HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst
Hildesheim/ Holzminden / Göttingen
Studiengang: Konservierung und Restaurierung
Studienrichtung: Möbel und Holzobjekte

Mikrokristalline Wachse in der Konservierung

mit besonderem Augenmerk auf deren Verwendung an Metalloberflächen

Vorgelegt von: Jacqueline Siebenbrock
Holzweg 54
26605 Aurich
Matrikel Nr. 736219

Modul: Bachelor-Thesis

Geprüft von: Prof. Dr. Julia A. Schultz
Stephan Rudolph

Bearbeitungszeitraum: 20.04.2022 – 22.06.2022

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 3

2. Definition und Klassifizierung der Wachse 5

2.1. Natürliche Wachse 7

2.1.1. Pflanzliche und tierische Wachse 7

2.1.2. Mineralwachse 9

2.2. Teilsynthetische- und synthetische Wachse 10

3. Mikrokristalline Wachse: Struktur und Eigenschaften 11

4. Der Einsatz von mikrokristallinen Wachsen zur Konservierung von Metalloberflächen . 16

4.1. Exkurs: Eine kurze Einführung in die Werkstoffkunde von Metall 16

4.1.1. Korrosionserscheinungen 22

4.2. Anforderungen an die Konservierung von Metalloberflächen 26

4.3. Einsatzmöglichkeiten und Wirkungsweise der mikrokristallinen Wachse 29

4.4. Applikationsmöglichkeiten der mikrokristallinen Wachse 34

4.4.1. Erfahrungsberichte zu den Applikationsverfahren 37

4.5. Diskurs über die ästhetische Veränderung der Metalloberfläche 41

5. Zusammenfassung 43

6. Verzeichnisse 47

6.1. Literaturverzeichnis 47

6.2. Internetquellenverzeichnis 49

6.3. Abbildungsverzeichnis 50

6.4. Abbildungsnachweis 51

6.5. Tabellenverzeichnis 51

6.6. Tabellennachweis 51

6.7. Abkürzungsverzeichnis 51

1. Einleitung

Bis zum 19. Jh. versteht man unter Wachs klassischerweise das Bienenwachs, auch wenn davon auszugehen ist, dass Stoffe, die wir heute den Mineralwachsen zuordnen wie z.B. Bitumen, bereits bekannt waren.[1] Die Definition anderer Stoffe als Wachse erfolgt erst im Zuge der Ausweitung der chemischen Analytik im 19. Jh. Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Wachse sind zu weiten Teilen jedoch bereits seit der Antike bekannt.

Die konservierenden Eigenschaften des Wachses fanden bereits beim Verfahren des Mumifizierens Verwendung. Hierbei wurde sich die leichte Verformung mittels Schmelzen bei gleichzeitiger Formstabilität nach dem Erkalten des Wachses zu Nutzen gemacht, ebenso die chemische Beständigkeit und das Abdichtungsvermögen, welche die Erhaltung des Leichnams garantierten. Obwohl sie noch nicht als Wachse klassifiziert waren, kamen nachweislich neben dem Bienenwachs auch Mineralwachse wie Bitumen beim Prozess des Mumifizierens zum Einsatz.[2]

Auch kamen Wachse bereits in der Antike als Korrosionsschutzmittel für Gemälde, Statuen, Wände u.a. zum Einsatz. Im Zuge dieses Verfahrens ergab sich ein weiterer ästhetischer Nutzen. Die Behandlung mit Wachs verlieh bspw. den Marmor-Statuen einen weichen Glanzgrad. So wurde gleichsam die Optik aufgewertet und das Material vor Feuchtigkeit und Befall durch Moose und Flechten geschützt.[3]

Mit der Ergründung des Fachgebietes der Fettchemie im 19 Jh., welche sich mit der Analyse der Seifen, Öle, Fette und Wachse befasst, wurden erstmals andere Stoffe wie z.B. Ozokerit oder Paraffin dem Gebiet der Wachse zugeordnet. Mit fortschreitender, experimenteller Ergründung chemischer Stoffe, die ihren Eigenschaften nach den Wachsen zuzuschreiben waren, begann man schließlich in den 1930er Jahren der Frage systematisch nachzugehen „[…] *was unter Wachsen zu verstehen sei und welche Natur- und Industrieprodukte zu den Wachsen zuzuzählen seien.“*[4]

Das Bienenwachs wurde auch in der Metallrestaurierung lange Zeit als Konservierungsmittel genutzt. Mit der fortschreitenden Synthese anderer Stoffe seit dem 19. und vor allem im 20 Jh. wird das Bienenwachs jedoch inzwischen durch andere Stoffe, vornehmlich mikrokristalline Wachse, ersetzt.

[1] Vgl. Büll (1977), S. 18
[2] Vgl. Ebd., S. 18-20
[3] Vgl. Ebd., S. 25
[4] Zit. nach Büll (1977), S. 45

Während der Tätigkeit in einer Restaurierungswerkstatt für Metallobjekte in den Bereichen des Kunsthandwerks, der Archäologie und der Denkmalpflege, begegnen einem oftmals mikrokristalline Wachse für die Konservierung der entsprechenden Objekte. Dies wirft die Frage auf, in welchen Bereichen sich diese Wachse für konservierende Überzüge eignen und warum sie sich in der Anwendung an Metalloberflächen etabliert haben. Diese Arbeit soll dem Leser vermitteln, worum es sich bei mikrokristallinen Wachsen handelt, wie sie sich in Struktur und Eigenschaften von anderen Wachsen unterscheiden und warum sie eine gute Eignung für Teilbereiche der Konservierung und Restaurierung aufweisen.

Um ein Verständnis davon zu vermitteln, worum es sich bei mikrokristallinen Wachsen handelt, wird zunächst ein Überblick über die Wachse allgemein geschaffen. Im Weiteren wird näher auf die Struktur und Eigenschaften der mikrokristallinen Wachse eingegangen. Der Hauptteil dieser Arbeit stellt den Einsatz von mikrokristallinen Wachsen für die Konservierung von Metalloberflächen dar. Dieses Kapitel umfasst unter anderem eine Einführung in die Werkstoffkunde der Metalle sowie deren Anforderungen an konservierende Maßnahmen. Ein grundlegendes Verständnis dieses Werkstoffs und der Problematiken in dessen Erhalt ist Voraussetzung dafür, die Wirkungsweise von Schutzbeschichtungen mit mikrokristallinen Wachsen zu verstehen, auf welche im direkten Anschluss eingegangen wird. Weiterhin werden die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten der mikrokristallinen Wachse im Metallbereich erläutert. In diesem Sinne wird auch im Kurzen auf mögliche andere Anwendungsbereiche in der Konservierung eingegangen. Die Vorstellung der unterschiedlichen Applikationsmöglichkeiten soll einen praxisnahen Bezug zu der Anwendung der mikrokristallinen Wachse schaffen. Letztlich wird noch die ästhetische Veränderung der Metalloberflächen, welche mit mikrokristallinen Wachsen behandelt wurden, kritisch beleuchtet. Abschließend werden die getroffenen Erkenntnisse übersichtlich zusammengefasst.

2. Definition und Klassifizierung der Wachse

Um ein Verständnis davon zu vermitteln, worum es sich bei mikrokristallinen Wachsen handelt und wie sie sich von anderen Wachsen unterscheiden, wird in diesem Kapitel eine Übersicht über die Wachse im Allgemeinen aufgeführt. Ferner wird in diesem Sinne auch auf handelsübliche Produkte natürlicher-, teilsynthetischer- und synthetischer Wachse sowie deren Herkunft und Gewinnung kurz eingegangen.

Wachs ist ein Überbegriff für eine große Anzahl an Stoffen und Stoffgruppen, die sich wiederum aus einer Vielzahl chemischer Verbindungen zusammensetzten. Aufgrund der zahlreichen Stoffgruppen, welche „Wachscharakter" besitzen, ist eine widerspruchfreie Definition nur schwer zu treffen.[5]

Da sie in ihrer chemischen Zusammensetzung und Herkunft so unterschiedlich sind, werden sie in der modernen Definition allgemein anhand ihrer technisch-physikalischen Eigenschaften beurteilt.[6] Eine weitverbreitete Definition stellt die *Deutsche Gesellschaft für Fettwissenschaft.*

Wachse sind demnach nicht homogene, natürlich oder künstlich gewonnene Stoffe und weisen in der Regel folgende Eigenschaften auf: Wachse sind fest bis hart, grob- bis feinkristallin, durchscheinend bis opak, jedoch nicht glasartig und lassen sich unter leichtem Druck polieren. Sie sind bei 20 °C knetbar und schmelzen ab einer Temperatur von 40°C. Sie verhalten sich schon kurz vor dem Schmelzpunkt niedrigviskos und nicht fadenziehend. Sie sind in Konsistenz und Löslichkeit stark temperaturabhängig. Zudem sind sie nahezu wasserunlöslich, können jedoch in organischen, unpolaren Lösemitteln gelöst werden. [7] [8] Wird mehr als eines dieser Kriterien nicht erfüllt, handelt es sich demnach nicht um ein Wachs.

[5] Vgl. Büll, S. 12
[6] Vgl. Büll, S. 53
[7] Vgl. Deutsche Einheitsmethoden zur Untersuchung von Fetten, Fettprodukten, Tensiden und verwandten Stoffen, M-I 1 (75): Deutsche Gesellschaft für Fettwissenschaft
[8] Vgl. Büll, S. 53

Es existiert bis heute keine einheitliche Klassifizierung der Wachse. Mehrere Auffassungen dessen, wie Wachse definiert und gegliedert werden sollten, existieren simultan nebeneinander. Diese Auffassungen teilen sich in die der Wachspraktiker und der Chemiker auf.[9] Da der Fokus dieser Arbeit jedoch nicht auf Wachsen im Allgemeinen liegt, wird der leichteren Verständlichkeit halber die Klassifizierung nach Auffassung der Chemie vertreten, auch um Widersprüche zu vermeiden, da sich diese Klassifizierung in anderen Beiträgen zu Wachsen wiederfindet (siehe Abb. 1, S. 6).[10] [11]

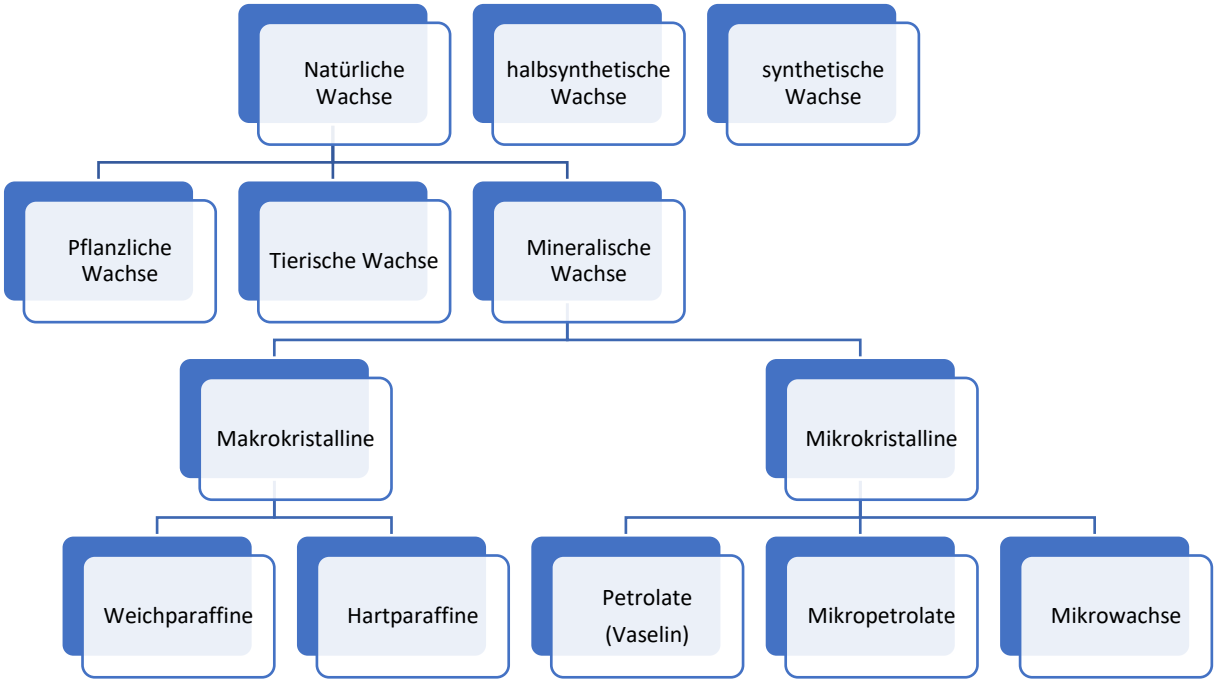


Abbildung 1. Klassifizierung der Wachse nach Vorbild: Magnussons (2017)[12]

[9] Vgl. Büll (1977), S. 54
[10] Vgl. Magnusson (2017), S. 19
[11] Vgl. Aßel (2012), S. 51
[12] Vgl. Magnusson (2017), S. 19

2.1. Natürliche Wachse

Natürliche Wachse werden unterteilt in fossile und rezente Wachse. Die Hauptbestandteile der rezenten Wachse sind Fettsäureester, die mit langkettigen, aliphatischen, primären Alkoholen, den so genannten Fettalkoholen, verestert sind.[13] Sie werden daher zu den Lipiden gezählt. Um die rezenten Wachse chemisch betrachtet klar von Fetten zu unterscheiden, ist zu beachten, dass es sich bei den Fettsäureester, anders als bei Fetten, nicht um Triglyceride von Fettsäuren handelt.[14] Daher handelt es sich bspw. bei Jojobaöl, entgegen dem Namen, nicht um ein Öl, sondern um ein flüssiges Wachs.[15] Weitere zu erwähnende Verbindungen in den rezenten Wachsen sind freie, langkettige, aliphatische Carbonsäuren, Ketone, Alkohole und Kohlenwasserstoffe. Die fossilen Wachse hingegen bestehen hauptsächlich aus gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffen.[16]

2.1.1. Pflanzliche und tierische Wachse

Viele Pflanzenarten sind dazu fähig, Wachsschichten auf Blättern, Beeren oder auch Wurzeln auszubilden. Dabei machen sich die Pflanzen den hydrophoben Charakter des Wachses zu nutzen, um Wasserverlust zu vermeiden. Dies erwirken sie durch Einlagerungen des Wachses in der Kutikula[17] und den kutinisierten Membranschichten. Tritt das Wachs aus der Kutikula nach außen, entstehen die typischen Wachsschichten bspw. auf Palmenblättern oder Beeren. Die Struktur der Wachsschicht kann je nach Art der Pflanze stark variieren. Die Wachse werden innerhalb der Pflanze durch chemische Reaktionen der Oxidation, Reduktion, Hydrolyse, Carboxylierung, Decarboxylierung und photochemischer Vorgänge gebildet.[18] Zunächst werden Fettglyceride durch Reduktion und Decarboxylierung gebildet. Anschließend werden diese weiter umgewandelt in Alkohole, Säuren, Ester und Kohlenwasserstoffe. Die Kohlenwasserstoffe werden dabei infolge der Reduktion von Oxysäure gebildet.

Von wirtschaftlicher Bedeutung ist das Hartwachs der Fächerpalme, das sog. **Carnaubawachs**. Es wird vor allem als Zusatz für andere Wachssorten verwendet, da es zum einen den Schmelzpunkt sowie den Härte- und Glanzgrad anhebt und zum anderen die Klebrigkeit, Plastizität und Neigung zur groben Kristallisation verringert. Weitere in der Industrie geläufigen Pflanzenwachse sind bspw. das **Candellilawachs**, das hauptsächlich in der Kosmetik verwendet wird, und das **Zuckerrohrwachs.**

[13] Vgl. Aßel (2012), S. 51
[14] Vgl. Haim (2012), S. 164-169
[15] Vgl. Büll (1977), S. 209
[16] Vgl. Ebd., S. 203
[17] Bei der Kutikula handelt es sich um feine Häutchen auf den Außenwänden der Epidermen, diese enthalten Klutin, ein Glycerol Ester höherer Fettsäuren. Sie bilden die äußersten Membranlamellen und sind schwer durchlässig für Wasser und Gase. Vgl. Büll (1977), S. 207
[18] Vgl. Büll (1977), S. 207

Wichtige Vertreter der **tierischen Wachse** sind beispielsweise **Bienenwachs, Wollwachs, Chinawachs** und andere Insektenwachse. Auch **Walrat** und **Schellack** enthalten Wachsanteile. Wie auch bei den pflanzlichen Wachsen gilt: die Beschaffenheit der Wachse variiert stark abhängig von deren Herkunft. Die Haut aller Gliedertiere besteht aus der Grundmembran, Hautzellen, der Epidermis[19] und einer feinen Wachsschicht. Das Wachs wird in den Hautzellen gebildet und zur Cuticula transportiert. Bereiche mit besonders produktiven wachsabscheidenden Hautzellen werden Wachsdrüsen genannt, wie sie bspw. die (Arbeiter-) Bienen auf der Bauchseite der vier letzten Hinterbeine besitzen.[20]

Das Bienenwachs bedarf einer Hervorhebung, da es eine besondere Stellung in der Geschichte der Wachse einnimmt.

