Detail von Abb. 109, vor der Restaurierung, starker Schimmelbefall und rötlich-gelbe Verfärbung des Papiers.

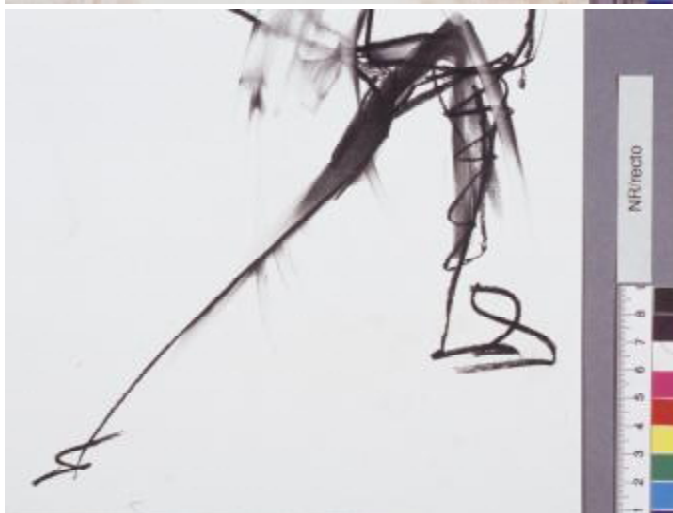


Abb. 111: Detail von Abb. 109, nach der Restaurierung, das Blatt wurde konsolidiert und gebleicht.

### 5.2.3 Kreide auf Acryl von Ross Sinclair

#### Objektbeschreibung

Ross Sinclair (\*1966) hat die Installation *The journey to the edge of the world-the new republic of St. Kilda*, 1999/2002 (Inventar Nr. G-2002-2), mit über 800 Pappkartons, drei Videos, zwei Diaprojektoren und Ton-Installation geschaffen (weiterführende Literatur s. Fruitmarket Gallery, Sinclair 2000: 94; Baur, Berg 2002/2003: 1). Der Künstler hat 54 Pappkartons mit den Einzelmaßen 49,5 x 49,5 x 49,5 cm mit schwarzer Acrylfarbe bestrichen und darauf mit weißer Tafelkreide die Erdteile spiegelbildlich gezeichnet, ohne die Kreide zu fixieren. In Abb. 8 und 113 ist die Installation aus dem Bestand der Hamburger Kunsthalle, wie sie zurzeit in der Restaurierungswerkstatt aufbewahrt ist, gezeigt.

#### Problemstellung

Die unfixierte großflächige Kreidezeichnung wurde während einer Ausstellung von Besuchern verwischt (s. Abb. 114). Durch das Handling in der Hamburger Kunsthalle und beim Transport sind Fingerabdrücke in der Zeichnung sichtbar. Kreidepartikel rieseln zudem von den senkrecht stehenden Installationswänden herab.

Im Vorfeld einer Konsolidierungsmaßnahme gilt es zu klären, ob nicht gerade der fragile Charakter Teil der Konzeption des Künstlers und Bestandteil des Kunstwerks ist. Neben der konzeptionell-ideologischen Fragestellung, stellen die Auftragsarten der Kreide durch den Künstler restaurierungstechnische Schwierigkeiten dar. Der Künstler hat die weiße Kreide auf drei verschiedene Arten auf den schwarzen Acrylgrund aufgetragen, wofür jeweils eine eigene Klebstoffapplikation erarbeitet werden muss.

#### Konzeption und Zustand des Objekts

Nach Aussagen des Künstlers<sup>11</sup> entspricht es nicht seiner Intention, die Fragilität des losen Kreideauftrags zu zeigen, sondern vor allem der starke Kontrast der weißen Kreide auf dem schwarzen Untergrund sind Bestandteil seiner Ausdrucksweise. Auf Grund dieser Aussage und nach Absprache mit dem Kurator, Christoph Heinrich, und der Restauratorin, Barbara Sommermeyer, beide Hamburger Kunsthalle, ist eine Konsolidierung vertretbar. Eine Tafelkreide weist kein Bindemittel auf. Das Konsolidieren der Kreide bedeutet, dass ein Bindemittel erstmals eingebracht wird, da der Zeichenaufbau nicht einem ursprünglichen Malaufbau entspricht und damit ein neues Kreide-Bindemittelsystem vorliegt. Die originale Konzeption des Künstlers ist nach einer Konsolidierung verändert. Die Beibehaltung des

---

<sup>11</sup> Persönliche Kommunikation mit Dipl. Rest. Barbara Sommermeyer, Hamburger Kunsthalle am 24. Juni 2004, die mit Ross Sinclair in ständigem Kontakt bezüglich der Bearbeitung des Werkes ist.



hohen Kontrasts zwischen der weißen Kreide und dem schwarzen Untergrund sollte während der Festigung vorrangig im Auge behalten werden. Sommermeyer und Banik (1999: 901) haben bei der Konsolidierung von Kreidezeichnungen von Joseph Beuys auf einer Schultafel schon wertvolle Erfahrungen gesammelt. Diese Zeichnung wurde mit einer 0,25 %igen Methylcellulose als Aerosol gefestigt.

Der Kreideauftrag besteht aus Calciumsulfat (s. Anhang 12.20), wie ein mikrochemischer Test gezeigt hat. Calciumsulfat ist in Wasser durchaus zu einem geringen Teil löslich. Bei einer Konsolidierung mit wässrigen Klebstoffen sollte der Feuchteeintrag so gering wie möglich gehalten werden, damit es nicht zu Lösungserscheinungen beim Konsolidieren der Kreide kommt.

Die Kreidezeichnung ist auf drei verschiedene Arten vom Künstler aufgetragen worden:

*Kreideauftrag 1:* Kräftige, opake Kreidestriche, die mit dem Kreideblock dick auf den Acrylgrund aufgetragen wurden.

*Kreideauftrag 2:* Opake Kreidestriche und schraffierte Flächen, die eine samtige, offene und poröse Oberfläche aufweisen. Die Flächen sind mit dem Kreideblock schraffiert und zusätzlich noch mit den Händen verwischt worden.

*Kreideauftrag 3:* Extrem dünner Kreideauftrag, der nur mit den Fingern oder mit dem Handballen vom Künstler aufgetragen wurde. Es liegt keine durchgehende Pigmentschicht, sondern nur lose nebeneinander liegende Pigmente vor.

#### Konsolidierung und Diskussion

Eine Pinselapplikation schließt sich bei diesem Objekt aus, da schon das Berühren der Kreide mit dem Pinsel zu Substanzverlust führt und ein Klebstoffeintrag mit dem Pinsel nicht gleichmäßig auf flächige Kreidebereiche aufgetragen werden kann.

In der Hamburger Kunsthalle standen der AGS 2000 und der Nebulizer als Aerosolgeneratoren zur Verfügung. Für diese Arbeit wurden der AGS 2000 und die Düsen des Nebulizers verwendet. Für diese großen Flächen, es handelt sich um ca. 10 m<sup>2</sup> zu konsolidierende Fläche, eignet sich der AGS 2000 besser, da er gleichmäßiger und geräuscharmer arbeitet als der Druckluft betriebene Nebulizer mit einem Kompressor und der Gas-Partikel-Strom geringer ist als beim Nebulizer. Der hohe Gas-Partikel-Strom stellt ein Risiko dar, dass lose aufliegende Kreidepartikel weggerissen werden. Die Düsen des AGS 2000 resultieren bei höchster Ultraschalleinstellung in einem Hufeisen förmigen Aerosolstrahl, der die Gefahr eines ungleichmäßigen Klebstoffeintrags bei flächigen Konsolidierungsaufträgen in sich birgt. Aus diesem Grund wurden die „Adapterdüsen“ des Nebulizers verwendet, die einen runden gleichmäßigen Aerosolstrahl produzieren. Als Klebstoff wurde eine 1 %ige Gelatinelösung verwendet, da schon nach einem einmaligen Klebstoffeintrag eine genügende Haftung der opaken Kreidestriche realisiert werden konnte.

Die Haftung der Kreide auf dem Acrylgrund solle einem leichten Darüberstreichen mit einem Pinsel standhalten. Bei allen anderen Klebstoffen waren mehrere Aufträge nötig, um dasselbe Ergebnis zu erzielen. Klucel® in Ethanol hatte keine ausreichend festigende Wirkung der weißen Kreide.

Es besteht keine Gefahr, dass der Gelatineauftrag Glanz hervorruft, da die Kreideschicht eine poröse und offene Struktur aufweist und die Gelatine sich diesen Unebenheiten exakt anpasst. Ein zu häufiger Klebstoffauftrag kann allerdings zu einer Überfeuchtung und zu einem Zusammenfließen der Kreideschicht führen, weswegen so wenige Klebstoffaufträge wie möglich ausgeführt werden sollten.

Im Folgenden werden die Festigungsverfahren für die *Kreideaufträge 1 bis 3* separat beschrieben und begründet.

*Kreideauftrag 1:* Die kräftigen opaken Kreidestriche wurde mit dem Aerosolstrahl in einem Abstand von 5 bis 10 cm konsolidiert, so dass die Pigmentschicht einmal völlig mit Konsolidierungsmittel umhüllt und die weiße Kreide vollständig benetzt ist, was zur Folge hat, dass der Kreideauftrag während der Behandlung nass und transparent ist (s. Abb. 115). Nach einer Trocknungszeit von einigen Sekunden gewinnt die Kreideschicht ihre weiße Farbe und Opazität zurück. Die Kartons mit der Zeichnung werden in senkrechter Lage konsolidiert, damit der Restaurator in Sitzhaltung arbeiten kann und in einem Abstand eines halben Meters das Konsolidierungsergebnis sofort beurteilen kann. Der Ultraschall und die Luftpumpe des AGS 2000 wurden auf halbe Leistung eingestellt. Das vollständige Einbetten der Pigmentschicht mit Konsolidierungsmittel ist nötig, um eine gleichmäßige Verteilung des Konsolidierungsmittels zu erzielen. Wird die Schicht nicht vollständig mit Konsolidierungsmittel umhüllt, muss der Auftrag wiederholt werden, was zu einem Schwemmland führt. Der Kontrast zwischen Kreideauftrag und schwarzem Acrylgrund hat sich nicht verändert.

*Kreideauftrag 2:* Flächige und schraffierte Zeichenbereiche wurden in gleicher Weise konsolidiert. Die Kartons wurden in senkrechter Lage konsolidiert, damit der Restaurator in Sitzhaltung das Ergebnis sofort begutachten kann. Der Ultraschall und die Luftpumpe des AGS 2000 sind auf halbe Leistung eingestellt. Der Aerosolstrahl wird in einem Abstand von 10 bis 15 cm von der Zeichnung entfernt aufgetragen. Bei den flächigen Schraffuren wird die Pigmentschicht nicht vollständig mit Konsolidierungsmittel umhüllt, sondern nur stark benetzt. Die Kreideschicht soll bei einem Konsolidierungsauftrag nicht völlig transparent werden, da sich sonst der Kontrast zwischen der weißen Zeichnung und dem schwarzen Untergrund zu stark erhöht. Dieses Ergebnis verwundert im ersten Moment, liegt aber daran, dass durch einen übermäßigen Eintrag des Konsolidierungsmittels die Pigmentschicht verdichtet wird, die Pigmente fließen und rücken leicht zusammen. Diese Verdichtung resultiert nicht, wie bei den bunten Pigmenten, in einer Reduzierung der Helligkeit, sondern

im Falle eines Weißpigments in einer Erhöhung der Helligkeit, da das Deckvermögen des weißen Pigments zugenommen hat. Hinzu kommt, dass bei einem Verdichten des weißen Pigments, der schwarze Untergrund weniger zu sehen ist und sich dadurch nochmals der weiße Farbeindruck erhöht. Weiße Pigmente werden nach ihrem Deckvermögen charakterisiert und Calciumsulfat hat ein hohes Deckvermögen (Burell 1970: 48). Die Erhöhung der Helligkeit bzw. des Deckvermögens kann bei den schraffierten weißen Flächen dahingehend kontrolliert werden, dass gerade so viel Konsolidierungsmittel eingetragen wird, dass eine noch genügende Haftung realisiert wird, aber nicht zu viel Klebstoff aufgetragen wird, so dass die Pigmente zusammenfallen.

Die flächigen Kreideaufträge weisen nach der Konsolidierung einen leicht erhöhten Kontrast zwischen der weißen Zeichnung und dem schwarzen Untergrund auf, was allerdings als tolerierbar bewertet wird.

*Kreideauftrag 3:* Die extrem dünnen lose nebeneinander liegenden weißen Pigmentkörner stellen eine technische Herausforderung bei der Konsolidierung dar. Wird zuviel Klebstoff als Aerosol auf die dünnen Schichten aufgetragen, ist die Kreidezeichnung nicht mehr visuell sichtbar. Nur in diesem speziellen Fall hat der Brechungsindex des Konsolidierungsmittels eine Auswirkung auf die Farbwirkung des zu konsolidierenden Pigments.

Das weiße Pigment ist auf dem schwarzen Untergrund selbst in dünnsten Lagen sichtbar, da der Unterschied des Brechungsindex zwischen Luft ( $n=1,333$ ) und Pigment ( $n=1,52$ , Wulfert 1999: 215) groß genug ist, dass das Pigment wahrzunehmen ist. Zudem wird das auftreffende Licht an dem weißen Pigment diffus reflektiert, was einen hellen Farbeindruck bewirkt. Umhüllt der Klebstoff das weiße Pigment auf dem schwarzen Untergrund, so ist das Pigment vom Klebstoff eingebettet. Die kritische Pigmentvolumenkonzentration ist erreicht, einige wenige Pigmentkörner werden von relativ viel Bindemittel umschlossen. Gelatine hat einen Brechungsindex von  $n=1,523$ , so dass bei einer Umhüllung des Pigments mit der Gelatine der Farbeindruck des weißen Pigments ausgelöscht wird, da Klebstoff und Pigment denselben Brechungsindex haben. Es findet auch keine diffuse Reflexion am weißen Pigment mehr statt, da die Oberfläche geglättet wurde. In diesem Fall besteht die Gefahr, dass zu viel Klebstoff die dünnsten Pigmentschichten einbettet und diese für das Auge nicht mehr wahrnehmbar sind. Diese Zusammenhänge sind grafisch in Abbildung 112 dargestellt.

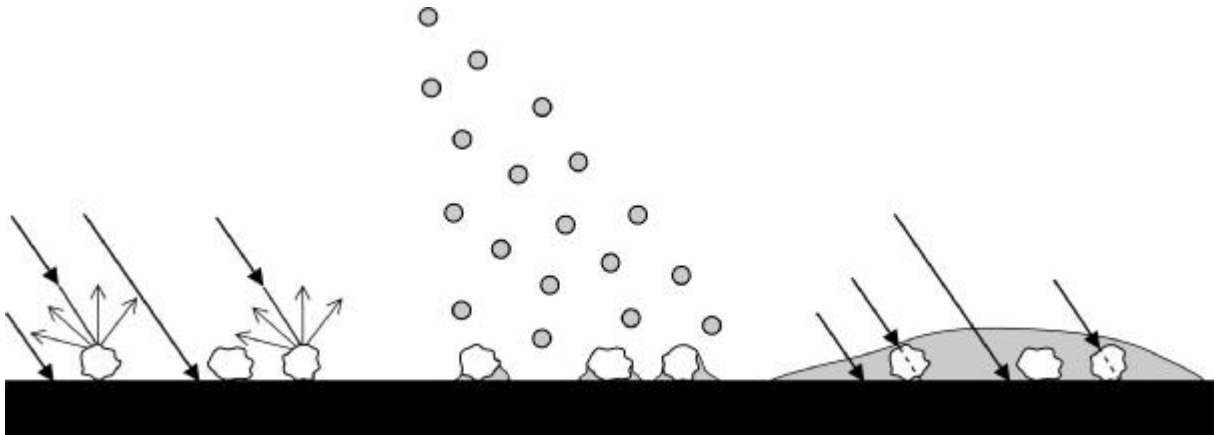


Abb. 112: Vorgang beim Konsolidieren des *Kreideauftrags* 3. Einzelne weiße Pigmentkörner reflektieren das einfallende Licht diffus (links). Nach einem Klebstoffauftrag (mitte) sind die Pigmentkörner eingebettet (rechts) und sind nicht mehr zu erkennen, weil der Brechungsindex von Klebstoff und Pigment derselbe ist, es herrscht ein schwarzer Farbeindruck.

Um möglichst wenig Klebstoff aufzutragen, aber doch eine festigende Wirkung zu erzielen, werden die Kartons in waagerechter Stellung konsolidiert und die Düsen vom Aerosolgenerator abgenommen. Damit wird kein Aerosolstrahl, sondern ein Aerosolnebel produziert, der in einem Abstand von ca. 20 cm auf die dünnen Kreideschichten fallen gelassen wird. Die Pigmentschichten dürfen weder vom Klebstoff umhüllt noch dürfen sie transparent werden, sondern es soll nur eine leichte Benetzung stattfinden. Diese Benebelung wird drei bis vier Mal erfolgreich durchgeführt (s. Abb. 116).

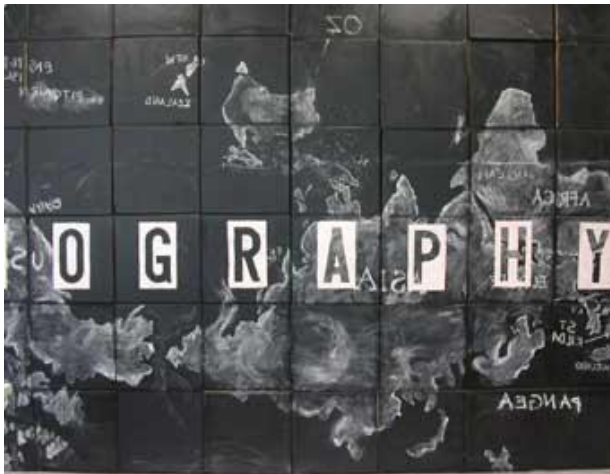


Abb. 113: Installation von Ross Sinclair, *The Journey to the edge of the world-the new republic of St. Kilda*, 1999/2002, (Invent. Nr.G 2002-2). Detail der Installation, wie sie in der Restaurierungswerkstatt der Hamburger Kunsthalle aufgebaut ist.

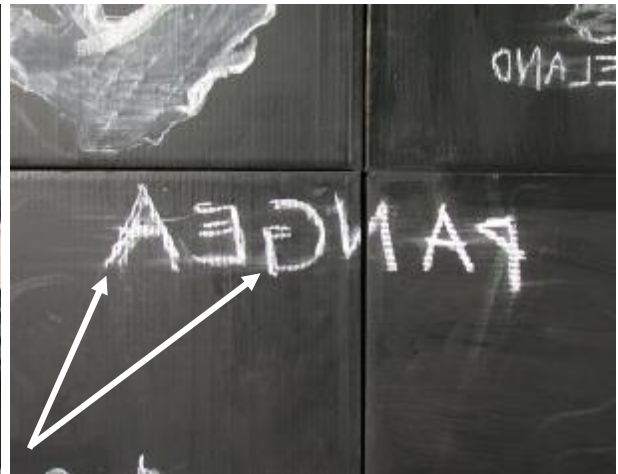


Abb. 114: Detail von Abb. 113, der Schriftzug vor der Restaurierung, durch Besucher verwischt. Daraufhin hat der Künstler im Jahre 2002 einzelne Bereiche nachgezeichnet, wie an den nachgezogenen Buchstaben zu sehen ist (s. Pfeile).



Abb. 115: Detail von Abb. 113, Links vor der Konsolidierung, Mitte während des Konsolidierens, der weiße Kreidestrich wird mit Konsolidierungsmittel (1% Gelatine) getränkt und wird transparent, Rechts ist das Konsolidierungsmittel getrocknet und die Kreide ist wieder weiß und gefestigt.



Abb. 116: Konsolidierungstechnik der sehr fein gezeichneten Partien, die Düse des Aerosolschlauchs ist abgenommen und der Aerosolnebel (1% Gelatine) fällt auf die Kreideschicht, die nur leicht benetzt werden soll.

## 6 Fallbeispiele im Kontext des Code of Ethics

Der International Council of Museums (ICOM 2003: 12), der weltweite Museums-Dachverband, verfasst Richtlinien, der Code of Ethics, die unter Anderem die Erhaltung von Kunstwerken in musealen Einrichtungen beschreiben. Die physische Erhaltung von Kunstwerken vor dem Hintergrund ihrer geschichtlichen Entstehung und ihres historischen Kontextes ist das umschriebene Ziel einer Konservierung und Restaurierung von Kunstwerken. Unter Punkt 6 „Verantwortung gegenüber den Sammlungen“, heisst es in dem Unterpunkt 6.3 „Konservierung der Sammlungen“, dass nach dem aktuellen Wissensstand die Bestände so gut und sicher wie möglich zu erhalten sind, um sie an künftige Generationen weitergeben zu können. Die Dokumentation eines Kunstwerks ist ein elementarer Vorgang bei der Bestandsaufnahme und Pflege, aber auch bei der Restaurierung und Konservierung. Weiter heisst es, dass das eigentliche Ziel die Erhaltung des aktuellen Zustands des Objekts sein sollte. Alle hinzugefügten Materialien sowie physikalischen und genetischen Veränderungen sollten reversibel und vom ursprünglichen Objekt deutlich unterscheidbar sein.

Die Anforderungen hinsichtlich der Erhaltung des Zustands und der Reversibilität der eingebrachten Materialien werden am Beispiel der hier vorgestellten Konsolidierungsarbeiten diskutiert, wobei der Punkt der Reversibilität kritisch bewertet wird. Als reversibel wird das Rückführen auf den Zustand vor einer Restaurierung verstanden, das die Entfernung von eingebrachten Materialien, wie Kaschierungen, Montierungen, Ergänzungen, Retuschen, aber auch Klebstoffe und zum Beispiel Bleichreagenzien beinhaltet. Da dies in der Papierrestaurierung aus chemischer und physikalischer Sicht in den meisten Fällen nicht durchführbar ist, wie die nachfolgende Diskussion erläutern soll, wird der Begriff der Reversibilität durch den Begriff der Rückführbarkeit ersetzt.

Diese kritische Auseinandersetzung mit dem Code of Ethics hat 1999 zur Publikation eines Sammelwerkes von Oddy und Carroll (Hrsg.) geführt, das den Titel trägt: „Reversibility-does it exist?“ (Reversibilität-gibt es sie?). Vincent Daniels (1999: 50), ein langjähriger Konservierungswissenschaftler am British Museum, London, erläutert in einem Beitrag dieses Sammelwerkes den Unterschied zwischen einem eingebrachten Material, welches aus technischer Sicht nicht aus einem Kunstwerk zu entfernen ist und einem eingebrachten Material, welches andererseits auf Grund seiner stabilisierenden Funktion nicht wieder entfernt werden soll. Daniels führt zwei Beispiele an. Ein Weizenstärkekleister als Verklebung von zwei Papieren ist nur wasserquellbar, aber nicht wasserlöslich und somit technisch gesehen aus dem porösen Papiervlies kaum zu entfernen, obwohl es ein viel verwendeter Klebstoff in der Papierrestaurierung ist. Andererseits sollte ein

Entsäuerungsmittel, welches in Papiere eingebracht wurde, um den oxidativen und hydrolytischen Abbauprozess zu verlangsamen, nicht wieder aus einem degradierten Papier zu entfernen sein, da ansonsten die chemische Stabilisierung der Cellulosefasern nicht mehr gegeben ist. Dieses Beispiel zeigt, dass die Anforderung der Rückführbarkeit technisch nicht möglich ist und im Falle des Entsäuerungsmittels auch nicht wünschenswert ist.

Ein Konsolidierungsmittel repräsentiert eine Kombination der beiden Beispiele. Technisch gesehen ist es nicht möglich, ein Konsolidierungsmittel aus einem Pigmentgefüge zu entfernen. Zudem würde die Entfernung eines Konsolidierungsmittels unweigerlich zu weiterem Verlust an Originalsubstanz führen. Vor diesem Hintergrund stellen die hier vorgestellten Untersuchungen und Ergebnisse einen wesentlichen Beitrag dar, um die Auswirkungen einer Konsolidierungsmaßnahme hinsichtlich der eingebrachten Klebstoffe im Vorfeld einzuschätzen, um die Risiken einer Konsolidierung einzuordnen und um schädigende Folgen zu verhindern. Ein Konsolidierungsmittel soll aus diesem Grund chemisch verträglich mit dem Pigment und dem Träger sein und nicht zu einer Veränderung des Farbeindrucks führen, da eine Konsolidierungsmaßnahme nicht rückführbar ist.

Die Aquarelle auf Transparentpapier von Erich Mendelsohn waren gefährdet, da die stark aufgetragene rote Höhung (E.M.678) und die blauen und braunen stark aufgetragenen Partien der Rauminnenansicht (E.M.231) abpuderten und sich schollig vom Untergrund lösten. Eine Gelatine (1 % Massengehalt) wurde für die Konsolidierung gewählt, da eine hohe Klebkraft für das Transparentpapier, auf dem die Zeichnungen ausgeführt wurden, nötig war. Die hohe Klebkraft sollte einen einmaligen Auftrag gewährleisten, da das hygroskopische Transparentpapier sich ansonsten zu stark durch das Einbringen von Feuchtigkeit dehnt und weitere Schäden an der Malschicht verursacht. Die Konsolidierung erfolgte sowohl mit dem Aerosol als auch mit dem Pinsel und hat zu keinen visuellen Veränderungen geführt. Die Aquarelle wurden gefestigt und ein weiterer Substanzverlust, wie er auf der unteren Kante des Passepartoutfensters vor der Restaurierung zu beobachten war, konnte gestoppt werden.

Die Konsolidierung der schwarzen Pastellkreide von Uli Peter wurde unternommen, um vorbeugend die Zeichnung zu schützen. Nach Abnahme der farbigen Sporen war der Gesamteindruck der Zeichnung verbessert. Das Papier wies allerdings noch starke Verfärbungen durch den Schimmelbefall auf, die störend für die Zeichnung waren und reduziert werden sollten. Bei einer wässrigen Behandlung einer Pastellkreide besteht die Gefahr von Substanzverlust, so dass die Kreide vor einem solchen Eingriff gefestigt wurde. Der Klebstoff Funori (0,2 %), der eine geringe Klebkraft aufweist, wurde mehrfach als Aerosol aufgetragen und hat visuell zu keinen Farbveränderungen geführt. Es wurde nur eine geringe Klebkraft benötigt, da die Pastellkreide nicht stark pudern ist und das

Konsolidieren als Schutzmaßnahme zu betrachten ist. Das Blatt wurde daraufhin gewässert, gebleicht und plangelegt. Durch die Reduzierung der Verfärbungen im Papier wurde der Kontrast zwischen der schwarzen Zeichnung und dem weißen Papier erhöht. Ein Zustand, wie er vor dem Schimmelbefall war, ist mit großer Wahrscheinlichkeit wieder hergestellt worden. Bei diesem Blatt handelt es sich um eine Arbeit eines zeitgenössischen Künstlers, der allerdings nicht aktiv in die Restaurierung mit einbezogen wurde, da die künstlerische Ausführung und die verwendeten Materialien einer klassischen Zeichnung entsprechen und die traditionellen Restaurierungstechniken eingesetzt werden konnten.

Die Restaurierungsmaßnahmen an den Zeichnungen von Erich Mendelsohn und von Uli Peter entsprechen einer traditionellen restauratorischen Vorgehensweise, bei der originale Substanz erhalten und eine ästhetische Störung durch Verfärbungen wiederhergestellt wurde. Der Substanzverlust bei den Aquarellen war gravierend und hat die Gesamtwirkung der Zeichnung verändert. Der starke Schimmelbefall von Uli Peter hat die Zeichnung ästhetisch beeinträchtigt, was einen restauratorischen Eingriff notwendig gemacht hat.

Die Konsolidierungsmaßnahme entspricht allerdings nicht den Richtlinien des Code of Ethics in Bezug auf die Reversibilität bzw. Rückführbarkeit eines eingebrachten Klebstoffs. Derzeit ist es mit technischen Mitteln nicht möglich, ein Konsolidierungsmittel, welches in Form von Aerosolen in ein poröses Pigmentgefüge aufgetragen wurde, wieder ohne Verlust der umgebenden Originalsubstanz zu entfernen. Die geringen Klebstoffmengen und meist fragilen Pigmentschichten verunmöglichen eine solche Maßnahme. Es sollte in einem solchen Fall eine Risikoabschätzung in Bezug auf mögliche Farbverschiebungen während einer Konsolidierung formuliert werden, um die sicherste Methode zu wählen.

Die Konsolidierungsmaßnahme der Installation von Ross Sinclair wurde durchgeführt, da durch die geringe Haftung der Kreide auf dem Untergrund Substanzverluste und Verwischungen eingetreten sind. Die Situation gestaltet sich allerdings im Vergleich zu den Zeichnungen von Erich Mendelsohn und Uli Peter komplexer, da der fragile Charakter der Installation durchaus vom Künstler beabsichtigt sein konnte und es damit ein Bestandteil des Kunstwerkes wäre. Der Künstler ist für die Entscheidungsfindung über den weiteren Umgang der Installation in der Sammlung befragt worden und es stellte sich heraus, dass die Darstellung der Fragilität nicht seiner Intention entspricht<sup>12</sup>. Ihm ist vor allem wichtig, dass ein starker Kontrast zwischen der weißen Zeichnung und dem schwarzen Untergrund gewährleistet wird. Aus diesem Grund hat er auch Partien neu gezeichnet (s. Abb. 114), die durch Besucher verwischt wurden. Die Elemente der Zeichnung sollen klar erkennbar und

---

<sup>12</sup> Persönliche Kommunikation mit Dipl. Rest. Barbara Sommermeyer, Hamburger Kunsthalle am 24. Juni 2004, die mit Ross Sinclair in ständigem Kontakt bezüglich der Bearbeitung des Werkes ist.



lesbar sein und können nach Ansicht des Künstlers auch konsolidiert werden. Dies sind wichtige Informationen, die als ein Teil der Dokumentation des Werkes von Ross Sinclair, in der Hamburger Kunsthalle aufgenommen und für künftige kuratorische und restauratorische Arbeiten verwertet werden können.

Der Künstler wurde aktiv in die Erarbeitung des Restaurierungskonzepts eingebunden. Nach Absprache mit Ross Sinclair und den Kuratoren wurde die Konsolidierung der weißen Kreidezeichnung als einzige technische Möglichkeit in Erwägung gezogen, die Pigmente mit den geringsten Veränderungen berührungsfrei zu festigen. Die Gelatine (1 % Massegehalt) wurde gewählt, da ein einmaliger Auftrag zu einer ausreichenden Festigung geführt hat, die ein leichtes Darüberstreichen mit einem Pinsel gewährleistet. Ein zu starkes Feuchten durch mehrfache Aerosolaufträge, wie es die Verwendung von Methylcellulose, Funori und JunFunori® nötig gemacht hätte, sollte wegen des Risikos einer möglichen Farbveränderung vermieden werden. Der Kontrast zwischen der weißen Kreide und dem schwarzen Untergrund hat sich nach der Konsolidierung leicht erhöht, da die Kreideschicht leicht verdichtet wurde. Die leichte Erhöhung des Kontrastes zwischen der weißen Zeichnung und dem schwarzen Untergrund ist von den Kuratoren und Restauratoren als tolerierbar eingeschätzt worden.

Die Konsolidierungen der hier angeführten Beispiele konnten erfolgreich durchgeführt werden und stellen teilweise die einzige technische Lösung dar. Weiterer Substanzverlust konnte durch die Konsolidierungsmaßnahmen vermieden werden, was nun ein besseres Handling innerhalb der Sammlung, aber auch bei Ausstellungstätigkeiten erlaubt. Die Richtlinien des Code of Ethics können in Bezug auf die Rückführbarkeit von Konsolidierungsmitteln nicht befolgt werden. Dies untermauert die Wichtigkeit der genauen Kenntnisse und der hier durchgeführten Untersuchungen von Konsolidierungsabläufen und veranschaulicht den Bedarf an einer differenzierteren Ausformulierung der Richtlinien bei der Umschreibung des Anforderungskatalogs von Restaurierungsaufgaben.

Der Code of Ethics ist auch bei zeitgenössischen Installationen, wie die Arbeiten von Wolfgang Laib (s. Kapitel 5.1, S. 138) zeigen, schwierig anzuwenden. Da Wolfgang Laib seine Installationen derzeit noch selbst vor einer Ausstellung aussieht und auf die Platz- und Lichtverhältnisse eingeht, ist ein „Ausleihen“ und ein Präsentieren seiner Arbeit in verschiedenen Sammlungen ohne Mitwirkung des Künstlers kritisch. Auch eine Dauerausstellung von Blütenteppichen ist auf Grund des fragilen Charakters seines Werkes nicht möglich. Für die Arbeiten von Wolfgang Laib gibt es kein Konzept, das im Einklang mit den verfassten Richtlinien steht. Das Problem kann im Moment umgangen werden, da der Künstler noch aktiv in den Umgang und Entwicklungsprozess mit einbezogen wird.

Die Anforderung der Code of Ethics in Bezug auf die Erhaltung von originaler Substanz wird anhand zwei weiterer Beispiele aus dem Bereich der zeitgenössischen Kunst aus restaurierungsethischer Sicht kritisch veranschaulicht.

Willcocks (2002: 936) stellt die Konservierung der Skulptur *Transparent Tubes*, 1960, von William Turnbull vor, die aus 18 aufrecht stehenden transparenten Kunststoffröhren besteht. Bei dem Kunststoff handelt es sich um ein Polymethyl Methacrylat (pMMA), der nicht alterungsbeständig ist und sich mit den Jahren ins Gelbliche verfärbt hat. Nach Absprache mit dem Künstler und zahlreichen Vorversuchen sind Röhren aus demselben Kunststoff nachgearbeitet und nur eine „originale“ Röhre im Depot der Tate Modern, London, aufbewahrt worden. Die Skulptur setzt sich nun aus neu gearbeiteten pMMA-Röhren zusammen, die zwar wieder aus demselben Kunststoff bestehen, aber noch keine Verfärbung aufweisen. Die Verfärbung wird voraussichtlich auch bei dieser Skulptur eintreten, aber erst in einigen Jahrzehnten, da die Arbeit nur wenig dem Tageslicht ausgesetzt und bei gleichbleibendem Klima aufbewahrt wird. Dieses Beispiel zeigt, dass die Transparenz des vormals unvergilbten Kunststoffes relevanter ist, als die Erhaltung der originalen Substanz. Die Wirkung der pMMA-Röhren wird von dem transparenten Material getragen, was eine Rekonstruktion des „originalen“ Materials erlaubt. Durch diese Konservierungsarbeit wird vorrangig die Wirkungsweise der Skulptur erhalten, wie sie William Turnbull in den 1960iger Jahren angestrebt hat, im Gegensatz zur physischen Bewahrung der einzelnen pMMA-Röhren. Die physische Erhaltung eines Materials entspricht der Tradition der Restaurierung. Die Rekonstruktion eines Materials, um die Wirkungsweise zu erhalten, ist ein neuer Ansatz der Restaurierung und Konservierung.

Die Arbeiten von Dieter Roth andererseits basieren auf der Selbstzerstörung der Materialien, weil der Künstler gerade das sich Zerstörende und die Endlichkeit des Materials und seinen Werken darstellen möchte (Thun 2002: 469). Althöfer (1980: 444) schreibt über den konservatorischen Umgang des Werkes *Straßenszene*, 1976, von Dieter Roth, bei dem ein Stück Käse auf der Rückseite des Bildes montiert ist, dass sich allenfalls eine Plexiglasumhüllung anbietet. Die Geruchsbelästigung und der Schimmel des Käses nimmt von Woche zu Woche und von Jahr zu Jahr zu und verändert die Vorderseite des Bildes, da Verfärbungen auf Grund des Schimmelbefalls und Fettrückstände des Käses nach vorne durchschlagen.

Diese neuen Aspekte des kritischen Umgangs mit der unabdingbaren Erhaltung der Originalsubstanz haben noch keinen schriftlichen Niederschlag beim Verfassen von Richtlinien wie dem Code of Ethics von ICOM für den Umgang mit zeitgenössischer Kunst gefunden. Bei Arbeiten von Anish Kapoor, Ross Sinclair oder William Turnbull wird vorrangig die Wirkungsweise eines Kunstwerkes konserviert, was nicht einhergehen muss mit der

unabdingbaren Erhaltung der Originalsubstanz. Die Konservierung der Wirkung wird zu einer zentralen Komponente beim Sichern und Bewahren von Sammlungsgut. Bei Arbeiten von Gotthard Graubner, Wolfgang Laib und Dieter Roth ist der technische Aufbau des Werkes und die Materialzusammensetzung restauratorisch schwierig zu handhaben, wofür es bislang keine greifenden Konservierungskonzepte gibt.

Die Erhaltung von Originalsubstanz ist weiterführend bei modernen Materialien wie Kunststoffen materialbedingt komplex, da aus der großen Vielfalt der Produkte in einem ersten Schritt das Material erkannt und bestimmt werden muss, um Alterungsmechanismen einschätzen und Konservierungsverfahren erarbeiten zu können. Waentig (2004) leistet hierfür in ihrer Promotionsarbeit *Kunststoffe in der Kunst* einen wichtigen Beitrag, indem sie einen historischen Überblick über die Herstellung und über den Einsatz von Kunststoffen in Kunstwerken gibt, konservatorische Ansätze aufzeigt und den Begriff der Materialikonologie in Bezug zu den mannigfaltigen Fallbeispielen setzt.

## 7 Schlussbetrachtung

Das Konsolidieren von pudernden Pigmentaufträgen unterliegt Einschränkungen in Bezug auf die Stärke der Pigmentschicht und der Farbigkeit des zu festigenden Pigmentkorns. Je stärker eine Pigmentschicht, desto risikoreicher ist eine Veränderung des Farbeindrucks durch Einbringen eines Konsolidierungsmittels.

Der Grund für eine Veränderung des Farbeindrucks liegt an der Ausbildung von Klebstoffbrücken im Pigmentgefüge, die ein Zusammenrücken der Pigmente und eine Verdichtung der Pigmentschicht bewirken, wobei es nicht zu sichtbaren Beschichtungen der Pigmentoberfläche kommt. Dieser Rückschluss wird gezogen, da bei keinem der Klebstoffaufträge Glanz gemessen wurde, was bedeutet, dass die Klebstoffe sich im Pigmentgefüge verteilen und die Klebstofffilme sich exakt an Unebenheiten anpassen, wie die Untersuchungen zum Streuvermögen zeigten.

Bei Pastellen liegen die Pigmente lose, ohne stützendes Bindemittel aufeinander, was gerade den luftigen und fragilen Charakter ausmacht. Bei einem Eintrag von Klebstoffen wird auch hier eine Verdichtung stattfinden, da Klebstoffbrücken ausgebildet werden. Es besteht ein hohes Risiko, dass sich der Farbeindruck verändert, da relativ viel Pigmentmaterial verdichtet werden kann. Je kompakter die zu konsolidierende Pigmentschicht ist und je mehr originales Bindemittel noch vorliegt, um so mehr wird sich das Risiko einer starken Verdichtung minimieren, da relativ weniger Material zusammensinken und zusammenfließen kann.

Die Farbigkeit des Pigmentkorns beeinflusst gleichermaßen die Veränderung der Farbwirkung. Das Verdichten von bunten Pigmentschichten resultiert in einer Reduzierung der Helligkeit, da die diffuse Reflexion aus dem Innern der Pigmentschicht abnimmt. Dies konnte an den Messungen zur Oberflächenbeschaffenheit der ausgewählten Pigmentproben gezeigt werden. Das Verdichten von weißen Pigmentlagen resultiert in einer Erhöhung der Helligkeit bzw. in einer Erhöhung des Deckvermögens, wie es bei der Kreidezeichnung von Ross Sinclair zu beobachten war.

Dies lässt wiederum den Schluss zu, dass eine Konsolidierung von weißen Pigmentlagen ein relativ geringeres Risiko einer sichtbaren Veränderung des Farbeindrucks in sich birgt, da das Auge Verschiebungen bei hohen Reflexionswerten weniger unterscheiden kann, als dies bei dunklen Reflexionswerten der Fall ist.

Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchungen wurde ein grafisches Modell erarbeitet (s. Abb. 81), das den Zusammenhang zwischen einer Konsolidierungsmaßnahme und den daraus resultierenden Veränderungen der Farbwirkung in Abhängigkeit der Stärke der Pigmentschicht und der Farbigkeit herstellt. Dieses Modell wurde erstmals für den Fall der Pigmentkonsolidierung erarbeitet. Es erlaubt darüber hinaus, eine Risikoeinschätzung bei

Sonderfällen der Pigmentfestigung vorzunehmen, die vor einem restauratorischen Eingriff unbedingt abgewogen werden sollte, da es aus technischer Sicht keine Möglichkeit gibt, das Konsolidierungsmittel aus dem Pigmentgefüge wieder zu entfernen.

Die dünnsten Pigmentschichten, wie der *Kreideauftrag 3* von Ross Sinclair zeigte, stellt einen Sonderfall der Pigmentfestigung dar. Bei sehr dünnen Pigmentschichten und einzelnen losen Pigmenten besteht die Gefahr, dass das Konsolidierungsmittel das Pigment umhüllt und durch eine Glättung der Oberfläche diese Pigmente für das Auge nicht mehr wahrnehmbar sind. Der gleiche Brechungsindex von  $n=1,52$  von Kreide und von Gelatine führt bei einer Einbettung der Pigmente dazu, dass die Kreidezeichnung visuell nicht mehr zu erkennen ist.

In dem hier beschriebenen Fall spielt der Brechungsindex der Klebstoffe eine Bedeutung, wohingegen der Brechungsindex von dünnen Klebstoffaufträgen auf und in einem Pigmentgefüge keine Rolle spielt.

Die untersuchten Klebstoffe haben sich in Bezug auf den Grad der Verdunkelung nach einem Konsolidierungsauftrag vergleichbar verhalten und es kann keinem Klebstoff der Vorzug gegeben werden. Allerdings wurden bei Klucel® wiederholt Verdunkelungen gemessen, weshalb Klucel® für Konsolidierungsmaßnahmen nur mit Einschränkungen empfohlen wird. Klucel® sollte nur angewendet werden, wenn ein stark feuchteempfindliches Pigment einer Festigung bedarf und der Klebstoff hierfür in einem niedermolekularen Alkohol gelöst eingesetzt werden muss.

In Bezug auf die Klebkraft und das Streuvermögen unterscheiden sich die untersuchten Klebstoffe allerdings. Gelatine und Hausenblase besitzen im Vergleich zu Methylcellulose, Funori und JunFunori® eine relativ höhere Klebkraft. Die Viskositätsmessungen haben gezeigt, dass die Viskosität sich nicht auf die Aerosolbildung, aber auf die zu vernebelnde maximale Konzentration der Klebstoffe auswirkt. Daraus lässt sich theoretisch ableiten, dass Klebstoffe, wie Gelatine und Hausenblase, die mit den höchsten Konzentrationen vernebelt werden können, im Pigmentgefüge eine höhere Klebkraft entwickeln werden, als die niedrig konzentrierten Klebstoffe wie Methylcellulose, Klucel®, Funori und JunFunori®.

Das Streuvermögen ist ein weiterer Unterscheidungsaspekt. Gelatine-, Klucel®- und Methylcellulose-Filme trocknen auf glatten Flächen glänzend auf, was eine Gefahr bei der Konsolidierung auf zum Beispiel Glas darstellt. Auf rauen Untergründen, wie es eine Pigmentschicht darstellt, passen sich allerdings alle Klebstoffe den Untergründen an und trocknen nicht glänzend auf.

Die Untersuchungen der Klebstofffilme durch die beschleunigte Alterung zeigten, dass diese Ergebnisse nicht auf die Langzeitstabilität eines Klebstoffs in einem Pigmentgefüge zu übertragen sind. Die Klebstoffe im Pigmentgefüge haben sich in keinsten Weise so stark in ihrer Planlage und Farbe verändert, wie dies bei den gealterten Klebstofffilmen eintrat. Die Klebstoffe als Konsolidierungsmittel waren form- und dimensionsstabil und bewirkten keine Spannungsrisse nach der beschleunigten Alterung. Zudem müssen die Alterungsbedingungen für Klebstofffilme weiter herausgearbeitet werden, da geringe Veränderungen der Alterungsbedingungen zu drastischen Veränderungen der Klebstofffilme führten.

Die Kriterien für die Wahl eines Klebstoffs als Konsolidierungsmittel sind vor allem die benötigte Klebkraft und der Untergrund, auf dem eine Malschicht aufgetragen ist. Die Eigenfarbe, der Brechungsindex und die Viskosität der Klebstoffe spielen dabei eine untergeordnete Rolle.

Die neu gewonnenen Erkenntnisse basierend auf den durchgeführten Untersuchungen und basierend auf dem Aufzeigen der Zusammenhänge zwischen Farbeindruck und Pigmentoberfläche sind eine unverzichtbare Voraussetzung bei der Konsolidierung von pudernden Malschichten, weil es sich bei diesem Eingriff um eine nicht rückführbare restauratorische Maßnahme handelt. Umso relevanter ist die Interpretation und Vorstellung der hier dargelegten Untersuchungen, um das geringste Risiko während einer Konsolidierungsmaßnahme einzugehen.