„Das Wachs wird in den Wachsdrüsen der Arbeiterbienen produziert. Sie schwitzen es als helle, feine Lamellen aus dem Körper aus und verwenden es für den Bau der Waben. Für 1 kg Wachs werden etwa 11 kg Honig oder Zucker verdaut. Im Jahr kann ein Bienenvolk ca. 0,5 - 1,5 kg Wachs erzeugen, wobei an der Produktion von 1 kg Wachs ca. 150'000 Bienen beteiligt sind.“[21]

Es besteht hauptsächlich aus Paraffinen, Fettsäuren und Fettsäureestern.[22] Ein hoher Bestandteil ungesättigter Verbindungen in den genannten Bestandteilen wirkt sich positiv auf die Plastizität und Haftfähigkeit von Bienenwachs aus.[23] Bienenwachs besitzt für die Konservierung und Restaurierung wichtige Eigenschaften wie eine (bedingte) chemische Inertheit oder gutes Abdichtungsvermögen. Es neigt jedoch dazu, im Alterungsprozess aufgrund von Oxidation einen milchigen bis grauen Schleier zu bilden, verliert in dünner Schichtdicke an Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen und kann aufgrund des hohen Anteils ungesättigter Verbindungen leicht mit anderen Stoffen reagieren.[24] Zudem besitzt Bienenwachs, wie auch andere rezente Wachse, keine genormte Zusammensetzung. Je nach Region und Bienenvolk können die Beschaffenheit und damit die Eigenschaften des Bienenwachses variieren.[25] Einheitliche, immer gleichbleibende Eigenschaften eines Stoffes sind in der Anwendung der Konservierung und Restaurierung jedoch ein wichtiger Aspekt. Da dies bei anderen Wachsen, wie bspw. den mikrokristallinen Wachsen, bei besserer Eignung gegeben ist, haben diese in der Anwendung in der Konservierung das Bienenwachs nahezu gänzlich abgelöst.[26]

[19] Einer wachshaltigen Schicht der sog. Cutikula, vgl. Büll (1977), S. 207
[20] Vgl. Ebd., S. 215
[21] Zit. nach Sitterwerk (2014), https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1417/
[22] Vgl. Koller et al. (2000), S. 227
[23] Vgl. Ebd., S. 228
[24] Vgl. Ebd., S. 229-230
[25] Vgl. Ebd., S. 227
[26] Vgl. Aßel (2012), S. 53

2.1.2. Mineralwachse

Die Erd- bzw. Mineralwachse werden aus fossilen Stoffen verschiedener Herkunft gewonnen. Sie bestehen im Wesentlichen aus Kohlenwasserstoffen.

Ozokerit bezeichnet ursprünglich das beim Bergbau gewonnenen Erdwachs. Es handelt sich dabei um natürliche Rückstände der Verdunstung von Erdöl. Im heutigen Sprachgebrauch bezeichnen Ozokerite entölte Erdölpetrolate, welche als Rückstand bei der Destillation von Erdöl anfallen oder sich als Tanksedimente bestimmter Rohöle absetzen.[27] Das **Ceresin** bezeichnete früher das gereinigte und gebleichte Ozokerit. Inzwischen bezeichnen Ceresine zumeist Mischprodukte aus Paraffinen, Petrolatozokeriten und anderen Zusätzen wie Fischer-Tropsch-Paraffine u.a. hochschmelzende Wachse.[28] **Vaseline** kann sowohl „natürlich" als Nebenprodukt der Erdöldestillation anfallen, wie auch synthetisch bei der Fischer-Tropsch-Synthese gewonnen werden. Vaseline bestehen aus aliphatischen, gerad-, verzweigt- und ringförmigen Kohlenwasserstoffen.[29] Die **Montanwachse** sind fossile Pflanzenwachse und werden aus dem wachsreichen Braunkohlebitumen gewonnen. Sie stammen aus Erdschichten deren Alter auf etwa 30-40 Millionen Jahre datiert werden. Bei den Montanwachsen sind die ursprünglichen Pflanzenwachse erhalten, jedoch durch Prozesse der Schwefelung, Kondensationsreaktion sowie Salz- und Seifenbildung abgewandelt. Es setzt sich vorwiegend aus hochmolekularen, z.T. mit Alkoholen veresterten Säuren zusammen. In kleineren Mengen sind auch Paraffinkohlenwasserstoffe, höhere Ketone und freie Wachsalkohole enthalten.[30]

Technische Paraffine werden aus Erdöl, Destillaten und Hydrierungsprodukten des Braunkohleschwelteers sowie aus den Teeren des Schiefers und Torfs gewonnen. Sie werden in Weich- und Hartparaffine unterteilt. Sie bestehen zum Hauptanteil aus aliphatischen, gesättigten Kohlenwasserstoffen. Anteilig sind jedoch auch Iso- und Ringkohlenwasserstoffe enthalten.[31] Die hochschmelzenden **mikrokristallinen Wachse** werden aus Tankbodenwachsen oder aus Petrolaten hergestellt.[32] Oftmals ist die Unterscheidung zwischen mikrokristallinen Wachsen und Paraffinen allein anhand der Nomenklatur schwer zu erfassen. Allgemein sind mikrokristalline Wachse jedoch plastischer als Paraffine und weisen eine höhere Molekülmasse auf, demnach besitzen sie **höhere Schmelz-, Tropf- und Erstarrungspunkte** (siehe Abb. 4, S. 15).[33] Da die mikrokristallinen Wachse im weiteren Verlauf eingehend behandelt werden, wird an dieser Stelle jedoch nicht näher auf sie eingegangen.

[27] Vgl. Büll (1977), S. 203
[28] Vgl. Ebd., S. 204
[29] Vgl. Ebd., S. 205
[30] Vgl. Ebd., S. 205
[31] Vgl. Ebd, S. 203
[32] Vgl. Crowley u. Laefer (2008), S. 5
[33] Vgl. Magnusson (2017), S. 18

2.2. Teilsynthetische- und synthetische Wachse

Bei den teilsynthetischen Wachsen handelt es sich um chemisch modifizierte, natürliche Wachse. Für die Herstellung dieser Wachse kommen verschiedene chemische Verfahren wie die Oxidation, Reduktion, Veresterung, Kondensation u.v.m. zum Einsatz. Ziel dieser Verfahren ist es, hochwertige Wachse mit einheitlichen anwendungstechnischen Eigenschaften und gleichbleibender Handelsqualität zu erzeugen. Ein Beispiel für chemisch modifizierte Wachse sind die „Edelmontanwachse". Sie werden vornehmlich in der Putz- und Poliermittelherstellung verwendet.[34]

Bei synthetischen Wachsen handelt es sich um Kohlenwasserstoffwachse die durch Verfahren wie der Hydrierung, Polymerisation, Kondensation oder Addition aus Syntheseprodukten erzeugt werden. Sie können sowohl rein synthetisch gewonnen werden wie auch aus technischen Produkten auf Basis natürlicher Stoffe. So entstehen bspw. Paraffinoxydate sowohl aus FISCHER-TROPSCH-Paraffinen wie auch aus Erdölparaffinen.[35]

Bedeutende Vertreter der synthetischen Wachse sind die Kohlenwasserstoffwachse der sogenannten **FISCHER-TROPSCH-Hydrierung**.[36] Unter diesem Verfahren wird die katalytische Hydrierung von Kohlenoxid in bestimmten Mischungsverhältnissen verstanden.[37] Die Wachse fallen als Nebenprodukte in der Treibstoffindustrie an. **Fischer-Tropsch-Hartwachse** bestehen fast ausschließlich aus unverzweigten, geradkettigen Alkanen mittlerer bis hoher Kettenlänge, sie können daher auch als synthetische Paraffinwachse bezeichnet werden.[38] Die **Fischer-Tropsch-Mediumwaxes** weisen in geringen Anteilen auch verzweigte oder zyklische Ketten auf, woraus sich ihre feinkristalline Struktur erklärt, die denen der mikrokristallinen Wachse ähnelt.[39] Diese „Mediumwaxes" weisen tendenziell eine mittlere Kettenlänge und somit einen tieferen Schmelzpunkt auf.[40]

[34] Vgl. Sitterwerk (2014), https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1507
[35] Vgl. Büll (1977), S.231
[36] Vgl. Ebd., S.231
[37] Vgl. Ebd., S. 232
[38] Vgl. Sitterwerk (2014), https://materialarchiv.ch/ma:material_1525
[39] Vgl. Ebd.
[40] Vgl. Ebd.

3. Mikrokristalline Wachse: Struktur und Eigenschaften

Der Ausgangsstoff der mikrokristallinen Wachse ist fossiles, organisches Material, es handelt sich also um eine Unterart der Mineralwachse. Im Handel sind sie unter Namen wie z.B. „Cosmoloid 80 Hard“ oder „Tecerowachs“ erhältlich. Im frühen 20. Jh. wurden sie aus der Raffinierung des Erdwachses, dem sog. Ozokerit oder Ceresin gewonnen.[41] Heute werden mikrokristalline Wachse als Nebenprodukte der Erdölraffination gewonnen, ähnlich wie die Paraffine, welche den makrokristallinen Wachsen zugeordnet werden.[42] Sie fallen entweder bei der Vakuumdestillation an oder sedimentieren während der Lagerung oder dem Transport von Erdöl. Die Rückstandsöle der Vakuumdestillation werden zu dem Rohstoff, dem sogenannten Petrolatum, weiterverarbeitet. Die sedimentierten Wachse müssen für die Gewinnung des mikrokristallinen Wachs entasphaltiert werden.[43] Sie bestehen zum Großteil aus verzweigtkettigen Kohlenwasserstoffen mit einer mikrokristallinen Gefügestruktur.[44] Sie sind beständig gegenüber Wasser, jedoch in zahlreichen organischen Lösemitteln löslich. Gegenüber Umwelteinflüssen sind sie mittelfristig beständig, neigen bei längerer Lichteinstrahlung jedoch zur Oxidation und vergilben.[45] Ihr Einsatzspektrum reicht von der Herstellung von Tinten, Überzügen, Asphalt bis hin zu Bindemitteln u.v.m. . In der Konservierung spielen sie eine wichtige Rolle, so werden sie bspw. als Oberflächenschutz für Metalle in der Archäologie und bei Denkmälern unter freiem Himmel verwendet.[46]

„Mikrokristallines Wachs ist eine Sammelbezeichnung für eine Reihe von Produkten, deren Nomenklatur je nach Anwendungsbereich unterschiedlich ist. Viele Ältere Namen, die ursprünglich auf die Herkunft der Rohstoffe verwiesen, werden heute für andere Materialien verwendet.“[47]

Daher ist die Nomenklatur oft undurchsichtig. So werden sie oft auch als (mikrokristalline) Paraffinwachse beschrieben, was leicht zu Verwechslung mit den makrokristallinen Paraffinwachsen führen kann. Bei dem Begriff „Mikrowachse“ ist ebenfalls Vorsicht geboten. Zwar sind bei Verwendung dieses Begriffs häufig die mikrokristallinen Wachse gemeint, es kann sich jedoch ebenso um rezente oder auch synthetische Wachse handeln, die in einem Mahlverfahren mikronisiert wurden.

[41] Vgl. Büll (1977), S. 202
[42] Vgl. Magnusson (2017), S.18
[43] Vgl. Sitterwerk (2014), https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1506/
[44] Vgl. Ebd.
[45] Vgl. Ebd.
[46] Vgl. Magnusson (2017), S. 18
[47] Zit. nach Magnusson (2017), S. 18

Im Allgemeinen werden mikrokristalline Wachse in harte und plastische Wachse unterteilt.[48] Der Unterschied liegt in der Molekularstruktur begründet, welche mit denen von Polymeren verglichen werden kann.[49] Die Struktur wird durch die Form der Bindungen der Molekülketten untereinander definiert: linear, verzweigt, vernetzt, netzwerkartig (siehe Abb. 2., S.12). Die Bestandteile der mikrokristallinen Wachse können anhand dieser Strukturen in n- Paraffine(linear), Iso-Paraffine(verzweigt), Naphthene(vernetzt) und di- und tricyclische Paraffine (netzwerkartig) charakterisiert werden.[50]

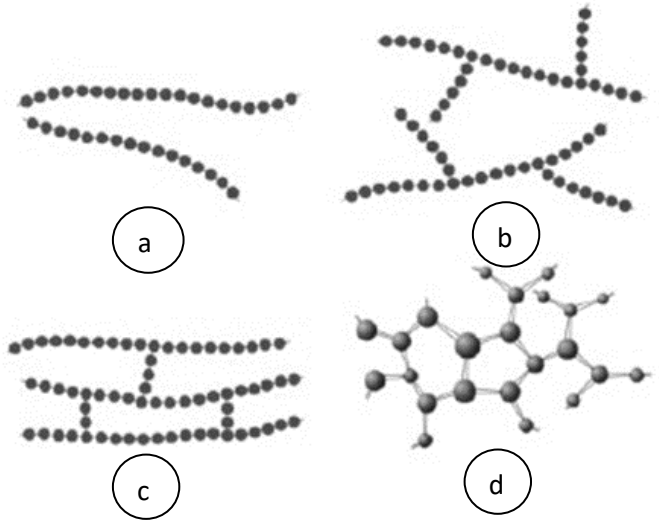


Abbildung 2. Schematische Darstellung der Strukturformen von Polymeren: a) linear b) verzweigt c) vernetzt d) Netzwerk, aus Crowley et. al (2008)

Die Struktur ist insofern von besonderer Wichtigkeit, da sie ausschlaggebend für den Grad der Kristallisation[51] ist. Lineare Polymere kristallisieren leicht, während solche mit Verzweigungen eine ausgedehnte Kristallisation behindern.

Mikrokristalline Wachse setzten sich, ähnlich wie die Paraffinwachse, aus einem Gemisch gesättigter, bei Raumtemperatur zumeist fester Kohlenwasserstoffe zusammen (siehe Tab. 1., S. 13). Dominierend sind im Gegensatz zu den Paraffinen jedoch die verzweigten Iso-Paraffine und ringförmigen Kohlenwasserstoffe.[52] Die Molmassen liegen bei den plastischen mikrokristallinen Wachsen zwischen 500 und 950. Bei den Hartwachsen zwischen 550 und 1000.[53] *„Da die Molmassen und Schmelzpunkte der einzelnen Komponenten der Mikrowachse höher liegen als bei den Hartparaffinen, treten keine Verluste durch Sublimation auf.“*[54]

[48] Vgl. Crowley et al. (2008), S. 5
[49] Vgl. Ebd.
[50] Vgl. Koller et al. (2000), S. 233
[51] Kristallisation bedeutet hier, inwieweit eine dreidimensionale Ordnung auf atomarer Ebene herrscht, basierend auf definierten, geordneten, chemischen und geometrischen Strukturen, vgl. Crowley et al. (2008), S. 5
[52] Vgl. Koller et al. (2008), S. 233
[53] Vgl. Koller et al. (2000), S. 234
[54] Zit. nach Koller et al. (2000), S. 234

	Plastische Mikrowachse		**Hartmikrowachse**	
Kohlenwasserstoff-Typ	**Gew. %**	**Kettenzahl**	**Gew. %**	**Kettenzahl**
n- Paraffine	10-25	35-42	25-35	35-45
Iso-Paraffine	38-45	35-50	20-28	35-50
Naphthene (monocyclisch)	38-45	35-50	20-28	35-50
di- und tricyclische Paraffine	---	---	20	45-55

Tabelle 1. Kohlenwasserstoff-Bestandteile in plastischen und harten mikrokristallinen Wachsen nach Koller et al. (2000)[55]

Das Ausmaß der Kristallisation beeinflusst demnach die physikalischen Eigenschaften des Wachses. Je kristalliner ein Wachs, desto höher sind Härtegrad und Sprödigkeit.[56] Eine Testreihe von Agrawell und Joshi zeigte, dass ein höherer Grad der Verzweigungen der Molekülketten, weichere und plastischere Wachse hervorbringt.[57]

„Die kristallisationshemmenden, stark verzweigten Iso-Paraffine und ringförmigen Naphthene lassen keine großen Kristalle zu und erklären somit die mikrokristalline Struktur."[58]

Neben der Struktur der Molekülketten hängt die Kristallisation auch von der Abkühl-Geschwindigkeit beim Erstarren ab. Molekülketten benötigen ausreichend Zeit, um sich beim Erstarren in einer geordneten Reihenfolge zu kristallinen Strukturen auszurichten.[59]

Mit steigender Anzahl der Verzweigungen ändern sich also Eigenschaften wie Schmelzpunkt, Erstarrungspunkt, Tropfpunkt, Härte und Sprödigkeit. Warum aber sind die genannten Eigenschaften wichtig für die Charakterisierung der mikrokristallinen Wachse, bzw. Wachse allgemein, und welchen Aussagegehalt haben sie?

[55] Vgl. Koller et al. (2000), S. 234
[56] Vgl. Crowley et al. (2008), S. 6
[57] Vgl. Ebd.
[58] Zit. nach Koller et al. (2000), S. 234
[59] Vgl. Crowley et al. (2008), S. 5

Der **Schmelzpunkt** bezeichnet den Punkt, an dem ein Großteil der mikrokristallinen Moleküle den Aggregatzustand von fest zu flüssig wechseln. Er wird in der Praxis häufig mit dem Tropf- und Erstarrungspunkt verwechselt.[60]

Der **Tropfpunkt** bezeichnet die Temperatur, bei der ein Stoff unter genormten Prüfbedingungen zu fließen beginnt, er ist daher kennzeichnend für die Schmelzbarkeit von Feststoffen.[61] Nach DIN ISO 2176 wird der Tropfpunkt in einer Temperaturskala angegeben.

Der **Erstarrungspunkt** bezeichnet die Temperatur ab dem das zuvor geschmolzene Wachs nicht mehr fließfähig ist. Der Erstarrungspunkt liegt zumeist niedriger als der Tropfpunkt. Je komplexer die Molekularstruktur, desto größer ist der Abstand der beiden Punkte.[62]

Die Härte des erkalteten Wachses wird mit der sog. **Nadelpenetration** ermittelt. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren bei dem, nach DIN 51579, eine Nadel mit genormten Abmessungen in einer definierten Geschwindigkeit und Temperatur in das Wachs gedrückt wird. Dabei wird die Eindringtiefe der Nadel in Zehntelmillimetern gemessen. Je niedriger die Zahl ist, desto härter ist das Wachs.[63]

Weiterhin sind für die Charakterisierung noch folgende Eigenschaften zu benennen:

Der **Ölgehalt** gibt den Grad der Raffinierung an und wird in Prozent angegeben. Dabei gilt: je niedriger die Zahl, desto reiner das Wachs: <0,5 % vollraffiniert; 0,5 – 1,5% halbraffiniert; 1,5 – 3 % raffiniert.[64]

Die **Viskosität** bezeichnet die Fließfähigkeit der Wachse in geschmolzener Form. Die Produktangaben bezüglich der Viskosität haben jedoch keinen Aussagegehalt über deren Eignung bspw. als Beschichtungssysteme. Dies liegt darin begründet, dass die entsprechenden Werte bei Temperaturen weit über dem Tropfpunkt ermittelt werden.[65] Bei Verfahren wie der Wachsausschmelze sind diese Angaben jedoch ausschlaggebend für die Auswahl eines geeigneten Wachses.

Die **Farbe** der mikrokristallinen Wachse reicht von farblos bis gelblich-braun. Aufgrund des hohen Anteils an Iso-Alkanen sind sie jedoch anfällig gegenüber Oxidation und neigen zur Vergilbung.[66]

[60] Vgl. Magnusson (2017), S. 19
[61] Vgl. Neumüller (1988), S. 4378
[62] Vgl. Magnusson (2017), S.19
[63] Vgl. Ebd.
[64] Vgl. Sitterwerk (2014), https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1506/
[65] Vgl. Magnusson (2017), S.19
[66] Vgl. Ebd.

Das nachstehende Diagramm zeigt den Tropf- und Erstarrungspunkt, sowie die Werte der Nadelpenetration (Rot markiert) von verschiedenen handelsüblichen Wachsen (siehe Abb. 3, S. 15).

Bei Polarit A55 und Polarit G54/56 handelt es sich um Paraffine. Die Produkte rechts neben dem Bienenwachs sind handelsübliche, mikrokristalline Wachse, die in der Konservierung verwendet werden.

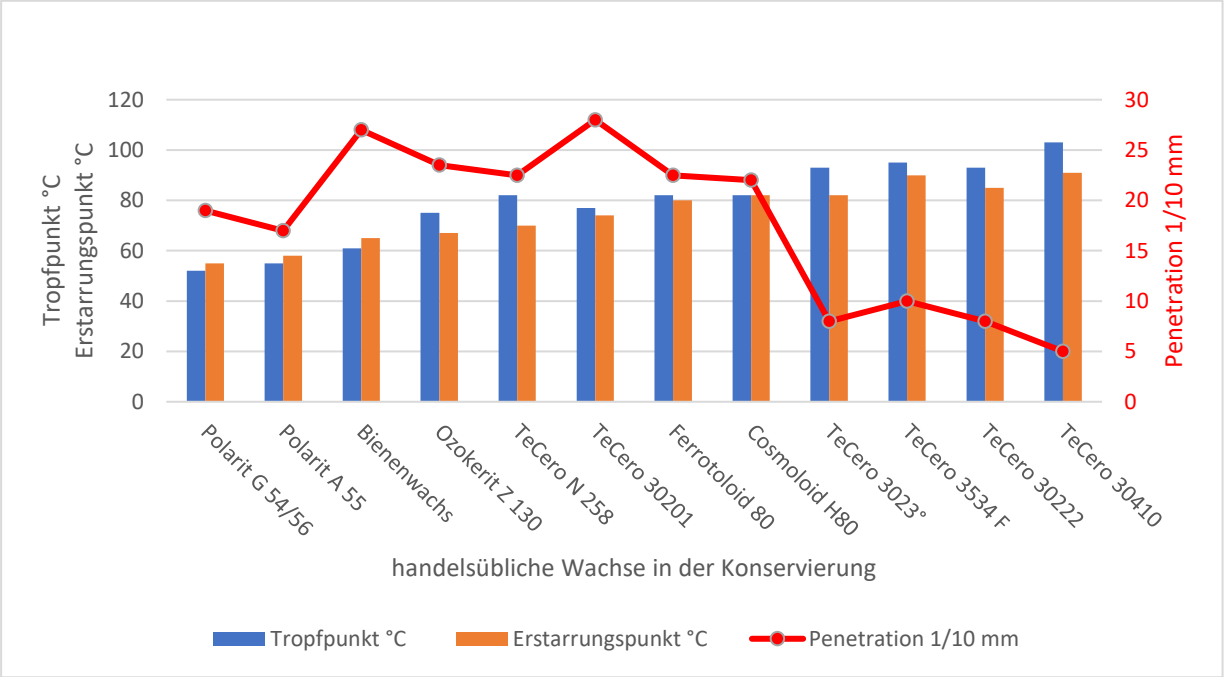


Abbildung 3. Diagramm zu Angaben über Tropf- und Erstarrungspunkt sowie der Nadelpenetration von handelsüblichen Wachsen in der Konservierung. Nach Vorbild: Yngve Magnusson (2017)[67]

[67] Vgl. Magnusson (2017), S. 19

4. Der Einsatz von mikrokristallinen Wachsen zur Konservierung von Metalloberflächen

Mikrokristalline Wachse haben sich seit den 1970er Jahren als Korrosionsschutzmittel für Metalle im Außenbereich etabliert.[68] Im folgenden Kapitel soll ein Verständnis darüber vermittelt werden, warum sich mikrokristalline Wachse in diesem Teilbereich der Konservierung bewährt haben. Zu diesem Zweck wird zunächst eine Einführung in die Werkstoffkunde der Metalle und deren typische Korrosionserscheinungen gegeben. Dies soll unter Hinzunahme des vorangegangenen Kapitels über die Struktur und Eigenschaften der mikrokristallinen Wachse, einen Bezug zu dem Thema der Konservierung von Metalloberflächen schaffen. Weiterhin wird auf die Anforderungen an die Konservierung von Metalloberflächen eingegangen mit besonderem Augenmerk auf solche unter freier Bewitterung, da diese das Haupteinsatzgebiet der mikrokristallinen Wachse in der Metallkonservierung darstellt. Anschließend wird mit der Vorstellung der Einsatzgebiete und Wirkungsweise ein direkter Bezug zu den mikrokristallinen Wachsen hergestellt. Anwendungsbezogen werden noch die verschiedenen Möglichkeiten der Applikation vorgestellt und durch Beispiele ergänzt. Da die ästhetische Veränderung der Metalloberfläche in der Fachwelt unterschiedlich bewertet wird, werden abschließend die unterschiedlichen Auffassungen darüber im Kurzen aufgezeigt und mit Bildbeispielen verdeutlicht. So soll ein praxisnaher Eindruck über den Einsatz der mikrokristallinen Wachse in der Verwendung an Metalloberflächen vermittelt werden.

4.1. Exkurs: Eine kurze Einführung in die Werkstoffkunde von Metall

Die meisten Metalle werden aus Erzen gewonnen. Die Erze sind Verbindungen von Metallen und anderen Elementen aus dem Erdreich. Sie werden i.d.R. bergmännisch abgebaut. Die Isolierung des reinen Metalls aus den Erzen ist mit einem großen Energieaufwand verbunden.

Die Metalle können nach unterschiedlichen Kriterien unterteilt werden. Sie können anhand ihres Reaktionsvermögens, im Besonderen gegenüber Sauerstoff, in edle und unedle Metalle unterschieden werden. Zu den edlen Metallen zählen z. B. Gold, Silber und Kupfer da sie reaktionsträge sind. Sie korrodieren daher weniger leicht und können auch in der Natur in Reinform vorkommen.[69]

[68] Vgl. Koller et. Al (2000), S. 234
[69] Vgl. Koesling (1999), S. 132

Zu den unedlen Metallen zählen Elemente wie Eisen, Zink, Aluminium oder Blei, da sie über ein hohes Reaktionsvermögen verfügen und folglich eine starke Neigung zur Bildung von Korrosionsprodukten aufweisen. Nach dieser Klassifizierung können die Metalle anhand ihrer Reaktionsfreudigkeit in der sog. Spannungsreihe angeordnet werden.[70]Andere Klassifizierungen orientieren sich an der Dichte, anhand derer die Metalle in Leicht- und Schwermetalle unterteilt werden oder an der technischen Unterteilung zwischen Eisen- und Nichteisenmetallen. Buntmetalllegierungen stellen hier eine Untergruppierung der Nichteisenmetalle dar.[71]

Wie erwähnt benötigt es einen hohen Energieaufwand, um die Metalle aus den Erzen zu isolieren. Es handelt sich daher bei Metallen um energiereiche Stoffe. Da jedoch, wie aus der grundlegenden Physik bekannt, alle Stoffe einen möglichst energiearmen Zustand anstreben, neigen vorallem die unedlen Metalle dazu, erneut Verbindungen einzugehen. Dieser natürliche Zersetzungsprozess ist es, was wir unter Korrosion verstehen (siehe Abb.4, S.17).[72]

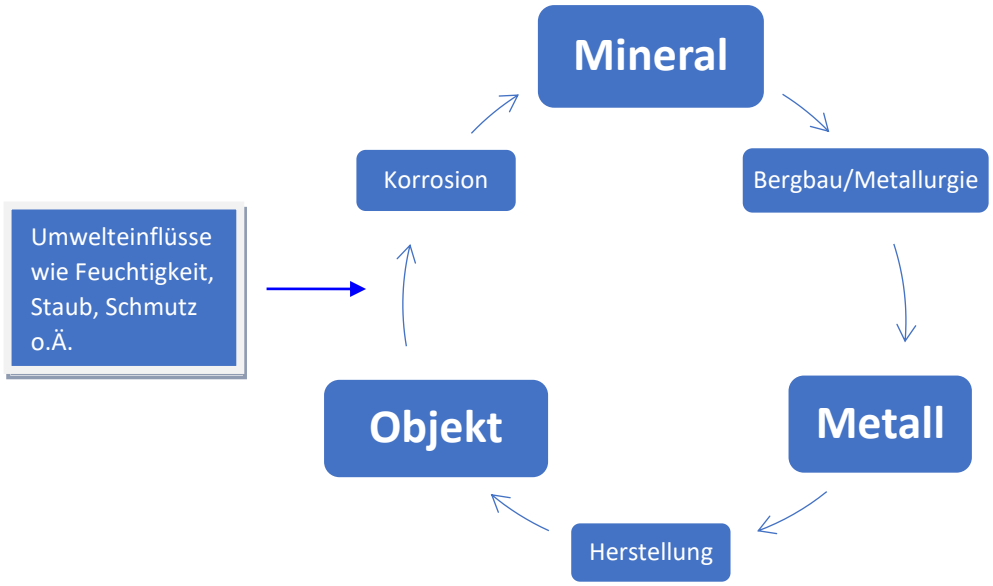


Abbildung 4. Metallkreislauf nach Vorbild Bernhard Mai (2007) [73]

Weiterhin ist allen Metallen ein spezifisches Aussehen von glänzender Ausprägung eigen, welches auch in sehr dünner Schichtdicke noch lichtundurchlässig ist. Dieser metallische Glanz ist auf das hohe Reflexionsvermögen dieser Stoffgruppe zurückzuführen. Die Undurchlässigkeit für Licht liegt der dichten Struktur der Metallgitter zugrunde.[74]

[70] Vgl. Koesling (1999), S. 132
[71] Vgl. Ebd.
[72] Vgl. Ebd.
[73] Vgl. Mai (2007), Einführung II
[74] Vgl. Koesling (1999), S. 132

Zudem besitzen alle Metalle eine hohe Festigkeit, sind gleichzeitig jedoch unter Erhitzen gut verformbar. I. d. R. lassen sich metallische Stoffe innerhalb bestimmter Temperaturbereiche mittels Walzen, Ziehen, Pressen, Schmieden o.ä. bearbeiten.[75] In Bezug auf die Konservierung und Restaurierung ist die wichtigste Eigenschaft der Metalle ihre Fähigkeit elektrischen Strom und Wärme zu leiten. *„Der Stromtransport ist dabei weder mit einem Stofftransport noch mit Bindung von Zersetzungsprodukten verbunden, wie z.B. im Fall der Elektrolyte.“*[76] Auch im flüssigen Aggregatzustand bleiben die o.g. Eigenschaften erhalten. Lediglich im gasförmigen Zustand liegen die Eigenschaften nicht mehr vor. Dies liegt daran, dass Metalldämpfe i. d. R. einatomig sind, sprich die Metallgitterstruktur aufgelöst ist.[77]

Wie bereits angedeutet, liegen die Eigenschaften der Metalle in deren Atomanordnung in Metallgittern zugrunde. Alle Metalle gehören der Gruppe der Elemente an, welche Elektronen leicht abgeben.[78] So entstehen positiv geladene Atomrümpfe, die als Ionen bezeichnet werden. Wie aus der Physik bekannt, stoßen sich gleichnamige Ladungen ab, während sich ungleichnamige Ladungen anziehen. Der Zusammenhalt in kristallinen Strukturen wie z.B. der von NaCL (Kochsalz) beruht auf diesem Prinzip.[79]

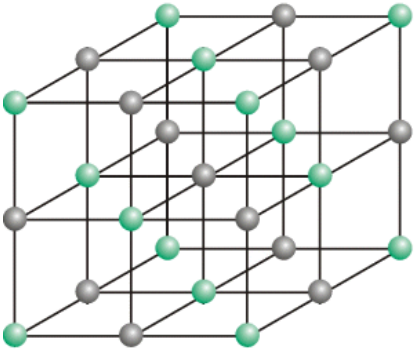


Abbildung 5. Struktur des Ionengitters von Natriumchlorid (Kochsalz)[80]

Im Gegensatz zu der klassischen Gitterstruktur bestehen Metalle jedoch aus ausschließlich positiv geladenen Ionen ohne negativ geladene Bindungspartner, die für den Zusammenhalt der Gitterstruktur sorgen. Im Metallgitter wird die Gitterstruktur nicht etwa durch negativ geladene Bindungspartner bewirkt, sondern durch die freien Elektronen, welche zwischen den Gitterhohlräumen diffundieren.[81]

[75] Vgl. Koesling (1999), S. 132
[76] Zit. nach Koesling (1999), S.132
[77] Vgl. Koesling (1999), S. 132 f.
[78] Vgl. Ebd., 133
[79] Vgl. Ebd.
[80] Vgl. Chemgapedia.de
[81] Vgl. Ebd.