Die Verantwortung des Abschätzens einer ausreichenden Haftung wird auch weiterhin beim ausführenden Restaurator liegen, der die Effektivität einer Konsolidierungsmaßnahme durch das Testen am Objekt prüft. Dies geschieht durch Darüberstreichen der gefestigten Stellen mit einem feinen Pinsel, um festzustellen, ob die vormals losen Pigmente gesichert wurden. Vor dem Hintergrund des umfangreichen analytischen Einsatzes zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Farbeindruck, Klebstoffauswahl und Applikationsmethode ist diese manuelle Kontrolle des Restaurators ernüchternd, da das Testen der Haftung subjektiv ist und nicht normiert werden kann. Die Erfahrung des Restaurators und die Kenntnis über die weitere Verwendung und Inanspruchnahme des Kunstwerks beeinflussen das Abschätzen einer ausreichenden Haftung gleichermaßen. Das Zusammenwirken der manuellen Tätigkeit, die ein hohes Maß an Sicherheit und Gewandtheit des Restaurators erfordert, und der Kenntnis von optischen und farbmetrischen Gesetzmäßigkeiten wird beim Konsolidieren von pudernden Malschichten ersichtlich und spiegelt den interdisziplinären Charakter zwischen der restauratorischen Praxis und der naturwissenschaftlichen Analytik wider.

## 8 Literatur

- AMERICAN INSTITUTE FOR CONSERVATION (Hrsg.): *AIC, Preprints, Tenth Annual Meeting, Milwaukee, Wisconsin, 26.- 30. Mai 1982*. Washington, D.C. (AIC) 1982.
- AMERICAN INSTITUTE FOR CONSERVATION (Hrsg.): *AIC Paintings Speciality Group, Postprints, Philadelphia, PA, 8.- 13. Juni 2000*. Philadelphia, PA (AIC) 2000.
- ALTHÖFER, Heinz: *Moderne Kunst- Handbuch der Konservierung*. Düsseldorf (Pädagogischer Verlag Schwann) 1980.
- ALTHÖFER, Heinz: *Restaurierung moderner Malerei: Tendenzen, Material, Technik*. München (Verlag Georg D.W.Callwey) 1985.
- ANFAM, David: *Mark Rothko- The Works on Canvas*. New Haven/ London (Yale University Press) 1998.
- ANSELM, Andreas Friedrich: *Untersuchungen zum Verhalten hygroskopischer Aerosolteilchen im Atemtrakt des Menschen*. Frankfurt am Main. Dissertation 1989. Als Manuskript gedruckt.
- ARNOLD, David: *Recent Developments in the Mist Consolidation of Powdery Painted Surfaces. Draft Paper, AIC 1996 Annual Meeting, 15. Juni 1996*. Norfolk 1996.
- BACCI, M.; BALDINI, F.; CLARA, R. : *A Colour Analysis of the Brancacci Chapel Frescoes*. In: *Applied Spectroscopy*, 45. Jg. (1991), H. 1, S. 26- 31.
- BACCI, M.; PICOLLO, M.; PORCINAI, S. : *Non- Destructive Spectrophotometric Investigations of Paintings: Some Recent Advances*. Aus: Goupy, J.; Mohen, J. (Hrsg.): *Art et Chimie, la Couleur. Actes du Congrès*. Paris (CNRS Editions) 2000. S. 187- 190.
- BACCI, M.; PICOLLO, M.; PORCINAI, S. : *Non- Destructive Spectrophotometry and Colour Measurements Applied to the Study of Works of Art*. In: *Techné*, 5. Jg. (1997), S. 28- 33.
- BANIK, Gerhard; PATAKI, Andrea: *Training for Conservators- a Changing Profile*. In: *The Paper Conservator*, 25. Jg. (2001), S. 45- 51.
- BANIK, Gerhard; WEBER, Hartmut (Hrsg.): *Tintenfraßschäden und ihre Behandlung*. Stuttgart (W. Kohlhammer GmbH) 1999.
- BARTHOLOMÉ, Ernst; BIEKERT, Ernst; HELLMANN, Heinrich (Hrsg.): *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*. Weinheim (Verlag Chemie) 1979.
- BAUR, Andreas; BERG, Stephan (Hrsg.): *On Stage*. Hannover (Kunstverein) 2002.
- BELL, Ian; CLARK, Robin; GIBBS, Peter: *Raman Spectroscopic Library of Natural and Synthetic Pigments (pre- 1850 AD)*. In: *Spectrochimica Acta Part A* (1997), H. 53, S. 2159- 2179.
- BERGGRUEN, Oliver; HOLLEIN, Max; PFEIFFER, Ingrid (Hrsg.): *Yves Klein. Ausstellung vom 17. September 2004 bis 9. Januar 2005 an der Schirn Kunsthalle Frankfurt am Main*. Ostfildern- Ruit, Frankfurt am Main (Hatje Cantz Verlag) 2004.
- BURNS, Roy S.; DE LA RIE, René: *The Relative Importance of Surface Roughness and Refractive Index in the Effects of Varnishes on the Appearance of Paintings*. Aus: Vontobel, Roy (Hrsg.): *13th Triennial Meeting Rio de Janeiro, ICOM- CC, 22.- 27. September 2002*. London (James & James Ltd.) 2002. S. 211- 216.
- BÖHLAU, V.; STRAUBEL, H. (Hrsg.): *Aerosole in Naturwissenschaft, Medizin und Technik. Jahreskongress 1974, Gesellschaft für Aerosolforschung e.V. Bad Soden (Gesellschaft für Aerosolforschung) 1974*.

- BORQUE, A.; RUIZ-MORENO, S.; LOPEZ-GIL SERRA, A.: *Application of Near Infrared Raman Spectroscopy to the Analysis of Historical Documents*. Aus: Kolar, Jana; Strlic, Matija; Wouters, Jan (Hrsg.): *Proceedings of the ICOM-CC Graphic Document Meeting, Ljubljana. 11.- 12. März 2004*. Ljubljana (National and University Library) 2004. S. 73- 74.
- BRIDGLAND, Janet (Hrsg.): *11th Triennial Meeting, ICOM- CC, Edinburgh 1.- 6. September 1996*. London (James & James Ltd.) 1996.
- BRIDGLAND, Janet (Hrsg.): *12th Triennial Meeting, ICOM- CC, Lyon 29. August- 3. September 1999*. London (James & James Ltd.) 1999.
- BRIDGLAND, Janet (Hrsg.): *10th Triennial Meeting, ICOM- CC, Washington D.C. 22.- 27. August 1993*. London (James & James Ltd.) 1993.
- BRINKER, Jeffrey; SCHERER, George: *Sol- Gel Science*. San Diego (Academic Press Inc.) 1990.
- BROMELLE, N.; PYE, Elizabeth; SMITH, Perry (Hrsg.): *Adhesives and Consolidants, IIC Conference, 2.- 8. September 1984*. London (IIC) 1984.
- BROWN, Jean (Hrsg.): *The Iron Gall Ink Meeting, 4.- 5. September 2000*. Newcastle (The University of Northumbria) 2001.
- BURGESS, Helen (Hrsg.): *Proceedings of a Conference, Symposium 88*. Ottawa (Government of Canada) 1994.
- BURGIO, Lucio; CLARK, Robin: *Library of FT- Raman Spectra of Pigments, Minerals, Pigment Media and Varnishes, and Supplement to Existing Library of Raman Spectra of Pigments with Visible Excitation*. In: *Spectrochimica Acta Part A*, 57. Jg. (2001), S. 1491- 1521.
- BURGIO, Lucia; CLARK, Robin; STRATOUDAKI, Theodosia: *Pigment Identification in Painted Artwork: A dual Analytical Approach employing Laser- Induced Breakdown Spectroscopy and Raman Microscopy*. In: *Applied Spectroscopy*, 54. Jg. (2000), H. 4, S. 463- 469.
- BURRELL, Harry: *Hiding without Pigment*. In: *Journal of Paint Technology*, 43. Jg. (1971), H. 559, S. 48- 53.
- BUXBAUM, Gunter (Hrsg.): *Industrial Inorganic Pigments*. Weinheim (Wiley- VCH) 1998.
- CARIUS, Reinhard; DITTRICH, Thomas: *Photonen- Management- Optische Strukturen*. Aus: Stadermann, Gerd (Hrsg.): *Photovoltaik- neue Horizonte. FVS Jahrestagung 2003*. Berlin (Forschungsverband Sonnenenergie) 2003. S. 85- 89.
- CLARK, ROBIN, J. H.: *Pigment Identification on Medieval Manuscripts by Raman- Microscopy*. In: *Journal of Molecular Structure* (1995), H. 347, S. 417- 428.
- DA COSTA, Valérie: *Wolfgang Laib et Anish Kapoor: Histoires de Jaune (s)*. In: *Techne*, 9- 10. Jg. (1999), S. 106- 111.
- DANIELS, Vincent: *The Effects of Water Treatments on Paper with Applied Pastel or Powder Pigment*. In: *The Paper Conservator*, 22. Jg. (1998), S. 29- 37.
- DANIELS, Vincent: *Imperfect Reversibility in Paper Conservation*. Aus: Oddy, Andrew; Carroll, Sara (Hrsg.): *Reversibility- does it exist?* London (The British Museum) 1999. (=British Museum Occasional Paper Number. 135) S. 47- 51.
- DANIELS, Vincent; DONNITHORNE, Alan; SMITH, Perry (Hrsg.): *Works of Art on Paper, Books, Documents and Photographs. Techniques and Conservation, IIC, 2.- 6. September 2002. Contributions to the Baltimore Congress*. London (IIC) 2002.
- DAVEY, R.; GARDINER, D. J.; SINGER, B. W. : *Examples of Analysis of Pigments from Fine Art Objects by Raman Microscopy*. In: *Journal of Raman Spectroscopy*, 25. Jg. (1994), H. 25, S. 53- 57.
- DE LA RIE, René: *The Influence of Varnishes on the Appearance of Paintings*. In: *Studies in Conservation*, 32. Jg. (1987), S. 1- 13.



- DEIGHTON, Sandra; HEUMAN, Jackie: *Natural Selection 1981. Antony Gormley*. Aus: Heuman, Jackie (Hrsg.): *Material Matters*. London (Tate Gallery Publishing Ltd) 1999. S. 83- 90.
- DEMUTH, Petra: *Regenerierung von Firniskrepiierungen- Beiträge zu Verfahrenstechniken unter Einsatz von Lösemitteldämpfern*. Hochschule für Bildende Künste Dresden. Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut. Seminararbeit 2000. Als Manuskript gedruckt.
- DEPOCAS, Alain; IPPOLITO, Jon; JONES, Caitlin (Hrsg.): *Permanence through Change- The Variable Media Approach*. New York, Montreal (The Solomon R. Guggenheim Foundation, The Daniel Langlois Foundation) 2003.
- DERBYSHIRE, Alan; WITHNALL, Robert: *Non- Destructive Pigment Analysis using Raman Microscopy*. In: *V & A Conservation Journal* (1999), H. 30, S. 9- 13.
- DEUTSCHER KÜNSTLERBUND E.V. (Hrsg.): *Zeichnen. Der Deutsche Künstlerbund in Nürnberg 1996. 44. Jahresausstellung des Germanischen Nationalmuseums vom 1. Dezember 1996 bis 6. April 1997*. Nürnberg (Germanisches Nationalmuseum) 1996.
- DIERKS- STAIGER, Regine; HASSEL, Barbara; BECKER, Ernst : *Konsolidierung von Gouachemalerei auf Papier mit Hilfe von Aerosolen*. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, 11. Jg. (1997), S. 276- 285.
- DIGNARD, Carole; DOUGLAS, Robyn; GUILD, Sherry : *Ultrasonic Misting. Part 2, Treatment Applications*. In: *Journal of the American Institute for Conservation*, 36. Jg. (1997), S. 127- 141.
- DOW CHEMICAL: *Methocel Cellulose Ethers- Technical Handbook*. U.S.A. 2002.
- DOWN, Jane: *Swelling as an Indicator of Removability*. Aus: Oddy, Andrew; Carroll, Sara (Hrsg.): *Reversibility- does it exist?* London (The British Museum) 1999. (=British Museum Occasional Paper Number. 135) S. 111- 127.
- EAGAN, Jane (Hrsg.): *IPC Conference Papers London 1997*. London (The Institute of Paper Conservation) 1998.
- ELIAS, Mady; DUPUIS, Guillaume; SIMONOT, Lionel : *Mesure la couleur: couleurs, textures et surfaces des oeuvres d'art*. Aus: Vontobel, Roy (Hrsg.): *13th Triennial Meeting Rio de Janeiro, ICOM- CC, 22.- 27. September 2002*. London (James & James Ltd.) 2002. S. 419- 425.
- ELIAS, Mady; MENU, Michel: *Experimental Characterisation of Random Metallic Rough Surface by Spectrophotometric Measurements in the Visible Range*. In: *Optics Communications*, 180. Jg. (2000), S. 191- 198.
- ELIAS, Mady; MENU, Michel: *Caractérisation de la constitution de surface d'oeuvres d'art du patrimoine*. In: *La Revue de Métallurgie-CIT/ Science et Génie des Matériaux* (2001), S. 778- 782.
- EVANS, Debra: *Funori: a Short Description, Recipe and Source*. In: *The Book and Paper Group Annual*, 3. Jg. (1984), S. 59.
- FALBE, Jürgen; REGITZ, Manfred (Hrsg.): *Römpp- Chemie- Lexikon*. Stuttgart (Georg Thieme Verlag) 1992.
- FALK, David; BRILL, Dieter; STORK, David: *Seeing the Light. Optics in Nature, Photography, Color, Vision and Holography*. Washington D.C. (John Wiley & Sons, Inc.) 1986.
- FELLER, Robert: *Artist's Pigments- A Handbook of their History and Characteristics*. Washington, D.C. (Cambridge University Press) 1986.
- FELLER, Robert: *Factors Affecting the Appearance of Picture Varnish*. In: *Science*, 125. Jg. (1957), S. 1143- 1144.

- FELLER, Robert; KUNZ, Noel: *The Effect of Pigment Volume Concentration on the Lightness or Darkness of Porous Paints*. Aus: Whitmore, Paul (Hrsg.): *Contributions to Conservation Science. A Collection of Robert Feller's Published Studies on Artists' Paints, Paper, and Varnishes*. Pittsburgh (Carnegie Mellon University Press) 2002. S. 269-278.
- FELLER, Robert; WILT, Myron: *Evaluation of Cellulose Ethers for Conservation*. Los Angeles (The J. Paul Getty Trust) 1990.
- FISCHER, Heidi: *Konsolidierung einer Malschicht mittels Aerosol in einem spätmittelalterlichen Büchsenmeisterbuch*. In: *Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut*, 1. Jg. (2003), H. 1, S. 129- 135.
- FONDATION BEYELER (Hrsg.): *Mark Rothko*. Ostfildern/ Ruit (Hatje Cantz Verlag) 2001.
- THE FRUITMARKET GALLERY; SINCLAIR, Ross: *Ross Sinclair, 8 Projects 1996- 1999*. Edinburgh (The Fruitmarket Gallery) 2000.
- FUCHS, Robert: *New Consolidation Techniques for Fixing Brittle Paint Layers in Medieval Book Illuminations*. In: *Care and Conservation of Manuscripts*, 4. Jg. (1999), S. 140- 159.
- FUCHS, Robert; MEINERT, Christiane; SCHREMPF, Johannes: *Pergament- Geschichte, Material, Konservierung, Restaurierung*. In: *Kölner Beiträge zur Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut*, 12. Jg. (2001), S. 1-226.
- GALINSKY, Eva: *Kunststoff- Folien in der Papierrestaurierung 1950- 1970: Schwerpunkt Deutschland*. Leipzig (Zentrum für Bucherhaltung) 2001. (= Schriftenreihe zur Bestandserhaltung 1)
- GANTZERT- CASTRILLO, Erich: *Archiv für Techniken und Arbeitsmaterialien zeitgenössischer Kunst*. Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag) 1996.
- GAUL, Gerhard; KNÖCHEL, Arndt: *Röntgenfluoreszenzanalyse mit Synchrotronstrahlung*. Berlin (Springer Verlag) 1994. (= Analytikertaschenbuch. 13)
- GEBHART, J.; PORSTENDÖRFER, J.: *Beständigkeit der Tropfengrößenspektren medizinischer Vernebler in wasserdampfgesättigter Luft*. Aus: Böhlau, V.; Straubel, H. (Hrsg.): *Aerosole in Naturwissenschaft, Medizin und Technik. Jahreskongress 1974, Gesellschaft für Aerosolforschung e.V.* Bad Soden (Gesellschaft für Aerosolforschung) 1974. S. 1- 7.
- GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER (Hrsg.): *Anakon 2003, Kurzreferate, 2. bis 5. April 2003, Konstanz*. Konstanz (Eigenverlag) 2003.
- GOTTWALD, Wolfgang; PUFF, Werner: *Physikalisch- chemisches Praktikum*. Weinheim (VCH Verlagsgesellschaft) 1990.
- GOULD, Robert (Hrsg.): *Industrial Color Technology*. Washington DC (American Chemical Society) 1972.
- GOUPY, J.; MOHEN, J. (Hrsg.): *Art et Chimie, la Couleur. Actes du Congrès*. Paris (CNRS Editions) 2000.
- GRANTHAM, Sandra; CUMMINGS, Alan: *Painted Japanese Paper Screens: the Consolidation of Paint Layers on a Paper Substrate*. Aus: Stratis, Harriet; Salvesen, Britt (Hrsg.): *The Broad Spectrum, Studies in the Material, Techniques and Conservation of Colour on Paper*. London (Archetype Publication) 2002. S. 198- 206.
- GRIFFITHS, W.; MARK, D; MARSHALL, I. : *Aerosol Particle Size Analysis*. Cambridge (AEA Technology) 1998.
- GRIMSTED, Kirsten (Hrsg.): *9th Triennial Meeting Dresden, ICOM- CC, 26.- 31. August 1990*. London (James & James Ltd.) 1990.
- GROSSO, Villia: *Fourier Transform Infrared and Raman Spectroscopy of Ancient Paper*. Aus: Burgess, Helen (Hrsg.): *Proceedings of a Conference, Symposium 88*. Ottawa (Government of Canada) 1994. S. 245- 250.

- HABENICHT, Gerd: *Kleben- Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Berlin (Springer Verlag) 1997.
- HANSEN, Eric; LOWINGER, Rosa; SADOFF, Eileen: *Consolidation of Porous Paint in a Vapour-Saturated Atmosphere. A Technique for Minimising Changes in the Appearance of Powdering, Matte Paint*. In: *Journal of the American Institute of Conservation*, 32. Jg. (1993), H. 1, S. 1- 14.
- HANSEN, Eric; WALSTON, Sue; BISHOP, Mitchell (Hrsg.): *Matte Paint. Its History and Technology, Analysis, Properties, and Conservation Treatment* Marina del Rey (The Getty Conservation Institute) 1993. (= Art and Archaeology Technical Abstracts)
- HAUPT, Tobias: *Zubereitung von Störleim. Auswirkung der Zubereitungstemperatur und- zeit auf Viskosität, Geliervverhalten und Molekulargewicht*. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Studiengang Gemälderestaurierung. Diplomarbeit 2000. Als Manuskript gedruckt.
- HEDLIN HAYDEN, Malin: *Out of Minimalism: The Referential Cube. Contextualising Sculptures by Anthony Gormly, Anish Kapoor and Rachel Whiteread*. Uppsala. Dissertation 2003. Als Manuskript gedruckt.
- HEUMAN, Jackie (Hrsg.): *Material Matters*. London (Tate Gallery Publishing Ltd) 1999.
- HOFMANN, Christa; FLAMM, Verena; KADLEC, Gertrud: *Farbschichtkonsolidierung*. In: *PapierRestaurierung*, 2. Jg. (2001), H. 2, S. 21- 32.
- HOLZNER, Peter: *Pharmazeutische Aerosole. Methoden zur Erzeugung, Charakterisierung und Bewertung*. Kiel. Dissertation 1995. Als Manuskript gedruckt.
- HOMBURGER, Hildegard; KORBEL, Barbara: *Architekturzeichnungen auf Transparentpapier. Modifizierte Restaurierungsverfahren*. In: *Restauro*, 104. Jg. (1998), H. 7, S. 462- 467.
- HORIE, Charles Velson: *Materials for Conservation: Organic Consolidants, Adhesives and Coatings*. Oxford (Butterworth- Heinemann Ltd.) 1987.
- HUET, Mélanie: *Etude et conservation-restauration d'un manuscrit nepalais conserve au Musée National des Arts Asiatiques-Guimet*. Institut National du Patrimoine. Département des restaurateurs d'oeuvres d'art (IFROA). Als Manuskript gedruckt.
- HUHSMANN, Enke: *Erweiterte Methoden zur chemischen Stabilisierung und zur Festigung von tintenfraßgeschädigten Papieren*. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart. Studiengang Restaurierung und Konservierung von Graphik, Archiv- und Bibliotheksgut. Diplomarbeit 2000. Als Manuskript gedruckt.
- INTERNATIONAL COUNCIL OF MUSEUMS: *ICOM- Ethische Richtlinien für Museen. Code of Ethics for Museums*. Berlin 2003.
- IMDAHL, Max: *Farblaiber- Farbraumkörper*. Aus: Peters, Hans Albert; Schmidt, Katharina (Hrsg.): *Gotthard Graubner- Malerei*. Baden- Baden (Staatliche Kunsthalle Baden- Baden) 1980. S. 3- 15.
- IPPOLITO, Jon: *Accomodating the Unpredictable: The Variable Media Questionnaire*. Aus: Depocas, Alain; Ippolito, Jon; Jones, Caitlin (Hrsg.): *Permanence through Change- The Variable Media Approach*. New York, Montreal (The Solomon R. Guggenheim Foundation, The Daniel Langlois Foundation) 2003. S. 47- 53.
- JACKSON, Tessa: *Recumbent Figure 1938. Henry Moore*. Aus: Heuman, Jackie (Hrsg.): *Material Matters*. London (Tate Gallery Publishing Ltd) 1999. S. 63- 72.
- JÄHNERT, Bernd: *Wasserdampfkondensation an hygroskopischen Aerosolteilchen*. Frankfurt am Main. Dissertation 1982. Als Manuskript gedruckt.
- JOHNSTON- FELLER, Ruth: *Color Science in the Examination of Museum Objects. Nondestructive Procedure*. Los Angeles (The J. Paul Getty Trust) 2001.