Dieser Zustand wird dadurch erreicht, dass die Elektronen der äußeren Schale der Atome, der sog. Valenzschale, vollständig abgegeben werden. So sind die Elektronen zwar stark delokalisiert, stehen aber weiterhin in Wechselwirkung zu den Metallionen.[82] *„Darin liegt der Unterschied zur Ionisation im Ionenkristall.“*[83] Durch diese gemeinsame Nutzung der Elektronen im Ionenverband werden die Abstoßungsprozesse der einzelnen Ionen aufgehoben. Dies führt zu einer deutlich dichteren Struktur als sie im normalen Ionengitter möglich ist.[84]

Die drei wichtigsten Gittertypen der Metalle sind das kubisch-flächenzentrierte-, das kubisch-raumzentrierte- und das hexagonale Gitter.[85]

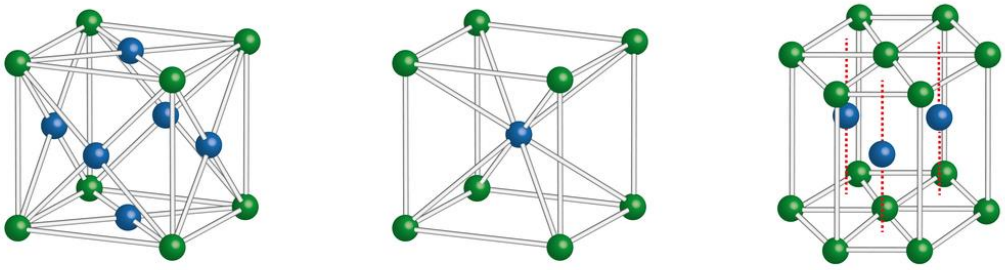


Abbildung 6. von rechts nach links: kubisch-flächenzentriert, kubisch-raumzentriert, hexagonal[86]

Die unterschiedliche Anordnung der Ionen im Metallgitter wirkt sich direkt auf deren Eigenschaften aus. Die Metalle kubisch-flächenzentrierter Struktur besitzen eine deutlich bessere Verformbarkeit als solche kubisch-raumzentrierter Strukturen.[87] Die Metalle hexagonaler Struktur zeichnen sich durch eine hohe Sprödigkeit aus.[88] Einige Metalle können auch je nach Temperatur und Druck in unterschiedlichen Modifikationen auftreten. So ist Eisen unterhalb von 911°C bspw. im kubisch-raumzentrierten Gitter kristallisiert, geht jedoch oberhalb dieser Temperatur in die kubisch-flächenzentrierte Form über. Deshalb muss Eisen erhitzt werden, um schmiedbar zu sein. Dieses Verhalten der Umwandlung der Gitterstruktur nennt man Allotropie.[89] Die nachstehende Tabelle zeigt die Gruppierung von geläufigen Metallen in die drei Gittertypen (vgl. Tab. 2., S. 20).

[82] Vgl. Koesling (1999), S. 133
[83] Zit. nach Koesling (1999), S.133
[84] Vgl. Ebd., S. 134
[85] Vgl. Ebd.
[86] Vgl. Metalltechnik Online, http://www.wolfhesse.de/courses/werkstoffe/lessons/herstellung-und-innerer-aufbau-von-eisen-und-stahl/topic/gefuege-und-kristalle/
[87] Vgl. Koesling (1999), S. 134
[88] Vgl. Ebd.
[89] Vgl. Ebd., 135

Kubisch-flächenzentriert	Kubisch-raumzentriert	Hexagonaler Typ
Kupfer	α -Eisen	Magnesium
Aluminium	Chrom	Zink
γ -Eisen	Wolfram	Titan
Nickel	Alkalimetalle	Cadmium
Silber	Erdalkalimetalle	Berylium
Gold		

Tabelle 2. Beispiele von Metallen zu den drei Gittertypen, nach Volker Koesling[90]

Zusammengefasst sind „[…] *die freie Beweglichkeit und leichte Verfügbarkeit der Elektronen also die Ursache für die gute thermische und elektrische Leitfähigkeit der Metalle*.“[91]

Gleichzeitig resultiert daraus jedoch ein hohes Reaktionsvermögen mit elektronenliebenden Bindungspartnern. Hieraus erklärt sich die Neigung zur Bildung von Zersetzungsprodukten der Korrosion.[92] Die hohe Dichte und Festigkeit sowie die Undurchdringlichkeit für Licht liegt ebenfalls in der dichten Struktur des Metallgitters begründet. Die Verformbarkeit der Metalle unter mechanischer Bearbeitung resultiert aus der Verschiebbarkeit der einzelnen Gitterschichten gegeneinander.[93]

Metallische Atomverbände können jedoch nicht nur ausschließlich in Reinform auftreten, sondern auch Atome unterschiedlicher Elemente enthalten. Solche Mehrstoffsysteme werden, sofern zumindest eine metallische Komponente vorliegt, als Legierungen bezeichnet.[94] Voraussetzung für die Ausbildung einer Legierung ist eine Mischbarkeit in der Schmelze. Legierungen werden in Mischkristalle und Kristallgemische unterteilt.[95] Mischkristalle sind homogene Legierungen, die nur eine Phase mit einem einheitlichen Kristallgitter enthalten.[96] Kristallgemische sind heterogene Legierungen deren Gefüge mehrere metallische Phasen in Form mehrerer Kristallarten aufweisen.[97] Das sog. Zustands- oder Phasendiagramm gibt Angaben über das Verhalten der Legierungen in Abhängigkeit von der Konzentration der Komponenten und der Temperatur an.[98]

[90] Vgl. Koesling (1999), S. 136
[91] Zit. nach Koesling (1999), S. 136
[92] Vgl. Ebd.
[93] Vgl. Ebd. S. 136
[94] Vgl. Ebd., S. 137
[95] Vgl. Ebd.
[96] Vgl. Ebd.
[97] Vgl. Ebd., S. 138
[98] Vgl. Ebd.

Dies kann in Hinblick auf die Restaurierung und Konservierung von Wichtigkeit sein, da sich aus den Gefügeschliffen Aussagen zur Herstellungstechnologie herleiten lassen. So kann bspw. das Schadenspotenzial von Wärmebehandlungen besser eingeschätzt werden oder ein besseres Verständnis über die Ursache der Korrosionsvorgänge erlangt werden.[99]

Das Feld der Legierungen stellt jedoch einen noch weitaus tiefer gegliederten Teil der Werkstoffkunde der Metalle dar. Die Buntmetall-Legierungen, welche der Restaurator*in am häufigsten begegnen, sind die der Kupferlegierungen, wie z.B. Bronze (Kupfer-Zinn-Legierung) oder Messing (Kupfer-Zink-Legierung).[100] Die Massenanteile der jeweiligen Metalle in historischen Buntmetall-Legierungen können je nach Entstehungszeit, Herstellungstechnik und Herkunft der Ausgangsstoffe variieren. Daher können keine einheitlichen Aussagen über die exakte Zusammensetzung historischer Buntmetalle getroffen werden.[101] Die nachstehende Abbildung zeigt beispielhaft die wichtigsten Buntmetall-Legierungen (siehe Abb. 7, S.21).



Abbildung 7. Bildbeispiele und chemische Zusammensetzung von geläufigen Buntmetall-Legierungen, Bildquelle: Arbeitsblätter Legierungen (Expertenwissen)

[99] Vgl. Koesling (1999), S. 142
[100] Vgl. Blumer et al. (1994), S. 21- 26
[101] Vgl. Ebd.

4.1.1. Korrosionserscheinungen

Um die Anforderungen an die Konservierung von Metalloberflächen zu verstehen, muss zunächst ein grundsätzliches Verständnis über die am häufigsten auftretenden Korrosionserscheinungen auf Metalloberflächen geschaffen werden.

Die am häufigsten auftretende Form der Korrosion ist die elektrochemische Korrosion, welche sich in unterschiedlichen Formen und Schadensbildern äußern kann. Grundlegend kennzeichnet sie sich durch das Vorhandensein elektrisch leitender Flüssigkeit, der sog. Elektrolyte, sowie durch die Vorgänge des Ladungs- und Stoffaustauschs zwischen Metall und Elektrolyte aus.[102] Substanzen wie Staub, Salze, Metallabrieb, Handschweiß etc. sind unter normalen Bedingungen auf allen Metalloberflächen vorhanden. Diese bilden in wässriger Lösung Ionen. Daher entsteht durch den Niederschlag von Luftfeuchtigkeit auf Metalloberflächen ein Film leitfähiger Elektrolyte. [103]

Die elektrochemischen Zersetzungsprozesse werden durch die Lösungs- und Abscheidungsvorgänge der Ionen zwischen Anode und Kathode bedingt. *„Die Lösungsprozesse vollziehen sich in der Weise, dass Atome Elektronen abgeben, die im Metall verbleiben und selbst als positive Ionen in den Elektrolyten übertreten.“*[104] Die Korrosionsprodukte entstehen, indem Ionen aus der Lösung zu der Grenzfläche wandern und durch Aufnahme von Elektronen zu ungeladenen Atomen umgewandelt werden. Diese Atome sind im Elektrolyten unlöslich und legen sich auf der Metalloberfläche nieder. Bei dem Lösungsvorgang handelt es sich um den sog. anodischen Vorgang. Der Bereich, an dem dieser Vorgang abläuft wird als Anode bezeichnet. Der Abscheidungsprozess hingegen wird als kathodischer Vorgang bezeichnet und der Abscheidungsbereich als Kathode.[105]

Bei dem anodischen Vorgang handelt es sich demnach um eine Oxidation, bei dem kathodischen Vorgang im Umkehrschluss um eine Reduktion. Zwischen Anode und Kathode kommt es also über die elektrisch leitende Verbindung des metallischen Kontakts zum Austausch von Elektronen. Die Anode und Kathode können dabei sowohl auf einer gemeinsamen Oberfläche liegen wie auch räumlich voneinander getrennt sein. Voraussetzung für diese Vorgänge ist lediglich, dass ein geschlossener Stromkreis für Elektronen und Ionen über eine metallische Brücke und den Elektrolyten gegeben ist.[106]

[102] Vgl. Koesling (1999), S. 145
[103] Vgl. Ebd., S. 146
[104] Zit. nach Koesling (1999), S. 146
[105] Vgl. Ebd.
[106] Vgl. Ebd.

Solche geschlossenen Stromkreise können bspw. bei konstruktivem Kontakt unterschiedlicher Metalle entstehen. Bei diesen Verbindungen treten häufig massive Korrosionserscheinungen der sog. Kontaktkorrosion auf.[107]

Diese entsteht dadurch, dass das unedlere Metall bei Kontakt zum edleren als Anode fungiert und so aufgrund der Wechselwirkung korrodiert. Das edlere Metall, welches sich hier als Kathode verhält, ist weitgehend vor der Korrosion geschützt. *„Die Tendenz, beim Kontakt mit Wasser, positiv geladene Ionen zu bilden, die den Metallverband verlassen und in […] Lösung übertreten, ist allen Metallen eigen.“*[108] Die abgegebenen Elektronen bleiben im Metall zurück. So entsteht zwischen dem nun negativ geladenen Metall und der positiv geladenen Lösung ein elektrisches Feld. Dieses bringt die Metallauflösung schließlich zum Stillstand. Es entsteht eine sog. Potentialdifferenz zwischen Metall und Lösung.[109] Dabei gilt umso größer die Auflösungstendenz des Metalls, desto größer die Potentialdifferenz.

Aber nicht nur durch den konstruktiven Kontakt von Metallen kann eine solche elektrochemische Korrosion ausgelöst werden. Aufgrund der heterogenen Struktur vieler Metalle und Legierungen kann es auch innerhalb der Gefügestruktur zu Wechselwirkungen zwischen Anode und Kathode kommen.[110] Die Bestandteile des edleren Legierungspartners verhalten sich hier als Kathode, die anderen als Anode (siehe Abb. 8., S.23).

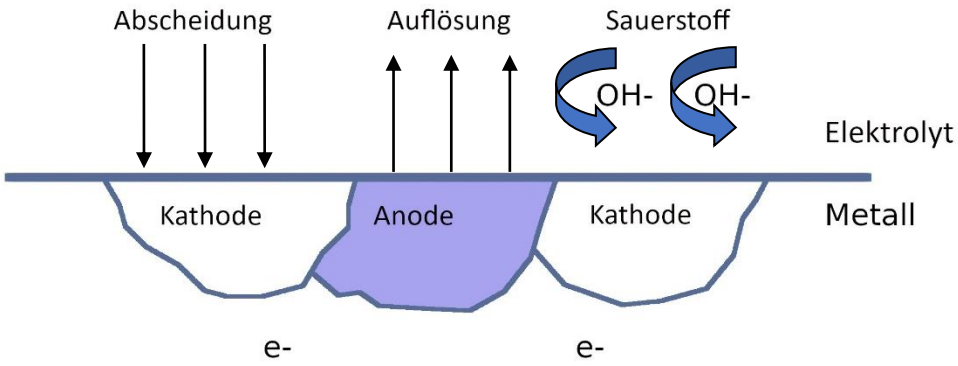


Abbildung 8. Schematische Darstellung der Wechselwirkung zwischen Anode und Kathode in einem heterogenen Metallgefüge; nach Vorbild Volker Koesling (1999)[111]

Auch durch unterschiedlich starke Oxidschichten auf der Metalloberfläche oder ursprünglich als Schutz aufgetragene Überzüge können solche Potentialdifferenzen hervorgerufen werden. Derartige Prozesse führen häufig zum sog. Lochfraß (siehe Abb. 10., S. 25).[112]

[107] Vgl. Koesling (1999), S. 146
[108] Zit. nach Koesling (1999), S. 146
[109] Vgl. Ebd., S. 147
[110] Vgl. Ebd.
[111] Vgl. Ebd., S. 148

Eine weitere Form der elektrochemischen Korrosion ist die atmosphärische Korrosion. Trockener Sauerstoff greift Metalle im Allgemeinen nicht an, da eine schützende Oxidschicht auf der Metalloberfläche gebildet wird.[113] In Kombination mit Feuchtigkeit kann bei Überschreitung von Werten der relativen Luftfeuchte zwischen 55 und 70% jedoch ein Zersetzungsprozess einsetzten.[114] Ausprägung und Voranschreiten dieser Korrosion ist jedoch stark abhängig von Bedingungen wie dem Verschmutzungs- und Erhaltungsgrad sowie dem Vorhandensein von Schadstoffen in der Luft. I. d. R. ist die Bildung von Kondenswasser auf metallischen Oberflächen ein stark korrosionsfördernder Faktor.[115] Die nachstehende Abbildung zeigt schematisch den Ablauf der atmosphärischen Korrosion ohne Berücksichtigung des Einflusses von Wasser (siehe Abb. 9., S. 24).

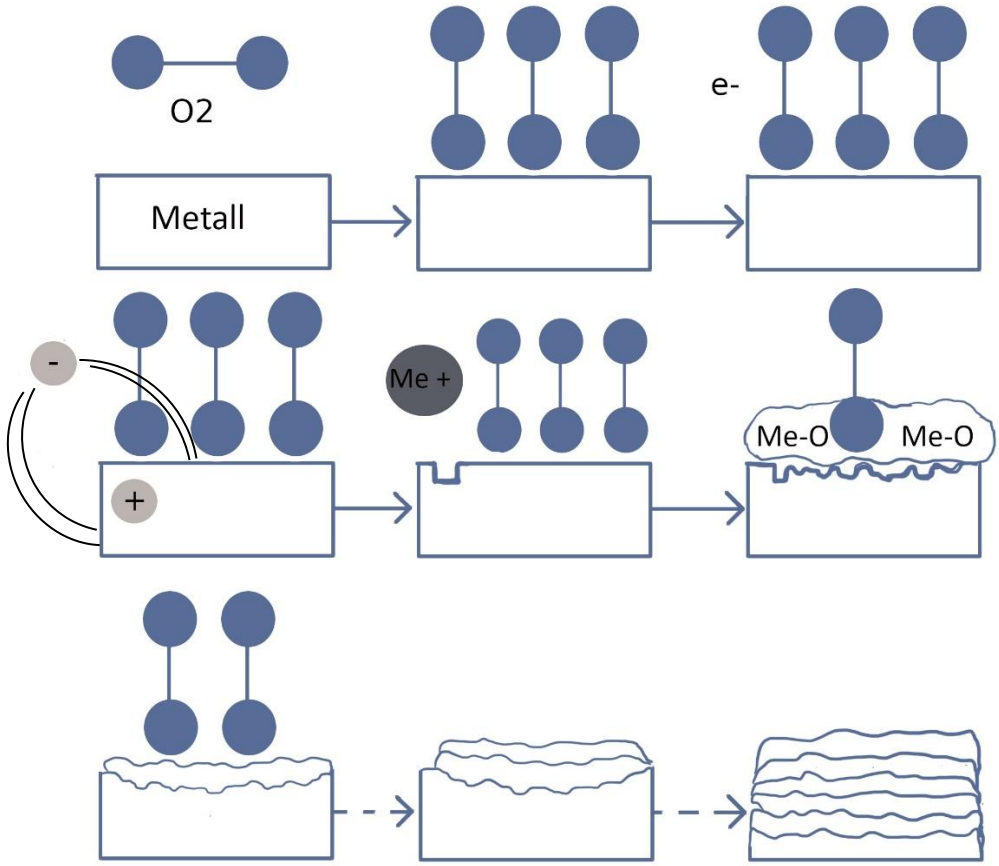


Abbildung 9. Schematische Darstellung der Atmosphärischen Korrosion nach Vorbild Volker Koesling (1999)[116]

Infolge mehrerer solcher Reaktionszyklen bildet sich eine Kruste aus Korrosionsprodukten und die Originalsubstanz nimmt deutlich ab. Da so auch Spannungen im Materialgefüge entstehen, begünstigt dies weitere Schäden.[117]

---

[112] Vgl. Koesling (1999), S. 148
[113] Vgl. Ebd., S. 150
[114] Vgl. Ebd., S. 151
[115] Vgl. Ebd., S. 150
[116] Vgl. Ebd.

Schematische Darstellung verschiedener Arten und Erscheinungsformen der Korrosion.

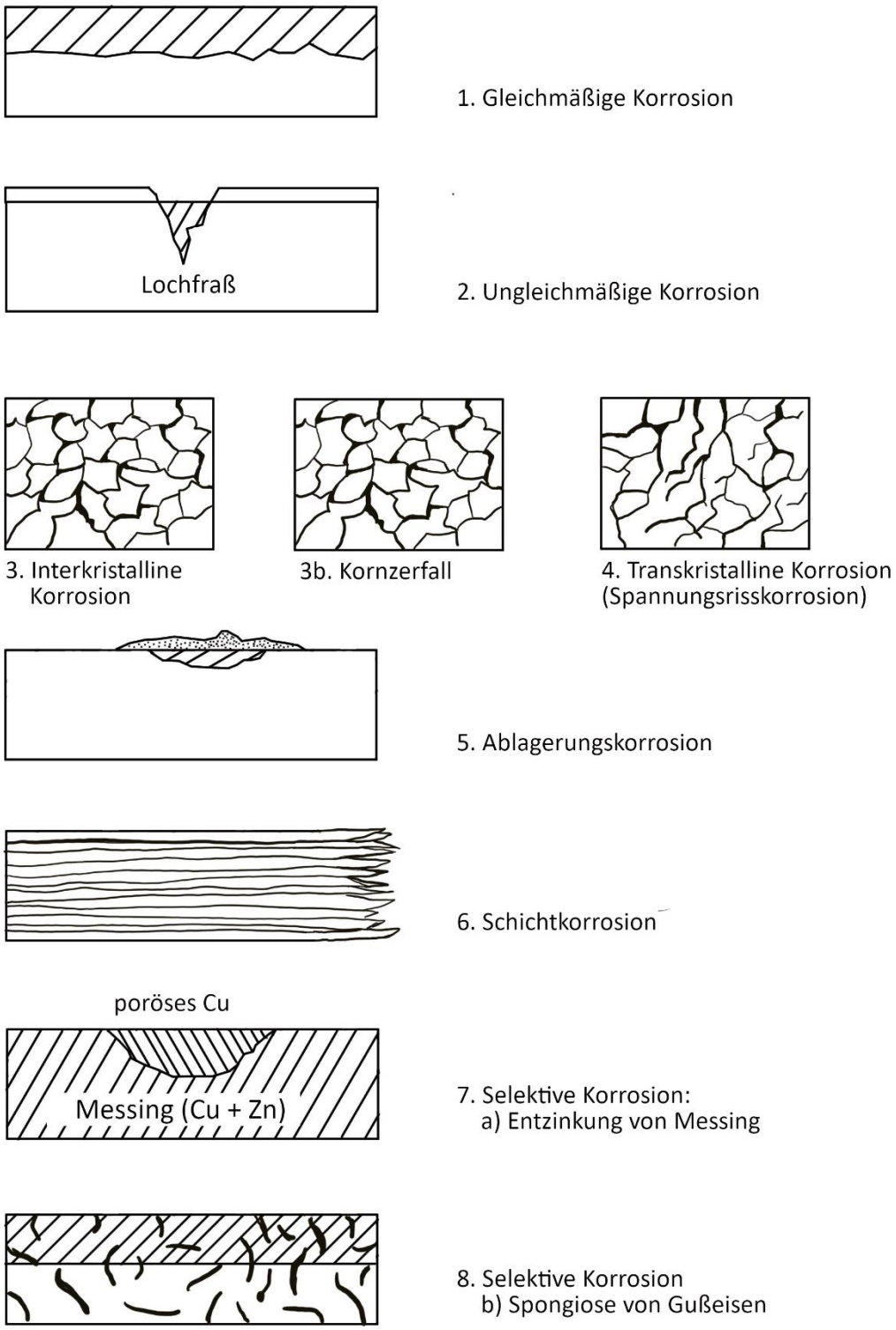


Abbildung 10. Schematische Beispiele für geläufige Korrosionserscheinungen nach Vorbild Wilhelm Bauer (1994)[118]

[117] Vgl. Ebd., S. 151
[118] Vgl. Bauer (1994), S. 41

4.2. Anforderungen an die Konservierung von Metalloberflächen

Hauptanforderung an konservierende Oberflächenbeschichtungen für Metalle ist es, den Stoffaustausch zwischen Metall und Elektrolyte weitmöglichst zu unterbinden und so die Korrosionsprozesse effektiv vorzubeugen.

Da Metalle und Legierungen unentwegt dazu neigen die o.g. Zersetzungsprozesse zu durchlaufen, um einen energieärmeren Zustand zu erreichen, ist aus restauratorischer Sicht eine zyklische Pflege der Metalloberflächen von größter Wichtigkeit.[119] Dies wird auch bereits Mitte des 19. Jh. von der Deutschen Patina-Kommission für Bronzeplastiken im Außenbereich festgehalten.

„Die Deutsche Patina-Kommission kam zu dem Ergebnis, dass die Bildung schwarzer Krusten auf Bronzen auf Luftverschmutzung durch Ruß zurückzuführen sei, welcher durch seine ölige Konsistenz zusätzlich Schmutz und Staub an den Metalloberflächen haften ließ. Aus systematischen Versuchen an neugegossenen Bronzebüsten zu Reinigung und Konservierung gingen als wesentliche Ergebnisse die Forderungen nach häufiger Reinigung, sowie Konservierung mit Knochen- oder Olivenöl hervor. Heute weiß man, dass Knochen und Olivenöl, sowie natürliche Wachse aufgrund ihres Säuregehalts als ungeeignet für die Bronzekonservierung einzustufen sind.“[120]

Die Grundsätze der Patina-Kommission gelten auch heute noch. Trotz wissenschaftlicher Fortschritte in Analyse-, Reinigungs- und Freilegungsmethoden sowie der Durchführung konservierender Maßnahmen bleibt die regelmäßige Pflege der Metalloberflächen, vorallem im Außenbereich, der Dreh- und Angelpunkt der Restaurierung und Konservierung von Metallen.[121]

Im Umgang mit Metalloberflächen hat sich ein einheitliches Vorgehen entwickelt. Nach einer ersten kunsthistorischen Betrachtung und Dokumentation des Zustandes wird anhand naturwissenschaftlicher Analytik und Anfertigung von Probeflächen mit verschiedenen Reinigungs- und Konservierungsmethoden ein Maßnahmenkonzept erstellt.[122] In diesem Sinne wird ähnlich wie in der Restaurierung von Holzobjekten vorgegangen. Bei Maßnahmen an Metallobjekten im Außenbereich steht häufig die Sicherung des Originalbestandes und Pflege von Bronzedenkmälern u.ä. im Vordergrund. Die sog. Patina des Objektes ist dabei als Zeitdokument zu verstehen und nach Möglichkeit zu erhalten. Als Patina wird die korrodierte Metalloberfläche bezeichnet.

[119] Vgl. Kolmanitsch (2007), S.185 f.
[120] Zit. nach Aßel (2012), S. 41
[121] Vgl. Ebd., S 46
[122] Vgl. Ebd.

Idealerweise weist die Patina eine glatte, dichte und weitgehend homogene Beschaffenheit auf, welche das darunterliegende Metall vor weiterer Korrosion schützt.[123] Oftmals zeigt sich die Patina aber als rau, zerklüftet, unregelmäßig und fleckenartig. Insbesondere solche Oberflächen bedürfen konservatorischer Maßnahmen.[124] Bei der Reinigung der Metalloberflächen sollten lediglich Schmutz, Krusten und Korrosionsprodukte, welche sich schädlich auf den Erhalt des Objektes auswirken, entfernt werden. Da Chemikalien sich selten rückstandslos entfernen lassen, ist deren Einsatz bei Durchführung der Maßnahmen, soweit möglich, zu vermeiden.[125]

Ein bewährtes Maßnahmenkonzept umfasst eine Reinigung in Kombination mit einer anschließenden schützenden transparenten Beschichtung. Zusätzlich soll der Zustand des Objektes in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden. Ggf. kommen auch Korrosionsinhibitoren wie Benzotriazol zum Einsatz.[126]

Eine weitere Methode den Erhalt von Objekten mit fortgeschrittenen Schadenbildern zu gewährleisten besteht darin, das betreffende Objekt in eine klimastabile Umgebung zu überführen und am Originalstandort durch eine Kopie zu ersetzten.[127]

Das die Zersetzungsprozesse mittels der Beschichtung transparenter Überzüge deutlich verlangsamt werden können, zeigen Ergebnisse zahlreicher Studien (siehe Tabelle 3., S. 27).[128] [129]

Probe	Massenverlust nach 1 Jahr {mg/cm2x Jahr}	Massenverlust nach 4 Jahren {mg/cm2x Jahr}	Eindringtiefe nach 4 Jahren {µm/Jahr}
Kupfer, geschützt	0,1 – 1,7	0,1 – 1,4	0,1 – 1,6
Kupfer, ungeschützt	0,3 – 2,8	0,5 – 2,0	0,6 – 2,2
Bronze, geschützt	0,1 – 0,7	0,1 – 1,0	0,1 – 1,1
Bronze, ungeschützt	0,3 – 1,5	0,2 – 1,6	0,2 – 1,8

Tabelle 3. Massenverlust und Eindringtiefe von Kupferkorrosion nach Strandberg (1997)[130]

[123] Vgl. Kühn (2014), S. 283
[124] Vgl. Kühn (2014), S. 283
[125] Vgl. Aßel (2012), S. 47
[126] Vgl. Ebd.
[127] Vgl. Ebd.
[128] Vgl. Strandberg (1997), S. 57
[129] Vgl. Doktor (2001), S. 82 f.
[130] Vgl. Strandberg (1997), S. 57

Die Beschichtungssysteme sollten dabei die folgenden Anforderungen weitmöglichst erfüllen:

- Neben einer ausreichenden Schutzwirkung, vorallem gegenüber Wasser, darf sich die gewählte Beschichtung nicht schädigend auf das Objekt auswirken.[131]
- Das optische Erscheinungsbild der Metalloberfläche sollte möglichst wenig beeinträchtigt werden.[132]
- Die Beschichtung sollte chemisch inert sein und möglichst beständig gegenüber Umwelteinflüssen sein.
- Theoretisch gehört auch eine lange Haltbarkeit zu den Anforderungen an die Konservierung von Metalloberflächen. Da sich diese jedoch selten mit der Forderung nach Reversibilität vereinbaren lässt, wird dies in der praktischen Umsetzung meist vernachlässigt und durch kontinuierliche Pflege behelfsweise ersetzt.[133] [134]

Neben dem Schutz vor einer fortschreitenden Korrosion bergen Beschichtungen, die regelmäßiger Pflegeintervalle bedürfen, jedoch noch weitere Vorteile. So kann bspw. bei Vandalismus in Form von Graffitis u.ä. auf den Objekten ein Eindringen der Fremdstoffe in das Materialgefüge verhindert werden. Zudem haben Wachse und Lacke auch eine festigende Wirkung auf kreidenden Bereichen der Patina.[135]

[131] Vgl. Aßel (2012), S. 48
[132] Dies ist bei der Verwendung mikrokristalliner Wachse nicht der Fall, Näheres dazu siehe im weiteren Verlauf 4.5. Diskurs über ästhetische Veränderung der Metalloberfläche, S. 41 f.
[133] Vgl. Aßel (2012), S. 49
[134] Vgl. Koller et al. (2000), S. 239
[135] Vgl. Aßel (2012), S. 49

4.3. Einsatzmöglichkeiten und Wirkungsweise der mikrokristallinen Wachse

Mikrokristalline Wachse kommen in vielen konservatorischen Bereichen als Schutzbeschichtungen zum Einsatz. Die Verwendungsgebiete reichen von Metallen in der Archäologie und Denkmälern unter freier Bewitterung bis hin zu Zusätzen in Möbelwachsen.[136] Auch im Alltäglichen spielen sie eine große Rolle. So werden sie bspw. für die Isolation von Stromkabeln oder für die Produktion von PVC eingesetzt.[137]

In der Konservierung von Metalloberflächen werden die mikrokristallinen Wachse vornehmlich im Außenbereich verwendet bspw. an Bronzedenkmälern. Seltener kommen in diesem Bereich auch Kunstharzlacke zum Einsatz. Diese sind jedoch wenig beständig gegenüber Witterung und nur unter hohem Aufwand reversibel.[138] Daher haben sich mikrokristalline Wachse als Beschichtungsmittel für die Konservierung von Metallen im Außenbereich weitgehend durchgesetzt.

Mikrokristalline Wachse bilden aufgrund ihres hydrophoben Charakters und der hohen Beständigkeit gegenüber Wasser eine effektive Barriere zwischen dem Metall und der Elektrolyte.[139] Aufgrund ihrer mikrokristallinen Struktur dringen sie zudem tief in das Materialgefüge ein, vorallem wenn sie thermisch appliziert werden.[140] So werden neben der Korrosion auf der Oberfläche auch die Prozesse innerhalb der Gefügestruktur eingedämmt. Dies liegt darin begründet, dass sie durch die hohe Eindringtiefe in die Kapillaren und Mikrorisse die Wechselwirkungen zwischen Anode und Kathode innerhalb des Materials, wie bspw. bei der Lochfraßkorrosion, hemmen.[141]

Zudem können die mikrokristallinen Wachse mit hohen Härtegraden auch als Stabilisatoren bei fortgeschrittenen Korrosionsprozessen agieren indem die entstandenen Hohlräume aufgefüllt werden.[142] Aufgrund ihrer Zusammensetzung aus hauptsächlich gesättigten Kohlenwasserstoffketten sind sie non-reaktiv und mittelfristig beständig gegenüber Umwelteinflüssen.[143] Sie werden bspw. auch anderen Kunstharzen als UV-Schutzmittel beigemischt.[144]

[136] Vgl. Magnusson (2017), S. 18
[137] Vgl. Ebd.
[138] Vgl. Kühn (2014), S. 296
[139] Vgl. Koesling (1999), S. 156
[140] Vgl. Aßel (2012), S. 56
[141] Vgl. Koller et al. (2000), S. 235
[142] Vgl. Ebd., S. 234
[143] Vgl. Magnusson (2017), S. 19
[144] Vgl. Koller et al. (2000), S. 234

Da sie, wie erwähnt, im Gegensatz zu Kunstharzen mittelfristig beständig gegenüber Umwelteinflüssen sind, liegen die Einsatzgebiete der mikrokristallinen Wachse vornehmlich in der Konservierung von Metalloberflächen im Außenbereich. Je nach Standort kann diese Beständigkeit jedoch variieren und es kann u.U. bereits nach einem Jahr zu Alterungserscheinungen kommen.[145] Zunächst wird der Überzug matter und es kann im weiteren Verlauf zu Vergrünung und Vergrauung kommen.