- KÄSSBERGER, Michael: *Vorgänge im Papier bei dynamisch beschleunigter Alterung*. Graz. Dissertation 1998. Als Manuskript gedruckt.
- KESSLER, Annette: *Anwendung von Aerosolen zur Konsolidierung matter Farbschichten unterschiedlicher Schadensbilder unter Berücksichtigung des Eindringverhaltens des Konsolidierungsmittels*. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart. Studiengang Restaurierung und Konservierung von Graphik, Archiv- und Bibliotheksgut. Diplomarbeit 1997. Als Manuskript gedruckt.
- KOLAR, Jana; STRLIC, Matija; WOUTERS, Jan (Hrsg.): *Proceedings of the ICOM-CC Graphic Document Meeting, Ljubljana. 11.- 12. März 2004*. Ljubljana (National and University Library) 2004.
- KOLBE, Gesa: *Gelatine in der Papier- und Pergamentrestaurierung*. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Studiengang Restaurierung und Konservierung von Graphik, Archiv- und Bibliotheksgut. Diplomarbeit 1999. Als Manuskript gedruckt.
- KRESSE, Peter: *Eine Schnellmethode zur Bestimmung der kritischen Pigmentvolumenkonzentration*. In: *Farbe und Lack*, 71. Jg. (1965), H. 3, S. 178- 184.
- KÜHN, Hermann: *Erhaltung und Pflege von Kunstwerken. Material und Technik, Konservierung und Restaurierung*. München (Klinkhardt & Biermann Verlag) 2001.
- LAMB, Trevor; BOURRIAU, Janine (Hrsg.): *Colour. Art & Science*. Cambridge (Cambridge University Press) 1995.
- LAWSON, Margaret: *A Simple Method of Consolidation using an Adult Respan Nebulizer and an Aquarium Pump*. Aus: American Institute for Conservation (Hrsg.): *AIC Paintings Speciality Group, Postprints, Philadelphia, PA, 8.- 13. Juni 2000*. Philadelphia, PA (AIC) 2000. S. 73- 75.
- LAWSON, Margaret; YAMAZAKI-KLEPS, Akiko: *Examination and Conservation of the Fifteenth-Century Parchment Manuscript, the Belles Heures of Jean, Duke de Berry*. Aus: Daniels, Vincent; Donnithorne, Alan; Smith, Perry (Hrsg.): *Works of Art on Paper, Books, Documents and Photographs. Techniques and Conservation, IIC, 2.- 6. September 2002. Contributions to the Baltimore Congress*. London (IIC) 2002. S. 129- 134.
- LOOS, Hansl: *Farbmessung. Grundlagen der Farbmessung und ihre Anwendungsbereiche in der Druckindustrie*. Itzehoe (Verlag Beruf + Schule) 1989.
- MAHEUX, Anne; MCWILLIAMS, Wanda: *The Use of the Ultrasonic Mister for the Consolidation of a Flaking Gouache Painting on Paper*. In: *The Book and Paper Group Annual*, 14. Jg. (1995), S. 19- 25.
- MASSON, Olivier: *L'Approche occidentale d'un adhésif venu d'Orient*. In: *Tracé*, 3. Jg. (2003), S. 63- 65.
- MASSON, Olivier; RITTER, Michaela: *Fräulein Huth and the Red Seaweed: Consolidation of a Collage by Kurt Schwitters with JunFunori*. In: *The Paper Conservator*, 28. Jg. (2004), S. 91- 99.
- MEYER, Werner (Hrsg.): *Mythos und Farbe. Die Filmbilder von Friedemann Hahn*. Ostfildern, Ruit (Cantz Verlag) 1995.
- MICHALSKI, Stefan; DIGNARD, Carole: *Ultrasonic Misting. Part 1, Experiments on Appearance Change and Improvement in Bonding*. In: *Journal of the American Institute of Conservation*, 36. Jg. (1997), S. 109- 126.
- MICHEL, Françoise; GEIGER, Thomas; REICHLIN, Anita : *Interdisziplinäre Grundlagenforschung zur Konsolidierung von matter Malerei*. Dübendorf (EMPA Dübendorf) 2001.

- MICHEL, Françoise; GEIGER, Thomas; REICHLIN, Anita : *Funori, ein japanisches Festigungsmittel für matte Malerei*. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, 16. Jg. (2002), H. 2, S. 257- 275.
- MILLS, John; SMITH, Perry (Hrsg.): *IIC Preprints of the Contribution to the Brussels Congress, Cleaning, Retouching and Coatings, 3.- 7. September 1990*. London (IIC) 1990.
- NAUMER, Hans; HELLER, Wolfgang: *Untersuchungsmethoden in der Chemie. Einführung in die moderne Analytik*. Stuttgart (Georg Thieme Verlag) 1997.
- NEEVEL, Han: *Phytate als chemische Inhibitoren von Tintenfraß auf Papier*. Aus: Banik, Gerhard; Weber, Hartmut (Hrsg.): *Tintenfraßschäden und ihre Behandlung*. Stuttgart (W. Kohlhammer GmbH) 1999. S. 87- 112.
- NODELMAN, Sheldon: *The Rothko Chapel. Origins, Structure, Meaning*. Austin (the Menil Collection/ University of Texas Press) 1997.
- ODDY, Andrew; CARROLL, Sara (Hrsg.): *Reversibility- does it exist?* London (The British Museum) 1999. (= British Museum Occasional Paper Number. 135)
- OTTMANN, Klaus (Hrsg.): *Wolfgang Laib- Retrospektive*. Ostfildern- Ruit (Hatje- Cantz Verlag) 2002.
- PETERS, Hans Albert; SCHMIDT, Katharina (Hrsg.): *Gotthard Graubner- Malerei*. Baden- Baden (Staatliche Kunsthalle Baden- Baden) 1980.
- PETUKHOVA, Tatyana; BONADIES, Stephen: *Sturgeon Glue for Painting Consolidation in Russia*. In: *Journal of the American Institute for Conservation*, 32. Jg. (1993), S. 23- 31.
- PFAFF, Gerhard: *Perglanzpigmente- der Chemiker als Designer von Farbe und Glanz*. In: *Chemie in unserer Zeit*, 31. Jg. (1997), H. 1, S. 6- 16.
- PFEIFFER, Ingrid: *Yves Klein: Stationen in Deutschland*. Aus: Berggruen, Oliver; Hollein, Max; Pfeiffer, Ingrid (Hrsg.): *Yves Klein. Ausstellung vom 17. September 2004 bis 9. Januar 2005 an der Schirn Kunsthalle Frankfurt am Main*. Ostfildern- Ruit, Frankfurt am Main (Hatje Cantz Verlag) 2004. S. 55- 86.
- PICKROTH 1963: *Ultraschall- und Düsen- Aerosole in der Medizin*. Jena (VEB Gustav Fischer Verlag) 1963.
- PIETSCH, Wolfgang: *Size Enlargement by Agglomeration*. Frankfurt am Main (Otto Salle Verlag) 1991.
- POCIUS, Alphonsus: *Adhesion and Adhesives Technology: an Introduction*. München, Wien, New York (Carl Hanser Verlag) 1997.
- PORTER, Cheryl: *Laser Raman Spectroscopy- a Tool for Non- destructive Pigment Analysis of Manuscripts*. In: *The Paper Conservator*, 16. Jg. (1992), H. 16, S. 93- 97.
- QUANDT, Abigail: *Recent Developments in the Conservation of Parchment Manuscripts*. In: *The Book and Paper Group Annual*, 15. Jg. (1996), S. 99- 115.
- RAFF, Thomas: *Die Sprache der Materialien, Anleitung zu einer Ikonologie der Werkstoffe*. In: *Kunstwissenschaftliche Studien*, 61. Jg. (1994), S. 5- 146.
- REAM, Julie Dennin: *Observations on the Penetration of two Consolidants Applied to Insecure Gouache in Paper*. In: *The Book and Paper Group Annual*, 14. Jg. (1995), S. 27- 40.
- REICHE, Ina; BERGER, Achim; DUVAL, Alain : *Metallstiftzeichnungen Albrecht Dürers- zerstörungsfreie Spurenanalyse mit orts aufgelöster Synchrotron- induzierter Röntgenfluoreszenzanalyse*. In: *PapierRestaurierung*, 5. Jg. (2004), H. 2, S. 30- 38.

- REILLY, James: *Role of the Maillard, or "Protein- Sugar" Reaction in Highlight Yellowing of Albumin Photographic Prints*. Aus: American Institute for Conservation (Hrsg.): *AIC, Preprints, Tenth Annual Meeting, Milwaukee, Wisconsin, 26.- 30. Mai 1982*. Washington, D.C. (AIC) 1982. S. 160- 168.
- RESTANY, Pierre: *Yves Klein*. München (Schirmer/ Mosel Verlag) 1982.
- RICHMOND, Alison (Hrsg.): *Modern Works, Modern Problems? IPC, 3.- 5. März 1994*. London (Institute of Paper Conservation) 1994.
- RICHTER, Manfred: *Einführung in die Farbmeterik*. Berlin, New York (Walter der Gruyter) 1981.
- ROLFE, Melanie: *Little Dancer Aged Fourteen*. Aus: Heuman, Jackie (Hrsg.): *Material Matters*. London (Tate Gallery Publishing Ltd) 1999. S. 15- 25.
- HTTP://WWW.ROEMPP.COM: *Römpf Chemie Lexikon*. Stuttgart (Georg Thieme Verlag) 2004.
- SCHEUCH, Gerhard (Hrsg.): *Aerosole in der Inhalationstherapie IV*. München- Deisenhofen (Dustri- Verlag Dr. Karl Feistle) 2000.
- SCHIEBL, Ulrich: *Konservierungstechnische Beobachtungen zur Festigung wässrig gebundener, kreadender Malschichten auf Holz*. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, 3. Jg. (1989), H. 2, S. 293- 320.
- SCHINZEL, Hiltrud: *Die Bedeutung des Materials für die Restaurierung. Im Blickpunkt: zeitgenössische Kunstwerke und ihre Inhalte* In: *Restaurio*, 110. Jg. (2004), H. 2, S. 86- 91.
- SCHMIDT, Katharina: *Gotthard Graubner. Farbräume, Farbraumkörper- Arbeiten auf Papier*. Düsseldorf (Städtische Kunsthalle Düsseldorf) 1978.
- SCHRADER, Bernhard: *Die Möglichkeiten der Raman- Spektroskopie im Nah- Infrarot- Bereich, Teil I*. In: *Chemie in unserer Zeit*, 31. Jg. (1997), H. 5, S. 229- 234.
- SCHRADER, Bernhard: *Die Möglichkeiten der Raman- Spektroskopie im Nah- Infrarot- Bereich, Teil II. Anwendungsbeispiele für die Schwingungsspektroskopie- von der Chemie zur Archäologie und Medizin*. In: *Chemie in unserer Zeit*, 31. Jg. (1997), H. 6, S. 270- 279.
- SCHRAMM, Hans- Peter; HERING, Bernd: *Historische Malmaterialien und ihre Identifizierung*. Berlin (Deutscher Verlag der Wissenschaften) 1988.
- SEYMOUR, Anne: *Beuys, Klein, Rothko. Transformation and Prophecy. Ausstellung vom 5. Juni- 3. Juli 1987 in London*. London (Anthony d' Offany Gallery) 1987.
- SKOOG, Douglas; LEARY, James: *Instrumentelle Analytik- Grundlagen, Geräte, Anwendungen*. Berlin, Heidelberg (Springer- Verlag) 1996.
- SMITH, Martha: *The Conservation of Islamic Book Pages*. In: *The Book and Paper Group Annual*, 9. Jg. (1990), S. 118- 119.
- SOMMERMEYER, Barbara: *Konsolidierung matter, pudriger Malschichten aus dem Bereich moderner Kunst- Anwendung ultraschallvernebelter Konsolidierungsmittel*. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart. Restaurierung und Technologie von Gemälden und gefassten Skulpturen. Diplomarbeit 1998. Als Manuskript gedruckt.
- SOMMERMEYER, Barbara; BANIK, Gerhard: *Consolidation of Matte, Powdery Paint in Modern Art with the Ultrasonic Mister*. Aus: Bridgland, Janet (Hrsg.): *12th Triennial Meeting, ICOM- CC, Lyon 29. August- 3. September 1999*. London (James & James Ltd.) 1999. S. 901.
- SÖNMEZ, Necmi: *Milch, Blütenstaub, Reis und Wachs- das Werk von Wolfgang Laib*. Frankfurt am Main. Dissertation 2001. Als Manuskript gedruckt.
- SORGE, Georg: *Faszination Ultraschall*. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden (B. G. Teubner GmbH Verlag) 2002. (= Einblicke in die Wissenschaft)

- STAATLICHE KUNSTHALLE KARLSRUHE (Hrsg.): *Gotthard Graubner- Malerei auf Papier. 19. Mai- 22. Juli 2001. In der Staatlichen Kunsthalle Karlsruhe.* Düsseldorf (Verlag Richter) 2001.
- STADERMANN, Gerd (Hrsg.): *Photovoltaik- neue Horizonte. FVS Jahrestagung 2003.* Berlin (Forschungsverband Sonnenenergie) 2003.
- STAUB, S.; SIMON, R.; FRIEH, C. : *Micro- XRF Beamline at the Synchrotron Radiation Facility ANKA.* Aus: Gesellschaft Deutscher Chemiker (Hrsg.): *Anakon 2003, Kurzreferate, 2. bis 5. April 2003, Konstanz.* Konstanz (Eigenverlag) 2003. S. 99.
- STRATIS, Harriet; SALVESEN, Britt (Hrsg.): *The Broad Spectrum, Studies in the Material, Techniques and Conservation of Colour on Paper.* London (Archetype Publication) 2002.
- TE NIJENHUIS, K.: *Thermoreversible Networks. Viscoelastic Properties and Structures of Gels.* Berlin (Springer Verlag) 1997. (= Advances in Polymer Science)
- THUN, Felicitas: *Dieter Roth im Gespräch mit Felicitas Thun, Basel Februar 1998.* Aus: Wien, Barbara (Hrsg.): *Dieter Roth- Gesammelte Interviews.* Reykjavik, London (Edition Hansjörg Mayer) 2002. S. 467- 487.
- TILLEY, Richard: *Colour and the Optical Properties of Materials- an Exploration of the Relationship Between Light, the Optical Properties of Materials and Colour.* Chichester (John Wiley & Sons Ltd) 2000.
- TOMPKINS, Harland; MCGAHAN, William: *Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry. A User's Guide.* New York (John Wiley & Sons, Inc.) 1999.
- TROST, Vera: *Skriptorium- die Buchherstellung im Mittelalter.* Stuttgart (Belser Verlag) 1991.
- TROUILLET, Vanessa; HEIßLER, Stefan; GECKLE, Udo : *FT Raman und FTIR Untersuchungen zur Qualitätskontrolle und Alterung von Papier.* Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. Als Manuskript gedruckt.
- UMHAUER, Heinz: *Streulicht- Partikelgrößen- Zählanalyse als Methode für In- situ- Messungen in Gas- Partikel- Strömungen.* In: *Technisches Messen*, 56. Jg. (1989), H. 5, S. 213- 221.
- VÖLZ, Hans: *Industrielle Farbprüfung. Grundlagen und Methoden.* Weinheim (Wiley- VCH Verlag GmbH) 2001.
- VONTOBEL, Roy (Hrsg.): *13th Triennial Meeting Rio de Janeiro, ICOM- CC, 22.- 27. September 2002.* London (James & James Ltd.) 2002.
- WAENTIG, Friederike: *Kunststoffe in der Kunst. Eine Studie unter konservatorischen Gesichtspunkten. Disserationsschrift der Otto- Friedrich- Universität Bamberg 2002.* Petersberg (Michael Imhof Verlag) 2004.
- WAGNER, Monika (Hrsg.): *Moderne Kunst 1, Das Funkkolleg zum Verständnis der Gegenwartskunst.* Reinbeck (Rowohlt Taschenbuch Verlag) 1991.
- WAGNER, Monika (Hrsg.): *Moderne Kunst 2, Das Funkkolleg zum Verständnis der Gegenwartskunst.* Reinbeck (Rowohlt Taschenbuch Verlag) 1991.
- WAGNER, Monika: *Das Material der Kunst: eine andere Geschichte der Moderne.* München (Verlag C. H. Beck oHG) 2001.
- WAGNER, Monika; RÜBEL, Dietmar; HACKENSCHMIDT, Sebastian (Hrsg.): *Lexikon des künstlerischen Materials, Werkstoffe der modernen Kunst von Abfall bis Zinn.* München (C.H. Beck) 2002. (= Becksche Reihe)
- WEITEMEIER, Hannah: *Yves Klein 1928- 1962, International Klein Blue.* Köln (Benedikt Taschen Verlag GmbH) 1994.

- WHITMORE, Paul (Hrsg.): *Contributions to Conservation Science. A Collection of Robert Feller's Published Studies on Artists' Paints, Paper, and Varnishes*. Pittsburgh (Carnegie Mellon University Press) 2002.
- WIEN, Barbara (Hrsg.): *Dieter Roth- Gesammelte Interviews*. Reykjavik, London (Edition Hansjörg Mayer) 2002.
- WILLCOCKS, Stella: *Transparent Tubes by William Turnbull: the Degradation of a Polymethyl Methacrylate Sculpture*. Aus: Vontobel, Roy (Hrsg.): *13th Triennial Meeting Rio de Janeiro, ICOM- CC, 22.- 27. September 2002*. London (James & James Ltd.) 2002. S. 935- 939.
- WILLEKE, Klaus; BARON, Paul (Hrsg.): *Aerosol Measurement- Principles, Techniques, and Application*. New York (Van Nostrand Reinhold) 1993.
- WINTER, John: *Natural Adhesives in East Asian Paintings*. Aus: Bromelle, N.; Pye, Elizabeth; Smith, Perry u.a. (Hrsg.): *Adhesives and Consolidants, IIC Conference, 2.- 8. September 1984*. London (IIC) 1984. S. 117- 120.
- WOUTERS, Jan; GANCEDO, Gely; PECKSTADT, Ann : *The Conservation of the Codex Eyckensis: The Evolution of the Project and the Assessment of Materials and Adhesives for the Repair of Parchment*. In: *The Paper Conservator*, 16. Jg. (1992), S. 67- 77.
- WOUTERS, Jan; VAN BOS, Marina; LAMENS, Karijn: *Baroque Stucco Marble Decorations. I. Preparation of Laboratory Replicas and Establishment of Criteria for Analytical Evaluation of Organic Materials*. In: *Studies in Conservation*, 45. Jg. (2000), S. 106- 116.
- WÜLFERT, Stefan: *Der Blick ins Bild- lichtmikroskopische Methoden zur Untersuchung von Bildaufbau, Fasern und Pigmenten*. Ravensburg (Ravensburger Buchverlag Otto Maier GmbH) 1999.
- ZORLL, Ulrich (Hrsg.): *Lacke und Druckfarben. Römpf Lexikon*. Stuttgart (Georg Thieme Verlag) 1998.



## 9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Evangeliar (Gospels), 11. Jhd. (Invent. Nr. W.7).....	10
Abb. 2: Detailansicht der Abb. 1, abblätternde Goldauflage und pudernde grüne Malschicht.....	10
Abb. 3: Detailansicht von Abb. 1, abblätternde blaue und braune Pigmentschicht.....	10
Abb. 4: Detailansicht von Abb. 1, abpudernde blaue Malschicht.....	10
Abb. 5: Detailansicht der Abb. 1, abblätternde grüne Malschicht.....	10
Abb. 6: Firadawsi, Persische Handschrift, 17. Jhd. (Invent. Nr. W.602).....	11
Abb. 7: Max Liebermann <i>Baumlandschaft mit See</i> , 1920 (?), (keine Invent. Nr.).....	11
Abb. 8: Installation von Ross Sinclair <i>The journey to the edge of the world-the new republic of St. Kilda</i> , 1999/2002 (Invent. Nr. G-2002-2).....	11
Abb. 9: Wellenbildung einer Flüssigkeits-Oberfläche durch Ultraschall.....	15
Abb. 10: technischer Aufbau eines Ultraschall betriebenen Aerosolgenerators.....	16
Abb. 11: technischer Aufbau eines Druckluft betriebenen Aerosolgenerators.....	16
Abb. 12: Abhängigkeit zwischen der Größe der Aerosolpartikel und der Größe der Pigmente.....	20
Abb. 13: Aerosolpartikel treffen auf Pigmentkörner auf.....	21
Abb. 14: Klebstoffbrücke in Form eines Meniskus.....	21
Abb. 15: REM-Aufnahme einer Brückenbildung.....	21
Abb. 16: Benetzte Pigmente mit Brückenbildung des Klebstoffs.....	22
Abb. 17: Abbildung links zeigt Zinnober als reines Pigment.....	22
Abb. 18: UV/VIS-Spektroskopie von Zinnober.....	31
Abb. 19: Gerichtete und diffuse Reflexion.....	33
Abb. 20: Modell einer UV/VIS-Spektroskopie von Zinnober.....	34
Abb. 21: diffuse Reflexion (schlanke Pfeile) an der Oberfläche und aus dem Innern der Pigmentschicht.....	35
Abb. 22: Sechs Klebstoffe in fester Form.....	40
Abb. 23: Klebstofffilme aller Klebstoffe mit 1 % Massengehalt.....	42
Abb. 24: FTIR-Spektroskopie der Klebstofffilme von Funori und JunFunori®.....	44
Abb. 25: FTIR-Spektroskopie von zwei Gelatinefilmen.....	47
Abb. 26: Zinnober, Mischung Ultramarin/Bleiweiß und brauner Ocker auf Glas-bzw. Plexiglasträger.....	49
Abb. 27: UV/VIS-Spektroskopie der Pigmente Zinnober, der Mischung Ultramarin/Bleiweiß und brauner Ocker.....	50
Abb. 28: FT-Raman-Spektroskopie von Zinnober.....	51
Abb. 29: $\mu$ -SyRFA-Spektrum der Quecksilberbanden (Hg-L) von Zinnober (HgS).....	51
Abb. 30: $\mu$ -SyRFA Spektrum von Ultramarin/Bleiweiß ( $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{S}_2\text{O}_4 / 2\text{PbCO}_3 \times \text{Pb}(\text{OH})_2$ ).....	52
Abb. 31: $\mu$ -SyRFA Spektrum von braunem Ocker ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).....	52
Abb. 32: Wassertropfen, die als Aerosol vorliegen.....	55
Abb. 33: Wassertropfen mit Netzmittel.....	55
Abb. 34: Beispiele von einwirkenden Kräften auf Aerosolteilchen.....	56
Abb. 35: Aerosolstrahl senkrecht auf eine Fläche gehalten.....	56
Abb. 36: Volumenverteilung der Aerosole von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt).....	59
Abb. 37: Volumenverteilung der Aerosole von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt).....	60
Abb. 38: Teilchenverteilung der Aerosole von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt).....	60
Abb. 39: Teilchenverteilung der Aerosole von Methylcellulose (0,2 % Massengehalt).....	61
Abb. 40: Volumenverteilung der Aerosole von Methylcellulose (0,2 % und 0,01 %).....	63
Abb. 41: Volumenverteilung der Aerosole von 1 % Gelatine.....	64
Abb. 42: Volumenverteilung der Aerosole von Wasser und Ethanol.....	65
Abb. 43: Teilchenverteilung der Aerosole von Wasser und Ethanol.....	65
Abb. 44: Volumenverteilung von JunFunori® (0,1 %) in Wasser gelöst und Klucel® (0,2 %).....	66
Abb. 45: Volumenverteilung der Aerosole von Klucel® in Ethanol.....	67
Abb. 46: Verhältnis zwischen Korngröße und produzierter Aerosolpartikel.....	68
Abb. 47: Polystyrol-Petrischale, transparent und glatt.....	70
Abb. 48: Gelatine-Klebstofffilm, klar mit kleinen Verklumpungen.....	70
Abb. 49: Funori-Klebstofffilm, grob, wolkig und noppig.....	70
Abb. 50: UV/VIS-Spektroskopie der Klebstofffilme Gelatine und Funori.....	71
Abb. 51: REM-Aufnahme der feingerauten Probenschale (vermutlich Polystyrol).....	72
Abb. 52: Gelatine-Klebstofffilm bei 200facher Vergrößerung.....	72
Abb. 53: UV/VIS-Spektroskopie eines Gelatine-und Funori-Klebstofffilms.....	72
Abb. 54: Reproduzierbar raue Probenschale.....	73
Abb. 55: Gelatine-Klebstofffilm auf der reproduzierbar rauen Probenschale.....	73
Abb. 56: Funori-Klebstofffilm auf der reproduzierbar rauen Probenschalen.....	73
Abb. 57: UV/VIS-Spektroskopie der Funori-und Gelatine-Klebstofffilme.....	74
Abb. 58: UV/VIS-Spektroskopie der Klebstofffilme.....	77
Abb. 59: Schwächung eines Lichtstrahls durch eine absorbierende Lösung.....	78
Abb. 60: Klebstofffilme nach beschleunigter Alterung bei 80 °C und 65 % relativer Feuchte.....	83
Abb. 61: Klebstofffilme nach der beschleunigten Alterung bei 30 °C und 85 % relativer Feuchte.....	83
Abb. 62: Viskositätskurve einer newtonschen Flüssigkeit.....	85
Abb. 63: schematische Darstellung von Viskositätskurven.....	85
Abb. 64: schematische Darstellung von Biopolymeren.....	86
Abb. 65: Viskositätskurven aller Klebstoffe mit einem Massengehalt von 2 %.....	88

Abb. 66: Viskositätskurve von Funori und JunFunori®. JunFunori® (2 % Massengehalt) .....	88
Abb. 67: Viskositätskurven von Methylcellulose 400 und 50 mit 2 % Massengehalt. ....	89
Abb. 68: Brechung bzw. Refraktion eines Lichtstrahls.....	92
Abb. 69: Schematische Darstellung zweier Versuchsaufbauten zur Aufnahme der diffusen Reflexion .....	99
Abb. 70: UV/VIS-Spektroskopie von Zinnober als Referenz und zwei Mal gesättigt (2xges) .....	103
Abb. 71: Pigmentproben von Zinnober.....	104
Abb. 72: REM-Aufnahme (3300 fache Vergrößerung) von Zinnober.....	104
Abb. 73: UV/VIS-Spektroskopie von der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW).....	105
Abb. 74: Pigmentproben von Ultramarin/Bleiweiß.....	106
Abb. 75: UV/VIS-Spektroskopie von braunem Ocker .....	107
Abb. 76: Pigmentpresslinge.....	111
Abb. 77: UV/VIS-Spektroskopie von dem Pigmentpressling Ultramarin/Bleiweiß (UBW) .....	112
Abb. 78: UV/VIS-Spektroskopie eines Bariumsulfat (BaSO <sub>4</sub> )-Presslings.....	113
Abb. 79: UV/VIS-Spektroskopie der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) .....	114
Abb. 80: UV/VIS-Spektroskopie der Pigmentmischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) .....	115
Abb. 81: Reduzierung der diffusen Reflexion durch Ausbildung der Klebstoffbrücken .....	116
Abb. 82: Pigmentvolumenkonzentration von Pigmentkörnern, die in einem Bindemittel eingebettet sind.....	117
Abb. 83: Pigmentvolumenkonzentration von Pigmentkörnern, die in einem Bindemittel eingebettet sind.....	118
Abb. 84: Pigmentvolumenkonzentrationen von den Pigment/Bindemittelgemischen .....	119
Abb. 85: UV/VIS-Spektroskopie von Zinnober (1g).....	120
Abb. 86: REM-Aufnahme der Mischung 1g Zinnober mit 2ml 5 %iger Gelatine. ....	121
Abb. 87: REM-Aufnahme der Mischung 1g Zinnober mit 2ml 10 %iger Gelatine .....	121
Abb. 88: Pigmentvolumenkonzentration (PVK) von Pigmentkörnern.....	122
Abb. 89: PVK der Mischung Zinnober mit Gelatine 10 % (links), 5 % (mitte) und 1 % (rechts) .....	122
Abb. 90: PVK der Mischung Zinnober mit Funori 0,2 % (links), 1 % (mitte) und 2 % (rechts) .....	122
Abb. 91: UV/VIS-Spektroskopie von der Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) .....	124
Abb. 92: UV/VIS-Spektroskopie von der Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) .....	125
Abb. 93: REM-Aufnahmen von Ruß auf Glas .....	128
Abb. 94: REM-Aufnahmen von Ruß mit Methylcellulose (0,2 % Massengehalt) .....	128
Abb. 95: REM-Aufnahmen von Ruß mit Methylcellulose (0,2 % Massengehalt) .....	128
Abb. 96: UV/VIS-Spektroskopie einer Rußschicht auf Glas. Die Reflexion liegt bei etwa 2 %.....	129
Abb. 97: Mark Rothko (1903-1970) <i>Ohne Titel</i> , 1962.....	142
Abb. 98: Gotthard Graubner (*1930) <i>Ohne Titel</i> , 1977 .....	142
Abb. 99: Yves Klein (1928-1962) <i>ohne Titel</i> , Blaues Schwammrelief.....	143
Abb. 100: Anish Kapoor (*1954) <i>1000 Names</i> , 1982.....	143
Abb. 101: Wolfgang Laib (*1950) siebt Blütenpollen von Haselnuss.....	144
Abb. 102: Wolfgang Laib (*1950) <i>Die fünf unbesteigbaren Berge</i> , 1984 .....	144
Abb. 103: Aquarell auf Transparentpapier von Erich Mendelsohn, <i>Imaginäre Skizze</i> , 1915.....	148
Abb. 104: Detail von Abb. 103 .....	148
Abb. 105: Detail von Abb. 103 .....	148
Abb. 106: Aquarell auf Transparentpapier von Erich Mendelsohn, <i>Projekt Haus Becker, Chemnitz</i> , 1915.....	149
Abb. 107: Detail von Abb. 106. ....	149
Abb. 108: Detail von Abb. 106. ....	149
Abb. 109: Uli Peter, <i>Ohne Titel</i> , 1987.....	151
Abb. 110: Detail von Abb. 109 .....	151
Abb. 111: Detail von Abb. 109 .....	151
Abb. 112: Vorgang beim Konsolidieren des <i>Kreideauftrags 3</i> .....	156
Abb. 113: Installation von Ross Sinclair, <i>The Journey to the edge of the world-the new republic of St. Kilda</i> , 1999/2002, (Invent. Nr.G 2002-2) .....	157
Abb. 114: Detail von Abb. 113 .....	157
Abb. 115: Detail von Abb. 113. ....	157
Abb. 116: Konsolidierungstechnik der sehr fein gezeichneten Partien .....	157

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung der Ultraschall-und Druckluft betriebenen Aerosolgeneratoren.....	14
Tabelle 2: Gas-Partikel-Strom des AGS 2000, des Mini-Verneblers und des Nebulizers .....	17
Tabelle 3: Maximale Konzentrationen von Klebstoffen.....	18
Tabelle 4: Klebstoffauswahl.....	40
Tabelle 5: Dickenbestimmung der Klebstofffilme .....	41
Tabelle 6: Untersuchungen von Sommermeyer (1998: 32) .....	46
Tabelle 7: Darstellung der Pigmente. ....	48
Tabelle 8: Klebstoffkonzentrationen. ....	58
Tabelle 9: Maxima der Volumenverteilung der Klebstoffe.....	58
Tabelle 10: Maxima der Teilchenverteilung der Klebstoffe mit drei Aerosolgeneratoren. ....	58
Tabelle 11: Alterungsreihen der Klebstofffilme.....	80
Tabelle 12: Maximale Konzentrationen der Klebstoffe .....	89
Tabelle 13: Brechungsindex-Werte .....	93
Tabelle 14: Brechungsindex von Methylcellulose mit 5 % Massengehalt. ....	94
Tabelle 15: Farbmessdaten von Zinnober. ....	103
Tabelle 16: Farbmessdaten von der Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW).....	105
Tabelle 17: Farbmessdaten von braunem Ocker. ....	107
Tabelle 18: die $\Delta L^*$ -und $\Delta E^*_{ab}$ -Werte sind angegeben und weisen eine Verschiebung der Helligkeit auf. ....	112
Tabelle 19: die $\Delta L^*$ -und $\Delta E^*_{ab}$ -Werte sind angegeben und weisen eine Verschiebung der Helligkeit auf. ....	113
Tabelle 20: Mischungsverhältnisse von 1g Zinnober.....	119
Tabelle 21: Farbmessdaten von Zinnober (1g) mit 2ml Gelatine (Gel). ....	120
Tabelle 22: Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) mit Gelatine und JunFunori®.....	123

## 11 Abbildungsnachweis

Abb. 1 bis 5: The Walters Art Museum, Ms. W. 7, fol. 15 verso, photomicrograph ( Andrea Pataki); copyright: Walters Art Museum, 2006.

Abb. 6: The Walters Art Museum, Ms. W. 602, fol. 494 verso, photomicrograph ( Andrea Pataki); copyright: Walters Art Museum, 2006.

Abb. 7: © VG-Bildkunst, Bonn, 2005, Stiftung Saarländischer Kulturbesitz, Saarlandmuseum, Saarbrücken (Foto: Andrea Pataki).

Abb. 8, 113- 115: © Hamburger Kunsthalle, Ross Sinclair, 2006 (Foto: Andrea Pataki).

Abb. 15: © Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Annette Kessler, 2006.

Abb. 34: © Van Nostrand Reinhold, die Reproduktionsrechte wurden von Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA, freundlicherweise erteilt, 2006.

Abb. 35: © Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Enke Huhsmann, 2006 (Foto: Enke Huhsmann)

Abb. 62, 63: © Butterworth-Heine-Verlag, die Reproduktionsrechte wurden von Elsevier Science & Technology freundlicherweise erteilt, 2006.

Abb. 97: © Kate Rothko-Prizel & Christopher Rothko/VG Bild-Kunst, Bonn, 2006, Staatsgalerie Stuttgart.

Abb. 98: © Gotthard Graubner, Stiftung Saarländischer Kulturbesitz, Saarlandmuseum, Saarbrücken, 2005 (Foto: Accent Studios C.Clüsserath, Im Taubfeld, 66123 Saarbrücken).

Abb. 99: © VG Bild-Kunst, Bonn, 2006, Staatsgalerie Stuttgart.

Abb. 100: © Courtesy of Lisson Gallery and Anish Kapoor, London, 2005.

Abb. 101, 102: © Wolfgang Laib, die Reproduktionsrechte wurden vom Hatje Cantz Verlag, Ostfildern (Ruit) freundlicherweise erteilt, 2006.

Abb. 103- 108: © Staatliche Museen zu Berlin, Kunstbibliothek, 2005 (Foto: Andrea Pataki).

Abb. 109- 111: © Uli Peter, Heilbronn, 2006 (Foto: Andrea Pataki).

Alle weiteren Abbildungen, Grafiken und Tabellen stammen von der Autorin.

## 12 Anhang

### 12.1 Materialien

Material	Spezifikation	Hersteller/Vertrieb
Pigmente	Zinnober, Ultramarin, Bleiweiß, Brauner Ocker	Kremer Pigmente Hauptstraße 41 88317 Aichstetten/Allgäu- Deutschland
Bindemittel	Gummiarabikum, fest, pulvrig	
Hausenblase	Fest, in Platten	
Gelatine	Fest, pulvrig, mehrbloomig	VWR International (Merck)
Petrischalen	Polystyrol Zell-und Gewebekulturschalen, Nunc, 40x12 mm Außenmaße	John-Deere- Straße 5 76646 Bruchsal- Deutschland
Ethanol	Absolut zur Analyse	
Calciumhypochlorid Ca (OCl) <sub>2</sub>		
Methylcellulose	MC 400, fest, pulvrig	Hercules GmbH/Aqualon Division
Klucel®	Hydroxypropyl Cellulose, fest, pulvrig	Paul-Thomas-Straße 56 40599 Düsseldorf- Deutschland
Benecel®	Hydroxypropyl Methylcellulose, fest, pulvrig	
Funori	Fest, aufgefaserter Platten	Aiko's Art Materials, Import.Inc 3347 N Clark Chicago, IL 60657- U.S.A.
JunFunori®	Fest, pulvrig	EMPA-Eidgenössische Materialprüfungs-und Forschungsanstalt Überlandstraße129 8600 Dübendorf- Schweiz
Papier	Munktell-Filterpapier, α-Cellulose	Anton Glaser Theodor-Heuss Straße 34 70174 Stuttgart- Deutschland
Archivstaubsauger	Stufenlos regulierbar	
Melinex- Folie	Polyethylen (PE)	
Rhodamin B	Isothiocyanat (C <sub>28</sub> H <sub>31</sub> ClN <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Fest	Fluka, Riedel-de Haën Sigma-Aldrich Laborchemikalien GmbH P.O. Box 100262 30918 Seelze- Deutschland
Dialyse- Kit	ZelluTrans Art. Nr. E722.1 12,000- 14,000 MWCO 25mm breit, 20µm dicke Wand	Carl Roth GmbH Schoemperlenstraße 1-5 76185 Karlsruhe- Deutschland
Bondina®	Microjet-Vlies (nicht mehr lieferbar)	Gaby Kleindorfer Aster Straße 9 84186 Vilsheim- Deutschland
Pinsel zum Konsolidieren	da vinci „00000“, Best. Nr. 11033	Der Martz (Künstlerbedarf) Lautenschlagerstraße 24 70173 Stuttgart- Deutschland
Acrylfarben	Schwarz	Winsor & Newton, Künstlerbedarf
Schleifpapier	120er, 180er, 240er	Baumarkt

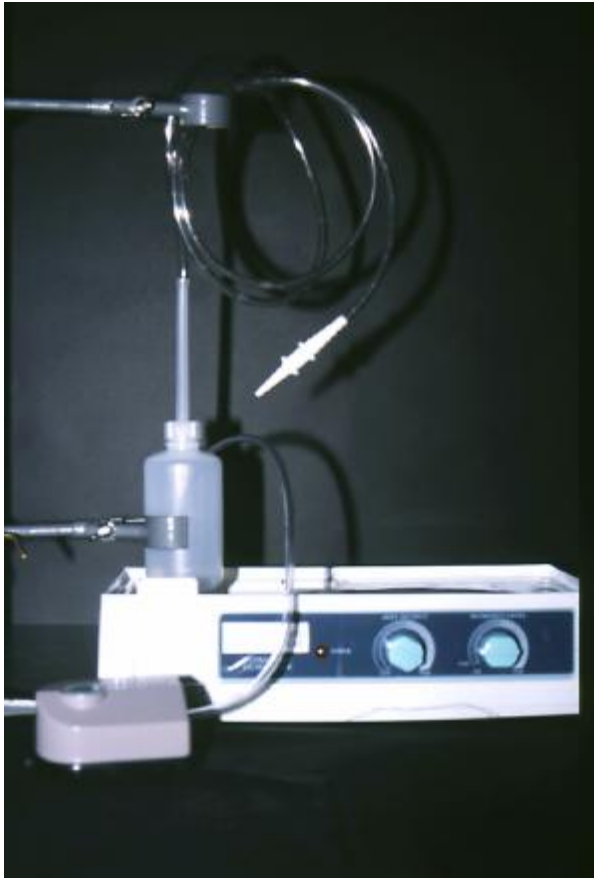
### 12.2 Instrumente

Instrument	Spezifikation/Einstellung	Hersteller
Abbe Refraktometer	16597 Natrium-Lampe 589 nm	Carl Zeiss AG Carl-Zeiss Straße 22 73447 Oberkochen- Deutschland
Aerosolgenerator	AGS 2000 Stufenlose Regulierung der Ultraschalleistung und der Luftpumpe, Gasstrom zwischen 1040 bis 1200ml/min	Becker Preservotec Mommsen Strasse 7 04329 Leipzig- Deutschland

Düse des Nebulizers (Konsolidierung Ross Sinclair)	Adapter, 20mm, Art. Nr. 9-1974	B +P-Produkte Postfach 2161 53813 Neunkirchen Seelscheid Deutschland
Analysenwaage	BP 221S Digital	Sartorius Weender Landstraße 94-108 37075 Göttingen- Deutschland
CCI- Vernebler Ultraschallbefeuchter	LDPE-(Low density Polyethylen) Flaschen, Schläuche	VWR International GmbH John-Deere-Straße 5 76646 Bruchsal- Deutschland
Dosiergerät		Belo Restaurierungsgeräte GmbH Wiesenstraße 14 79585 Steinen- Deutschland
Ellipsometer	M-2000F TM Durchstimmbarer Laser von 260 bis 900 nm	J.A. Wollamm Co.Inc. 645 M Street. Suite 102 Lincoln, NE, 68508- U.S.A.
Mini- Vernebler	Ultraschall- Mini-Vernebler WAV, stufenlose Regulierung der Luftpumpe, Ultraschalleistung statisch	Deffner & Johann Mühlacker Straße 13 97520 Röhlein- Deutschland
Farbmessgerät	CM 2600d Messgeometrie d/8° mit SCE/SCI, Auflösung 10 nm, 360 bis 740 nm, Xenon-Blitzlampen (keine Wattangabe), CIE L*a*b* u.a.	Konica Minolta Betastraße 13 85774 Unterföhring- Deutschland
FTIR-/Raman- Spektrometer	IFS 66/S (Raman Modul FRA 106, IR- Quelle: Globar- tift aus SiC; Raman-Quelle: 450mW, 1064 nm) Wellenzahlen von 500 bis 4000 cm <sup>-1</sup> , Auflösung 4 Wellenzahlen, Strahlteiler KBr, Germanium Detektor DTGS, gekühlt mit flüssig N <sub>2</sub> , 64 scans, gemessen bei 10 kHz	Bruker Optik Rudolf-Plank Straße 27 76275 Ettlingen- Deutschland
Gas-Partikel-Strom	Gilibrator-2, wet cell calibrator	Gilian Instruments Corp.- Sensidyne 16333 Bay Vista Dr. Clearwater, FL 33760- U.S.A.
Gonio-spectro-photo- colorimeter	Prototyp Halogenlampe 100W, Lichtleiter Messstrahl ø6mm, diffuse Reflexion, D65 nach CIE 1931, 2° Beobachter, Auflösung 3 nm, CIE L*a*b* Weißstandard : BaSO <sub>2</sub> -Tablette, Schwarzstandard: schwarzes Samttuch	Centre de recherche et de restauration des musées de France (CNRS) 6, rue des Pyramides 75041 Paris, Cedex 01 Frankreich
Heißluftgerät	Leister	Deffner & Johann Mühlacker Straße13 97520 Röhlein- Deutschland
Hydraulische Presse	15-t-Presse	Specac Ltd. River House 97 Cray Avenue Orpington, Kent BR5 4HE United Kingdom
Mikroskop	BH2 µm-Fokussierung 1 µm-Einheit entspricht 0,79 µm	Olympus Europe GmbH Wendenstraße 14-18 20097 Hamburg- Deutschland
Mikroskop- Durchlicht	Metallux 3 100fache und 200fache Vergrößerung	Leitz/Leica Lilienthalstraße 39-45 64625 Bensheim- Deutschland

μ-SyRFA	Strahldurchmesser: 40 * 40 μm <sup>2</sup> , Monochromatische Anregungsenergie: 21.5 keV, Absorber: 2 mm Al, Meßzeit: 1000 sec.	Angströmquelle Karlsruhe(ANKA) Postfach 3640 76021 Karlsruhe- Deutschland
Nebulizer	Inhalationsset mit 60 cm langem Schlauch + Kompressor	B+P Produkte Postfach 2161 53813 Neunkirchen Seelscheid Deutschland
Partikelzähler- Größenanalysator	PCS 2000 5L/min Kalibrierstandard, Kalibrieren mit Monospher 750 nm, 0,506 μm, 1,2 μm; Latex 0,506 μm, 1,59 μm	Palas GmbH Grenzbachstraße 3b 76229 Karlsruhe- Deutschland
Porta Neb	Inhalationsset	B+P Produkte Postfach 2161 53813 Neunkirchen Seelscheid Deutschland
Rasterelektronen- mikroskop (IFIA, Karlsruhe)	ISI ABT SR-50A Unbedampft gemessen	TOPCON Europe B.V. Essebaan 11, 2908LJ P.O.Box 145, 2900 AC Capelle a/d IJssel- Niederlande
Rasterelektronen- mikroskop (ICORT, Wien)	XL 30 ESEM Unbedampft gemessen im Low-Vacuum- Modus des Gerätes (Druck in der Probenkammer ca. 1,4 Torr)	FEI Company European Headquarters Achtsweg Noord 5 P.O. Box 80066 5600 KA Eindhoven- Niederlande
Rotationsviskosimeter	VT 500/501 Zylinder MV 1, 23 °C, 40 ml Einfüllmenge	Thermo Haake Dieselstraße 4 76227 Karlsruhe- Deutschland
Klimaschrank	VC 0020, HC 0020	Vötsch Industrietechnik GmbH Umweltsimulation Beethovenstraße 34 72336 Balingen-Frommern Deutschland
UV/VIS-Spektrometer	UV/VIS 2100, Diffuse Reflexion Auflösung 5 nm, Weißstandard mit BaSO <sub>4</sub> , Spaltbreite 5, schneller scan	Shimadzu Albert-Hahn-Straße 6-10 47269 Duisburg- Deutschland
Wärmeschrank	UM 400	Memmert GmbH + Co KG Äußere Rittersbacher Straße 38 91126 Schwabach- Deutschland
Zentrifuge	Biofuge pico	Heräus Holding GmbH Heräus Straße12-14 63450 Hanau- Deutschland

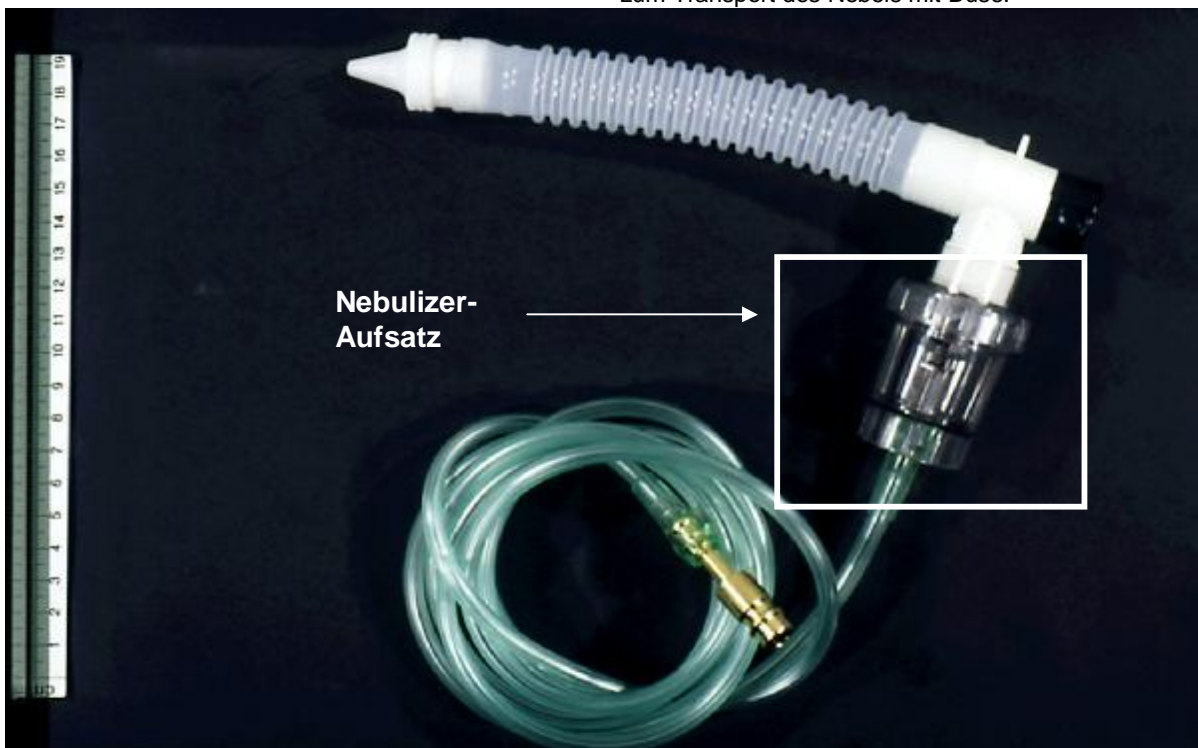
### 12.3 Aerosolgeneratoren



CCI-Mister mit Ultraschallbefeuchter, LDPE-(Low density Polyethylen) Flasche und Aquariumpumpe.

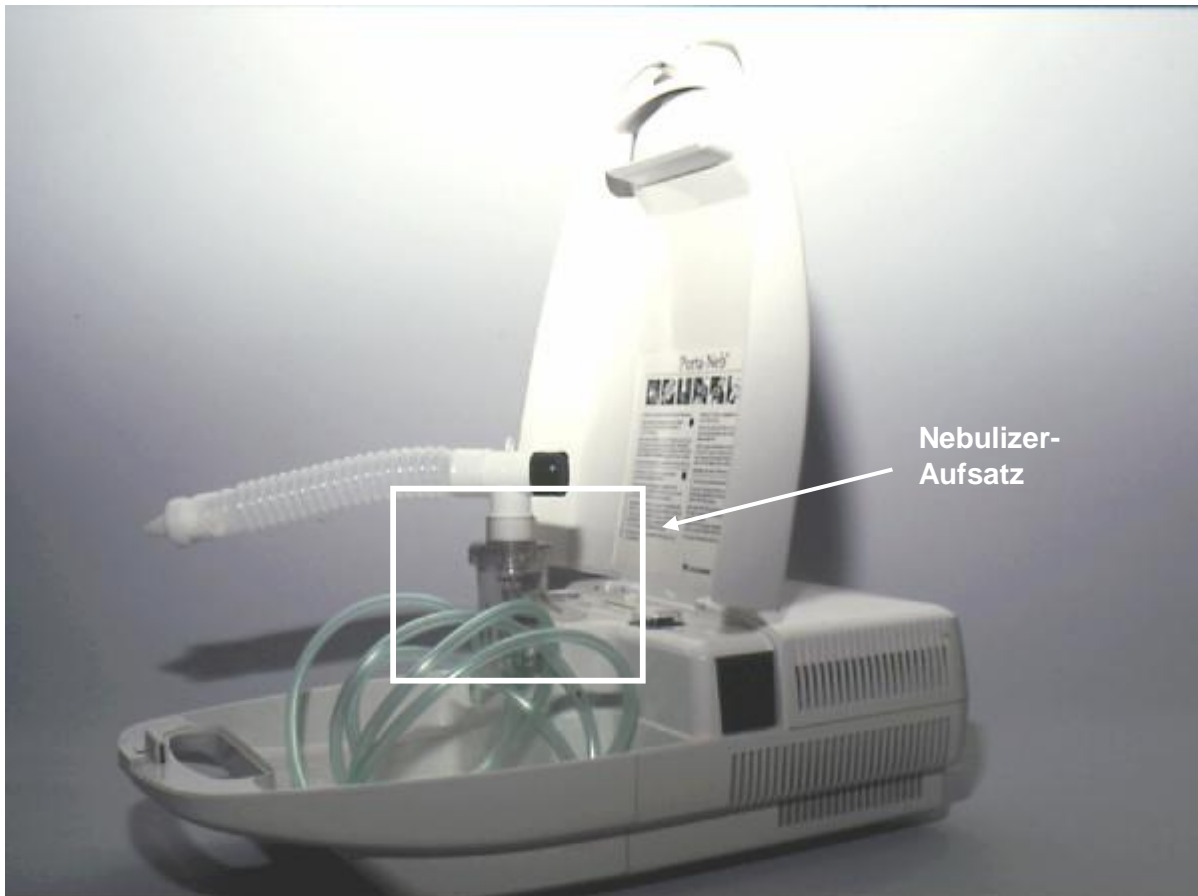


AGS 2000, Wasserreservoir mit Klebstoffbecher (rechts), Schlauch von der Luftpumpe und Schlauch zum Transport des Nebels mit Düse.



Nebulizer Aufsatz (transparent) mit kurzem Schlauch und Düse des AGS 2000.





Nebulizer-Aufsatz

Porta Neb mit Nebulizer-Ausatz und Düse vom AGS 2000.



Ultraschallsensor

Mini-Vernebler WAV mit Vierkantflasche und Schlauch zum Transport des Nebels und schwarzer Düse.



verschiedene Düsen



verschiedene Düsen

Oben Glaspipette und verschiedene Reduzierventile als Düsen zu verwenden, unten Düsen für den AGS 2000, die auch auf die Schläuche des Nebulizers passen.

## 12.4 Zubereitung der Klebstofflösungen

### Gelatine

Die gepulverte Gelatine wird über mehrere Stunden in demineralisiertem Wasser gequollen, bevor sie bei 60 °C mit dem Magnetrührer unter ständigem Rühren mindestens zwei bis drei Stunden warm gehalten wird, bis die Lösung klar und ohne Feststoffe vorliegt. Bei Konzentrationen über ca. 1 % sind die Lösungen klar, aber gelblich gefärbt.

### Methylcellulose

Die gepulverte MC wird in ein Becherglas gegeben und ein kleiner Teil des demineralisierten Wassers zum Kochen gebracht. Das erhitzte Wasser wird unter schnellem Rühren in die MC eingetragen. Danach wird der Rest des demineralisierten Wassers, welches gekühlt sein sollte, der Wasser/MC-Mischung zugegeben und eingerührt. Diese Mischung über mehrere Stunden mit dem Magnetrührer bei 60 °C unter ständigem Rühren warm halten. Die Lösung ist klar und farblos.

### Hausenblase

Den Feststoff, meist Platten bei dem Produkt von Kremer Pigmente, wird in kleine Stücke geschnitten und mit demineralisiertem Wasser über mehrere Stunden quellen gelassen. Anschließend bei 60 °C mit dem Magnetrührer unter ständigem Rühren warm halten. Die Suspension ist trüb und milchig-weiß.

### Funori

Die gelben Faserplatten werden in demineralisiertem Wasser über mehrere Stunden quellen gelassen, bis die Fasern so stark gequollen sind, dass sie fast aufgelöst sind. Anschließend über mehrere Stunden bei 60 °C mit dem Magnetrührer unter ständigem Rühren warm halten. Die Suspension wird anschließend durch ein Sieb passiert, damit Feststoffe und Verunreinigungen herausgenommen werden. Die Suspension ist trüb und gelblich gefärbt.

### JunFunori®

Das weiß-irisierende Pulver wird in demineralisiertem Wasser über mehrere Stunden quellen gelassen und anschließend bei 60 °C mit dem Magnetrührer unter ständigem Rühren warm halten. Das Rezept von Michel, Geiger, Reichlin (2002: 263) empfiehlt die Zugabe von Alkohol zur Prävention von Schimmelpilzwachstum. Dies wurde bei den hier vorliegenden Untersuchungen nicht zugegeben, damit nur der reine Klebstoff untersucht wird. Da nur kleine Mengen Klebstoff für die geringen Konzentrationen benötigt werden, eignet sich eine Analysenwaage zum Abwiegen am besten. Die Lösung ist klar und farblos.

### Klucel® G

Das Klucel®-Pulver wird abgewogen und in Ethanol nach Volumengehalt (w/v) angesetzt. Nach der Zugabe des Ethanol zum pulverigen Klebstoff wird die Mischung unter starkem Rühren mit einem Magnetrührer bei 50 °C mehrere Stunden warm gehalten, bis eine klare Lösung vorliegt. Die Lösung ist klar und farblos.

Alle Klebstoffe wurden im Kühlschrank ein bis zwei Tage aufbewahrt, für jede Versuchsreihe allerdings neu hergestellt, um die höchste Reproduzierbarkeit für die Untersuchungen zu gewährleisten. Alle wässrigen Klebstoffe, außer Klucel®, wurden nach Massengehalt in % (w/w) hergestellt. Bei Klucel® wird der Feststoff gewogen und das Lösemittel (Ethanol) nach Volumenanteilen hinzugefügt (w/v). Bei Funori und JunFunori® ist ein Absetzen von Feststoffen in der Lösung/Suspension nach einigen Tagen zu erkennen, was sich durch trübe Schlieren am Boden der Gefäße bemerkbar macht. Gelatine und Hausenblase sind anfällig gegenüber Schimmelpilzwachstum. MC und Klucel® sind im Kühlschrank relativ länger haltbar.

## 12.5 Dickenbestimmung der Klebstofffilme

Die Dicken der Klebstofffilme wurden mit einem Lichtmikroskop und einem dazugehörigen µm-Fokussiergerät gemessen. Die µm zwischen Ober- und Unterkante des Klebstofffilms wurden mit dem µm-Fokussiergerät aufgenommen. Anschließend werden die µm des Fokussiergerätes in wahre µm umgerechnet. Anhand einer bekannten Dicke wird die µm-Einteilung des Fokussiergerätes bestimmt und der Faktor errechnet. Bei dem hier verwendeten Lichtmikroskop (Olympus BH2) beträgt der Faktor 0,79, also eine µm-Einheit auf dem µm-Fokussiergerät entspricht 0,79 µm.

## 12.6 Bestimmung des Gesamtproteingehalts

Zur Bestimmung des Gesamtproteingehalts am Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium-Institut Royale du Patrimoine Artistique (KIK/IRPA), Brüssel, durch Dr. Jan Wouters von Funori und JunFunori® wurde jeweils eine 0,1 %ige Lösung hergestellt. Um eine möglichst aussagekräftige Untersuchung zu gewährleisten, wurde Funori nach dem Qellen und Erwärmen nicht durch ein Sieb passiert, sondern stärker gerührt und länger erwärmt, bis keine Feststoffe mehr zu sehen waren. JunFunori® wurde nur gequollen, aber nicht erwärmt, um die Konzentration nicht zu verändern. Für die Bestimmung der Aminosäuresequenz (ASS) musste der prozentuale Anteil von Wasser und von Protein bekannt sein (Wouters, Van Bos, Lamens 2000: 107). Aus diesem Grund sollte das Verhältnis Feststoff/Lösemittel so wenig wie möglich verändert werden. Je 10ml Funori und JunFunori® wurden hergestellt und je 1ml in Eppendorf Kuvetten gefüllt.

## 12.7 FTIR-/Raman-Spektroskopie

Die Klebstoffe wurden nach den oben beschriebenen Anleitungen angesetzt und anschließend auf einer MelinexFolie ausgegossen. Die Messung im Infrarotbereich erfolgte in Transmission, indem die Klebstofffilme freistehend mit Hilfe eines Ringes aus Edelstahl in den Strahlengang montiert wurden.

## 12.8 UV/VIS-Spektroskopie

Die Pigmente sind mit diffuser Reflexion gemessen worden. Die gespincoateten Pigmentproben wurden in den Strahlengang montiert. Der Weißstandard ist Bariumsulfat ( $\text{Ba}_3\text{SO}_4$ ), mit dem die Wände einer Kammer, ähnlich einer Ulbricht-Kugel, beschichtet sind.

Die Klebstofffilme sind in Transmission freistehend gemessen worden. Hierfür diente ein Ring aus Edelstahl zum Aufspannen der Klebstofffilme als Halterung, um sie im Strahlengang zu montieren. Aufgenommen wird die Absorption.

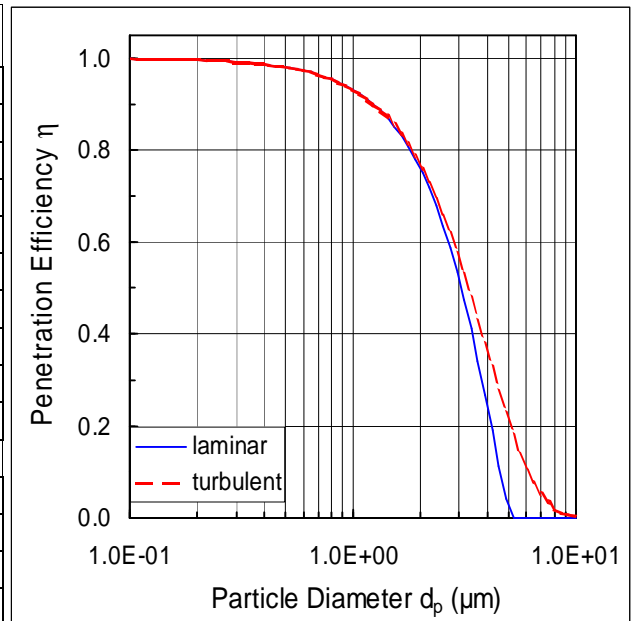
## 12.9 Partikelgrößenbestimmung

Der Aufbau zur Bestimmung der Partikelgrößen erfolgte mit dem Partikelzähler-Größenanlaysator der Palas GmbH, dem PCS 2000. Bei allen zu untersuchenden Geräten, dem AGS 2000, dem Nebulizer und dem Mini-Vernebler wurde jeweils ein Gesamt-Volumenstrom von 5 Litern/min gewährleistet, der sich anteilmäßig aus produziertem Aerosol eines der Geräte und aus ca. 4Litern/min Zuluft zusammensetzt. Der AGS 2000 erbringt einen Volumenstrom von ca. 1000 bis 1200 ml/min, der Mini-Vernebler ca. 1020 ml/min, im Gegensatz zum Nebulizer, der bei 1 bar einen Volumenstrom von ca. 7000 ml/min erzeugen kann. Die Zuluft ist über ein Wasserbad befeuchtet (73 bis 89 % relative Feuchte). Das austretende Aerosol wurde fest mit dem Auffangventil des PCS 2000 verbunden, so dass kein Aerosol oder andere Teilchen aus der umgebenden Luft mit angesaugt werden. Die Messdauer betrug standardmäßig 10s und jede Messung wurde zwei Mal wiederholt. Kalibriert wurde das Gerät morgens und mittags mit monodispersen Latex (0,506  $\mu\text{m}$  und 1,59  $\mu\text{m}$ ).

Für die Messungen zur Abhängigkeit der relativen Feuchte auf die Größe der Partikel wurde ein Diffusionstrockner mit Kieselgel („Topas“) direkt vor den PCS 2000 montiert. Der Diffusionstrockner ermöglichte ein Austrocknen des Volumenstromes bis auf eine relative Feuchte von ca. 8 %.

Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen Partikelgröße (particle diameter  $d$  in  $\mu\text{m}$ ) und die Durchfließkapazität durch einen runden Schlauch. Mit den unten angegebene Daten (links), wird folgende Kurve (rechts) erstellt. Dieses Beispiel stammt von Ottmar Möhler, Institut für Metereologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe, nach Willeke, Baron 1993: 36. Der Durchmesser und die Länge eines Schlauches wird in die entsprechenden Felder eingetragen, woraufhin die Durchfließkapazität grafisch dargestellt wird.

Sedimentational losses of particles in linear tubes as function of particle diameter $d$	
Gas flow rate	0.3 l/min
=	5.0 $\text{cm}^3/\text{s}$
Tube diameter $D$	1 Cm
Tube length $L$	100 Cm
Incline angle	0 Degree
Temperature	293.15 Kelvin
Pressure	1000 HPa
Particle density $\rho_p$	1 $\text{g}/\text{cm}^3$
Graph minimum diameter	0.10 $\mu\text{m}$
Number of decades	2
Air density =	1.19E-03 $\text{g}/\text{cm}^3$
Air viscosity =	1.81E-04 Poise
Mean flow velocity =	6.4 cm/sec
Reynolds number =	42 -laminar-



## 12.10 Klebstofffilme im Durchlicht

### Klebstofffilme im Durchlicht

Getrocknet in Polystyrol-Petrischalen

200fache Vergrößerung

Die schwarzen Punkte stammen von Verunreinigungen  
der Untersuchungseinrichtung

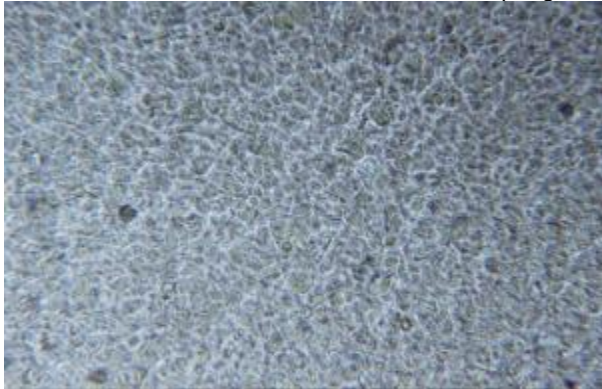
250µm



Gelatine-Klebstofffilm, klar mit kleinen Verklumpungen.



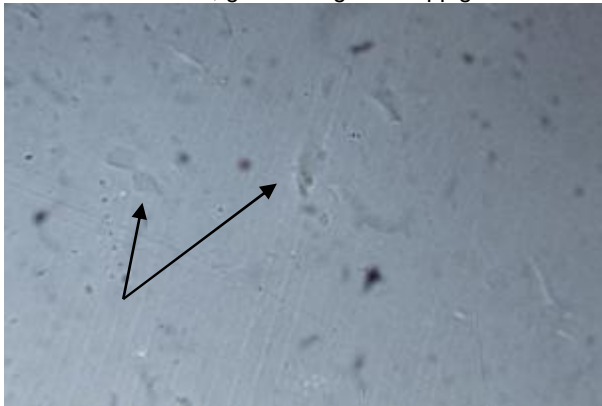
Hausenblase-Klebstofffilm, leicht wolkig und rauh.



Funori-Klebstofffilm, grob wolkig und noppig.



JunFunori®-Klebstofffilm, wolkig und leicht noppig.



Methylcellulose-Klebstofffilm, klar mit kleinen Verklumpungen.

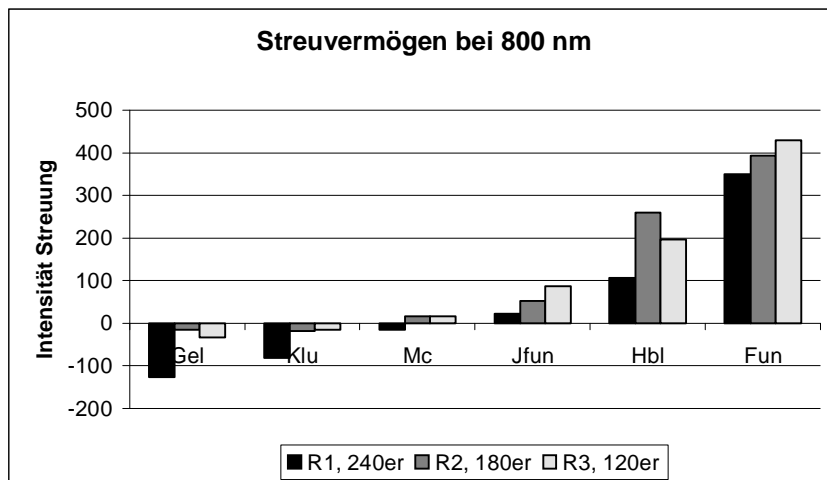


Klucel®-Klebstofffilm, leicht noppig.

### 12.11 Rauigkeitsproben

Die Deckel der Polystyrolschalen wurden mit einem Heißluftgerät (Deffner&Johann, Leister) leicht erwärmt und mit einem Schleifpapier bekannter Körnung in einer Stockpresse bestempelt. Ziel der Probenpräparation war die reproduzierbare Aufrauung/Körnung eines Untergrunds, auf dem dann Klebstofffilme hergestellt werden können. Insgesamt wurden drei Schleifpapiere verwendet. Rauigkeit 1, 240er, entspricht einer Korngröße von durchschnittlich 58 µm, Rauigkeit 2, 180er, entspricht einer durchschnittlichen Korngröße von 76 µm und Rauigkeit 3, 120er, entspricht einer Korngröße von 120 µm. Ein FEPA-Standard (Fédération européenne des fabricants de produits abrasifs) legt die durchschnittliche Körnung in µm für die Rauigkeitsstufen der Schmiergelpapiere (60er bis 4000er) fest. Die so präparierten Schalen der Polystyrolschalen wurden wiederum mit 1 %igen Klebstofflösungen (5ml) befüllt und vier Tage austrocknen gelassen. Die erste UV/VIS-spektroskopische Messung wurde mit haftendem Klebstofffilm auf dem Träger durchgeführt, die zweite Messung erfolgte nur an dem präparierten Untergrund ohne Klebstofffilm, der rechnerisch bei einer definierten Wellenlänge (800 nm) abgezogen wird. Dadurch ist sowohl die Rauigkeit des Klebstofffilms als auch die Rauigkeit des präparierten Deckels messtechnisch erfassbar.

In der folgenden Tabelle sind die Intensität der Streuung aller Klebstofffilme auf den drei unterschiedlich rauen Petrischalen bei einer Wellenlänge von 800nm rechnerisch angegeben. Die Plus- Werte bedeuten Streuung, die Minus- Werte bedeuten eine Glanzbildung der Klebstofffilme.



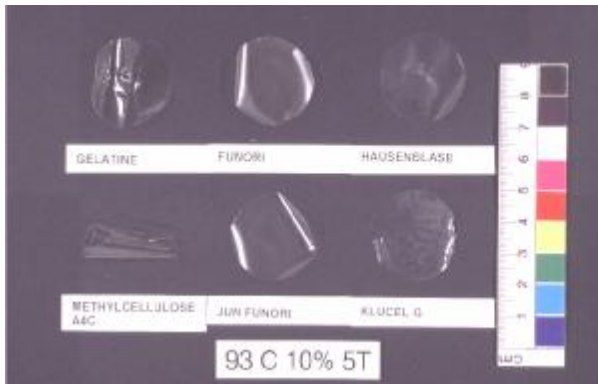
### 12.12 Klimaalterung der Pigmentproben

Die Pigmentproben wurden frei liegend im Klimaschrank künstlich gealtert. Insgesamt verblieben die Pigmentproben fünf Tage/vier Stunden in den Klimaschränken.

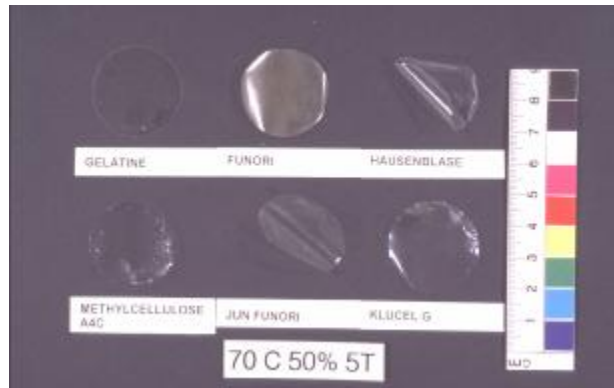
Alterung	Pigmentproben	relative Feuchte [%]	Temperatur [ °C]
2 (fünf Tage)	Zinnober mit allen Klebstoffen „4x“ Ultramarin/Bleiweiß mit allen Klebstoffen „4x“	30/85 (alle 3h alternierend)	90
3 (fünf Tage)	Zinnober mit allen Klebstoffen „8x“ Ultramarin/Bleiweiß mit allen Klebstoffen „8x“	65	80 (ISO-Standard)
4 (fünf Tage)	Zinnober mit allen Klebstoffen „1xges“ Ultramarin/Bleiweiß mit allen Klebstoffen „1xges“	50	70
6 (vier h)	Zinnober mit allen Klebstoffen „2xges“ Ultramarin/Bleiweiß mit allen Klebstoffen „2xges“	98	30



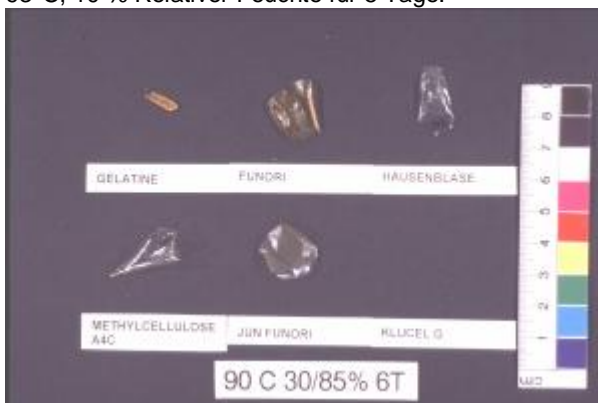
## Beschleunigte Alterung der Klebstofffilme im Klimaschrank (HC 0020, VC 0020)



Klebstofffilme nach der beschleunigten Alterung bei 93°C, 10 % Relativer Feuchte für 5 Tage.



Klebstofffilme nach der beschleunigten Alterung bei 70°C, 50 % Relativer Feuchte für 5 Tage.



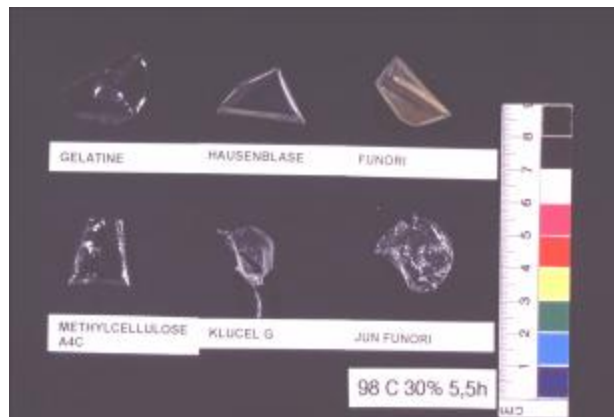
Klebstofffilme nach der beschleunigten Alterung bei 90°C, alternierender Relativer Feuchte von 30 auf 80 % alle drei h für 6 Tage, Klucel® vermutl. im Klimaschrank verloren.



Klebstofffilme nach der beschleunigten Alterung bei 30°C, 85 % Relativer Feuchte für 5 Tage.



Klebstofffilme nach der beschleunigten Alterung nach ISO 5630 bei 80°C, 65 % Relativer Feuchte für 5 Tage.



Klebstofffilme nach der beschleunigten Alterung bei 98°C, 30 % Relativer Feuchte für 5,5 Tage.

## 12.13 Brechungsindex

Die zu messenden Substanzen wurden auf das waagrecht liegende Prisma aufgetropft und optisch justiert, um den Wert abzulesen. Jede Messung wurde einmal wiederholt, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen. Der Brechungsindex von sechs verschiedenen Klebstofflösungen, darunter eine im alkoholischen Medium, wurde in den höchsten mit dem Abbe-Refraktometer abzulesenden Konzentrationen angesetzt und in einem weiteren Arbeitsschritt errechnet.

Der Brechungsindex einer Flüssigkeit ist von dessen Konzentration abhängig, wie an der Tabelle unten zu sehen ist. Bei Gelatine beispielsweise steigt der Brechungsindex von 1,335 bei einer Konzentration von 1 % auf 1,352 bei einer Konzentration von 10 %. Je höher die Klebstoffkonzentrationen sind, desto mehr steigt der Brechungsindex. Je niedriger die Konzentration, desto mehr fällt der Brechungsindex bzw. desto mehr nähert sich dieser dem Brechungsindex des Lösungsmittels an. Die niedrigsten Konzentrationen der Klebstoffe zeigen Brechungsindizes von ca. 1,334 bis 1,335, was dem Brechungsindex von Wasser, nämlich 1,333, sehr nahe kommt. Der gleiche Zusammenhang kann bei Klucel in Ethanol beobachtet werden.

Klebstoff Mit Ausgangs- konzentration	BI	BI	BI
Gelatine (VWR) 10 %	10 % <b>1,352 (38 °C)</b>	5 % <b>1,343</b>	1 % <b>1,335</b>
MC 400 (DOW) 5 %	5 % <b>1,340</b>	2,5 % <b>1,337</b>	0,5 % <b>1,334</b>
Hausenblase (Kremer) 10 %	10 % <b>1,349</b>	5 % <b>1,342</b>	1 % <b>1,335</b>
Funori (Aiko's) 5 %	5 % <b>1,338 (38 °C)</b>	2,5 % <b>1,335</b>	0,5 % <b>1,334</b>
Jun Funori (EMPA) 2,5 %	2,5 % <b>1,338</b>	1,25 % <b>1,335</b>	0,25 % <b>1,334</b>
Klucel (Kremer) (in Ethanol) 10 %	10 % <b>1,383</b>	5 % <b>1,370</b>	1 % <b>1,363</b>
Wasser	<b>1,333*</b>		
Ethanol	<b>1,362*</b>		

Werte des Brechungsindex von verschiedenen Klebstoffen (alle wässrig außer Klucel) bei verschiedenen Konzentrationen. Je verdünnter die Lösung wird, desto mehr nähert sich der Brechungsindex dem Wert des Lösungsmittels an.

\* Literaturwert Wasser: 1,333, Literaturwert Ethanol: 1,3617 (Römpp online 2004 „Refraktion“)

Aus diesen Messungen wurde geschlossen, dass bei den niedrigsten Klebstoffkonzentrationen der vorhandene Klebstoff den Brechungsindex nicht beeinflusst, da mehr oder weniger das Lösungsmittel gemessen wurde. Die gemessenen Daten entsprechen zudem nicht den Brechungsindex-Werten der reinen Klebstoffe, da die Werte bei ansteigenden Konzentrationen auch ansteigen. Die Konzentrationen, die für die Messung des Brechungsindex herangezogen wurden, stellen bereits die maximalen Konzentrationen dar, um mit einem Abbe-Refraktometer den Brechungsindex zu bestimmen. Für diesen Messaufbau wurde die Flüssigkeit bzw. hier der Klebstoff, auf ein Prisma aufgetragen und durch Schließen der Apparatur als Flüssigkeitsfilm von der Na-Lampe durchstrahlt. An einem Drehrad wurde die Anzeige justiert und als Wert abgelesen. Die Schwierigkeit bei der Messung von Klebstoffen liegt an dem Flüssigkeitsfilm, der bei gelierenden oder hochviskosen Klebstoffen sich nicht ausbildet und dadurch eine Messung behindert. Aus diesem Grund wurden die erarbeiteten Werte als Grundlage für eine rechnerische Bestimmung des Brechungsindex herangezogen. Die prozentualen Anteile von Klebstoff und Lösungsmittel dienen als Grundlage für die folgende Formel:

$$n_{kleb} = n_{polymer} \times \text{Anteile \%} + n_{wasser} \times \text{Anteile \%}$$

$n_{kleb}$  stellt die gemessenen Werte dar und  $n_{polymer}$  die Werte, die auf den reinen Klebstoff schließen lassen,  $n_{wasser}$  steht für den Brechungsindex des Lösungsmittels von Wasser als Lösungsmittel. Somit ergeben sich die errechneten Werte der Brechungsindizes der verschiedenen Klebstoffe.



Der Brechungsindex von zwei Klebstoffen (Methylcellulose und JunFunori®) wurde in einem zusätzlichen Versuch ellipsometrisch (J.A. Wollamm, M-2000F TM, Tompkins, McGahan 1999: 46) vermessen. Bei diesem Versuchsaufbau wurde eine homogene Klebstoffschicht auf Silicium in der Größe von ca. 1 cm<sup>2</sup> aufgetragen. Ca. 50 µl der Klebstoffe Methylcellulose (1,25 % Massengehalt) und Funori (1% Massengehalt) wurden auf Silicium Plättchen gespincoated, bis sich eine gleichmäßige Interferenz einstellt. Bei der Messung lag die Temperatur bei 24 °C und 75 % relativer Feuchte. In einem ersten Schritt wurde die Dicke bestimmt und anschließend der Brechungsindex bei durchstimmbaren Wellenlängen gemessen.

Methylcellulose (1,25 % Massengehalt), ca. 260 nm dick, Auftreten von Interferenz Brechungsindex von 1,47 ellipsometrisch ermittelt.

JunFunori® (1 % Massengehalt), ca 310 nm dick, Auftreten von Interferenz Brechungsindex von 1,57 ellipsometrisch ermittelt.

Die errechneten und die ellipsometrisch erfassten Daten stimmen bei den beiden Klebstoffen annähernd überein, so dass man davon ausgehen kann, dass die errechneten Werte aussagekräftig sind. Der Brechungsindex der Klebstoffe wurde nicht ellipsometrisch gemessen, da es technisch schwierig ist, eine homogene, 1 cm<sup>2</sup> große Klebstofffläche auf dem Silicium herzustellen.

### 12.14 Pigmentaufstriche für PVK

1g Pigment wurden jeweils 2ml Klebstoff in unterschiedlichen Konzentrationen zugegeben. Durch die variierenden Konzentrationen der Klebstoffe wurden unterschiedliche Pigmentvolumenkonzentrationen erzeugt.

1g Zinnober wurde mit plus 2ml Klebstoff der folgenden Klebstoffkonzentrationen vermischt, auf Papier aufgestrichen und UV/VIS-spektroskopisch untersucht:

Gelatine	1 %	5 %	10 %
Methylcellulose	0,2 %	1 %	2 %
Hausenblase	1 %	5 %	10 %
Funori	0,2 %	1 %	2 %
JunFunori®	0,2 %	1 %	2 %
Klucel®®	0,2 %	1 %	2 %

### 12.15 Pigmentpresslinge

Presslinge aus Kaliumbromid (KBr) werden für die FTIR-Spektroskopie als nicht-absorbierendes Bindemittel eingesetzt. Die Pigmente können einer speziellen hydraulischen Presse (Specac) zur Herstellung von Presslingen bei einem maximalen Druck von 15t gepresst werden. Die Presslinge haben einen Durchmesser von 1cm und variieren in der Dicke je nach Befüllung der Pressvorrichtung. Den hier hergestellten Presslingen aus Zinnober, brauner Ocker und der Mischung Ultramarin/Bleiweiß wird KBr im Verhältnis 1:1 (v/v) zugegeben und sie weisen eine Dicke von 1 bis 3mm auf. Der Pressdruck liegt bei ca. 10t. Die Oberfläche der Presslinge ist glatt und glänzend, da die Pressköpfe aus poliertem Edelstahl bestehen.

### 12.16 Konsolidierung von Ruß

Objektträger aus Glas sind über die Flamme eines Feuerzeugs gehalten worden, bis der Rußniederschlag opak war. Partien des ungebundenen Rußes sind mit 0,2 %iger Methylcellulose als Aerosol mit dem AGS 2000 benebelt worden. Die erste Auftragsart war ein einmaliger sättigender Auftrag, die zweite Auftragsart ein dreimaliger Auftrag mit 0,2 %ige Methylcellulose. Nach Auftrag des Aerosols mit der Methylcellulose hat sich die tiefschwarze satte Farbe des ungebundenen Rußes stark erhellt. Die REM-Aufnahmen sind von Rudolf Erlach, ICORT (Institut für Konservierungswissenschaften und Restaurierungs-Technologie), Universität für Angewandte Kunst, Wien, gemacht worden.

### 12.17a CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten

Zusammenstellung der verwendeten Pigmente und der Klebstoffe, die auf die Proben in fünf verschiedenen Arten aufgegeben wurden (s. Tabelle unten). Alle Angaben mit den Abkürzungen, die dann auch für die Tabellen der Farbmessdaten verwendet werden.

Pigmente	Zinnober (ZI)		Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW)			Brauner Ocker (brO)	
Klebstoff + Konzentration [%]	Gelatine [1 %] gel	Methylcellulose [0,2 %] MC	Hausenblase [1 %] Hbl	Funori [0,2 %] Fun	JunFunori® [0,1 %] Jfun	Klucel®® [0,2 %] Kluc	
Auftragsarten	Viermaliger Auftrag 4x	Achtmaliger Auftrag 8x	Einmal gesättigter Auftrag 1xges.	Zweimal gesättigter Auftrag 2xges.	Einmal getränkter Auftrag 1xgetr.		

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Zinnober mit Gelatine behandelt

Zi_gel	L*	DL*	a*	Da*	B*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	51,3759		45,1957		40,1651		41,6273	60,464	
4x	52,115	0,7391	44,8494	-0,3463	39,5182	-0,6469	41,3843	59,7759	<b>1,04</b>
8x_r	50,8063		45,4781		40,9949		42,0322	61,2277	
8x	51,4841	0,6778	44,7065	-0,7716	39,7612	-1,2337	41,6494	59,8299	<b>1,61</b>
1xges_r	49,6656		40,8254		37,227		42,3604	55,25	
1xges	50,2547	0,5891	40,3758	-0,4496	36,5703	-0,6567	42,1686	54,4757	<b>0,99</b>
2xges_r	50,1894		40,744		36,6582		41,9784	54,8078	
2xges	50,065	-0,1244	41,1252	0,3812	37,7365	1,0783	42,5395	55,8151	<b>1,15</b>
1xgetr_r	51,168		46,3501		40,7276		41,3056	61,7014	
1xgetr	51,6735	0,5055	45,3842	-0,9659	39,4657	-1,2619	41,0099	60,1437	<b>1,67</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Zinnober mit Methylcellulose behandelt

ZI_mc	L*	DL*	A*	Da*	b*	Db*	C*	H*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	50,8967		45,0752		40,7371		42,1059	60,7559	
4x	51,3415	0,4448	44,9236	-0,1516	40,0756	-0,6615	41,7356	60,2012	<b>0,81</b>
8x_r	50,9732		45,7321		40,6258		41,6161	61,1709	
8x	51,5869	0,6137	45,2393	-0,4928	40,2902	-0,3356	41,6884	60,5797	<b>0,86</b>
1xges_r	50,2321		41,2575		37,1944		42,0352	55,5482	
1xges	50,6686	0,4365	41,1796	-0,0779	37,1924	-0,002	42,0876	55,489	<b>0,44</b>
2xges_r	49,6807		45,3341		41,737		42,6343	61,621	
2xges	50,4622	0,7815	45,1544	-0,1797	41,1339	-0,6031	42,3323	61,0813	<b>1,00</b>
1xgetr_r	50,9056		45,3289		40,6778		41,9046	60,9048	
1xgetr	51,6426	0,737	45,0812	-0,2477	40,3162	-0,3616	41,8063	60,479	<b>0,86</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Zinnober mit Hausenblase behandelt

Zi_hbl	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	51,5623		45,7202		39,5518		40,8625	60,4539	
4x	51,2925	-0,2698	46,6155	0,8953	42,6775	3,1257	42,4748	63,2011	<b>3,26</b>
8x_r	50,863		45,4668		39,865		41,2441	60,4686	
8x	50,759	-0,104	47,0797	1,6129	44,2823	4,4173	43,2462	64,633	<b>4,70</b>
1xges_r	50,9449		45,175		40,8299		42,1078	60,8922	
1xges	50,6794	-0,2655	44,9966	-0,1784	42,2159	1,386	43,1738	61,6999	<b>1,42</b>
2xges_r	50,6792		44,9164		40,5026		42,042	60,481	
2xges	50,1966	-0,4826	46,0059	1,0895	43,9371	3,4345	43,6824	63,6161	<b>3,64</b>
1xgetr_r	50,418		42,9215		39,0854		42,3218	58,051	
1xgetr	50,6825	0,2645	42,7874	-0,1341	40,1204	1,035	43,1575	58,655	<b>1,08</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Zinnober mit Funori behandelt

Zifun	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	50,9546		45,8912		40,305		41,292	61,0777	
4x	51,2404	0,2858	45,5774	-0,3138	40,457	0,152	41,594	60,9431	<b>0,45</b>
8x_r	50,8872		46,0874		40,8154		41,5284	61,5625	
8x	51,4356	0,5484	46,2318	0,1444	41,2586	0,4432	41,7466	61,9649	<b>0,72</b>
1xges_r	50,5432		45,8481		40,3664		41,3619	61,0859	
1xges	51,1276	0,5844	45,8491	0,001	41,3023	0,9359	42,0135	61,7092	<b>1,10</b>
2xges_r	51,0242		45,6052		40,4656		41,5827	60,9697	
2xges	51,3173	0,2931	46,2437	0,6385	40,9331	0,4675	41,514	61,7576	<b>0,84</b>
1xgetr_r	50,473		45,835		41,0628		41,8566	61,5386	
1xgetr	51,1672	0,6942	46,047	0,212	41,2059	0,1431	41,8243	61,792	<b>0,74</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Zinnober mit JunFunori® behandelt

Zifun	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	50,8623		45,4445		40,7485		41,8815	61,038	
4x	51,0574	0,1951	45,4316	-0,0129	40,7144	-0,0341	41,8657	61,0057	<b>0,20</b>
8x_r	50,0766		45,207		41,1405		42,3037	61,1246	
8x	51,0869	1,0103	45,1014	-0,1056	40,0379	-1,1026	41,5965	60,3089	<b>1,50</b>
1xges_r	50,9376		45,7683		41,4601		42,1724	61,755	
1xges	51,0776	0,14	46,2153	0,447	41,7802	0,3201	42,1147	62,3012	<b>0,57</b>
2xges_r	50,2413		44,6864		40,9787		42,5218	60,6311	
2xges	51,1944	0,9531	44,6308	-0,0556	40,0565	-0,9222	41,9082	59,9703	<b>1,33</b>
1xgetr_r	51,0555		45,794		40,4831		41,4776	61,1226	
1xgetr	51,5504	0,4949	45,4576	-0,3364	40,3264	-0,1567	41,5769	60,7668	<b>0,62</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Zinnober mit Klucel® behandelt

Zikluc	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	50,8532		46,3757		41,3363		41,7117	62,124	
4x	49,8926	-0,9606	43,028	-3,3477	39,3557	-1,9806	42,4477	58,3119	<b>4,01</b>
8x_r	50,6932		46,4399		41,2931		41,6427	62,1433	
8x	51,0287	0,3355	44,4184	-2,0215	38,8346	-2,4585	41,1629	59,001	<b>3,20</b>
1xges_r	51,149		46,1141		41,0957		41,7066	61,7687	
1xges	51,1496	0,0006	44,41	-1,7041	39,3114	-1,7843	41,515	59,3096	<b>2,47</b>
2xges	50,3556		44,7041		39,9192		41,7637	59,9333	
1xgetr_r	51,3596		45,7094		40,0732		41,2409	60,7883	
1xgetr	51,1582	-0,2014	43,0914	-2,618	37,6334	-2,4398	41,132	57,2114	<b>3,58</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Ultramarin/Bleiweiß mit Gelatine behandelt

UBWgel	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	55,2155		16,2472		-52,5609		-72,823	55,0147	
4x	55,4528	0,2373	15,8271	-0,4201	-51,7055	0,8554	-72,9805	54,0736	<b>0,98</b>
8x_r	54,6443		16,3508		-52,7873		-72,7897	55,2617	
8x	55,5473	0,903	15,7475	-0,6033	-51,3863	1,401	-72,9622	53,7451	<b>1,77</b>
1xges_r	54,091		17,1898		-54,05		-72,3574	56,7176	
1xges	54,5675	0,4765	16,2137	-0,9761	-52,4119	1,6381	-72,8105	54,8625	<b>1,7</b>
2xges_r	55,2694		15,9732		-52,4667		-73,0675	54,8443	
2xges	55,4235	0,1541	16,1859	0,2127	-52,7127	-0,246	-72,9305	55,1418	<b>0,36</b>
1xgetr_r	55,5242		15,9214		-52,5296		-73,1382	54,8895	
1xgetr	55,5572	0,033	15,8482	-0,0732	-52,2866	0,243	-73,1379	54,6357	<b>0,26</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Ultramarin/Bleiweiß mit Methylcellulose behandelt

UBWmc	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	54,1551		16,9412		-53,7273		-72,499	56,3349	
4x	54,4354	0,2803	16,7458	-0,1954	-53,2918	0,4355	-72,5558	55,8609	<b>0,55</b>
8x_r	53,9617		17,6037		-54,8652		-72,2109	57,6202	
8x	54,7814	0,8197	16,766	-0,8377	-53,4195	1,4457	-72,5752	55,9888	<b>1,86</b>
1xges_r	55,331		14,4028		-50,1357		-73,9719	52,1635	
1xges	55,6653	0,3343	15,0342	0,6314	-50,6742	-0,5385	-73,4752	52,8574	<b>0,89</b>
2xges_r	54,9325		12,6471		-47,9328		-75,2193	49,5732	
2xges	55,6155	0,683	12,617	-0,0301	-47,4985	0,4343	-75,124	49,1456	<b>0,81</b>
1xgetr_r	54,8904		14,7609		-50,404		-73,6772	52,5209	
1xgetr	55,1939	0,3035	15,7552	0,9943	-51,5145	-1,1105	-72,9942	53,8699	<b>1,52</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Ultramarin/Bleiweiß mit Hausenblase behandelt

UBWhbl	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	H*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	56,165		12,1508		-46,8484		-75,4599	48,3985	
4x	56,8795	0,7145	11,8946	-0,2562	-46,5781	0,2703	-75,6747	48,0729	<b>0,81</b>
8x_r	55,1405		16,0712		-52,9374		-73,1123	55,3231	
8x	55,7875	0,647	16,2925	0,2213	-52,9924	-0,055	-72,91	55,4404	<b>0,67</b>
1xges_r	54,2389		15,3334		-51,3419		-73,3716	53,5827	
1xges	55,2423	1,0034	16,2301	0,8967	-52,6252	-1,2833	-72,8597	55,0711	<b>1,86</b>
2xges_r	54,4568		15,995		-52,109		-72,936	54,5086	
2xges	54,8939	0,4371	16,1113	0,1163	-52,547	-0,438	-72,9541	54,9615	<b>0,63</b>
1xgetr_r	54,5395		13,0761		-46,7617		-74,3772	48,5555	
1xgetr	54,5081	-0,0314	12,5006	-0,5755	-45,7929	0,9688	-74,7314	47,4685	<b>1,13</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Ultramarin/Bleiweiß mit Funori behandelt

UBWfun	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	54,8003		14,5521		-50,511		-73,9285	52,5654	
4x	55,9457	1,1454	14,4069	-0,1452	-49,7003	0,8107	-73,8344	51,7463	<b>1,41</b>
8x_r	51,6682		12,0131		-46,2222		-75,4312	47,7578	
8x	53,0051	1,3369	10,9783	-1,0348	-44,2157	2,0065	-76,056	45,5583	<b>2,62</b>
1xges_r	53,2479		16,438		-52,9612		-72,7568	55,4535	
1xges	54,0252	0,7773	16,5357	0,0977	-52,5412	0,42	-72,5302	55,0818	<b>0,89</b>
2xges_r	53,884		14,6795		-49,7272		-73,5533	51,8486	
2xges	54,8588	0,9748	14,239	-0,4405	-48,9692	0,758	-73,7869	50,9974	<b>1,31</b>
1xgetr_r	51,8791		17,6345		-53,2034		-71,662	56,0498	
1xgetr	52,7393	0,8602	17,1919	-0,4426	-52,4198	0,7836	-71,8423	55,167	<b>1,24</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Ultramarin/Bleiweiß mit JunFunori® behandelt

UBWjfun	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	54,3325		15,833		-52,0305		-73,0748	54,3862	
4x	55,4382	1,1057	15,6038	-0,2292	-51,4012	0,6293	-73,1133	53,7175	<b>1,29</b>
8x_r	51,2019		17,3099		-52,9644		-71,9015	55,7213	
8x	52,353	1,1511	16,7337	-0,5762	-51,8307	1,1337	-72,1072	54,465	<b>1,72</b>
1xges_r	53,4114		15,8231		-52,1026		-73,1069	54,4522	
1xges	54,5495	1,1381	15,2011	-0,622	-50,7096	1,393	-73,3129	52,939	<b>1,90</b>
2xges_r	54,2127		16,7659		-53,0489		-72,4611	55,6352	
2xges	52,9857	-1,227	17,7348	0,9689	-54,6928	-1,6439	-72,0341	57,4963	<b>2,27</b>
1xgetr_r	54,7192		14,8467		-50,1889		-73,5209	52,3387	
1xgetr	55,1518	0,4326	14,3775	-0,4692	-49,5717	0,6172	-73,826	51,6146	<b>0,89</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von Ultramarin/Bleiweiß mit Klucel® behandelt

UBWkluc	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	53,915		16,3689		-52,8586		-72,7936	55,3351	
4x	53,7572	-0,1578	16,5515	0,1826	-52,6074	0,2512	-72,5352	55,1497	<b>0,35</b>
8x_r	54,2487		15,331		-51,4803		-73,4163	53,7146	
8x	54,8469	0,5982	14,9655	-0,3655	-50,5106	0,9697	-73,4962	52,681	<b>1,20</b>
1xges_r	54,2792		14,6057		-50,2393		-73,7896	52,3193	
1xges	50,8945	-3,3847	16,9036	2,2979	-53,0833	-2,844	-72,3367	55,7097	<b>4,98</b>
2xges_r	54,0615		15,0826		-51,4306		-73,6556	53,5966	
2xges	54,4429	0,3814	15,3689	0,2863	-51,3618	0,0688	-73,3413	53,6119	<b>0,48</b>
1xgetr_r	53,9526		15,083		-51,4055		-73,6476	53,5726	
1xgetr	47,1387	-6,8139	17,4441	2,3611	-52,9527	-1,5472	-71,7667	55,752	<b>7,31</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von braunem Ocker mit Gelatine behandelt

BrO_gel	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	38,9674		8,89857		45,1371		78,8474	46,0059	
4x	38,8252	-0,1422	8,75315	-0,14542	44,7921	-0,345	78,9428	45,6394	<b>0,40</b>
8x_r	39,0435		8,95492		45,2797		78,813	46,1567	
8x	38,9137	-0,1298	8,85889	-0,09603	44,9521	-0,3276	78,8513	45,8167	<b>0,37</b>
1xges_r	39,2808		8,86236		44,9415		78,8445	45,807	
1xges	39,3753	0,0945	8,77647	-0,08589	44,3848	-0,5567	78,8148	45,2442	<b>0,57</b>
2xges_r	39,1347		8,89393		44,9066		78,7973	45,7788	
2xges	39,9342	0,7995	8,87631	-0,01762	44,4471	-0,4595	78,7063	45,3247	<b>0,92</b>
1xgetr_r	39,485		8,8527		44,577		78,7676	45,4475	
1xgetr	39,2627	-0,2223	8,7139	-0,1388	44,4767	-0,1003	78,915	45,3223	<b>0,28</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von braunem Ocker mit Methylcellulose behandelt

BrO_mc	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	39,2027		9,08723		45,1037		78,6089	46,01	
4x	39,3982	0,1955	8,82372	-0,26351	44,6553	-0,4484	78,8225	45,5187	<b>0,56</b>
8x_r	39,2784		9,04447		45,256		78,6983	46,1509	
8x	38,6858		8,60541		44,4685		79,0477	45,2935	
1xges_r	38,8274	0,1416	8,38862	-0,21679	43,9986	-0,4699	79,2057	44,7911	<b>0,54</b>
1xges	38,8723		8,94701		45,1093		78,7815	45,9881	
2xges_r	38,8715	-0,0008	8,82672	-0,12029	44,7798	-0,3295	78,8492	45,6414	<b>0,35</b>
2xges	39,9929		9,01147		44,801		78,627	45,6984	
1xgetr_r	39,8408	-0,1521	8,97276	-0,03871	44,8717	0,0707	78,692	45,7601	<b>0,17</b>
1xgetr									

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von braunem Ocker mit Hausenblase behandelt

BrO_hbl	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	39,2596		9,00226		45,0024		78,6879	45,894	
4x	39,8961	0,6365	8,41696	-0,5853	43,6489	-1,3535	79,0854	44,453	<b>1,61</b>
8x_r	39,329		8,75753		44,4434		78,8527	45,2981	
8x	39,4307	0,1017	8,18228	-0,57525	43,3926	-1,0508	79,3215	44,1573	<b>1,20</b>
1xges_r	39,1351		8,79538		44,598		78,8436	45,4571	
1xges	38,1808	-0,9543	8,74186	-0,05352	45,1727	0,5747	79,0475	46,0108	<b>1,12</b>
2xges_r	38,1142		8,80343		45,5893		79,0705	46,4315	
2xges	37,7176	-0,3966	8,71321	-0,09022	45,5318	-0,0575	79,1666	46,3581	<b>0,41</b>
1xgetr_r	38,4258		8,76721		45,5039		79,0945	46,3408	
1xgetr	38,1527	-0,2731	8,49931	-0,2679	45,0047	-0,4992	79,3054	45,8002	<b>0,63</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von braunem Ocker mit Funori behandelt

BrO_fun	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	38,9674		8,89857		45,1371		78,8474	46,0059	
4x	38,8252	-0,1422	8,75315	-0,14542	44,7921	-0,345	78,9428	45,6394	<b>0,40</b>
8x_r	39,0435		8,95492		45,2797		78,813	46,1567	
8x	38,9137	-0,1298	8,85889	-0,09603	44,9521	-0,3276	78,8513	45,8167	<b>0,37</b>
1xges_r	39,2808		8,86236		44,9415		78,8445	45,807	
1xges	39,3753	0,0945	8,77647	-0,08589	44,3848	-0,5567	78,8148	45,2442	<b>0,57</b>
2xges_r	39,1347		8,89393		44,9066		78,7973	45,7788	
2xges	39,9342	0,7995	8,87631	-0,01762	44,4471	-0,4595	78,7063	45,3247	<b>0,92</b>
1xgetr_r	39,485		8,8527		44,577		78,7676	45,4475	
1xgetr	39,2627	-0,2223	8,7139	-0,1388	44,4767	-0,1003	78,915	45,3223	<b>0,28</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von braunem Ocker mit JunFunori® behandelt

BrOjfun	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	37,7487		8,89573		45,7009		78,9851	46,5587	
4x	37,3848	-0,3639	8,90974	0,01401	45,926	0,2251	79,0209	46,7823	<b>0,43</b>
8x_r	38,6426		9,12872		46,2544		78,8356	47,1466	
8x	38,6711	0,0285	9,18074	0,05202	46,1803	-0,0741	78,7561	47,084	<b>0,09</b>
1xges_r	39,2599		8,92813		45,3785		78,8693	46,2485	
1xges	38,9471	-0,3128	8,91886	-0,00927	45,5394	0,1609	78,9189	46,4046	<b>0,35</b>
2xges_r	38,7038		9,17716		45,9191		78,6981	46,8272	
2xges	38,991	0,2872	9,08041	-0,09675	45,4251	-0,494	78,6957	46,3238	<b>0,89</b>
1xgetr_r	38,3313		8,92866		45,5931		78,9198	46,4591	
1xgetr	38,2519	-0,0794	8,91191	-0,01675	45,5913	-0,0018	78,9396	46,4541	<b>0,08</b>

CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten von braunem Ocker mit Klucel® behandelt

BrOkLuc	L*	DL*	a*	Da*	b*	Db*	C*	h*	DE* <sub>ab</sub>
4x_r	38,2518		9,40882		46,7102		78,6113	47,6484	
4x	38,452	0,2002	9,05351	-0,35531	46,0667	-0,6435	78,8813	46,9479	<b>0,76</b>
8x_r	38,1364		8,96386		45,9956		78,9721	46,8609	
8x	38,1321	-0,0043	8,86896	-0,0949	45,928	-0,0676	79,0704	46,7765	<b>0,12</b>
1xges_r	38,2375		9,4236		46,7852		78,6117	47,7248	
1xges	38,2071	-0,0304	9,4654	0,0418	46,6938	-0,0914	78,5407	47,6435	<b>0,11</b>
2xges_r	35,6655		9,2986		46,9655		78,801	47,8772	
2xges	35,2738	-0,3917	9,4297	0,1311	47,2726	0,3071	78,719	48,2039	<b>0,51</b>
1xgetr_r	37,8158		9,02564		46,2233		78,9513	47,0962	
1xgetr	37,6806	-0,1352	8,97056	-0,05508	46,1127	-0,1106	78,9914	46,9772	<b>0,18</b>

## 12.17b CIEL\*a\*b\*-Farbmessdaten nach beschleunigter Alterung

Farbmessdaten der Pigmentproben mit Klebstoffauftrag, die beschleunigt gealtert wurden. Die Probe mit der Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) mit viermaligem Gelatineauftrag (gel 4x) wurde für fünf Tage bei 90 °C und alternierender relativer Feuchte zwischen 35 % und 85 %, alle drei Stunden, beschleunigt gealtert.

Probe	Status	L*	$\Delta L^*$	a*	$\Delta a^*$	b*	$\Delta b^*$	h	C*	$\Delta E^*_{ab}$
UBW_ref	SCI/100	49.1106		10.2282		-52.1417		281.098	53.1354	
	SCE/100	49.3758		10.2215		-51.919		281.137	52.9156	
UBW_gel_4x	SCI/100	48.6002	<b>-0.5104</b>	10.0811	-0.1471	-51.9669	0.1748	280.978	52.9357	<b>0.5592</b>
	SCE/100	48.8774	<b>-0.4984</b>	10.0473	-0.1742	-51.7267	0.1923	280.992	52.6935	<b>0.5619</b>

Die Probe mit der Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) mit einmal gesättigtem Gelatineauftrag (gel 1xges) wurde für fünf Tage bei 80 °C und 65 % relativer Feuchte beschleunigt gealtert.

Probe	Status	L*	$\Delta L^*$	a*	$\Delta a^*$	b*	$\Delta b^*$	h	C*	$\Delta E^*_{ab}$
UBW_ref	SCI/100	49.137		11.988		-54.7075		282.359	56.0055	
	SCE/100	49.435		11.9316		-54.4317		282.363	55.7241	
UBW_gel_1xges	SCI/100	48.380	<b>-0.7567</b>	12.2229	0.2349	-54.8894	-0.182	282.553	56.2339	<b>0.813</b>
	SCE/100	48.67	<b>-0.7651</b>	12.1603	0.2287	-54.6186	-0.1869	282.551	55.9559	<b>0.8201</b>

Die Probe mit der Mischung Ultramarin/Bleiweiß (UBW) mit einmal gesättigtem JunFunori® -Auftrag (jfun 1xges) wurde für fünf Tage bei 80 °C und 65 % relativer Feuchte beschleunigt gealtert.

Probe	Status	L*	$\Delta L^*$	a*	$\Delta a^*$	b*	$\Delta b^*$	h	C*	$\Delta E^*_{ab}$
UBW_ref	SCI/100	48.7319		11.9709		-54.418		55.7194	282.406	
	SCE/100	48.9944		11.9364		-54.178		55.4777	282.424	
UBW_jfun_1xges	SCI/100	48.7395	<b>0.0077</b>	11.2173	-0.7537	-52.921	1.4972	54.0968	281.967	<b>1.6762</b>
	SCE/100	49.0106	<b>0.0162</b>	11.1801	-0.7563	-52.667	1.5105	53.8415	281.984	<b>1.6893</b>

## 12.18 Variable Media Questionnaire

Meg Webster  
*Stick Spiral*, 1986  
 Branches, dimensions vary with installation  
 Solomon R. Guggenheim Museum, New York  
 Panza Collection, Gift, 1992



Installation view at *The Material Imagination* at the Guggenheim Museum SoHo, New York, 1995. Photo by Ellen Labenski

To create *Stick Spiral* requires more than simply replicating the viewer's experience of the original version. Webster requires that the branches used to construct this ephemeral installation be pruned from the local region recently enough to bear foliage, odor, and/or fruit of the current season. Her ecological mandate insists that installers of the work find branches already cut for purposes other than the exhibition itself. Destroying nature to make art would be an anathema to the artist's aesthetic. The process by which the work is constructed is equally important to the appearance of the final product. Webster essentially instructs the installers of *Stick Spiral* to enact a kind of performance--albeit one invisible to the public. Endangered aspects of this work include the site-variability of its installation parameters and the performative process by which it is built. The latter is especially vulnerable since the unusual constraints on the installation process are not evident in photographs and other traditional forms of documentation.

Preservation strategies to explore include:

#### Instructions

**Storage** Should the instructions for completing an installation take the form of a paper score or script, a digital transcript, a video, or some combination of these? What is the best means for safeguarding these instructions? Should anything be stored besides the instructions themselves?

**Emulation** Should re-creators endeavor to find branches from the same species of trees as those employed in previous incarnations of the work?

**Migration** Should borrowers of the work be required to furnish any evidence that they followed these instructions? What format should that evidence take? What forms of branch sterilization (such as pesticides) are acceptable from an ecological standpoint to safeguard other works in the exhibition that may be vulnerable to pests abiding in the branches used to make this work?

**Reinterpretation** For the purposes of gathering branches, what is the artist's definition of "branches," "local region," and "recently in time"? Which of these requirements is most important? For example:  
If the work were installed in a desert, would a cactus qualify as a branch? Or would the installers have to travel until they found sufficient branches—perhaps even to a neighboring state?  
Can the work be installed in the dead of winter, when foliage is unavailable?

#### Space

**Storage** Should the overall dimensions of the work remain fixed in future re-creations, regardless of exhibition context?

**Emulation** Should installers custom-build an installation space to match the original dimensions of the work?

**Migration** Can the work be exhibited outside or in other non-museum contexts? Should the installation scale to fill the room allotted to it?

**Reinterpretation** Should the size or shape of the installation vary according to the artist's instructions on site-specificity?

## 12.19 Restaurierung des Pastells auf Papier von Uli Peter

Die Zeichnung ist relativ stabil und verwischt nicht beim leichten Darüberstreichen. Die Schimmelsporen wurden mit einem weichen Pinsel an der reinen Werkbank abgenommen. Weitere Schimmelsporen wurden mit einem Archivstaubsauger entfernt, an dem eine Plastikpipette befestigt wurde. Der Staubsauger wurde auf die kleinste Stufe eingestellt und die Schimmelsporen damit berührungslos abgenommen.

#### Vorversuche

Auf einem Nährgrund (Agar-Agar) wurden Schimmelsporen aufgelegt. Anschließend bei ca. 39 °C bebrütet. Nach fünf Tagen hat sich kein Schimmelwachstum eingestellt, die Referenz hat auch nur ein leichtes Schimmelwachstum gezeigt. Es liegt kein aktiver Schimmel vor.

Einzelne Papierfasern der Grafik wurden mit Phloroglucin auf mikrochemischem Weg auf die Präsenz von holzhaltigen Papierfasern getestet. Die mit einem Skalpell von der Rückseite abgenommenen Fasern wurden auf einem Objektträger platziert und mit einer 0,1 %igen Phlorogucin-Lösung umspült. Die zu testenden Fasern veränderten sich in ihrer Farbigkeit nicht. Der Ergebnis des Tests war negativ. Dieser Test wurde unternommen, um die richtige Bleichmethode auszuwählen. Bei Vorhandensein von Lignin haltigen Fasern schließt sich eine Bleichung mit Wasserstoffperoxid aus. Auf Grund der starken Verfärbungen wurde eine Bleichbehandlung mit Calciumhypochlorid durchgeführt.

#### Bleichbehandlung

Das Blatt wurde mit einem Dahlia-Sprayer befeuchtet und in ein 0,5 % iges Calciumhypochlorid-Bad (800ml + 4g Ca(OCl)<sub>2</sub>) für 18 min eingelegt. Es zeigte sich eine sichtbare Entfärbung der Flecken. Anschließend kam das Blatt für zwei Mal 30 min in ein Bad mit demineralisiertem Wasser bei pH 8, anschließend wurde es offen trocknen gelassen. Die Papierstruktur ist an den stark abgebauten Partien leicht aufgebrochen, der Gesamteindruck hat sich wesentlich verbessert. Durch die



Bleichbehandlung hat eine Desinfektion stattgefunden, so dass auf eine weitere Behandlung mit Alkohol verzichtet wurde. Das Antichlor wurde nicht eingesetzt, da nach dem Bleichprozess ausreichend gewässert werden konnte.

#### Planlegen

Für die Planlegung wurde die Grafik für ca. 18 Stunden im Zedernholzrahmen bei 80 % relativer Feuchte und Zimmertemperatur eingelegt. Es wurde eine so lange Befeuchtungszeit gewählt, weil es sich bei dem Papier um ein modernes Zeichenpapier handelt, welches nur langsam Feuchtigkeit aufnimmt. Das Planlegen erfolgte zwischen zwei Bondina®-Vliesen und zwei Passepartoutpappen und Brettern in der Presse für ca. vier Wochen. Es wurde ein "hartes Sandwich" (Homburger, Korbel 1998: 465) als Trocken- und Pressmethode gewählt, da die Zeichnung keine Pastositäten und keine Empfindlichkeiten auf Druck aufweist.

### **12.20 Versuche zur Restaurierung der Kreide auf Acryl von Ross Sinclair**

Die Kreide ist auf ihre Bestandteile hin mit einem mikrochemischen Test (Schramm, Hering 1988: 34) untersucht worden. Tafelkreide kann aus Calciumkarbonat oder-sulfat bestehen. Einzelne Partikel der Original-Kreide des Künstlers<sup>13</sup> sind auf einen Objektträger mit Schwefelsäure (2N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) versetzt und über einem Bunsenbrenner erhitzt worden. Nach Austrocknung der Mischung haben sich die für das Sulfat typischen Gipsnadeln am äußersten Rand des eingetrockneten Gemisches gebildet. Bei Anwesenheit von Calciumcarbonat wäre eine starke Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-Entwicklung zu beobachten gewesen. Dies konnte nicht beobachtet werden. Bei der von Ross Sinclair verwendeten Kreide handelt es sich um Calciumsulfat, das zu geringen Anteilen in Wasser löslich ist.

Die Konsolidierungsarbeiten der Kreide wurden in der Zeit vom 5. bis 7. Dezember 2005 von der Autorin und Georg Dietz, Student des Studiengangs Restaurierung und Konservierung von Grafik, Archiv- und Bibliotheksgut, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, 5. Semester, vor Ort an der Hamburger Kunsthalle fertiggestellt. Die Vorgehensweise entspricht der in Kapitel 5.2.3, Seite 153, beschriebenen Konsolidierungstechnik.

---

<sup>13</sup> Ross Sinclair hat sowohl einige Kreidestücke, als auch die schwarze Acrylfarbe in der Restaurierungswerkstatt der Hamburger Kunsthalle deponiert.