Abbildung 11. Plinthe der Amazone vorm Alten Museum Berlin. Sie wurde 2007 mit Cosmoloid H80 gelöst in Siedegrenzbenzin konserviert. 2012 weist die Beschichtung bereits viele kleinere Fehlstellen auf.[146]

Je nach Qualität des Überzuges und den Umständen der Bewitterung kann es auch zu Fehlstellen im Überzug kommen, welche die Gefahr der Bildung sog. Lokalelemente bergen. Hierbei besteht die Gefahr einer beschleunigten Korrosion unterhalb des noch intakten Überzuges, da das über die freien Bereiche eingedrungene Wasser schwerer verdunsten kann.[147] Es kann bei solchen Fehlstellen auch zu Korrosion direkt unterhalb der Wachsschicht kommen, sodass diese mit zunehmendem Volumen der Korrosionsprodukte abgesprengt wird.[148] Vorteilhaft an den mikrokristallinen Wachsüberzügen ist, dass Fehlstellen leicht mittels Erwärmen der bestehenden Wachsschicht und partiellem Auftrag einer neuen Wachsschicht ausgebessert werden können.[149]

Aus dieser eingeschränkten Haltbarkeit der Wachsbeschichtung ergibt sich allerdings die Notwendigkeit von regelmäßigen Pflegeintervallen. Je nach Standort können diese Intervalle stark variieren. Auf Objekten, die einer ständigen Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, verbraucht sich das mikrokristalline Wachs aufgrund seiner Anfälligkeit gegenüber Oxidation deutlich schneller als auf Objekten in

[145] Vgl. Aßel (2012), S. 55
[146] Vgl. Aßel (2012), S. 55
[147] Vgl. Koesling (1999), S. 156
[148] Vgl. Aßel (2012), S. 55
[149] Vgl. Koller et al. (2000), S. 234

Schattenbereichen.[150] Je nach Blickwinkel kann diese erforderliche, regelmäßige Wartung jedoch auch als Vorteil ausgelegt werden, da so größere, kostenintensive Schäden am Objekt im Frühstadium erkannt und vorgebeugt werden können.[151]

Auch im Innenbereich sind Metalloberflächen korrosiv wirkenden Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Neben konstant zu hoher Luftfeuchtigkeit mit einhergehender Kondenswasserbildung ist vorallem der Einfluss von Handschweiß auf den Oberflächen problematisch.[152] Dies ist auch für die Konservierung von Möbeln mit Metallbeschlägen ein Faktor, der beachtet werden sollte. Schweiß weist i. d. R. einen schwach Sauren Charakter mit einem pH-Wert von 4- 6,8 auf.[153] Korrosiv wirkende Bestandteile sind vorallem Natriumchlorid, Ammoniak und weitere organische Säuren. Auf ungeschützten Metalloberflächen zeichnen sich oft bereits nach kurzer Zeit Fingerabdrücke in Form von dunklen Korrosionsprodukten ab.[154] Korrosiv wirkende Stoffe können jedoch auch aus Werkstoffen der Raumausstattung oder Reinigungs- und Putzmitteln stammen. Potenzielle Gefahrenquellen sind bspw. Ausdünstungen aus Materialien wie Spanplatten, Sperrholz, bestimmte Naturhölzer (wie z.B. Eiche), Klebstoffe, Lacke, Anstrichfarbe, Textilappreturen und mehr.[155] Auch im Innenbereich gilt es daher eine Barriere zwischen dem Metall und den genannten Umgebungseinflüssen zu schaffen, um die Materialsubstanz zu erhalten. Prinzipiell eignen sich mikrokristalline Wachse auch für die Verwendung im Innenbereich. Da die Überzüge jedoch keiner Bewitterung ausgesetzt sind, werden hier häufig auch Kunstharze wie z. B. Paraloid B 72[156] verwendet.[157]

Grundvoraussetzung, sowohl im Außen- oder Innenbereich, ist, dass vor dem Aufbringen des Schutzüberzuges die Metalloberfläche eingehend gereinigt wird. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die korrosiv wirkenden Substanzen unterhalb der Schutzschicht weiter reagieren.[158]

[150] Vgl. Aßel (2012), S. 56
[151] Vgl. Ebd.
[152] Vgl. Kühn (2014), S. 306
[153] Vgl. Ebd.
[154] Vgl. Ebd.
[155] Vgl. Ebd., S. 310
[156] Ein Acrylatesterpolymerisat, vgl. https://www.kremer-pigmente.com/elements/resources/products/files/67400-67409.pdf
[157] Vgl. Scott et al. (2009), S. 146
[158] Vgl. Koesling (1999), S. 156

Die mikrokristallinen Wachse können ihrer Funktion nach in drei Kategorien eingeteilt werden. Solche deren Tropf- und Erstarrungspunkt nahezu identisch sind und zwischen 40 und 60 °C liegen, können als Primer oder Porenfüller verwendet werden. Da die Tropf- und Erstarrungspunkte dicht beieinanderliegen, erstarren diese Wachse fast augenblicklich bei Kontakt mit der zu behandelnden Oberfläche.[159] Sie eignen sich bspw. auch als Feuchtigkeitsbarrieren für Holzobjekte.[160] Zu beachten ist, dass der aufgetragene Wachsfilm anschließend in die Maserung eingearbeitet werden muss.[161] Überschüsse müssen zur Entfernung wiedererwärmt werden.

Die mikrokristallinen Wachse mit einem Tropfpunkt zwischen 60 – 90 °C und einem Härtegrad von etwa 20 ddm werden als „Kaschierschicht" verwendet.[162] Ziel dieser Beschichtung ist ein möglichst langlebiger Schutz der Oberfläche. *„Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn das Wachs in die Oberfläche poliert wird. Beim Schutz vor Korrosion wird häufig nur diese Schicht aufgebracht. Bei Skulpturen im Außenbereich können polierte Oberflächen bessere Feuchtigkeitsbarrieren darstellen."* [163]

Die härtesten mikrokristallinen Wachse mit Tropfpunkten zwischen 90 - 110°C und Härtegraden mit Werten weit unter 20 ddm, werden für Überzüge, die einen hohen Glanzgrad aufweisen und eine widerstandsfähige Beschichtung bilden sollen, verwendet.[164]

Allgemein gilt, dass die mikrokristallinen Wachse reversibel sind, da sie in organischen Lösemitteln löslich sind. In der Praxis gestaltet sich eine restlose Entfernung jedoch schwierig, daher sollte eher von einer bedingten Reversibilität oder Wiederanwendbarkeit gesprochen werden.[165] Zudem besteht die Möglichkeit, mikrokristalline Wachse mit unterschiedlichen Eigenschaften zu mischen und so den jeweiligen Anforderungen anzupassen.[166] Negativ behaftete Aussagen bzgl. der technischen Anwendung von mikrokristallinen Wachsen in der Konservierung von Metalloberflächen gibt es nur wenige. Erwähnt sei jedoch, dass laut Blumer et al. die Gefahr einer mikrobiellen Korrosion bestehe und überdies der Überzug mit Wachsen zu einem Korrosionsungleichgewicht und infolgedessen zum Verlust der Patina führen könne.[167] Dieser Aussage stellen sich jedoch die positiven Erfahrungswerte in der Praxis und in Versuchsreihen entgegen.[168] [169]

[159] Vgl. Magnusson (2017), S. 20
[160] Vgl. Ebd.
[161] Vgl. Ebd., S 19
[162] Vgl. Magnusson (2017), S. 19
[163] Zit. nach Magnusson (2017), S. 20
[164] Vgl. Ebd.
[165] Vgl. Aßel (2012), S. 54
[166] Vgl. Magnusson (2017), S. 20
[167] Vgl. Blumer et al. (2012), S. 61-63
[168] Vgl. Aßel (2012), S. 56

Zum Einsatz von mikrokristallinen Wachsen in der Konservierung von Holzobjekten ist in der Literatur jedoch nur wenig zu finden. Dies mag darin begründet sein, dass die Volltauchverfahren in Wachsschmelzen zur Festigung von Holzobjekten (zurecht) in Verruf gekommen sind.[170] Dieses Verfahren, eine lange wenig bestrittene Konservierungsmethode bis in die 60er Jahre hinein, ergab in einer Versuchsreihe von U. Schießl wenig überzeugende Ergebnisse bzgl. der Druckfestigkeitserhöhung geschwächter Holzstrukturen.[171]

Darüber, wie sich mikrokristalline Wachse auf Holzoberflächen verhalten, haben diese Versuche jedoch wenig Aussagegehalt, da für die Durchführung makrokristalline Paraffinwachse verwendet wurden.[172] Diese verhalten sich aufgrund anderer Tropf- und Erstarrungspunkte anders als die mikrokristallinen Wachse. Eine Versuchsreihe der *Central South University of Forestry and Technology* in Changsha Hunan, China, zeigte bspw. gute Ergebnisse in der Festigung von Proben aus Rosenholz.[173] Ob sich die mikrokristallinen Wachse für die Konservierung von Holzobjekten eignen, ist dennoch fraglich, da sich eine solche Imprägnierung negativ auf die Durchführung anderer Maßnahmen wie bspw. der Verleimung auswirken kann. Zudem ist eine Reversibilität einer solchen Imprägnierung ebenfalls fraglich, da das Wachs in die Poren der Holzstruktur eindringt.[174]

Vereinzelt finden mikrokristalline Wachse jedoch Erwähnung in der Verwendung an Holzoberflächen als Feuchtigkeitsbarrieren mit geringer Eindringtiefe.[175]

[169] Vgl. Doktor (2001), S. 82 f.
[170] Vgl. Schießl (1995), S. 18
[171] Vgl. Ebd.
[172] Vgl. Ebd.
[173] Vgl. Li et al. (2015), S. 5994-6000
[174] Vgl. Ebd., S. 5996
[175] Vgl. Magnusson (2017), S. 19

4.4. Applikationsmöglichkeiten der mikrokristallinen Wachse

Es gibt verschiedene Methoden mikrokristalline Wachse auf einem Objekt aufzutragen. Im Bereich der Konservierung und Restaurierung kommen hautsächlich drei verschiedene Applikationsverfahren zu Einsatz:[176]

1. Heißtauchverfahren
2. Wachsdispersionsverfahren
3. Thermische Applikation des reinen Wachses

Beim Heißtauchverfahren werden die Objekte, wie der Name schon sagt, in dem geschmolzenen Wachs eingetaucht. Dieses Verfahren wird vorallem bei der Konservierung von archäologischen Objekten angewendet.[177] Voraussetzung ist, dass die Objekte in einem ausreichend stabilen Zustand sind, um bei diesem Verfahren keine Schäden zu nehmen. Das Wachs mit dem Produktnamen „Ferroloid 80“ besitzt eine gute Eignung für diese Methode, da es über einen größeren Abstand zwischen Tropf- und Erstarrungspunkt verfügt.[178] Somit steht ein größerer Zeitraum für die Bearbeitung der Wachsschicht nach dem Tauchen zur Verfügung.

Bei dem Wachsdispersionsverfahren wird ein Wachs-Lösemittel-Gemisch hergestellt. Der Anteil an mikrokristallinem Wachs beträgt dabei i. d. R. etwa 10- 20 %.[179] Im Folgenden wird ein Verfahren zu einer Wachs-Lösemittelsuspension am Beispiel von TeCe 3534 F[180] und Shellsol T[181] nach Vorschlag von Stephan Rudolph[182] vorgestellt:

Aus Sicherheitsgründen sollten beim Ansetzten dieser Suspension eine Schutzbrille und Schutzhandschuhe getragen werden, sofern möglich sollte darüber hinaus im Digestorium gearbeitet werden. Für den Fall eines Brandes sollte eine Feuerlöschdecke in Reichweite aufbewahrt werden. **Ein Löschversuch mit Wasser ist zu unterlassen!**

Zunächst wird das Shellsol-T im Wasserbad auf 60 °C erwärmt. Simultan wird das Wachs ebenfalls in einem Wasserbad geschmolzen. Wichtig hierbei ist es, das Wachs nicht zu überhitzen, da die Wachsstruktur andernfalls zerstört wird und somit die gewünschten Eigenschaften verloren gehen. Daher sollte das Wachs während des Schmelzvorgangs beobachtet und gelegentlich umgerührt werden bis eine vollständige Schmelze erreicht wird.

[176] Vgl. Magnusson (2017), S. 20
[177] Vgl. Ebd.
[178] Vgl. Ebd.
[179] Vgl. Ebd.
[180] Ein mikrokristallines Wachs der Fa. Tromm GmbH, Köln
[181] Ein organisches Lösemittel auf Kohlenwasserstoff Basis, vgl. https://www.kremer-pigmente.com/elements/resources/products/files/70460_SHD.pdf
[182] Metallrestaurator für kunsthandwerkliche Objekte mit Sitz in Germering, Deutschland

Das geschmolzene Wachs wird anschließend langsam dem Shellsol-T beigemengt. Im warmen Zustand entsteht zunächst eine vollständige Lösung, die beim Erkalten in eine feine Suspension von milchiger Konsistenz übergeht.

Für glatte, leicht oxidierte Metalloberflächen bietet sich ein Mischungsverhältnis von Wachs zu Lösemittel von 1:8 an. Hieraus wird eine niedrig viskose Wachssuspension gewonnen. Für stark oxidierte Eisenoberflächen bietet sich hingegen bspw. ein Mischungsverhältnis von 1:5, da für solche Oberflächen eine höhere Viskosität von Vorteil ist. Nach Bedarf können auch mehrere Wachsschichten aufgetragen werden. Die einzelnen Schichten verbinden sich beim Auftrag auf der erwärmten Metalloberfläche zu einer homogenen Schicht.[183]



Abbildung 12. Wasserbäder zu Erwärmung von Shellsol-T auf 60 °C (links) und Schmelze des mikrokristallinen Wachses (rechts), Bildquelle: Stephan Rudolph

Die Suspension kann entweder mit einem Pinsel oder Polierballen aufgetragen werden. Der so entstehende Überzug ist meist zunächst von milchig-mattem Aussehen und muss mit dem Polierballen oder der Bürste in das Material eingearbeitet werden. Erst mit dem Polieren entsteht ein dichter, glänzender Überzug mit ausreichender Schutzfunktion.[184] Bei der Verwendung auf Metalloberflächen sollte diese zuvor erwärmt werden, so kann das Wachs tiefer in die Gefügestruktur eindringen und erstarrt nicht direkt beim Kontakt mit der Metalloberfläche.[185] *„Da sich mikrokristalline Wachse in den üblichen Benzinlösemitteln nur schlecht lösen, lassen sie sich in dieser Form kaum anwenden. In den meisten Fällen ist die Verwendung von gesundheitsschädlichen Aromaten erforderlich*.“[186]

[183] Schriftliche Aussage Stephan Rudolph
[184] Vgl. Doktor (2001), S. 83
[185] Vgl. Koller et al. (2000), S. 234
[186] Vgl. Ebd.

Bei der thermischen Applikation des reinen Wachses wird dieses zunächst geschmolzen und anschließend auf die Oberfläche aufgetragen. Bei dieser Methode wird die Oberfläche des Objektes zuvor erwärmt bspw. mit einem Heißluftföhn oder einem Rotlichtstrahlgerät.[187] Durch die erwärmte Oberfläche bleibt das Wachs länger in einem weichen Zustand und kann besser verarbeitet werden. In diesem Fall ist das Erwärmen der Oberfläche essenziell, um ein Gelingen des Überzuges zu gewährleisten. Ein sog. Speedheater kann dieses Applikationsverfahren vereinfachen.[188]

Für die Verarbeitung der Wachse, ungeachtet welche Methode zum Einsatz kommt, eignen sich Pinsel für den Auftrag in Kombination mit Polierballen oder Naturhaarbürsten, um das Wachs in die Oberfläche einzuarbeiten und die Beschichtung zu verdichten.[189] Die Materialien für den Polierballen sollten unbedingt fusselfrei sein. Geeignet sind Mikrofaserstoffe wie Evolon CR[190] oder auch eng gewebte Leinenstoffe. Evolon CR ist jedoch in einem besonderen Maß geeignet, da es sich um einen Verbund von polaren und unpolaren Materialien handelt. So kann im Vergleich zu Baumwollstoffen etwa die achtfache Menge Wachs aufgenommen werden.[191] Ungeachtet dessen, welches Verfahren angewandt wurde, ist ein Bürsten oder Polieren der getrockneten Wachsschicht für einen glatten Überzug sinnvoll.[192]

[187] Vgl. Magnusson (2017), S. 20
[188] Vgl. Ebd.
[189] Vgl. Ebd.
[190] Vgl. https://deffner-johann.de/de/evolonr-cr-bogen-50-x-50-cm.html
[191] Vgl. Magnusson (2017), S. 20
[192] Schriftliche Aussage: Stephan Rudolph

4.4.1. Erfahrungsberichte zu den Applikationsverfahren

Die nachfolgenden Bilder zeigen Objekte, welche mit einer Wachs-Lösemittel-Suspension[193] oder dem direkten Auftrag des geschmolzenen Wachses[194] auf der erwärmten Metalloberfläche behandelt wurden.



Abbildung 13. Tondo mit Medusenhaupt, Bodenfund Cuxhaven: Vorzustand, Bildquelle: Vera Fendel



Abbildung 14. Tondo mit Medusenhaupt, Bodenfund Cuxhaven: Endzustand nach Freilegung, Reinigung und anschließender Konservierung mit Wachsdispersionsverfahren: Cosmoloid H80 gelöst in Shellsol T, Mischungsverhältnis 1:5; Bildquelle: Vera Fendel

[193] In diesem Fall, Cosmoloid H80 in Shellsol T
[194] Cosmoloid H80



Abbildung 15. Bronzeplastik: " die Umschauende" von Lehmann, Standort Hannover, Vorzustand; Bildquelle: Vera Fendel

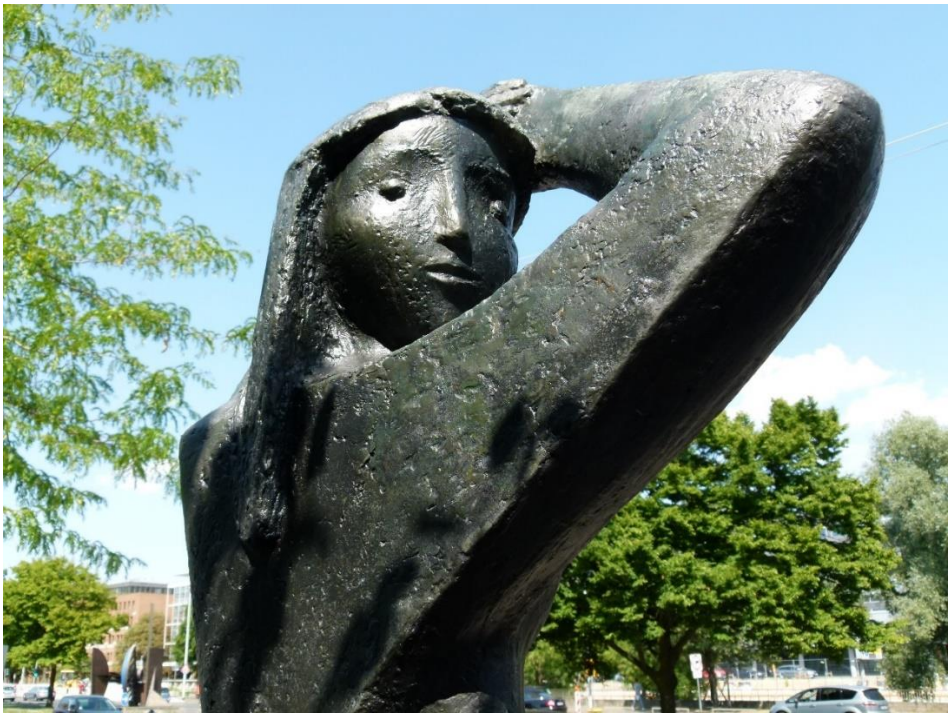


Abbildung 16. Bronzeplastik: „die Umschauende“ von Lehmann, Standort Hannover, Endzustand nach Reinigung und Konservierung, Bildquelle: Vera Fendel

Die Arbeit mit einer Wachs-Lösemittel-Suspension bietet den Vorteil, dass mit einer geringeren Erwärmung der Metalloberfläche gearbeitet werden kann. Insbesondere bei Objekten, die aufgrund fortgeschrittener Korrosion oder Spannungen innerhalb des Materialgefüges einer behutsamen Handhabung bedürfen, wird so eine materialschonende Durchführung der Maßnahmen ermöglicht. Bei Arbeiten im Außenbereich, wo es sich schwierig gestalten kann, dass Wachs vor Ort in einem Wasserbad aufzuschmelzen, bietet die Verwendung einer Wachs-Lösemittel-Suspension eine gute Alternative. Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch erfahrungsgemäß, dass die Wachs-Lösemittelsuspension (mit Cosmoloid H80) häufig eines mehrfachen Auftrags des Wachses bedarf, um eine homogene Beschichtung zu erreichen. Das aufgetragene Wachs bildet zunächst eine milchige Beschichtung, die mit Heißluftföhn und Bürste in das Material eingetrieben und zu einem glatten Überzug verdichtet werden muss.[195]

Beim Auftrag des geschmolzenen Wachses ist eine eingehende Erwärmung der Metalloberfläche für das Gelingen eines Schutzfilms essenziell. Bei nicht ausreichender Wärme erkaltet das Wachs schnell bei Kontakt auf der Metalloberfläche und muss mit einem erhöhten Arbeitsaufwand mit einem Heißluftföhn und Bürste in das Material eingetrieben werden. Die besten Ergebnisse werden bei der Erwärmung mit einem Rotlicht-Strahlgerät in Kombination mit einem Heißluftföhn erzielt. Das geschmolzene Wachs wird dabei mit einem Pinsel auf die mit Rotlicht erwärmte Metalloberfläche aufgetragen und anschließend mit einem Heißluftföhn und einer Naturhaarbürste in die Oberfläche eingetrieben. So entsteht ein dichter Überzug mit hoher Eindringtiefe.[196] Die hohe Eindringtiefe, die der Überzug mit mikrokristallinem Wachs bei diesem Verfahren erreicht, erklärt sich dadurch, dass die Metallgitterstruktur bei Erwärmung mobilisiert wird und das mikrokristalline Wachs in die Zwischenräume eindringen kann.[197]

Nachteil dieses Verfahren stellt jedoch sowohl ein erhöhter Arbeitsaufwand wie auch eine hohe Beanspruchung an das Objekt dar. Für stark korrodierte, instabile oder spannungsreiche Objekte kann diese hohe thermische Beanspruchung zu Schäden am Objekt führen.[198]

[195] Vgl. Koller et al. (2000), S. 239
[196] Vgl. Doktor (2001), S. 84
[197] Siehe 4.1. Exkurs: Eine kurze Einführung in die Werkstoffkunde von Metall, S. 16
[198] Vgl. Koesling (1999), S. 155



Abbildung 17. Portale der Bethlehemkirche, Hannover: Vorzustand, Bildquelle: Vera Fendel



Abbildung 18. Portale der Bethlehem Kirche, Hannover-Linden: Endzustand nach thermischer Applikation des reinen Wachses mittels Erhitzen, Bildquelle: Vera Fendel

4.5. Diskurs über die ästhetische Veränderung der Metalloberfläche

Der Überzug mit mikrokristallinen Wachsen verändert das Aussehen von Metallobjekten. Darüber ob diese Veränderung als positiv oder negativ zu bewerten ist, besteht in der Fachwelt Uneinigkeit. Häufiger wird diese Veränderung jedoch als positiv empfunden, obwohl dies der Anforderung der geringstmöglichen Oberflächenveränderung in einem harten Kontrast entgegensteht.

Die Patina, insbesondere von Bronzeobjekten, wird deutlich dunkler. Dies senkt den Kontrast zwischen „fleckigen" Bereichen der Patina oder auch den Laufrinnen, welche durch Regenwasser auf den Objekten gebildet werden. [199]

Die Oberfläche wirkt ruhiger und es kann argumentiert werden, dass so die Lesbarkeit des Objektes verbessert wird.[200] Die Wirkung des Metallischen nach dem Auftrag des Überzuges wird in der Literatur sehr unterschiedlich bewertet. Hier stehen sich zwei Ansichten gegenüber. Die Auffassung, dass mit dem Wachsüberzug einer witterungsbedingt matten Metalloberfläche, eine Tiefenlichtwirkung verliehen wird und so den metallischen Charakter hervorhebt, steht im Kontrast zu der Auffassung, dass eine Behandlung mit mikrokristallinem Wachs zu einem stumpfen bis speckigen Glanz führe, der die Metalloberfläche unecht erscheinen lässt.[201] [202]



Abbildung 19. Vorzustand, Behaim-Denkmal, Nürnberg, Bildquelle: Stephan Rudolph



Abbildung 20. Endzustand nach Restaurierung: Behaim-Denkmal, Nürnberg, Bildquelle: Stephan Rudolph

[199] Vgl. Kühn (2014), S. 297
[200] Vgl. Brendel (1997), S. 166
[201] Vgl. Aßel (2012), S. 56
[202] Vgl. Kühn (2014), S. 297

Der Überzug von mikrokristallinen Wachsen kann auf manchen Metalloberflächen aufgrund einer unvorteilhaften Lichtbrechung jedoch auch zu einem violetten Glanz führen (siehe Abb. 23., S. 42). Da jedoch für die Konservierung von Metalloberflächen derzeit noch keine reversible Alternative auf dem Markt ist, muss diese optische Veränderung für den Erhalt der entsprechenden Objekte in Kauf genommen werden, sofern ein Kunstharzlack nicht in Frage kommt.[203]

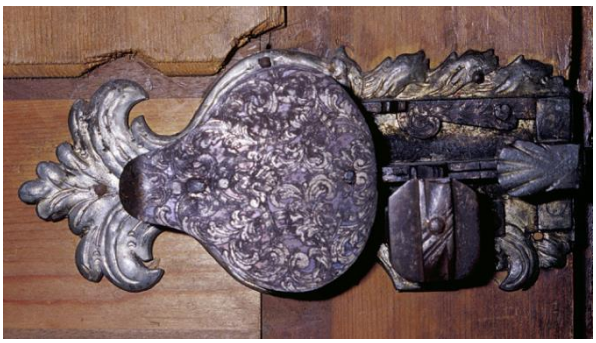


Abbildung 21. Barockes Schloss der Sakristei des Klosters Ettal, Vorzustand

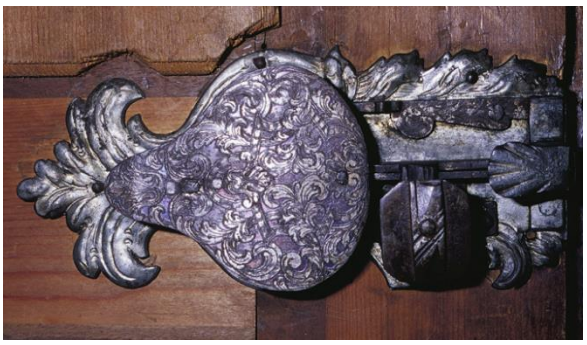


Abbildung 22. Barockes Schloss der Sakristei des Klosters Ettal, Endzustand nach Konservierung mit mikrokristallinem Wachs

„Das barocke Schloss ist aus der Sakristei des Klosters Ettal, hier ist bei den gebläuten Bereichen festzustellen, dass nach der Wachskonservierung die Farbe von blau in Richtung violett sich durch die andere Lichtbrechung verändert.“[204]

Fest steht, dass der Überzug mit mikrokristallinen Wachsen die Hell-, Dunkel- und Farbkontraste i. d. R. deutlich herabsenkt.[205] Ob dies nun zur verbesserten Lesbarkeit des Objektes an sich führt oder ob der historisch gewachsene Zustand und somit die Lesbarkeit der Objektgeschichte eingebüßt wird, ist wohl dem Auge des Betrachters zu überlassen. Da nach aktuellem Forschungsstand keine adäquate Alternative, zumindest für die Anwendung im Außenbereich, zur Verfügung steht, muss die ästhetische Veränderung, ungeachtet dessen wie sie beurteilt wird, in Kauf genommen werden.[206]

[203] Vgl. Koller et al. (2000), S. 239
[204] Schriftliche Aussage Stephan Rudolph
[205] Vgl. Kühn (2014), S. 297
[206] Vgl. Koller et al. (2000), S. 239

5. Zusammenfassung

Die Wachse im Allgemeinen können unterschiedlich definiert und klassifiziert werden. Eine weitverbreitete Definition anhand der technisch-physikalischen Eigenschaften stellt die *Deutsche Gesellschaft für Fettwissenschaften.* Zudem können die Wachse in die Kategorien der natürlichen-, halbsynthetischen- und synthetischen Wachse gegliedert werden. Die teilsynthetischen Wachse sind chemisch modifizierte, natürliche Wachse, welche über einheitliche, anwendungstechnische Eigenschaften verfügen. Synthetische Wachse werden mittels Verfahren wie der Hydrierung, Polymerisation o.ä. aus Syntheseprodukten erzeugt. Typische Vertreter dieser Wachse sind die Fischer-Tropsch-Wachse. Die natürlichen Wachse werden in rezente (pflanzliche- und tierische-) Wachse und in mineralische Wachse gegliedert. Die rezenten Wachse werden innerhalb von lebenden Organismen gebildet. Handelsübliche Wachse dieser Art sind bspw. das aus Palmen gewonnene Carnaubawachs oder das Bienenwachs. Hauptbestandteil der rezenten Wachse sind Fettsäureester, daher werden sie zu den Lipiden gezählt.[207]

Die Mineralwachse werden aus fossilen Stoffen gewonnen und bestehen zum Hauptteil aus Kohlenwasserstoffen. Die Mineralwachse werden in makrokristalline und mikrokristalline Wachse unterteilt. Der Unterschied liegt in der Molekularstruktur begründet. Makrokristalline Wachse bestehen zum Hauptteil aus linearen, unverzweigten Kohlenwasserstoffketten, welche große Kristalle ausbilden können.[208] Mikrokristalline Wachse hingegen bestehen hauptsächlich aus verzweigten Iso-Paraffinen und vernetzten Naphthenen, welche die Ausbildung von großen Kristallen verhindern.[209] Die mikrokristallinen Wachse werden als Nebenprodukte der Erdölraffination gewonnen, sie fallen bei der Vakuumdestillation an oder sedimentieren als Tankbodensatz.[210] Sie sind wasserbeständig, können jedoch in vielen organischen Lösemitteln gelöst werden. Mittelfristig sind sie beständig gegenüber Umwelteinflüssen, oxidieren jedoch bei Lichteinstrahlung über einen längeren Zeitraum hinweg.[211] Anhand ihrer Molekularstruktur werden sie in harte und plastische Wachse unterteilt. Je höher der Grad der Verzweigungen der Molekülketten, desto weicher und plastischer sind die entsprechenden Wachse. Die Eigenschaften der mikrokristallinen Wachse (bzw. Wachse allgemein) werden anhand von Schmelzpunkt, Erstarrungspunkt, Tropfpunkt, Härte, Sprödigkeit, Ölgehalt, Viskosität und Farbe definiert.[212] Die mikrokristallinen Wachse zeichnen sich durch hohe Tropf- und Erstarrungspunkte aus.

[207] Vgl. Aßel (2012), S.51
[208] Vgl. Koller et al. (2000), S. 230
[209] Vgl. Ebd., S. 234
[210] Vgl. Sitterwerk (2014), https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1506/
[211] Vgl. Koller et al. (2000), S. 239
[212] Vgl. Magnusson (2017), S. 19

Die Härte des erkalteten Wachses wird anhand der sog. Nadelpenetration ermittelt. Dabei gilt, je kleiner der Wert desto härter das Wachs. Bei den plastischen Wachsen liegt der Wert etwa bei 20 ddm, bei den harten Wachsen etwa bei 10 ddm und niedriger.[213]

Seit den 1970er Jahren haben sich die mikrokristallinen Wachse als Korrosionsschutzmittel für Metalle, vornehmlich im Außenbereich, etabliert. Dies liegt in ihrer mittelfristigen Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen und ihrer Fähigkeit eine wirksame Feuchtigkeitsbarriere zwischen dem Metall und der Umgebung zu bilden, begründet. Da es sich bei Metallen um energiereiche Werkstoffe handelt, die gemäß der allgemeinen Physik einen energieärmeren Zustand anstreben, handelt es sich bei den meisten Metallen um reaktionsfreudige Stoffe. Metalle bilden aufgrund ihrer Neigung Ionen abzugeben Metallgitter in denen Elektronen frei beweglich zwischen den Metallionen diffundieren.[214] Durch die Anwesenheit von elektrisch leitender Flüssigkeit, der sog. Elektrolyte und Substanzen, die in Flüssigkeit Ionen bilden wie z.B. Handschweiß oder Staubpartikel, entsteht so eine Wechselwirkung zwischen Anode und Kathode, bei der ein Ladungs- und Stoffaustausch stattfindet.[215] Es handelt sich demnach um einen Zersetzungsprozess bzw. einen korrosiven Vorgang. Bei dieser sog. elektrochemischen Korrosion wandern Ionen aus dem Elektrolyten zu der Grenzfläche des Metalls und werden durch Aufnahme von Elektronen zu ungeladenen Atomen umgewandelt. Diese legen sich als Korrosionsprodukte auf der Metalloberfläche nieder.[216]

Aufgrund dessen ist die Hauptanforderung konservierender Maßnahmen an Metalloberflächen eine Barriere zwischen dem Metall und der leitfähigen Elektrolyte zu schaffen. Weitere Anforderungen sind chemische Inertheit, Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen, eine nichtschädigende Auswirkung auf das Objekt sowie eine geringstmögliche optische Veränderung und Reversibilität des Überzugs. Diese Anforderungen werden bei der Beschichtung mit mikrokristallinen Wachsen im bestmöglichen Umfang, welcher nach aktueller Forschungslage möglich ist, erfüllt.

[213] Vgl. Magnusson (2017), S. 20
[214] Vgl. Koesling (1999), S. 133
[215] Vgl. Ebd., S. 146
[216] Vgl. Ebd.

Die hohe Eignung mikrokristalliner Wachse für die Restaurierung und Konservierung resultiert daraus, dass sie:

- aufgrund der gesättigten Kohlenstoffketten non-reaktiv sind
- säurefrei sind
- untereinander und mit anderen Materialien gemischt werden können
- sie über genormte Zusammensetzungen verfügen
- ungiftig sind
- sich aufgrund ihrer hohen Beständigkeit gegenüber Wasser als Schutzfilme eignen
- aufgrund ihrer Fähigkeit tief in das Materialgefüge von Metallen einzudringen, die Wechselwirkungen innerhalb des Metalls hemmen.

Mikrokristalline Wachse mit hohen Härtegraden können auch als Stabilisatoren für Metalloberflächen mit fortgeschrittenen Korrosionserscheinungen verwendet werden. Fehlstellen im Überzug können leicht durch Erwärmen und Neuauftrag ausgebessert werden, da sich die Beschichtungen bei Erwärmen zu einer homogenen Schicht vereinen.[217] Das Einhalten von zyklischen Pflegeintervallen der Metalloberfläche ist von großer Wichtigkeit. Zum einen streben die Metalle unentwegt einem energieärmeren Zustand an und korrodieren, zum anderen sind die mikrokristallinen Wachse nur mittelfristig beständig gegenüber Umwelteinflüssen. Je nach Umwelteinflüssen verbrauchen sich die mikrokristallinen Wachse unterschiedlich schnell, daher kann keine einheitliche Aussage über die Pflegeintervalle getroffen werden.[218] Haupteinsatzgebiete der mikrokristallinen Wachse liegen in der Konservierung von Metallobjekten im Außenbereich wie bspw. Bronzeplastiken. Sie eignen sich jedoch auch für die Anwendung im Innenbereich und zu Konservierung von archäologischen Metallobjekten.

Anwendungsbezogen gibt es in der Konservierung und Restaurierung drei mögliche Applikationsverfahren: das Heißtauchverfahren, Wachsdispersionsverfahren und die thermische Applikation des reinen Wachses auf der erwärmten Metalloberfläche. Beim Heißtauchverfahren werden die Objekte in geschmolzenes Wachs eingetaucht und anschließend bspw. mit einer Bürste bearbeitet. Dieses Verfahren eignet sich für archäologische Objekte.[219] Bei dem Wachsdispersionsverfahren wird ein Wachs-Lösemittel-Gemisch hergestellt, welches bei Raumtemperatur einen weichen Zustand aufweist und somit leicht zu verarbeiten ist.

[217] Vgl. Koller et al. (2000), S. 239
[218] Vgl. Aßel (2012), S. 55
[219] Vgl. Magnusson (2017), S. 20

Das vorherige Erwärmen der Metalloberfläche ergibt einen besseren Schutzfilm.[220] Bei der thermischen Applikation wird das geschmolzene Wachs auf die erwärmte Metalloberfläche aufgetragen. So erkaltet es nicht direkt beim Kontakt mit der Metalloberfläche und kann zu einem glatten Überzug mit hoher Eindringtiefe verdichtet werden. Meist werden mikrokristalline Wachse unter Hinzunahme von Wärme appliziert, können aber auch in gelöster Form kalt aufgetragen werden. Es ist jedoch nachweislich, dass der Korrosionsschutz durch eine Konservierung mit thermisch applizierten Wachsen gegenüber der mit kalten Wachsen deutlich wirksamer ist.[221] Durch die Applikation des geschmolzenen Wachses auf einer zusätzlich erwärmten Metalloberfläche erreicht das Wachs eine hohe Viskosität und kann tief in die porösen Schichten der Patina eindringen.[222]

Darüber wie die ästhetische Veränderung der Metalloberfläche nach Behandlung mit mikrokristallinen Wachsen zu bewerten ist, herrscht Uneinigkeit. Zum einen kann argumentiert werden, dass die Nivellierung der Kontraste und das dunklere Tiefenlicht zur Verbesserung der Lesbarkeit der Objekte führt.[223] Dem gegenüber steht jedoch die Anforderung der geringstmöglichen optischen Veränderung und die Auffassung, dass durch das Herabsenken der Kontraste der historisch gewachsene Zustand eingebüßt wird und so die Lesbarkeit der Objektgeschichte verloren geht.[224] Da nach aktuellem Forschungsstand jedoch keine adäquate Alternative zu den mikrokristallinen Wachsen existiert, muss die ästhetische Veränderung unabhängig dessen, wie sie bewertet wird, in Kauf genommen werden. Technisch betrachtet stellen mikrokristalline Wachse eine gute Methode der Konservierung von Metalloberflächen dar. Wichtig zu beachten ist jedoch, dass die Behandlung mit mikrokristallinen Wachsen aufgrund ihrer mittelfristigen Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen im Außenbereich regelmäßiger Wartungsintervalle bedarf. Nur so kann der Erhalt der entsprechenden Objekte gewährleistet werden.[225]

[220] Vgl. Koller et al. (2000), S. 239
[221] Vgl. Doktor (2001), S. 83
[222] Vgl. Aßel (2012), S. 54
[223] Vgl. Ebd.
[224] Vgl. Kühn (2014), S.
[225] Vgl. Aßel (2012), S. 98

6. Verzeichnisse

6.1. Literaturverzeichnis

Aßel, E. (13. 08 2012). Konzepterstellung zum Umgang mit der Altkonservierung am bronzenen Reiterstandbild Friedrich Wilhelm IV. vor der Alten Nationalgalerie, Berlin. *Diplomarbeit, Fachhochschule Potsdam Fachbereich Architektur und Städtebau, Studiengang Restaurierung*. Berlin.

Bauer, W. P. (1994). Grundzüge der Metallkorrosion. In D. Syndram, R. Blumer, C. J. Raub, W. P. Bauer, W. Knobloch, H. Fendel, . . . He, *Metall-Restaurierung. Beiträge zur Analyse, Konzeption und Technologie* (S. 40-69). München: Callwey Verlag.

Blumer, R. D., & Raub, C. J. (1994). Die Entwicklung der kunsthandwerklichen Verarbeitung der Metalle am Beispiel von Kupfer und Kupferlegierungen. In D. Syndram, R. Blumer, C. J. Raub, W. P. Bauer, W. Knobloch, H. Fendel, . . . P. Heinrich, *Metall-Restaurierung. Beiträge zur Analyse, Konzeption und Technologie* (S. 20-39). München: Callway.

Blumer, R.-D., & Kinder, J. (2012). Composition and Corrosion-Behavior of Differently Old Patinas on Copper Plates for Roofing and on Some Parts of Bronze Statue in South-West Germany. *Bronze Conservation Colloquium 2012. Extended Abstracts. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart.*, S. 61-63.

Brendel, K. (1996). Der gebrochene Glanz der Bronzen. *Arbeitshefte des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege, Band 86.*, S. 119-126. .

Büll, R. (1977). *Das große Buch vom Wachs Band 1. Geschichte Kultur Technik.* München: Callwey Verlag.

Crowley, A., & Laefer, D. F. (2008). Understanding microcrystalline waxes for seismic protection of art objects. *Journal of American Institute for Conservation 47.*, S. 119-139.

Doktor, A. (2001). Veränderung der Schutzwirkung von mikrokristallinen Wachsen auf Kupferblech unter thermischer Wechselbelastung. *Bronze- und Galvanoplastiken- Arbeitshefte der Landesämter für Denkmalpflege Sachsen und Sachsen-Anhalt*, S. 77-86.

Haim, K. (2012). *Organische Chemie macchiato - Cartoonkurs für Schüler und Studenten.* München: Pearson Studium.

Koesling, V. (1999). *Vom Bakelit zum Feuerstein- Band 5/6 Schriftenreihe zur Restaurierung und Grabungstechnik.* Stuttgart: Theiss Verlag.

Koller, J., & Baumer, U. (2000). Organische Überzüge auf Metallen. Teil 2, Wachse und Emulsionen. *Arbeitsblätter für Restauratoren, Heft 2*, S. 227-241.

Kolmanitsch, G. (2007). Bronzen im Außenbereich – Objekterhaltung durch kontinuierliche Pflege. In M. Griesser-Stemscheg, & G. K. (Hg.), *Metallkonservierung. Metallrestaurierung. Geschichte, Methode, Praxis. Band 4.* (S. 185-198). Weimar: Böhlau.

Kühn, H. (2014). *Werke aus Kupfer, Bronze und Messing.* München: Anton Siegl Fachbuchhandlung GmbH und TU München.

Li, Y., Li, X., Huang, Q., Wu, Y., Li, X., & Cheng, Z. (August 2015). Impregnation with Microcrystalline Wax to Improve Rosewood Dimensional Stability and Surface Hardness. *BioResources*, S. 5994- 6000.

Maggnuson, Y. (2017). Mikrokristallines Wachs. Ein Beitrag zum besseren Verständnis. *Restauro*, S. 18-21.

Mai, B. (2007). Modul 12 – Historische Werkstoffe „Metalle“ Lehrbrief für das modulare Weiterbildungsangebot der FHTW Berlin. Berlin: Fachhochschule für Technik und Wirtschaft.

Neumüller, O. A. (1988). *Römpps Chemie Lexikon- Band 6. T-Z.* Stuttgart: Francksche Verlagshandlung.

Schießl, U. (1995). Festigkeitserhöhende Konservierung von Holz. In E. Emmerling, & K. Hemme, *Holzschutz. Holzfestigung. Holzergänzung* (S. 15-27). Lipp.

Scott, D. A., & Eggert, G. (2009). *Iron and Steel in Art. Corrosion, Colorants, Conservsation.* London: Archetype Publications Ltd.

Strandberg, H. (1997). Perspectives on Bronze Sculpture Conservation . *Dissertation*. Göteborg, Schweden: Göteborg University.

6.2. Internetquellenverzeichnis

Sitterwerk. (2014). *Fischer-Tropsch-Hartwachs*. Von MaterialArchiv.ch:
https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1525 abgerufen am: 08.05.2022

Sitterwerk. (2014). *Mikrowachs*. Von MaterialArchiv.ch:
https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1506/ abgerufen am: 10.05.2022

Sitterwerk. (2014). *Bienenwachs*. Von MaterialArchiv.ch:

https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1417/ abgerufen am: 03.05.2022

Sitterwerk (2014). *Montanwachs* Von MaterialArchiv.ch:

https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1507 abgerufen am: 08.05.2022

Chemgaroo Chemgapedia. *Chemie für Mediziner- das Ionengitter.* Von chemgapedia.de:

http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/4/cm/bindung.vlu/Page/vsc/de/ch/4/cm/bindung/ionengitter.vscml.html abgerufen am: 13.06.2022

Metalltechnik Online. *Kristalle, Verformung und Baufehler.* Von wolfhesse.de:

http://www.wolfhesse.de/courses/werkstoffe/lessons/herstellung-und-innerer-aufbau-von-eisen-und-stahl/topic/gefuege-und-kristalle/ abgerufen am 13.06.2022

Sofatutor.at. *Arbeitsblatt Legierungen (Expertenwissen)* Von sofatutor.at/chemie:
https://www.sofatutor.at/chemie/videos/legierungen-expertenwissen
abgerufen am 14.06.2022

Deffner&Johann. *Evolon® CR Bogen 50 x 50 cm* Von deffner-johann.de:

https://deffner-johann.de/de/evolonr-cr-bogen-50-x-50-cm.html

aufgerufen am: 13.06.2022

Kremer Pigmente. *Sicherheitsdatenblatt 70460 Shellsol® T.* Von kremer-pigmente.de:

https://www.kremer-pigmente.com/elements/resources/products/files/70460_SHD.pdf

abgerufen am 13.06.2022

Kremer Pigmente. *Sicherheitsdatenblatt 67400 Paraloid™ B 72.* Von kremer-pigmente.de:

https://www.kremer-pigmente.com/elements/resources/products/files/67400_SHD.pdf

aufgerufen am 15.06.2022

6.3. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Klassifizierung der Wachse nach Vorbild: Magnussons (2017)..... 6
Abbildung 2. Schematische Darstellung der Strukturformen von Polymeren:..... 12
Abbildung 3. Diagramm zu Angaben über Tropf- und Erstarrungspunkt sowie der Nadelpenetration von handelsüblichen Wachsen in der Konservierung. Nach Vorbild: Yngve Magnusson (2017)..... 15
Abbildung 4. Metallkreislauf nach Bernhard Mai 17
Abbildung 5. Struktur des Ionengitters von Natriumchlorid (Kochsalz)..... 18
Abbildung 6. von rechts nach links: kubisch-flächenzentriert, kubisch-raumzentriert, hexagonal..... 19
Abbildung 7. Bildbeispiele und chemische Zusammensetzung von geläufigen Buntmetall-Legierungen 21
Abbildung 8. Schematische Darstellung der Wechselwirkung zwischen Anode und Kathode in einem heterogenen Metallgefüge; nach Vorbild Volker Koesling (1999)..... 23
Abbildung 9. Schematische Darstellung der Atmosphärischen Korrosion nach Vorbild Volker Koesling (1999) 24
Abbildung 10. Schematische Beispiele für geläufige Korrosionserscheinungen nach Vorbild Wilhelm Bauer (1994)..... 25
Abbildung 11. Plinthe der Amazone vorm Alten Museum Berlin. Sie wurde 2007 mit Cosmoloid H80 gelöst in Siedegrenzbenzin konserviert. 2012 weist die Beschichtung bereits viele kleinere Fehlstellen auf..... 30
Abbildung 12. Wasserbäder zu Erwärmung von Shellsol-T auf 60 °C (links) und Schmelze des mikrokristallinen Wachs (rechts), Bildquelle: Stephan Rudolph..... 35
Abbildung 13. Tondo mit Medusenhaupt, Bodenfund Cuxhaven: Vorzustand, Bildquelle: Vera Fendel 37
Abbildung 14. Tondo mit Medusenhaupt, Bodenfund Cuxhaven: Endzustand nach Freilegung, Reinigung und anschließender Konservierung mit Wachsdispersionsverfahren: Cosmoloid H80 gelöst in Shellsol T, Mischungsverhältnis 1:5; Bildquelle: Vera Fendel 37
Abbildung 15. Bronzeplastik: " die Umschauende" von Lehmann, Standort Hannover, Vorzustand; Bildquelle: Vera Fendel 38
Abbildung 16. Bronzeplastik: „die Umschauende“ von Lehmann, Standort Hannover, Endzustand nach Reinigung und Konservierung, Bildquelle: Vera Fendel 38
Abbildung 17. Portale der Bethlehemkirche, Hannover: Vorzustand, Bildquelle: Stephan Rudolph ... 40
Abbildung 18. Portale der Bethlehem Kirche, Hannover-Linden: Endzustand nach thermischer Applikation des reinen Wachs mittels erhitzen, Bildquelle: Stephan Rudolph..... 40
Abbildung 19. Vorzustand, Behaim-Denkmal, Nürnberg, Bildquelle: Stephan Rudolph 41
Abbildung 20. Endzustand nach Restaurierung: Behaim-Denkmal, Nürnberg, Bildquelle: Stephan Rudolph 41
Abbildung 22. Barockes Schloss der Sakristei des Klosters Ettal, Vorzustand 42
Abbildung 21. Barockes Schloss der Sakristei des Klosters Ettal, Endzustand nach Konservierung mit mikrokristallinem Wachs..... 42

6.4. Abbildungsnachweis

Abb. 1. und 3. Erstellt von Jacqueline Siebenbrock nach Vorbild von Yngve Magnusson (2017), S. 19
Abb. 2. Crowley et al. (2008), S. 6
Abb. 4. Erstellt von Jacqueline Siebenbrock nach Vorbild von Bernhard Mai (2007), Einführung II
Abb. 5. Chemgaroo Chemgapedia, chemgapedia.de
Abb. 6. Metalltechnik Online, wolfhesse.de
Abb. 7. Arbeitsblatt Legierungen (Expertenwissen):
https://www.sofatutor.at/chemie/videos/legierungen-expertenwissen
Abb. 8. und 9. Erstellt von Jacqueline Siebenbrock nach Vorbild von Volker Koesling (1999), S. 148 und S. 150
Abb. 10. Erstellt von Jacqueline Siebenbrock nach Vorbild von Bauer et al. (1994), S. 41
Abb. 11. Edda Aßel (2012), S. 55
Abb. 12.,19.,20., 21. und 22. Stephan Rudolph
Abb. 13., 14.,15, 16., 17. und 18. Vera Fendel

6.5. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Kohlenwasserstoff-Bestandteile in plastischen und harten mikrokristallinen Wachsen nach Koller et al. (2000) 13
Tabelle 2. Beispiele von Metallen zu den drei Gittertypen, nach Volker Koesling 20
Tabelle 3. Massenverlust und Eindringtiefe von Kupferkorrosion nach Strandberg (1997) 27

6.6. Tabellennachweis

Tabelle 1. Erstellt von Jacqueline Siebenbrock nach Vorbild Koller et. al. (2000), S. 234
Tabelle 2. Erstellt von Jacqueline Siebenbrock nach Vorbild Koesling (1999), S. 136
Tabelle 3. Erstellt von Jacqueline Siebenbrock nach Vorbild Strandberg (1997), S. 57

6.7.Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ggf.	gegebenenfalls
i. d. R.	in der Regel
Jh.	Jahrhundert
o. g.	oben genannt
o. Ä.	oder Ähnlichem
sog.	sogenannt
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
u.v.m.	und vielem mehr
u. Ä.	und Ähnlichem
z.B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil