

Abschlussbericht des Forschungsvorhabens

**Zur Erhaltung historischer Acrylgläser
Erhaltungsstrategien für transparentes Polymethylmethacrylat (PMMA)
in Architektur und musealem Kulturgut im Außenraum**



Antragstellung und Mittelempfang

Technical University of Munich, TUM School of Engineering and Design,
Professorship of Recent Building Heritage Conservation, Prof. Dr. Andreas Putz

Kooperationspartnerschaft

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor, Martin Mach (bis Mai
2022), Dr. Sven Bittner
Deutsches Museum München, Objekt- und Restaurierungsforschung, Dr. Marisa
Pamplona

Verfasser:innen

Susanne Brunner, Prof. Dr. Andreas Putz

Projektlaufzeit: 01.03.2020 – 31.12.2022

DBU-Aktenzeichen: AZ 35404/01-45

München, 31. März 2023



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	3
Abbildungen	4
Tabellen	4
1 Zusammenfassung	5
2 Bericht	5
Anlass und Zielsetzung des Projekts	5
Arbeitsschritte und angewandte Methoden	6
Ergebnisse.....	12
Diskussion.....	25
Öffentlichkeitsarbeit	26
Schlussbetrachtung	27
3 Danksagung	28
4 Anhang	29
Erste Anleitung zum Erhalt von historischem Acrylglas im Außenraum.....	29

Abkürzungen

BLfD	Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DM	Deutsches Museum
DSC	(engl. Differential Scanning Calorimetry) Dynamische Differenzkalorimetrie
FTIR	Fourier Transform Infrarot Spektroskopie
FWI	Felix-Wankel-Institut
FWS	Flugwerft Schleißheim
NSC	National Scientific Committee
PMMA	Polymethylmethacrylat
Py-GC/MS	Pyrolyse Gaschromatographie mit Massenspektrometer
REM	Rasterelektronenmikroskop
SWM	Stadtwerke München
TUM	Technische Universität München
ZB	Zwischenberichte

Abbildungen

Abb. 1: Übersicht über die drei Arbeitsbereiche des Projekts und die erwarteten Ergebnisse.	6
Abb. 2: Übersicht über die untersuchten Fallstudien.....	7
Abb. 3: Übersicht über die untersuchten historischen Fragmente	8
Abb. 4: Übersicht der Reinigungsstudien im Labor (links) und in situ (rechts) mit den angewandten Reinigungs- und Untersuchungsmethoden.....	11
Abb. 5: Übersicht der Studie zum Oberflächenschutz mit den getesteten Produkten und Untersuchungsmethoden sowie einer Skizze der Probeplatten.	11
Abb. 6: Übersicht über die Produktion und Anwendung von Acrylglas in Deutschland im Zeitraum ab Produktion von Scheiben bis in die 1980er Jahre.	13
Abb. 7: Makroskopische Schadensphänomene an den Fallstudien der Olympischen Sportstätten in situ, den Kassenhäusern von 1972 und dem Olympiadaach von 1998, geordnet nach Schweregrad von links nach rechts zunehmend.	16
Abb. 8: Mikroskopische Schadensphänomene an den untersuchten Fallstudien und historischen Fragmenten, geordnet nach Schweregrad, von links nach rechts zunehmend..	17
Abb. 9: Schadfaktoren als Ursache für die Alterungs- und Schadensphänomene an historischem Acrylglas im Außenraum können sowohl physikalisch/mechanischen (links), biologischen (mittig) oder atmosphärischen Ursprungs (rechts) sein.	18
Abb. 10: Alterungs- und Schadensphänomene sowie die hauptsächlichen Schadfaktoren als ihre Ursache.....	19
Abb. 11: Ergebnis der ersten Reinigungsstudie ist ein Baumdiagramm. Je nach vorhandener Schmutzart werden Reinigungsmethoden vorgeschlagen, die in der Studie wirksam waren.	22
Abb. 12: Ergebnis der zweiten Reinigungsstudie in situ, die Reinigungsmethoden Hochdruckreinigung, Mikrofasertuch und Gregomatic® mit ihren Vor- und Nachteilen.	23
Abb. 13: Anleitung für das schrittweise Vorgehen zum Erhalt von historischem Acrylglas im Außenraum im Flussdiagramm.....	25

Tabellen

Tab. 1: Konstruktion der Bauteile mit Acrylglas an den Fallstudien.....	14
Tab. 2: Untersuchungsmethoden, die sich zur Charakterisierung des Bestands eignen.	15
Tab. 3: Untersuchungsmethoden, die sich zur Charakterisierung der Schadensphänomene und ihrer möglichen Schadfaktoren eignen.....	20

1 Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben befasste sich mit der Möglichkeit nachhaltiger Pflege und Instandhaltung von transparenten Bauteilen aus Polymethylmethacrylat (PMMA, im Folgenden Acrylglas genannt) im Außenbereich. Dabei wurden in drei Bereichen Grundlagen erarbeitet, um die Lebensdauer von Acrylglas in Denkmalpflege und Museen zu verlängern: Ein Überblick über historische Herstellungstechniken dient der Identifikation und der Wertschätzung von originalen Bauteilen, es wurden Methoden zur Analyse und Differenzierung unterschiedlich hergestellter Acrylgläser getestet. Die Dokumentation von Alterungsphänomenen und Schadfaktoren soll helfen, den Zustand von historischem Acrylglas zu untersuchen und einzuschätzen, auch hier wurden neue Untersuchungsmethoden erprobt. An Fallstudien, historischen und neuen Prüfkörpern wurden Auswahlkriterien erstellt, Reinigungsmethoden getestet sowie Schutzüberzüge eruiert, die bei der Entwicklung von Erhaltungsmethoden nützlich sein können. Aus den Ergebnissen der Studien, Untersuchungen und Recherchen wurde eine erste Anleitung für den Umgang mit historischem Acrylglas im Außenraum entwickelt.

2 Bericht

Anlass und Zielsetzung des Projekts

Die materielle Erhaltung von Bauteilen aus Kunststoffen stellt eine aktuelle baudenkmalpflegerische und konservatorisch-restauratorische Herausforderung für die Bewahrung des Bauerbes der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts dar.

Zahlreiche historisch wertvolle Bauwerke und kulturelle Artefakte aus dem letzten Jahrhundert haben Bauteile aus transparentem Acrylglas. Besonders die Kulturgüter im Außenbereich sind von erhöhter UV-Strahlung, Abgase, Ruß und Schadgasen, Graffiti und Vandalismus betroffen, die das Erscheinungsbild und die Substanz der ehemals transparenten Acrylgläser schädigen. Statt Entfernung und Ersatz von Originalsubstanz sollte historisches Acrylglas an wertvollen Kulturgütern regelmäßig gepflegt werden, um die Lebensdauer zu verlängern.

Anders als in der Mitte des letzten Jahrhunderts, als Kunststoffe als effiziente, vielseitige und nicht alternde Materialien galten, wird Plastik heute als problematisch angesehen. An schützenswertem Kulturgut der Nachkriegszeit sind verbaute Kunststoffprodukte jedoch unverzichtbare Originalsubstanz und vielfach gestaltbildend. Sie sind Bedeutungsträger kultureller Werte ebenso wie Träger von Informationen über historische Rezepturen und Herstellungstechniken. Anders als bei konventionelleren historischen Bau- und Werkstoffen liegen für synthetische Materialien wie Acrylglas jedoch noch keine anerkannten und abgesicherten Methoden der substanzpflegenden, nachhaltigen Erhaltung vor. Eine veränderte Anschauung, die Kunststoffe nicht als Wegwerfprodukte, sondern als erhaltenswürdige und erhaltensfähige materielle und kulturelle Ressource ansieht, erhält auch das materielle Erbe der Moderne.

Zielsetzung des Projekts war es, anhand der Untersuchung und Analyse verschiedener Fallstudien und historischen Fragmenten, aber auch anhand von Literatur- und Archivrecherche den Bestand und Zustand historischer Bauteile aus Acrylglas zu charakterisieren (Abb. 1). Mittels einer historischen Einordnung und Untersuchungs- und Analysemethoden kann Acrylglas differenziert werden. Sowohl die Art der Produktion also

auch der Konstruktion kann Schäden im Acrylglas verursachen. Das Erkennen von teilweise charakteristischen Schäden und ihrer Schadfaktoren ist eine Voraussetzung für die Entwicklung von Erhaltungsmethoden. Mittels Studien zur Reinigung und zum Oberflächenschutz sollten Erhaltungsvorschläge erarbeitet werden, die den Einfluss der Schadfaktoren vermindern und das Acrylglas schützen. Endresultat sind erste Empfehlungen, welche Schritte zu gehen sind um historisches Acrylglas im Außenraum zu erhalten. Eine Übersicht über das Projekt geben die Publikationen Brunner, Pamplona, Putz 2020, sowie Brunner 2021 im ICOM-CC Newsletter.

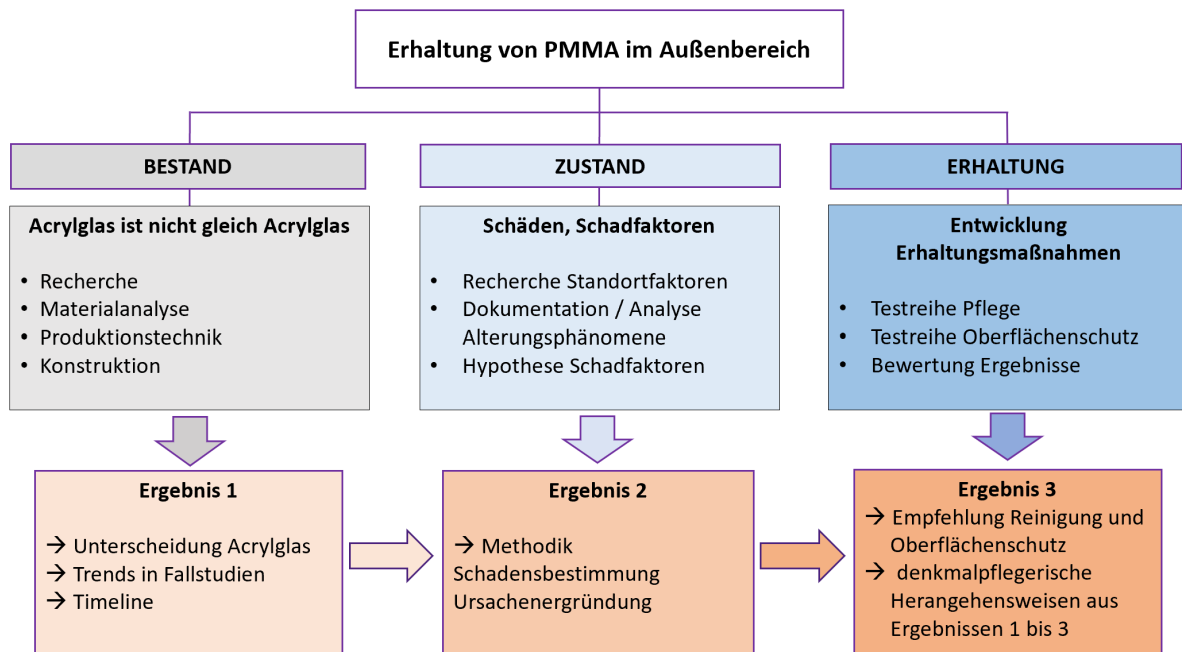


Abb. 1: Übersicht über die drei Arbeitsbereiche des Projekts und die erwarteten Ergebnisse.

Arbeitsschritte und angewandte Methoden

1 Differenzierung von Acrylglas

In drei Stufen fanden Quellenstudien statt, mit deren Hilfe der Bestand und die Entwicklung von Bauteilen aus Acrylglas nachvollzogen werden kann. Die verwendeten Quellen waren zum einen Literatur und Archivalien, zum zweiten Fallstudien und zum dritten historische Fragmente, die mittels Analyse- und Untersuchungsmethoden charakterisiert wurden. In den vier DBU-Zwischenberichten (ZB) sind die Arbeitsschritte und angewandten Methoden ausführlich beschrieben.

- 1) Mit Hilfe von Archivalien aus dem Archiv Röhm der Evonik Industries GmbH, dem Archiv des DM, und dem Archiv im Olympiapark, wurde die historische Entwicklung der Produktion und Anwendung von Acrylglas im Außenraum nachvollzogen. Bezüglich der Produktion wurden sowohl die Zusammensetzung als auch die Formgebung und Umformung betrachtet. Ebenso wurde betrachtet, wann welche Bauteile Verwendung fanden sowie welche Formen und Konstruktionen üblich waren.

- 2) An den Fallstudien in situ (Abb. 2) wurden Zusammensetzung, Formgebung und Umformung untersucht. Zur Anwendung kamen die Analyseverfahren FTIR und py-GC/MS, auch mit Mikrowellenextraktion, die eine minimale Probenentnahme erfordern. Auch wurden zerstörungsfreie optische Methoden angewandt, wie Mikroskopie und Bemaßung. Es erfolgte eine Beschreibung und Dokumentation des Bestands inklusive der Konstruktion, also der angrenzenden Materialien, Rahmung und Befestigung. Unterstützend dabei war die Recherche zur Historie der Objekte, mit Hilfe von Bauplänen und Literatur.
- 3) Als drittes wurden historische Fragmente im Labor untersucht (Abb. 3). Eine zeitliche Einordnung war nur bedingt möglich, es stand die Untersuchung des Materials im Vordergrund. Die Beprobung war ausgebaut und ohne Rahmen deutlich einfacher. Im Labor standen mehr Geräte zur optischen Begutachtung zur Verfügung, z.B. Stereoskop, und für FTIR war nicht zwingend eine Probenentnahme erforderlich.

Eine genaue Beschreibung der Fallstudien und Fragmente ist in den DBU-ZB 1 und 2 zu finden.

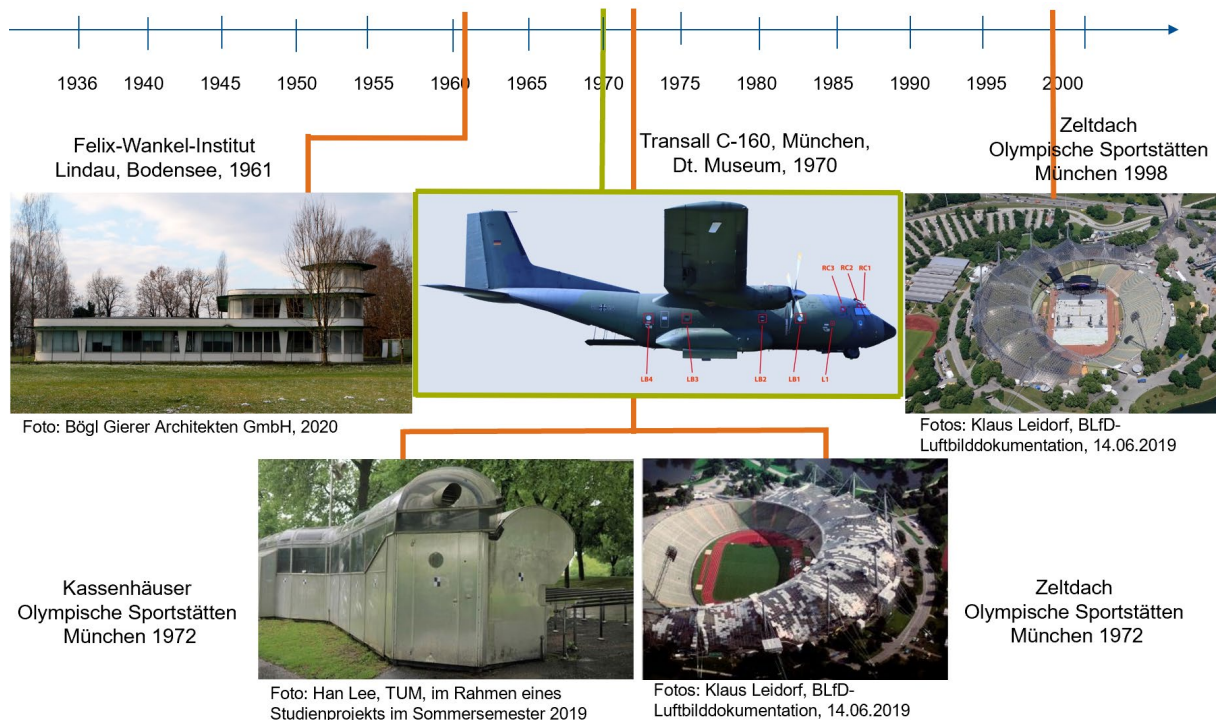


Abb. 2: Übersicht über die untersuchten Fallstudien



Scheiben Felix Wankel Institut 1961, 6 mm, ca. 2 x 1 m



Cockpitscheibe dt. Flugzeug 1943, Dachbodenfund
Dicke 6 mm,
Länge 39 cm,
Breite 29 cm

Fenster Transall, gewölbt, undatiert, 6 mm Dicke, 45 cm Durchmesser



Kompass Flugzeug, Kuppel, 1935-1940,
8 cm Durchmesser,
4 cm Höhe,
Dicke unbekannt



Fenster von Suchlicht, konvex gewölbt, undatiertes Ersatzmaterial, Dicke 6 mm, Höhe 27 cm, Länge 40 cm



Olympiadach BLfD 1972, Inv.-Nr. 2766, 4 mm, Breite 191 cm, Länge 210 cm



Olympiadach 1972, BLfD Inv.-Nr. 2769, 4 mm, Puffer Chloropren



Scheibe Kassenhaus 1972, 3,5 mm



Olympiadach 1998, 4 mm

Abb. 3: Übersicht über die untersuchten historischen Fragmente

II Schadensphänomene und Schadfaktoren

Obwohl Acrylglas im Allgemeinen relativ beständig ist im Vergleich zu anderen Kunststoffen, kann es dennoch im Lauf der Zeit unter Außenraumbedingungen zu Materialveränderungen kommen. Alterungs- und Schadensphänomene zeigen sich erst lange, nachdem Schadfaktoren gewirkt und Materialveränderungen ein großes Ausmaß erreicht haben. Die Identifikation der Alterung und des Materialabbaus ist durch optische und analytische Untersuchung an den Fallstudien und historischen Fragmenten in drei Schritten erfolgt.

- 1) Voraussetzung ist die genaue Materialkenntnis des Bestands. Schon die Zusammensetzung, bestimmte Produktionsverfahren und die Konstruktion können durch chemische und mechanische Prozesse Einfluss auf die Schädigung von Acrylglas nehmen und somit Schadfaktoren beinhalten.
- 2) Im zweiten Schritt steht die Identifikation von sichtbaren Schadens- und Alterungsphänomenen: Worum handelt es sich und wo im Material tritt das Phänomen auf? Die Beschreibung in Wort und Bild hilft dabei, Phänomene klar und einheitlich zu definieren. Bei der Beschreibung von Schadensphänomenen und ihrer Entstehung werden zudem Abbaumechanismen erkannt, und unter Umständen weitere Schadfaktoren.
- 3) Im dritten Schritt werden mögliche Schadfaktoren identifiziert. Zu wissen, was potenziell für eine Materialschädigung verantwortlich ist, ist die Grundlage für die Entwicklung von Erhaltungsstrategien. Schadfaktoren sollten als Ursache der Schäden identifiziert werden, aber auch ihre Wirkmechanismen.

III Erhaltungsmethoden

Die Entwicklung von substanzerhaltenden Maßnahmen für historisches Acrylglas setzt zwei Stufen voraus. Auf die Erfassung sichtbarer Alterungsphänomene, deren Aussehen und Schweregrad, folgt die Identifikation von Abbaumechanismen und deren ursächlichen Schadfaktoren. Die Schadensursachen zeigen auf, wo mindernd eingegriffen werden sollte und welches die häufigsten und schädlichsten Ursachen sind, die adressiert werden sollten. Der größte Anteil der erhaltenden Maßnahmen sollte nicht invasiv sein, bspw. durch Monitoring. Minimal invasive Maßnahmen bilden den kleineren Teil und stark invasive Maßnahmen sollten den geringsten Raum einnehmen.

Zu den stark invasiven Maßnahmen wurden drei Studien zur Pflege / Reinigung (Abb. 4) und zum Oberflächenschutz durchgeführt (Abb. 5). Die Studien werden hier ausführlicher dargestellt, da sie nicht in den DBU-ZW aufgeführt sind.

- 1) Eine *erste Reinigungsstudie* wurde von den Stipendiatinnen des Deutschen Museums (DM) Franziska Schittler mit Hilfe von Veronika Mayr durchgeführt. Sechs Reinigungsmethoden wurden an historischen Fragmenten des Olympiadachs von 1998 im Labor ausgeführt und mittels Untersuchungsmethoden sowohl der Reinigungserfolg als auch das Schädigungspotenzial eruiert mit dem Ziel, Empfehlungen auszusprechen.
- 2) In einer *fortführenden Reinigungsstudie* wurden Flächen des Olympiadachs in situ mit den bewährten Methoden aus der ersten Studie gereinigt. Neben Reinigungserfolg und Schädigungspotenzial wurden Effektivität, Effizienz und Praktikabilität der Methoden untersucht.

Die Reinigungsstudien wurden mit Unterstützung der Stadtwerke München (SWM) und weiterer Firmen durchgeführt.

- 3) In einer *Studie zum Oberflächenschutz* wurden zuerst mögliche industrielle Produkte recherchiert. Fünf ausgewählte Produkte wurden an neuem Acrylglas getestet, das mit simulierten Alterungsphänomenen in Form von Rauigkeit und Kratzern präpariert wurde. Mittels Untersuchungsmethoden wurden ihre Ästhetik und ihre Haftung geprüft sowie, inwiefern Rauigkeit und Kratzer ausgeglichen werden und Wasser abgewiesen werden kann. Ebenso wurde die Praktikabilität der Anwendung und die Kosten untersucht.

Auswahlkriterien für die Studien zu Reinigung und Oberflächenschutz

Die Reinigung soll nicht abrasiv und lösemittelarm sein.

Wie der Oberflächenschutz auch sollte sie in situ anwendbar sein, für große Flächen effizient anwendbar sein, effektiv sowohl an rauen als auch an glatten Flächen sein, und an jeglichen Formen und Konstruktionen anwendbar sein. Der Oberflächenschutz sollte eine gute Haftung und eine gute Schutzwirkung haben. Dabei ist sowohl ein mechanischer Schutz, als auch ein Schutz vor Strahlung (UV/IR), Wasser und Sauerstoff gemeint.

Es gab Diskussionen, ob der Oberflächenschutz ästhetisch unauffällig sein soll, langlebig und reversibel. Daraufhin wurde eine Umfrage gestartet, in der Denkmalpfleger:innen und Restaurator:innen beschreiben sollten, ob sie in ihrer Praxis einen langlebigen, jedoch optisch auffälligen Oberflächenschutz bevorzugt anwenden, oder einen optisch unauffälligen, der öfter erneuert werden muss.¹ Von einem Rücklauf von 43 Antworten bezog sich ein Drittel auf den Außenraum, wo beides gleichermaßen angewandt wurde. Somit sind die Kriterien ästhetische Unauffälligkeit, Langlebigkeit und Reversibilität nicht primäre Auswahlkriterien, sondern individuell je nach Fallstudie zu entscheiden.

Reinigungsstudie I

Bei der Laborstudie standen ausgetauschte Olympiadachplatten zur Verfügung (Abb. 4). Diese wurden nach drei Schmutzkategorien sortiert und jede Schmutzkategorie mit jeder der vier bzw. sechs Reinigungsarten gereinigt. Die Schmutzkategorien reichten von losen, hellen Auflagerungen über anhaftende Partikel mit leichtem grünen Bewuchs, bis zum öligen Schmutzfilm mit größeren Partikeln, inklusive Reifenabrieb. Direkt neben den Olympischen Sportstätten befindet sich der vielbefahrene sechsspurige Mittlere Ring. Die ausgewählten Reinigungsmethoden entsprachen den definierten Auswahlkriterien und waren wässrig, wässrig mit Tensid oder trocken: (1) Ein leicht angefeuchtetes Mikrofasertuch Vileda Professional MicroClean Plus, in Anlehnung an die Popartstudie von 2012², um einen angefeuchteten Schwammblock Blitz-Fix gelegt für einen gleichmäßigen Druck. Zum einen mit Wasser, zum anderen mit einer 1 %igen Tensidlösung (Dehyphon LS 45). (2) Der Waschsauger Gregomatic®, der z.B. in der Baudenkmalpflege für poröses Material eingesetzt wird, da er gleichzeitig Wasser auf die Oberfläche spritzt, dort verwirbelt und im Anschluss wieder absaugt; einmal pur angewandt, einmal mit Tensid vorgegärt. (3) Latexverfahren: Flüssiges Latex wird aufgestrichen und nach Abbindung wieder abgezogen, wobei der gebundene Schmutz entfernt wird, durchgeführt von der Fa. BELFOR. (4) CO₂ Schneestrahlen, bei dem Schmutz trocken abgesprengt wird, ohne mechanisch zu belasten, durchgeführt von Fa. acp Systems.

¹ Umfrage an Restaurator:innen und Denkmalpfleger:innen zu Oberflächenschutz: Langlebigkeit vs. Unauffälligkeit, eigene Erfahrungen in der Berufspraxis, Juni / Juli 2022. Verbreitung über den VDR.

² Lavédrine, B., Fournier, A., Martin, G. 2012 (Hg.): *Preservation of Plastic Artefacts in Museum Collections*, Paris 2012.

Der Reinigungserfolg wurde anhand von mikroskopischen und makroskopischen Fotos und mehreren Betrachtern mittels optischer Begutachtung ausgewertet. Ebenfalls gereinigt wurden Referenzplatten, die im Innenraum eingelagert waren und für den Austausch von defekten Dachplatten verwendet werden. Daran wurde das Schädigungspotenzial der Methoden getestet, mittels der Glanzmessung zur Untersuchung der Glanzänderung sowie der Profilometrie zur Untersuchung der Kratzerbildung. Mittels der Polariskopie wurde überprüft, ob bei der Reinigung mechanische Spannungen entstanden sind.

Reinigungsmethoden	
Mikrofasertuch um Schwamm	aqua dest. aqua dest. 1 % Tensid
Gregomatic®	aqua dest. aqua dest. 1 % Tensid
Latexverfahren	
CO ₂ Schneestrahlen	



Foto: Franziska Schittler 2021

Reinigungsmethoden	
Mikrofasertuch um Schwamm	aqua dest. aqua dest. 1 % Tensid
Gregomatic®	aqua dest. aqua dest. 1 % Tensid
Hochdruckreiniger	



Untersuchungsmethoden	Ziel
Optische Begutachtung	Reinigungserfolg
Glanzmessung	Glanzverlust
Kontaktwinkel	Änderung freie Oberflächenenergie Hydrophob ↔ hydrophil
Profilometrie	Kratzerbildung
Polariskopie	Erzeugung mechanischer Spannung

Untersuchungsmethoden	Ziel
Optische Begutachtung	Reinigungserfolg
Glanzmessung	Glanzverlust
Kontaktwinkel	Hydrophob ↔ hydrophil
Profilometrie	Kratzerbildung
Praktikabilität, Effizienz	Kosten / Zeitaufwand /benötigte Geräte / Zugänglichkeit

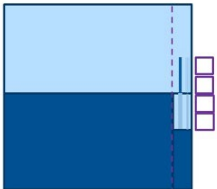
Abb. 4: Übersicht der Reinigungsstudien im Labor (links) und in situ (rechts) mit den angewandten Reinigungs- und Untersuchungsmethoden.

Reinigungsstudie II

Testfläche waren graue Platten an einer gut zugänglichen Stelle des Olympiadachs, die eine Verschmutzung ähnlich den Testflächen der Laborstudie aufweist (Abb. 5). Die Fläche befindet sich dennoch in drei Metern Höhe und ist um ca. 20 bis 30 Grad geneigt. Die Platten wurden insgesamt in fünf Testflächen unterteilt, für jede Reinigungsmethode eine Fläche. Als Reinigungsmethoden wurden vier der Methoden ausgewählt, die bei der Laborstudie für alle Schmutzarten gut funktioniert haben. Deshalb wurde CO₂ Schneestrahlen nicht ausgewählt, sondern das Mikrofasertuch und Gregomatic®.

Zusätzlich wurde die Hochdruckreinigung getestet, bei der es sich um eine im Außenraum üblicherweise angewandte und von Fa. Röhm für Plexiglas® empfohlene Methode handelt.³ Neben der Beurteilung des Reinigungserfolgs wurden erneut anhand Referenzplatten, diesmal grauen, das Schädigungspotenzial beurteilt, mittels Untersuchung von Glanz, Kontaktwinkel und Profilometrie. Zusätzlich wurde die Praktikabilität der Reinigungsmethoden einbezogen. Für schwere, sperrige Gerätschaften wie den Gregomatic® wird bspw. eine Hebebühne mit einer zusätzlichen Arbeitskraft benötigt. Außerdem wurde beurteilt, ob sich die Methoden für Hinterschneidungen und spitzwinklige Ecken eignen.

Schutzüberzüge	
Preimeß	Versiegelung Nanoprofi® Glas Nano-Lack matt
NewPro	Langzeitanstrich RK CCS
Nanocare	Plexiclean VP 20 Keramik Versiegelung DURA VF



Untersuchungsmethoden	Ziel
Optische Begutachtung	Ästhetische Beeinträchtigung
Glanz- / Farbmessung	Glanz-/Farbveränderung
Kontaktwinkel	Hydrophob ↔ hydrophil
Profilometrie	Kratzerbildung, Ausgleich von Vertiefungen
Gitterschnittprüfung	Haftung

Abb. 5: Übersicht der Studie zum Oberflächenschutz mit den getesteten Produkten und Untersuchungsmethoden sowie einer Skizze der Probestplatten.

³ <https://www.plexiglas.de/files/plexiglas-content/pdf/verarbeitungsrichtlinie/311-4-Oberflaechenbehandeln-von-PLEXIGLAS.pdf>, aufgerufen 26.3.2023.

Studie zum Oberflächenschutz

Ergebnis der Recherche ist eine Marktübersicht, aus der die wichtigsten Eckdaten der Produkte entnommen werden können. Aus diesen Produkten wurden fünf ausgewählt, die zur Fallstudie Olympiadach passen. Die gewählten Produkte sind einfach per Hand aufzutragen, transparent und farblos, gelten als alterungsbeständig und versprechen in gewisser Weise eine Schutzfunktion, entweder ein mechanischer Schutz, vor UV-Strahlung oder mit sogenanntem Lotus-Effekt. Alle Produkte enthalten Silizium oder Silikatische Verbindungen: Von Fa. Preimeß (1) eine Acrylglasversiegelung und (2) ein matter Nanolack. Von Fa. New Pro (3) ein Langzeitanstrich sowie von Fa. Nanocare (4) ‚Plexiclean‘ und (5) eine keramische Versiegelung. Der zweikomponentige Lack (2) wurde mit einer Lackrolle aufgetragen, die übrigen wurden mit einem Applikationstuch um einen Applikationsblock aus Schaumstoff aufgetragen. Nr. 1, 3 und 5 wurden zudem poliert. Die Haltbarkeit der Lacke reicht von 1-2 Jahren im Fall von Nr. 4 bis 20 Jahre im Fall von Nr. 2.

Nr. 1 und Nr. 4 können durch einen direkten Neuauftrag erneuert werden. Die übrigen sind zuvor mechanisch abzutragen.

Die Probestplatten von je 2500 x 2500 x 4 mm wurden in der unteren Hälfte mit einem Strahlgerät mit dem Strahlgut Natriumbicarbonat aufgeraut und am rechten Rand wurden vier Kratzerarten in unterschiedlicher Breite und Tiefe aufgebracht, um eine vorgeschädigte Oberfläche nachzustellen. Mittels makroskopischer und mikroskopischer Begutachtung, aber auch mittels Glanz- und Farbmessung wurden ästhetische Veränderungen untersucht. Mittels Kontaktwinkelmessung wurde gemessen inwiefern die Oberfläche hydrophobiert wurde. Profilometrie wurde angewandt um zu sehen inwiefern Auftrag und Politur Kratzer erzeugt haben, aber auch, ob der Oberflächenschutz Vertiefungen in Form von Kratzern oder Rauigkeit ausgleicht. Mit der Gitterschnittprüfung wurden die Lacke hinsichtlich ihrer Haftung an glatten oder rauen Oberflächen getestet.

Ergebnisse

I Differenzierung von Acrylglas

Aus den Recherchen entstand eine Zeitleiste, mit deren Hilfe eine Zuschreibung von historischem Acrylglas möglich ist (Abb. 4). Die Zeitleiste gibt einen Überblick über PMMA-Scheiben und Bauteilen, deren Zusammensetzung, Herstellung inkl. Formung, mit Konzentration auf die Herstellung in Deutschland. In der Publikation Brunner 2021 wird die Produktion von Acrylglas vor und nach 1950 zusammenfassend dargestellt.

Anwendung

Acrylglas spielte von Anfang an eine große Rolle in Technischen Objekten wie Flugzeugen, Autos, Hubschraubern, Booten usw. und hatte darin eine Hochkonjunktur während des 2. Weltkriegs. Vor 1936 wurden transparente Scheiben aus mineralischem Glas, Cellulosenitrat oder -acetat hergestellt. Diese sind heute gegilbt und stark gealtert. Erst nach dem Krieg wurde das Material in der Architektur in breitem Maß eingesetzt, beginnend mit Kuppeln, die aus dem Flugzeugbau bekannt waren. Kunstwerke im Außenraum gab es ab ca. 1960.

Produktion

Die Fallstudie des Felix-Wankel-Instituts (FWI) von 1961 hat gerundete Fensterscheiben aus Acrylglas. Zu der Zeit war die übliche Produktionsart der Guss. Anschließend wurden die

Scheiben durch Thermoformen umgeformt, also durch Erwärmen und ziehen über eine Holzform.

Mit Verwendung von Acrylglas in der Architektur kam die Extrusion auf, eine günstige Möglichkeit, große Flächen herzustellen. Wellplatten und Doppelstegplatten wurden bspw. extrudiert. Auf diese Art produziertes Acrylglas ist jedoch weniger qualitativ und weniger beständig als gegossenes Acrylglas aufgrund der kürzeren Kettenlänge, u.a. Heute gibt es hauptsächlich extrudiertes oder gerecktes Material in der Architektur.

Das Streckziehen, also das mono- oder biaxiale Ziehen einer gegossenen Platte in zwei bis vier Richtungen, war ein Verfahren, dass an der Transall Anwendung fand. Dort wurde die gereckte Scheibe im Anschluss unter Zug thermogeformt, was neben Literatur auch Spuren von Trennmittel belegen, die mittels py-GC/MS Untersuchungen festgestellt wurden.

Die Scheiben des Olympiadachs und der Kassenhäuser wurden ebenso gereckt. Hierbei werden die mechanischen Eigenschaften des Materials verbessert, es wurde schlagzäher und es wurden Materialkosten gespart, weil das Material auf das Vierfache seiner Fläche gezogen werden konnte. Das Olympiadach wurde 1972 fertig gestellt. Erst im Anschluss an die Produktion für die Olympischen Sportstätten stellte der Marktführer für Acrylglas in Deutschland, wenn nicht Europa, nämlich die Fa. Röhm, gerecktes Acrylglas in seine Produktpalette. Bis heute spielt es eine große Rolle, z.B. im Flugzeugbau.

Additive, nämlich UV-Schutzmittel und Brandschutzmittel, spielten ab dann eine Rolle in der Architektur, um zum einen die Brandschutzaufgaben zu erfüllen aber auch um das Material noch UV-beständiger zu machen als es schon ist. So z.B. bei den Platten des Olympiadachs. Vor allem in großer Höhe spielt UV-Schutzmittel eine Rolle, z.B. bei den Scheiben der Transall. Additive kamen am FWI noch nicht zur Anwendung, dort kam ein reines PMMA zur Anwendung, selbst ohne Stabilisatoren, allein mit einem Initiator für die Polymerisation. Ab Mitte/Ende der 1980er Jahre kamen Copolymerisate auf. Die Beigabe von Styrol bspw. macht das PMMA härter, aber die Herstellung auch günstiger. Zum Ausgleich wurden Weichmacher hinzugegeben. Dies kam bei der erneuten Olympiadacheindeckung 1998 zur Anwendung. Weichmacher sind nicht alterungsbeständig, sie wandern aus und lassen ein spröderes Material zurück. Dies ist ungünstig für die Beständigkeit von Acrylglas. Bis auf die Extrusion decken die ausgewählten Fallstudien alle Produktionsarten ab. Ausgenommen Kunst im Außenraum sind die drei Anwendungsarten im Außenraum vertreten.

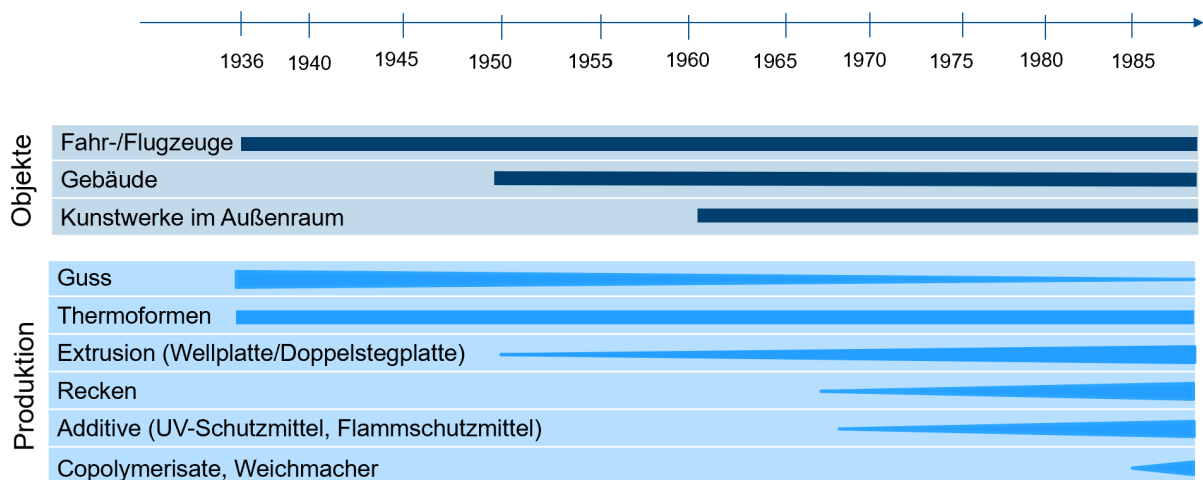


Abb. 6: Übersicht über die Produktion und Anwendung von Acrylglas in Deutschland im Zeitraum ab der erstmaligen Produktion der Scheiben bis in die 1980er Jahre.

Konstruktion



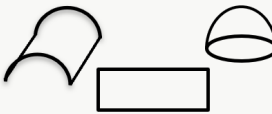

Die Acrylglasscheiben der Fallstudien sind gerade oder gebogen (Tab. 1) und befinden sich in einer Rahmenkonstruktion aus Aluminium, an der sie mit Schrauben und einem Puffermaterial als Zwischenlage befestigt sind. Beim recht frühen FWI ist das noch Kittmasse, wie sie im herkömmlichen Fensterbau verwendet wurde. Die obere Führungsschiene der verschiebbaren Fenster besteht schon aus einem synthetischen Elastomer, nämlich schwarzem Chloropren, das überall in den Olympischen Sportstätten verwendet wurde. An der Transall wurde Silikon als Dichtung verwendet. Gute Dichtungsmittel sind ein Muss. Zu fest angezogene Schrauben können ebenso wie kleine Bohrlöcher zu Rissen im Material führen. Schon die Konstruktion kann einen Schadfaktor darstellen. Die früheren Scheiben und die Scheiben im Flugzeugbau sind mit 6 mm generell dicker, in den Olympischen Sportstätten mit 3,5 und 4 mm eher dünner, weil das Recken die Schlagzähigkeit erhöht, auch bei einer Größe bis 3 x 3 m.

Die gereckten Scheiben der Olympischen Sportstätten, das sind alle bis auf die Kuppeln, wurden kalt in den Rahmen eingebogen, stehen also unter Spannung. Diese Konstruktion ist bei Alterung anfälliger für Mikrorisse, Risse und Brüche. Wohingegen die thermogeformten Scheiben des FWI, der Transall und die Kuppeln spannungsarm eingesetzt wurden. Über materialgerechte Konstruktionen mit Acrylglas ist tiefergehend in Brunner, Putz 2023 zu lesen.

Bis auf die Scheiben vom Olympiadach, bei denen nur ein kleiner Teil farblos ist und der größte Teil grau transluzent, wurde ausschließlich farbloses Acrylglas untersucht.

Die Scheiben der Kassenhäuser sind nach dem Einbau mit graublauem Lack versehen worden, jede Scheibe an je einer Oberfläche. Grund war vermutlich der Sonnenschutz. Somit konnten Trends innerhalb der Fallstudien ausgemacht werden, auch in Bezug auf die Form und Konstruktion.

Tab. 1: Konstruktion der Bauteile mit Acrylglas an den Fallstudien.

Fallstudie Parameter	Felix-Wankel-Institut	Transall	Kassenhäuser	Olympiadach
Maße	Bis ca. 2117 x 1117 (1125) x 6 mm	Ca. 450 x 6 mm	Bis ca. 1920 x 1340 x 3,5 mm	Bis ca. 3000 x 3000 x 6 mm
Herstellung	Guss, Thermoformen	Recken, Thermoformen	Recken, kalt Einbiegen / flach; Guss	Recken, kalt Einbiegen / flach
Bauteil	Fenster	Fenster	Dach, Kuppel, Wand	Dach
Befestigung	Alurahmen, Kitt, Chloropren, Schrauben	Alurahmen, Silikon, Schrauben	Alurahmen, Chloropren, Schrauben	Alurahmen, Chloropren, Schrauben
Ausrichtung	vertikal	vertikal	Vertikal / horizontal	vertikal / horizontal
Form				
Zusammensetzung	PMMA	PMMA mit Additiven	PMMA mit Additiven	PMMA Copolymer mit Additiven
Farbe	Farblos	Farblos	Farblos	Farblos oder transluzent grau
Beschichtung	-	-	Meist graublauer Lack	-

Untersuchungsmethoden

Mittels optischer Beurteilung und Recherchen aus Archiv und Literatur lassen sich viele Hinweise zur Differenzierung der Acrylate sammeln. Ist das Material z.B. gegilbt, so handelt es sich entweder nicht um PMMA, um ein Copolymer, oder eine andere Art von Mischmaterial oder Laminat, z.B. eine innenliegende Folie oder ein Überzug.

Es ist nicht zuletzt im Hinblick auf die Materialalterung relevant, die Produktionsarten inklusive der Materialzusammensetzung zu unterscheiden.

Die Unterscheidung gelingt mittels Untersuchungsmethoden, die eine minimale Probennahme erfordern (Tab. 2).

Am Beispiel der Transall: Mittels FTIR konnte Acrylglas als solches bestimmt werden. Es ergaben sich keine Hinweise auf ein Copolymer, dafür auf aromatische Zusätze im Spektrum. Mittels py-GC/MS, der Gaschromatographie mit Massenspektrometer konnten die Additive identifiziert werden, in diesem Fall zwei Initiatoren und Disflammol, das als Weichmacher und Brandschutzmittel verwendet wird, sowie ein UV-Schutzmittel.

Untersuchungsmethoden eignen sich ebenso zur Bestimmung der Art der Herstellung. Die Scheiben des FWI können der Zeitleiste entsprechend gegossen oder extrudiert worden sein. Mittels GPC, konnte anhand der Molekülgröße ein gegossenes Material identifiziert werden. Das Molekulargewicht lag im Millionenbereich, während hingegen extrudiertes Material ein geringeres Molekulargewicht hat.⁴

Tab. 2: Untersuchungsmethoden, die sich zur Charakterisierung des Bestands eignen.

Untersuchungsmethode	Feststellung Bestand
Quellenrecherche	Evtl. Produktzuschreibung möglich, Baupläne
Optische Begutachtung	Bemaßung, Morphologie, evtl. Material
FTIR	Feststellung PMMA, evtl. Copolymer/ aromatische Additive
Py-GC/MS, Mikrowellenextraktion	Detektion von Copolymer und spezifischen Additiven
GPC	Unterscheidung Guss / Extrusion

II Schadensphänomene und Schadfaktoren

Die an den untersuchten Fallstudien und historischen Fragmenten festgestellten sichtbaren Alterungs- und Schadensphänomene werden im Folgenden beschrieben und anhand von Fotos dokumentiert. Es werden mögliche Schadfaktoren aufgeführt, die die Phänomene verursacht haben könnten, sowie Untersuchungsmethoden, die zu einer Identifikation beitragen. Schadensphänomene können typisch für Produktionsarten sein oder auf eine spannungsreiche Konstruktion hinweisen. Eine tiefergehende Beschreibung findet sich in Brunner 2023.

Alterungs- und Schadensphänomene

Makroskopische Phänomene und ihre Schadfaktoren stammen aus den Olympischen Sportstätten und befinden sich dort an Acrylglas der Kassenhäuser von 1972 und am Olympiadaach von 1998 (Abb. 5). Sie sind aufgelistet nach Schweregrad der Schädigung, von leicht bis schwerwiegend.

⁴ Babo, S., Ferreira, J. L., Ramos, A. M. et al. 2020. 'Characterization and Long-Term Stability of Historical PMMA: Impact of Additives and Acrylic Sheet Industrial Production Processes'. In *Polymers*, 2020, 12, 2198 doi:10.3390/polym12102198.

- Eine leicht vertiefte Oberfläche / ein Verlust von Lack im Fall der Kassenhäuser, die mit einer leichten Trübung und Rauigkeit einhergehen können, werden auf eine mechanische Beschädigung aufgrund von biologischen Faktoren zurückgeführt. Die oberflächliche Vertiefung kann von einem mikrobiellen Befall wie bspw. Flechten oder Pilzen stammen, von Schneckenfraß oder von Wurzeln größerer Pflanzen, bspw. Moose.
- Kleine/flache oder große/tiefe Kratzer in der Oberfläche, meist von Verschmutzung und / oder von Reinigung stammend.
- Weißfärbung, die auf Rückstände eines Reinigungsmittels oder eines Graffitis zurückzuführen sind, oder auf eine Trübung aufgrund von Materialabbau, verursacht durch einen chemischen Angriff eines Reinigungsmittels.
- Deformation: Die Fenster der Kassenhäuser sind konkav nach innen gewölbt, so dass sich am Rand teilweise Lücken in der Konstruktion ergeben. Grund hierfür können Druck und Wärme sein, wie sie bspw. mittels eines Hochdruckreinigers ausgeübt werden. Die kalt eingebogenen Scheiben am Dach sind teilweise dauerhaft deformiert.
- Fehlstellen, ein kompletter Materialverlust, z.B. bei Ausbrüchen oder stumpfen Verletzungen.

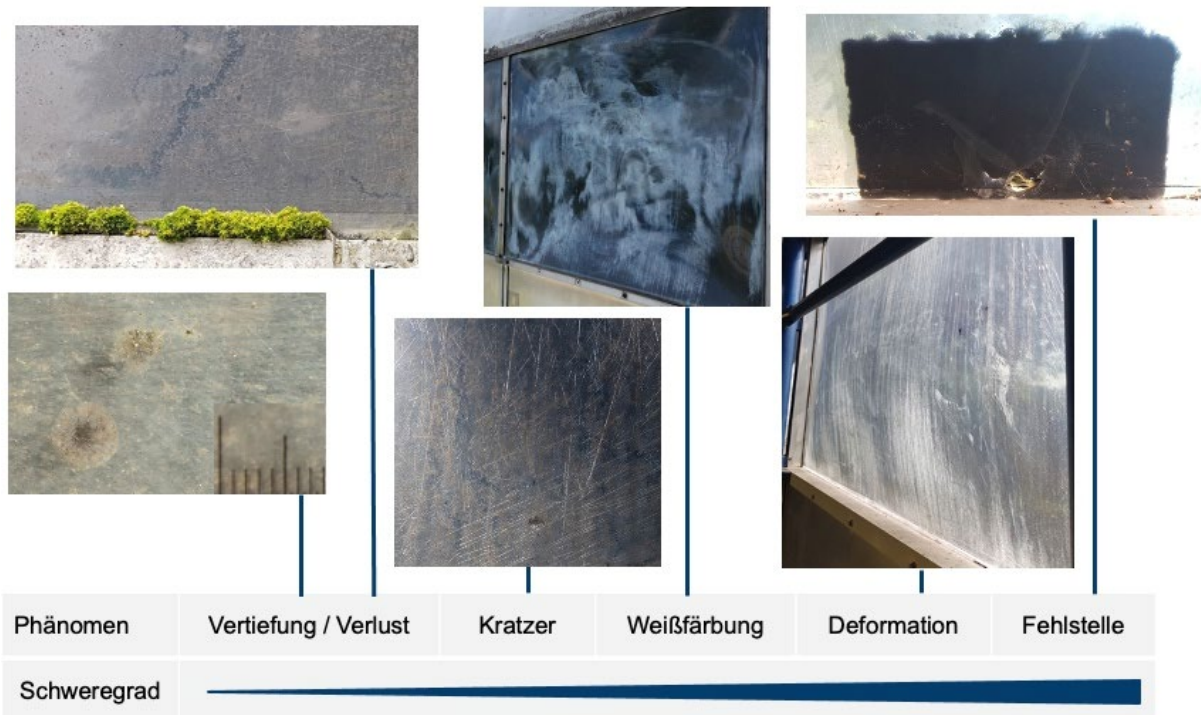


Abb. 7: Makroskopische Schadensphänomene an den Fallstudien der Olympischen Sportstätten in situ, den Kassenhäusern von 1972 und dem Olympiadach von 1998, geordnet nach Schweregrad von links nach rechts zunehmend.

Mikroskopisch dokumentierte Schadensphänomene sind an verschiedenen Objekten vorhanden (Abb. 6). Nachfolgend sind sie beschrieben in einer aufsteigenden Reihenfolge von geringer bis stärkerer Materialschädigung.

- eine flächige Trübung bei weiterhin glatter Oberfläche konnte vor allem am FWI in unterschiedlicher Ausprägung - je nach geografischer Ausrichtung - gesehen werden, jedoch auch an Kassenhäusern und an Flugzeugscheiben im DM in der Flugwerft Schleißheim (FWS).

- transparente Strukturen in der flächigen Trübung sind rund, wellenförmig oder linear und am FWI abschnittsweise in geringerer oder größerer Ausprägung vorhanden.
- Punktförmig vertiefte, weiß und rau erscheinende Oberflächen in einer kreisförmigen Anordnung sind singulär an der Unterseite von ausgebauten Olympiadachscheiben von 1998 zu sehen.
- Risse / Microcrazing sind an allen Objekten zu sehen, oberflächliches Crazing, oder Risse durch die gesamte Materialdicke.
- Weiß opake Oberfläche, rau mit rundlichen Erhebungen, ist singulär am FWI an einer nach Süden am stärksten der Sonne ausgesetzten Scheibe zu finden, am unteren Rand, unverschattet.
- Abblättern in Schollen, weiß kristalline Oberfläche, mit Materialverlust einhergehend, ist an gerecktem Material zu sehen. Zum einen an einer Sonne und Regen stark exponierten Scheibe an einem Kassenhaus sowie an einer Scheibe des Olympiadachs, beide von 1972. Das Phänomen folgt auf Crazing und Rissbildung. Die Außenhaut ist glänzend glatt gewölbt und gebrochen, darunter liegende Flächen sind rau.

Die Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Einige Schadensphänomene sind singulär, weshalb die Erfassung der Schadensphänomene mit neu untersuchten Objekten fortgesetzt werden kann. Im Interview mit der Bayerischen Zeitung in Dötsch 2022 wird der Zustand von Acrylglas in den Olympischen Sportstätten näher beleuchtet.

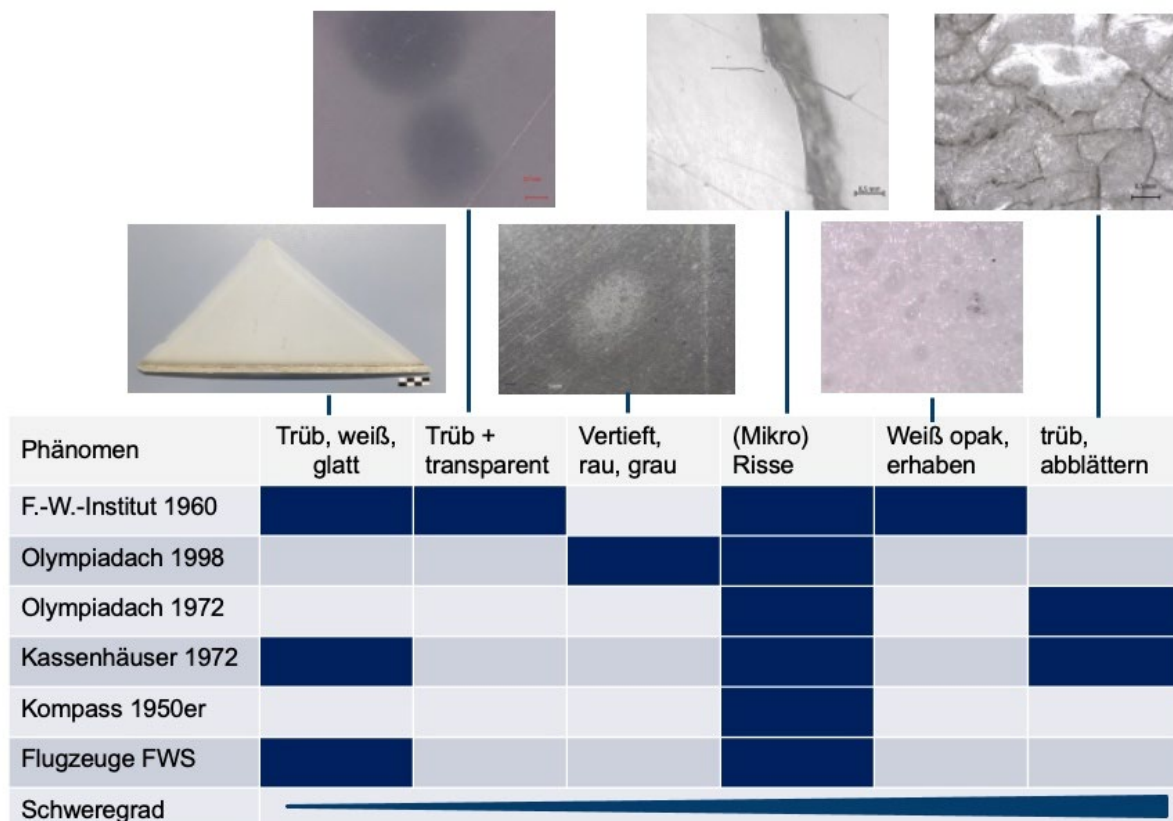


Abb. 8: Mikroskopische Schadensphänomene an den untersuchten Fallstudien und historischen Fragmenten, geordnet nach Schweregrad, von links nach rechts zunehmend.

Schadfaktoren

Verschiedene Schadfaktoren wirken auf die untersuchten Acrylgläser ein und können den oben aufgelisteten Alterungs- und Schadensphänomenen zugeschrieben werden.

Grob lassen sich die Schadfaktoren in drei Gruppen einteilen (Abb. 7):

- 1) Physikalisch/mechanische Faktoren, die schon bei der Herstellung angelegt sein konnten oder von der Konstruktion stammen
- 2) Biologisch/anthropogene Faktoren, die vom Menschen bis hin zu Mikroorganismen reichen. Dazu gehört bspw. eine unsachgemäße Reinigung, eine Besiedelung durch Organismen, eine Verschmutzung anorganischer oder organischer Natur oder Vandalismus.
- 3) Atmosphärische Faktoren, die von Sonne, Regen und der Luft/dem Wind stammen, das sind neben der UV-Strahlung die Wärme, Sauerstoff, etc.

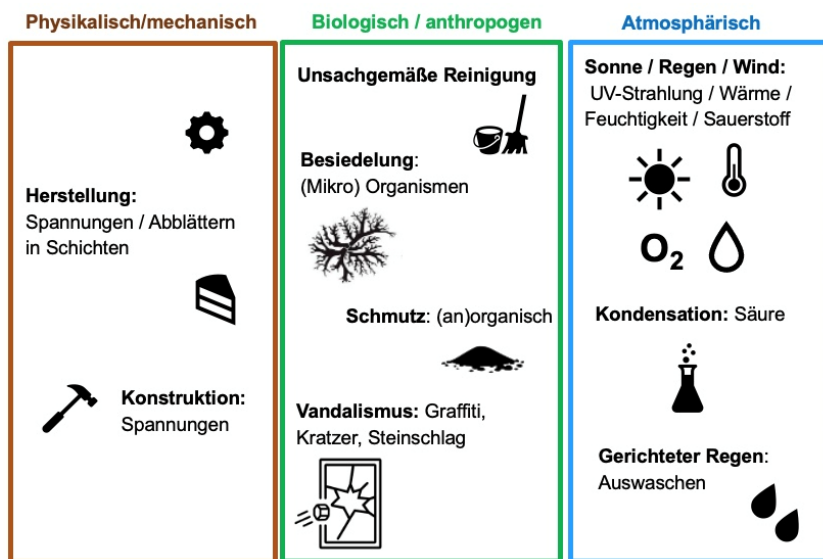


Abb. 9: Schadfaktoren als Ursache für die Alterungs- und Schadensphänomene an historischem Acrylglas im Außenraum können sowohl physikalisch/mechanischen (links), biologischen (mittig) oder atmosphärischen Ursprungs (rechts) sein.

Die Schadfaktoren wirken teilweise gleichzeitig auf das Acrylglas ein und können sich dabei gegenseitig verstärken. Atmosphärische Einflüsse wirken bspw. im Außenraum immer. Der Schadfaktor, also die Ursache der Schäden, kann hierbei unterschiedlich auf die Alterung einwirken. Die Wirkmechanismen der Schadfaktoren können sowohl physikalisch/mechanischer als auch chemischer Natur sein. Eine unsachgemäße Reinigung kann sowohl physikalisch wirken und Kratzer verursachen, oder das Putzmittel kann chemisch wirken. Ein gerichteter Regen, der gegen die Scheibe prasselt, hat ebenso sowohl physikalische als auch chemische Auswirkungen.

Die sichtbaren Alterungs- und Schadensphänomene lassen sich den hauptsächlichen Schadfaktoren als Ursache zuordnen (Abb. 8).

- 1) Physikalisch/mechanisch: Mikrorisse und Risse sind neben dem Abbau durch atmosphärische Einflüsse auch auf eine spannungsreiche Herstellung oder Konstruktion zurückzuführen. Das kalt eingebogene Dach eines Kassenhauses steht stark unter Spannung und verzeichnet Risse und Brüche.
- 2) Biologisch/anthropogen: Eine *unsachgemäße Reinigung*, z.B. eine durchaus übliche Hochdruckreinigung mit zu hohem Druck oder zu hoher Temperatur, kann zur Deformation von Acrylglas führen. Gerecktes Material beginnt ab über 80°C mit der

Rückschrumpfung. Als thermoplastisches Material ist es mit Wärme biegsam. Alkohole, die in handelsüblichem Glasreiniger vorhanden sind, können zu einer Trübung von Acrylglas führen. *Verschmutzung* organischer oder anorganischer Natur bildet einen Nährboden für Pflanzen und Mikroorganismen, besonders bei den Kassenhäusern unter Linden, von denen im Frühjahr/Sommer sogenannter Honigtau tropft. Dabei handelt es sich um klebrige Exkremente von Insekten, die den Lindensaft ausscheiden. Die klebrige Schicht zieht nicht nur Schmutz an, sondern auch Mikroorganismen wie einen schwarzen Pilz, der sowohl den Farblack als auch die Oberfläche des Acrylglases schädigt.

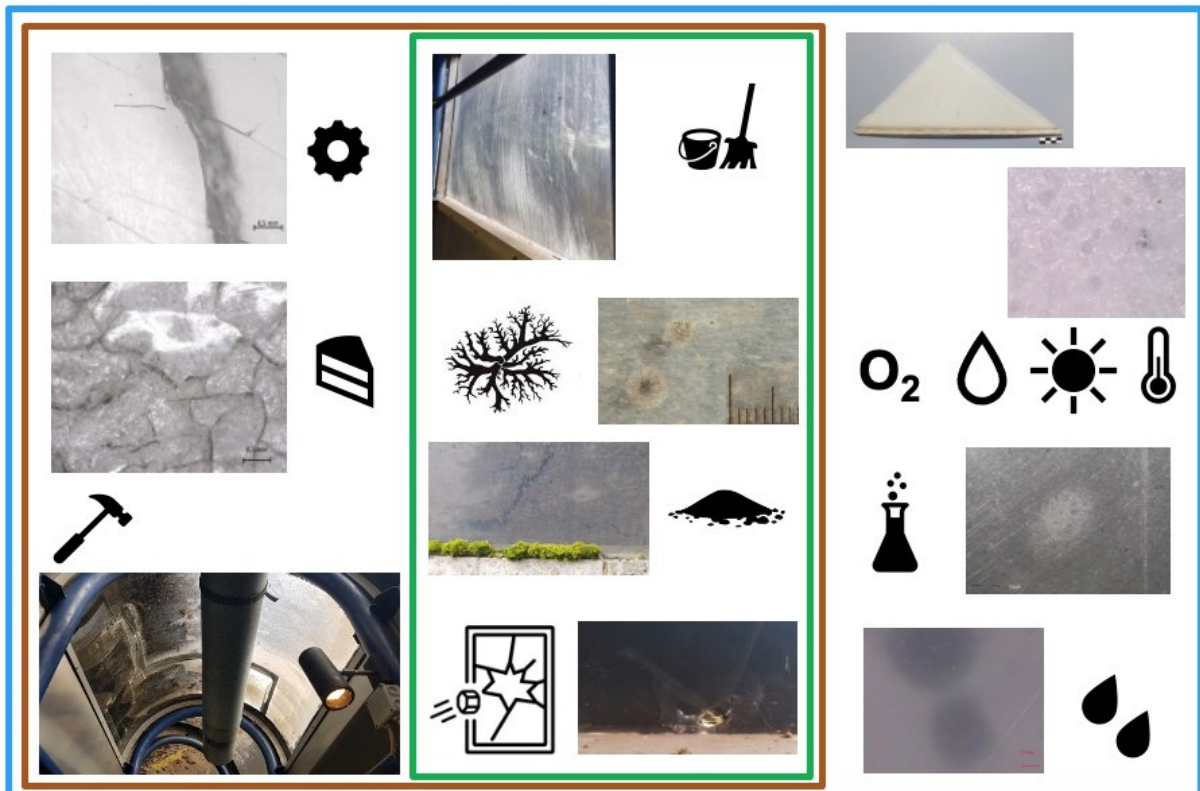


Abb. 10: Alterungs- und Schadensphänomene sowie die hauptsächlichsten Schadfaktoren als ihre Ursache.

3) Atmosphärische Faktoren: Die *weißen erhabenen Stellen* können bspw. durch Überhitzung entstanden sein, bei der sich die Oberfläche vergrößert und aufgewellt hat. Die *kreisförmigen Vertiefungen* an der Unterseite der Olympiadachplatten können aufgrund kondensierten sauren Regens entstanden sein. Bei Sonneneinstrahlung verdampft Wasser und es kann sich eine konzentrierte Schwefelsäure bilden, die das Material schädigt.⁵ Die *Trübung* bei glatter Oberfläche befindet sich nur an den äußeren 0,6 mm der Scheibe, wie mittels Mikroskopie und Rasterelektronenmikroskop (REM) an einer Bruchkante einer Scheibe des FWI nachgewiesen werden konnte. Es zeigt sich dort ein verändertes Bruchbild. Mittels GPC konnte nachgewiesen werden, dass das Molekulargewicht am bewitterten Außenrand nur noch ein Fünftel beträgt im Vergleich zu einer geschützten Stelle im Inneren des Materials. Kettenkürzung, Oxidation und Hydrolyseprozesse führen zu einer Verringerung des Molekulargewichts. Mittels Wärme

⁵ Schulz, U.; Trubiroha, P. 1997. 'Kunststoffe im sauren Regen'. In *Materialprüfung*, 39(1/2):35-39.

El-Tonsy, M. M.; Oraby, A. H.; Shumis, A. 2015. 'Degradation of glass polymers due to successive exposure to acid rain and UV radiation'. In *Journal of Advances in Physics* 11(2):2979-2989.

per Föhn konnte die Trübung an einer Stelle zurückgebildet werden.⁶ Es stellt sich die Frage, ob Abbauprodukte von PMMA (teil)kristallin vorliegen.⁷

An den *transparenten Stellen* in der Trübung konnte mittels GPC kein Anteil an niedermolekularen Bestandteilen nachgewiesen werden. Der Verdacht liegt nah, dass diese durch gerichteten Regen ausgewaschen wurden. Manche Schadfaktoren wirken direkt, wie bspw. Feuchtigkeit, und manche indirekt, wie bspw. eine mineralische Verschmutzung, deren zerkratzende Wirkung erst mit einer mechanischen Wischbewegung und Druck ausgelöst wird.

Es benötigt unten stehende Untersuchungsmethoden, um die Ursache der Schadensphänomene, sowie ihre Morphologie und Lokalisierung näher zu charakterisieren. Dies sind Untersuchungsmethoden, die über die rein makroskopische optische Untersuchung hinausgehen (Tab. 3). Mechanische Spannungen können mit einem Polariskop sichtbar gemacht werden. Hierzu dienen eine Lichtquelle und zwei linear polarisierte Folien, die gekreuzt zueinander stehen. Im Fall einer ausgebauten Scheibe des Olympiadachs konnten sowohl im Bereich der Schwingpuffer als auch im Randbereich mechanische Spannungen detektiert werden. Die Abbauprozesse, die immer aufgrund von atmosphärischen Einflüssen stattfinden, können nur mit minimalen Proben bestimmt werden. Mittels py-GC/MS können beispielsweise Abbauprodukte detektiert werden, die nach Oxidations- und Hydrolyseprozessen auftreten. GPC kann einen Materialabbau mittels des Molekulargewichts detektieren. DSC wurde nicht getestet, jedoch empfohlen, um die thermische Stabilität abzuschätzen und Schmelzpunkte zu definieren. Tiefergehend werden die Methoden in Brunner vsl. 2023 dargestellt.

Tab. 3: Untersuchungsmethoden, die sich zur Charakterisierung der Schadensphänomene und ihrer möglichen Schadfaktoren eignen.

Untersuchungsmethode	Feststellung Zustand / Schadfaktor
Optische Untersuchung, Mikroskopie, REM	Morphologie, Lokalisierung von Schäden
Polariskopie	Sichtbarmachung von mechanischer Spannung
Spektralphotometer	Grad der Trübung / Weißfärbung
Temperaturmessung	Deformation, Abbau, Überhitzung
Py-GC/MS	Detektion von Abbauprodukten nach Oxidations- und Hydrolyseprozessen
GPC	Grad des Abbaus, Lokalisierung anhand Molekulargewichts

III Erhaltungsmethoden

Die Untersuchungen und Tests haben deutliche Hinweise darauf gegeben, dass der größte Teil möglicher Erhaltungsmethoden an dem kratzerempfindlichen Acrylglas *nicht invasive*

⁶ Versuch von Restauratorin Katharina Haider an einer Scheibe des FWI 2021.

⁷ Henkel, M., Pleimling, M., Sanctuary, R. (eds.) 2007. *Ageing and the glass transition*. Lecture Notes in Physics Vol. 716. Berlin, Heidelberg, New York: Springer; White, J. R. 2006. ‚Polymer ageing: physics, chemistry or engineering? Time to reflect‘. In *Comptes Rendus Chimie* 9:1396-1408.

Methoden darstellen. Der kleinere Teil ist minimal invasiv und den geringsten Anteil haben stark invasive Maßnahmen. Im Folgenden werden Strategien angeführt und bewertet nach Grad ihrer Eingriffstiefe, um direkt und indirekt wirkende Schadfaktoren, sowohl chemisch als auch physikalisch/mechanisch wirkende, zu vermeiden oder zu mindern.

Nicht invasive Methoden

Ein Monitoring der Schäden, sowie die Aufklärung über das Materialverhalten und den Materialabbau von Acrylglas, das Schaffen eines Bewusstseins für mögliche Schadfaktoren, stellt eine nicht invasive Erhaltungsmethode dar. Beispielsweise kann eine Minderung von anthropogenen Schadfaktoren durch Aufklärung und einer Erhöhung der Sicherheit erreicht werden. Im öffentlichen Raum kann Vandalismus durch Überwachungskameras, einem Wachdienst oder ähnlichem entgegengewirkt werden. Eine unsachgemäße Reinigung sollte entdeckt und unterbunden werden.

Minimal invasive Maßnahmen

Minimal invasive Maßnahmen beinhalten Maßnahmen, die zur Verminderung atmosphärischer Einflüsse beitragen, z.B. einer Verschattung/Überdachung zur Reduktion von Wärme, direktem Regen, Hagel, Schnee und UV-Strahlung. Bestehende Konstruktionen sollten überprüft werden und können im geringen Umfang geändert werden. Schrauben können gelockert werden, und der korrekte Sitz des Puffermaterial sollte geprüft werden.

Stark invasive Maßnahmen

Stark invasive Maßnahmen sollten mit äußerster Vorsicht eingesetzt werden, da sie in die historische Originalsubstanz eingreifen. Sie beinhalten einen Austausch von Puffermaterialien, z.B. werden Puffermaterialien aus Chloropren mit der Zeit spröde. Beim Austausch von Scheiben sollte auf eine spannungsarme Konstruktion geachtet werden, indem bspw. Schrauben nicht zu fest angezogen werden, weiches Puffermaterial eingebracht wird, Bohrlöcher groß genug gebohrt werden, Scheiben thermisch statt kalt eingebogen werden, etc.

Es gab Überlegungen im Fall des FWI, ob durch eine Abnahme des äußeren getrübbten Millimeters, also durch Abtragung des stark gealterten Materials die Scheiben wieder transparenter werden und somit die Funktion des durchsichtigen Fensters wiederhergestellt werden kann. Das wurde bspw. an Flugzeugscheiben einer Maschine im Deutschen Museum durchgeführt. Solch ein Abtrag von Material ist nicht beliebig oft möglich und es muss sehr gut und eben poliert werden.

Bevor es jedoch zu einem Abtrag von historischer Substanz kommt, oder gar zum Austausch, sollte sich eine regelmäßige Reinigung oder ein Oberflächenschutz überlegt werden.

Eine regelmäßige Pflege sollte eine *sachgemäße Reinigung* beinhalten, die bei der Prävention von Mikroorganismenbefall, Schmutz und vor Verkratzen und Trübung hilft. Kommerzielle Reinigungsmittel für mineralisches Glas, aggressivere Reinigungsmittel, die abrasive Beistoffe enthalten, oder eine mechanische Entfernung mittels Kratzschwamm und Bürste schädigen. Auch eine zu aggressive Reinigung mit dem Hochdruckreiniger mit zu viel Druck oder zu hoher Temperatur. Eine sachgemäße Reinigung ist schonend, nicht abrasiv, wenig mechanisch, und mit möglichst niedrigem Druck und niedriger Temperatur.

Bevor es zu einem Austausch von Scheiben kommt, sollte ein *Oberflächenschutz* erwägt werden, der wie eine zweite Haut fungiert, oder wie eine Opferschicht, und vor atmosphärischen Einflüssen sowie mechanischen Angriffen und Vandalismus in Form von

Graffiti oder chemischen Angriffen schützen kann. Zugleich könnten damit fragile Oberflächen wie das Ablättern in Schichten gefestigt werden. Als Beispiel dienen hier die Fenster der Transall, die zum Schutz vor IR- und UV-Strahlung mit einer reflektierenden Schutzfolie beklebt wurden. Das Beispiel kam im Interview mit Hellmuth Nordwig in WDR-Quarks 2021 zur Sprache.

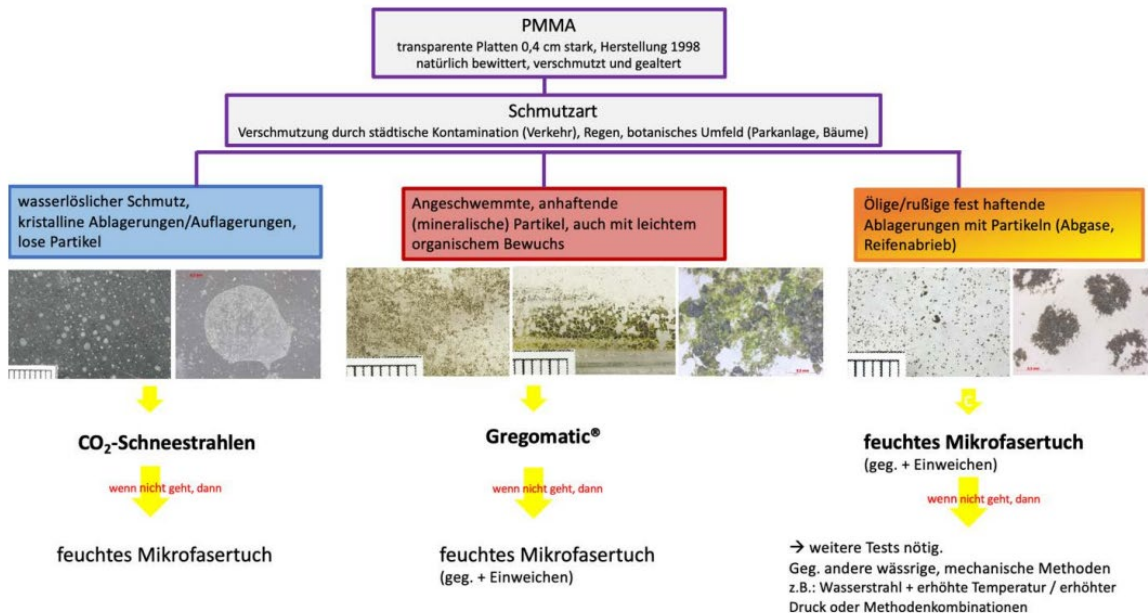


Abb. 11: Ergebnis der ersten Reinigungsstudie ist ein Baumdiagramm. Je nach vorhandener Schmutzart werden Reinigungsmethoden vorgeschlagen, die in der Studie wirksam waren (Schaubild Franziska Schittler).

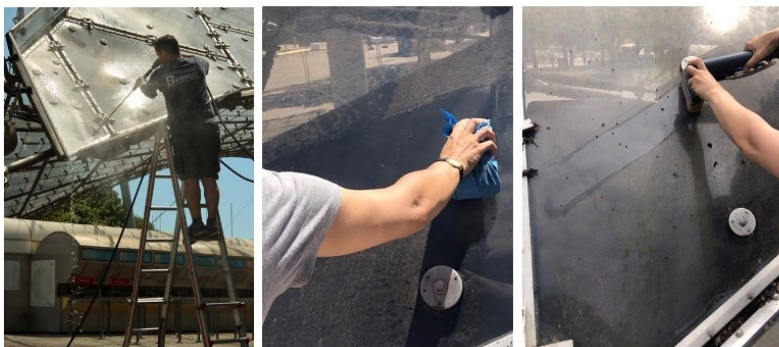
Reinigungsstudie I

Von vier getesteten Methoden wurden drei Methoden nach den Tests für geeignet befunden, die drei Schmutzarten zu entfernen ohne die Oberfläche zu beschädigen (Abb. 11). Für lose aufliegenden und wasserlöslichen Schmutz der ersten Kategorie ist das CO₂ Schneestrahlen das Mittel der Wahl. Es zeigte sich als äußerst schonend bei sehr gutem Reinigungserfolg. Sollte das nicht funktionieren, wäre das feuchte Mikrofasertuch das zweite Mittel der Wahl. Da in der Studie eine Fallstudie untersucht wurde und nicht mehrere, wurde zusätzlich jeweils eine zweite Wahl angegeben, falls die erste nicht funktioniert. Größere, haftende Partikel und leichter organischer Bewuchs konnten mit dem Waschsauger unter Vakuum schonend entfernt werden. Sollte eine stärkere mechanische Einwirkung nötig sein, wird hier das feuchte Mikrofasertuch empfohlen, ggf. nach vorherigem Vorweichen mit Wasser. Ölige/rußige und fest haftende Partikel haben eine stärkere mechanische und fettlösende Reinigung nötig mittels Mikrofasertuch. Das Tensid hat hier keinen Unterschied gemacht, da auch das Mikrofasertuch in der Lage ist in gewissem Maß Fett zu binden. Sollte dies nicht ausreichen, sind andere Methoden nötig, die z.B. einen höheren Druck oder eine höhere Temperatur beinhalten, wie der Hochdruckreiniger, der in der zweiten Reinigungsstudie getestet wurde.

Reinigungsstudie II

Die getesteten Methoden haben an den Referenzplatten keine nachteiligen Effekte gehabt. In Bezug auf die Reinigungswirkung, Praktikabilität, Anschaffungskosten und den Zeitaufwand hat jede Methode ihre Vor- und Nachteile (Abb. 12). Im Gegensatz zur ersten

Reinigungsstudie hat es einen deutlichen Unterschied gemacht, ob das Mikrofasertuch mit oder ohne Tensid angewandt wurde. Eine Anwendung mit Tensid hatte eine sichtlich höhere Reinigungswirkung. Bei der Anwendung mit Gregomatic® empfiehlt sich ein Vorweichen, damit die Gummilippe besser über die Oberfläche gleitet. Die Hochdruckreinigung eignet sich in dem Testablauf am besten. Als einzige Methode wurde anhaftender Bewuchs in Form von kleinen Flechten entfernt und Hinterschneidungen gut erreicht. Dennoch handelt es sich um eine Methode, die gut kontrolliert werden muss, was nicht einfach ist. Geräte, bei denen Druck und Temperatur eingestellt werden können, sind äußerst hochpreisig. Es empfiehlt sich nicht mit zu geringem Arbeitsabstand oder zu hohem Druck oder zu hohen Temperaturen zu arbeiten. Es sollte unter 100 bar und unter 80 °C gearbeitet werden. Schon aufgrund des geringen Arbeitsabstands sind die Methoden Microfasertuch und Gregomatic leichter zu kontrollieren, und damit ist auch die Kontrolle des Abwassers gemeint. Die Anwendung mittels Mikrofasertuch ist tropffrei, mittels Gregomatic® entsteht etwas Spritzwasser, während bei der Hochdruckreinigung das Abwasser über darunter liegende Oberflächen abfließt. Die Reinigung mittels Mikrofasertuch empfiehlt sich eher für kleine Flächen, da sie langwierig ist. Der Gregomatic® empfiehlt sich für ebene Flächen ohne Hinterschneidungen. Eine bessere Reinigungswirkung der beiden Methoden könnte erzielt werden, indem länger vorgeweicht oder die Reinigung öfter angewandt wird.



⊖	Sehr Teuer Kontrolle	Langwierig Reinigungswirkung	Teuer Hinterschneidungen Reinigungswirkung
⊕	Reinigungswirkung	Günstig Kontrolle	Kontrolle

Abb. 12: Ergebnis der zweiten Reinigungsstudie in situ, die Reinigungsmethoden Hochdruckreinigung, Mikrofasertuch und Gregomatic® mit ihren Vor- und Nachteilen (Fotos Domenika Marks).

Studie zum Oberflächenschutz

Potenzial auf den Anwendungsfall Olympiadaach haben zwei Produkte (Tab. 4). Jedoch sollten die Langzeitwirkung und die Dauerhaftigkeit überprüft werden, bevor eine klare Empfehlung ausgesprochen werden kann. Der Langzeitanstrich (3) und ‚Plexiclean‘ (4) schneiden in den ausgewählten Kriterien sehr gut ab. Aufgrund ihrer kurzen Trocknungszeit haben sie eine sehr geringe Staubbindung, können also auch in situ auftragen werden. Der Auftrag gelingt leicht und schnell, die Schichtdicken sind mit unter 1 µm sehr gering. Die Aufträge sind recht kratzerarm, wie mittels des R_{max} -Werts der Profilometrie gezeigt werden konnte. Die beschichteten glatten Flächen sind in ihren Mittelwerten aus 12 Messungen am nächsten an der unbeschichteten Referenzplatte und weisen die geringste Standardabweichung der Messwerte auf. Sie haften sehr gut auch bei starker

Beanspruchung: Bei der Gitterschnittprüfung wurde sowohl auf der rauhen als auch auf der glatten Fläche keine der beiden Produkte abgelöst. Dem Langzeitanstrich wird Flexibilität vom Hersteller zugeschrieben, bei Nr. 4 gab es keine Angabe. Beide Produkte hydrophobieren sowohl die glatte als auch die raue Oberfläche, wobei Nr. 4 mit 106° bzw. 110° sowohl auf der glatten als auch auf der rauhen Oberfläche einen sehr hohen Wert erzielt. Die als getrübt erscheinenden aufgerauten Oberflächen wurden gut ausgeglichen, was die Glanzmessungen zeigen, aber auch fotografische Aufnahmen, bei denen sich ein schwarzweißes Gitter an der Oberfläche spiegelt. Der Farbunterschied Delta E liegt bei beiden unter 1, den niedrigsten Werten, die raue beschichtete Oberfläche mit der unbeschichteten glatten Referenz verglichen. Dies würde bedeuten, dass eine Beschichtung auf einer gealterten rauhen Oberfläche, vereinzelt appliziert, farblich und den Glanz betreffend nicht auffällt neben einer eher glatten Oberfläche ohne Rauigkeit. Während Nr. 4 nach 1-2 Jahren recht häufig erneuert werden muss, ist Nr. 3 mit 10 Jahren Haltbarkeit zwar recht langlebig, kann jedoch nur nach einer mechanischen Abnahme neu beschichtet werden. Mit diesen beiden Produkten gibt es von beiden Extremen eine Schutzart. Ein Ausblick der Kurzzeitstudie ist es, den Oberflächenschutz auf natürlich bewitterten Fragmenten zu testen, die zuvor bei der Reinigungsstudie verwendet wurden, und dass sie im Anschluss einer künstlichen Alterung mittels UV-Strahlung und Feuchtigkeit ausgesetzt werden.

Tab. 4: Ergebnis der Studie zum Oberflächenschutz auf den Anwendungsfall Olympiadaach, dargestellt sind die fünf getesteten Produkte und ihre Bewertung geordnet nach den relevanten Kategorien.

Schutz	(1) Nanoversiegelung	(2) Nano-Lack	(3) Langzeitanstrich	(4) Plexiclean	(5) Keramikversiegelung
Staubfrei	X	x	X	X	X
Haftung	X	X	X	X	x
Flexibel	X	X	X	?	X
Kratzerarm	x	x	X	x	X
Hydrophob	X	x	X	X	x
Glanz/Farbe	x	x	X	X	X
Glatt	X	x	X	X	x

X hervorragend X sehr gut x gut x nicht gut X schlecht X sehr schlecht

IV Anleitung für die Erhaltung von historischem Acrylglas

Auf Grundlage der vorhergehenden Ergebnisse und in Anlehnung an Empfehlungen für den Erhalt von Beton in der Denkmalpflege⁸ wurden Richtlinien für den Umgang mit historischem Acrylglas entwickelt. Diese Empfehlungen sollen zukünftig als Handreichung dienen für Denkmalpfleger:innen und Restaurator:innen, aber auch für Besitzer:innen und Nutzer:innen im Umgang mit ihrem historischen und kulturell wertvollen Bestand (Abb. 13). Ein ausführlicher Punkteplan findet sich im Anhang. Neben der Schaffung eines Verständnisses für die Wertigkeit der Materialien und ihr (Alterungs-)verhalten ist es unabdingbar, alle Interessensgruppen in die folgenden Schritte mit einzubeziehen und ein Team von Experten zusammenzustellen. Für die Erfassung des Bestands und Zustands sind nicht nur

⁸ Macdonald, S., Arato Gonçalves, A. P. 2020. *Conservation Principles for Concrete of Cultural Significance*, Los Angeles 2020, S. 14-24; ICOMOC International (Hg.) 2021. *The Cádiz Document InnovaConcrete Guidelines for Conservation of Concrete Heritage*, Valencia 2020, S. 15-31.

Recherchen nötig sondern auch Untersuchungen vor Ort und im Labor, auch mit Probenahmen. Der anschließende Erhaltungsplan sollte vor allem nicht invasive Methoden einbeziehen und finanziell abgesichert sein. Ziel ist ein langfristiges Pflegeprogramm, bei dem die Bauteile aus Acrylglas in regelmäßigen Abständen untersucht und die Erkenntnisse dokumentiert werden.

Diese erste Anleitung soll zeitnah im Fachbereich vorgestellt und über ICOMOS (National Scientific Committee (NSC) Industriedenkmalpflege / Erbe des 20. Jahrhunderts und NSC Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei und Architekturoberflächen) und andere Fachverbände sowie den Landesämtern für Denkmalpflege weiterentwickelt und international veröffentlicht werden.

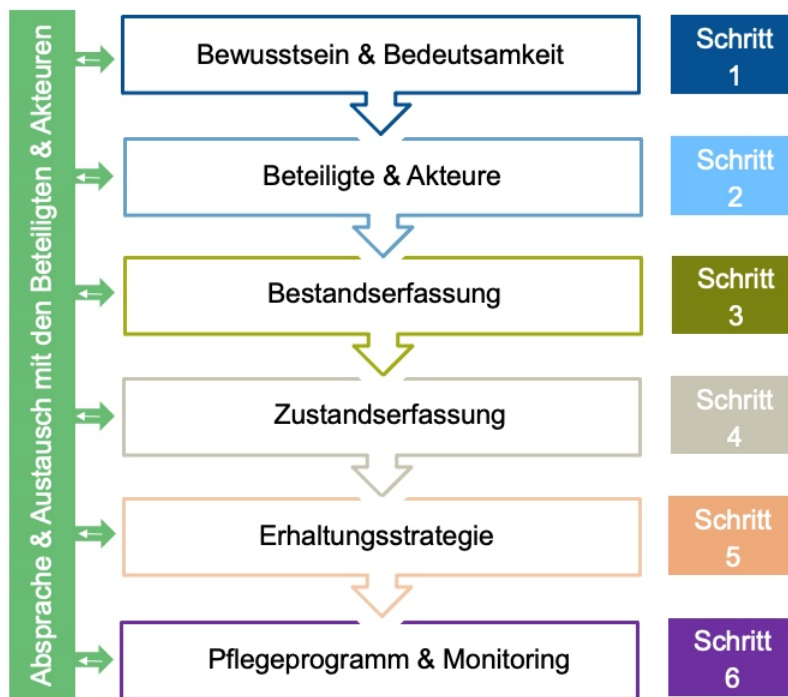


Abb. 13: Erste Anleitung für das schrittweise Vorgehen zum Erhalt von historischem Acrylglas im Außenraum im Flussdiagramm.

Diskussion

Die verfolgten Ziele wurden erreicht. Es wurde ein Vorgehen erarbeitet, wie historisches Acrylglas von kulturellem Wert vor anthropogenen Einflüssen geschützt werden kann. Abweichungen ergaben sich aus Unvorhergesehenheiten, so haben sich manche Untersuchungsmethoden aufgrund neu gewonnener Erkenntnisse nicht als geeignet erwiesen oder wurden zugunsten anderer vernachlässigt. Zu Anfang der Studie hatten wir beschränkten Zugang zu Laboren, Archiven, den Fallstudien und anderen Firmen, weshalb wir verstärkt publiziert haben und die Reihenfolge der Arbeitspakete getauscht wurde. Auf die Publikation in DIE DENKMALPFLEGE hin wurden wir auf die Fallstudie FWI aufmerksam gemacht. Zum Ende des Projekts haben sowohl die Technische Universität München (TUM) als auch das DM zusätzliche Arbeitskräfte finanziert, damit die Studien zur Reinigung und zum Oberflächenschutz innerhalb des Zeitplans durchgeführt werden konnten. Die

Zusammenarbeit mit den Kooperationspartner:innen, Archiven, Firmen und Laboren lief sehr gut. Es gab eine breite Unterstützung und das Forschungsprojekt stieß auf großes Interesse.

Öffentlichkeitsarbeit

Es ist gelungen, sowohl während der Projektlaufzeit als auch im Anschluss, durch die Untersuchungen an den Objekten, in den Instituten und mit den beteiligten Firmen, aber auch durch Publikation und Bekanntgabe das Interesse für die Fragestellung und die Ergebnisse zu wecken und Unterstützer:innen für das Projekt zu gewinnen.

Publikationen

Publikationen sind in nationalen und internationalen Fachpublikationen erschienen, ein Artikel wird voraussichtlich im Herbst publiziert. Die insgesamt vier Vorträge auf nationalen und internationalen Fachtagungen wurden interessiert angenommen. Es gab zwei Interviews für die interessierte Öffentlichkeit. Weitere Publikationen zu den Studien der Reinigung und des Oberflächenschutzes sind in Planung.

Fachpublikationen

- Brunner, S., Pamplona, M., Putz, A. 2020. 'Zum Wert von Polymethylmethacrylat. Erhaltungsstrategien für transparentes Acrylglas im Außenraum'. In *Die Denkmalpflege* 113(2):155-163.
- Brunner, S. 2021. 'Preservation of historic acrylics outdoors. Strategies for the conservation of outdoor transparent poly (methyl methacrylate) (PMMA) in architecture and museum objects'. In *ICOM-CC Newsletter, Triennium 2021-2023 / Newsletter No 1 / Issue 12 / July 2021*, S. 25
- Brunner, S. 2021. 'Transparent acrylic constructions before and after 1950 – from the 1935 Opel Olympia to the 1972 Olympic roof'. In *History of construction cultures* Vol. 1, 275-282.
- Brunner, S., Putz, A. 2023. 'Acrylglas im Bauen – materialgerechte Konstruktion oder konstruktionsgerechtes Material?'. In *Tagungsband der Fünften Jahrestagung vom 10. bis 11. Juni 2021 in Zürich, Gesellschaft für Bautechnikgeschichte (Hg), 2023*, S. 241-257.
- Brunner, S. 'Outdoors! Transparent acrylics in cultural heritage exposed to weather - case studies: degradation phenomena and their possible causes' [conference paper]. In *Future Talks 021*. Publikation vsl. Herbst 2023.

Vorträge

- Putz, A. 'Acrylglas im Bauen – materialgerechte Konstruktion oder konstruktionsgerechtes Material?', Fünfte Jahrestagung der Gesellschaft für Bautechnikgeschichte, 10.-11.6.2021 in Zürich
- Brunner, S. 'Outdoors! Transparent acrylics in cultural heritage exposed to weather - case studies: degradation phenomena and their possible causes', Future talks Conference, 8.-10.11.2021, online
- Brunner, S.; Putz, A.: 'Präsentation der Projektergebnisse, Erhaltungsstrategien für transparentes Polymethylmethacrylat (PMMA)', 15.3.2023, online
- Brunner, S.: 'Erhaltung und Schutz von Acrylglas: Wie kann eine stabile und innovative Schutzschicht aussehen', 10. Workshop Inn-O-Kultur *Neue Materialien &*

Interviews

- Interview von Hellmuth Nordwig zum Thema Kunststoffe im Museum, Hörfunkbeitrag WDR Quarks 1.12.2021: https://wdrmedien-a.akamaihd.net/medp/podcast/weltweit/fsk0/259/2590291/wdr5quarkswissenschaftundm ehr_2021-12-01_spritzegegenaidsnarzissmusbeikindernimpfpflicht_wdr5.mp3 (ab min. 57:10)
- Dütsch, K. 2022. ‚Kampf gegen trübe Aussichten. Wie kann man das wenige alte Acryl im Münchner Olympiapark retten und neues fit machen für seine transparente Zukunft?‘ In *Bayerische Zeitung*, Juli/August 2022, Jg. 71, Nr. 7/8, S. 11-15.

Partizipation an den Ergebnissen

An den Ergebnissen partizipiert auf Grund der Publikationen die gesamte nationale und internationale Forschungsgemeinschaft aus Denkmalpflege und Restaurierung/Konservierung. Es wurde ein wissenschaftlicher Diskurs angestoßen, der über das Projekt hinaus fort dauert. Eine Weiterführung der Studien zur Reinigung und zum Oberflächenschutz sind geplant. Die untersuchten Denkmäler haben einen direkten Nutzen, da durch die Forschung Aufmerksamkeit erregt wurde, ein Bewusstsein für den kulturellen Wert und das Materialverhalten geschaffen wurde und die Notwendigkeit von sachgerechten Pflege- und Erhaltungsmaßnahmen erkannt wurde. Am FWI wurden Erhaltungsmaßnahmen getestet und eine Restauratorin zu Tests hinzugezogen. Die Zusammenarbeit mit den SWM dauert an; eine Masterandin wurde für mechanische Tests an den Platten des Olympiadachs zur Feststellung der Stabilität hinzugezogen und zwei Kassenhäuser werden künftig sachgerecht gereinigt werden, die Reinigungsfirmen werden entsprechend instruiert. Die Einbeziehung von studentischen Hilfskräften, namentlich Domenika Marks vom CICS Köln, Heinrich Geißendörfer und Valerie Kronauer der TUM dient der Nachwuchsförderung. Maßgeblich hat das Projekt das Dissertationsvorhaben von Susanne Brunner ‚*Die Materialität der Transparenz – Erhalt von historischem Acrylglas zwischen Material und Ästhetik*‘ (Arbeitstitel) gefördert. Mit der Veröffentlichung des Sechs-Punkte-Plans erhalten die Interessensgruppen Hilfestellung bei Erhaltungsentscheidungen, und es werden mögliche Erhaltungsmethoden vorgestellt.

Schlussbetrachtung

Das im Projekt vorgenommene Vorgehen hat sich bewährt. Es sind viele Fragestellungen aufgeworfen worden, von denen einige beantwortet werden konnten. Einige konnten nicht abschließend geklärt werden. Weiterhin sollte das Ziel sein, Erhaltungsmethoden weiterzuentwickeln und zu testen. In Bezug auf den Oberflächenschutz ist ein Test zum Langzeitverhalten der industriellen Produkte nötig um Empfehlungen aussprechen zu können. Auch ist die Entwicklung eines neuen Produkts denkbar. Änderungen der Zielsetzung sind nicht notwendig.

3 Danksagung

Allen voran ergeht ein großer Dank an die DBU mit Constanze Fuhrmann sowie die Kooperationspartner:innen Dr. Marisa Pamplona mit der Restaurierungsabteilung am DM samt Kolleg:innen anderer Abteilungen, und vom Zentrallabor des BLfD Martin Mach, Dr. Sven Bittner, Simon Mindermann und Björn Seewald sowie Thomas Stöckl von der Restaurierungsabteilung und Julia Ludwar vom Bauarchiv in Thierhaupten. Ohne die Bereitstellung von finanziellen Mitteln, Arbeitsgeräten, Untersuchungsmaterial und personeller Unterstützung wäre das Projekt nicht erfolgt. Für die Durchführung von Analysen und Unterstützung bei der Auswertung sei Dr. Peter Montag gedankt von PSS Polymer Solutions Service GmbH, Fa. Röhm GmbH mit Michael Schwind und Fa. Evonik mit Steffen Ley und Kolleg:innen.

Von großer Hilfe waren die SWM mit vielen Abteilungen, allen voran Georg Hermann und Kolleg:innen, die mit Proben- und Archivmaterial sowie Rat und Tat vielfacher Art bei Seite standen. Für die Durchführung von und Unterstützung bei Reinigungsmethoden wird den SWM gedankt, Fa. BELFOR Peter Nützel Latexverfahren, Fa. acp Systems Peter Eggert Schneestrahlen und Fa. Berndt Gebäudereinigung.

Ein großer Dank für die Bereitstellung von Geräten zur Reinigung und Untersuchung ergeht an Markus Ahrens, TUM Medizintechnik, Restaurierung Max Knidlberger, Fa. Konica Minolta mit Ludwig Handschuh, TUM Physik Dr. Markus Lackinger, TUM Design Factory Hendrik Brödenfeld. Für die freundliche Betreuung im Archiv der Fa. Evonik wird Doris Eizenhöfer gedankt, für die Beratung am CICS Köln Prof. Dr. Friederike Waentig und Lisa Burkhart sowie am SKZ Dr. Marcus Heindl. Firma Obrist hat Zugang zum FWI und zu Untersuchungsmaterial ermöglicht. Und nicht zuletzt waren omnipräsent die Kolleg:innen der TUM Professur Neuere Baudenkmalpflege und offen für einen fruchtbaren fachlichen Austausch.

4 Anhang

Erste Anleitung zum Erhalt von historischem Acrylglas im Außenraum

1

Bewusstsein & Bedeutsamkeit

- Historisches Acrylglas ist materielles Zeugnis der industriellen Kulturgeschichte. Mit einem Austausch gehen materielle Zeitzeugen unwiederbringlich verloren
- Acrylglas ist nicht gleich Acrylglas. Es bestehen vielfältige Rezepturen und Herstellungsarten, die historisch bedingt sind und sich schnell überlebt haben
- Mittels Recherchen und Untersuchungen kann der Wert historischer Acrylgläser für individuelle Objekte im Museums- und Denkmalsbereich erschlossen werden
- Acrylglas ist ein organisches Material und altert natürlich. Es entwickelt eine Patina und ist dann nicht mehr transparent und glänzend
- Zustand und Dauerhaftigkeit hängen von vielen Faktoren ab, Trübung ist nicht zwingend ein Ausdruck von verringerter oder ungenügender Stabilität
- Es gibt Pflege- und Erhaltungsmethoden, ein Austausch ist häufig nicht nötig

Bezug zur DBU-Studie: Eine Rezeptur ohne Additive, wie an den Scheiben des Felix-Wankel-Instituts noch in den 1960er Jahren, wird heute nicht mehr produziert. Die Reckmaschine, die von Fa. Röhm für die Herstellung der Olympiadachscheiben 1972 und 1998 verwendet wurde, existiert nicht mehr und das verwendete Brandschutzmittel darf in Deutschland nicht mehr verarbeitet werden. Gegossene und thermogeformte Scheiben finden aus Kostengründen kaum noch Anwendung, obwohl sie alterungsstabiler sein können als extrudiertes Acrylglas.

2

Beteiligte & Akteure

- Einbeziehung und Konsens aller Interessensgruppen bei jedem Schritt
- Mögliche Interessensgruppen: Besitzer:innen, Nutzer:innen / Besucher:innen, Betreiber:innen, Verantwortliche für Unterhalt, Öffentlichkeit / Anwohner, Restaurierung/Konservierung, Denkmalpflege, Forschung, Ingenieurwesen, Chemie, Materialkunde
- Frühzeitige Einbeziehung zur Verhinderung von Zeitnot
- Hinzuziehung von interdisziplinären Expert:innen zur Beratung / Begutachtung
- Projektplanung: Klärung von geteilter Verantwortlichkeit, Aufgabenverteilung, Organisation, Finanzierung, zeitlichem Ablauf, Kommunikation und Ansprechpartner:innen
- Vertrauensvolle, transparente Zusammenarbeit mit gegenseitiger Unterstützung

Bezug zur DBU-Studie: Eine komplexe Interessenslage wurde bei den Olympischen Sportstätten München vorgefunden: Besitzerin Stadt München, Unterhalt durch den Technischen Service der SWM, die Betreuung durch die Olympia GmbH, die Denkmalbeauftragten der Stadt München und des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege (Referent:in / Konservator:in / Restaurierungsabteilung / Zentrallabor), Forschung u.a. durch die TUM, Sanierung durch die Bauabteilung der SWM und das planende Architekturbüro, Materialuntersuchung der SWM und nicht zuletzt die Parkbesucher:innen, die Nutzer:innen (Konzerte, Sportveranstaltungen) und die Öffentlichkeit. Ein frühzeitiges Einbeziehen von Expert:innen sichert den Aufbau einer vertrauensvollen Zusammenarbeit, die Möglichkeit zur Unterstützung durch finanzielle Förderung und Forschung sowie die Einhaltung des Denkmalrechts. Es besteht großes Interesse und großer Bedarf seitens des jungen Forschungszweigs zur Erhaltung von Kunststoffen im Außenraum.

- Recherche Archivalien (Firmenunterlagen, Pläne) und Literatur
- Produktion: Zusammensetzung, Formgebungsverfahren, ggf. Umformung
- Konstruktion: Rahmen, Dichtungsmaterial, Befestigung, Maße
- Untersuchungs- und Analysemethoden für die historische Einordnung und Identifikation nutzen
- Geringe Probennahmen sind nötig und können an versteckten Stellen z.B. im Rahmenbereich oder neben Ausbrüchen entnommen werden

Bezug zur DBU-Studie: Besonders zu empfehlen sind das Firmenarchiv Röhm, das Archiv des Deutschen Museums und historische Planzeichnungen, in denen teilweise Produkt- und Farbbezeichnungen vermerkt sind. Hilfreich waren Fotos aus dem Archiv der Olympischen Sportstätten München, bzgl. FWI des TECHNOSEUM in Mannheim sowie Aussagen der produzierenden /umformenden Firmen wie PLEXIWEISS in München, Airbus mit Zugang zu DIN-Normen im Flugzeugbau sowie Zeitzeugen: Architekten und Firmen, die die Kassenhäuser in den Olympischen Sportstätten geplant und das Acrylglas geliefert haben. Py-GC/MS Untersuchungen wurden mit Unterstützung der Fa. Röhm durch Evonik Industries GmbH durchgeführt, die aufgrund jahrelanger Produktion eine große Datenbank zum Vergleich und Expertise aufweisen. Im BLfD stehen im Zentrallabor Mikro-FTIR und REM-EDX zur Verfügung.

Übersicht Herstellungsarten und Zusammensetzungen siehe DBU-Bericht S. 12-15.

- Identifikation: Alterungs- und Schadensphänomene makroskopisch und mikroskopisch erkennen, lokalisieren und Schadfaktoren zuordnen
- Charakterisierung: Schadfaktoren und ihre Wirkmechanismen erkennen und Schadensphänomenen zuordnen
- Gewichtung: Welche Schadensphänomene und Schadfaktoren sind schwerwiegender als andere?
- Terminologie: Korrekte Benennung der Alterungs- und Schadensphänomene und Schadfaktoren
- Untersuchungs- und Analysemethoden nutzen

Bezug zur DBU-Studie: Zur Sichtbarmachung von mechanischen Spannungen eignen sich Polarisationsfolien. Für die Charakterisierung molekularer Abbaumechanismen eignen sich GPC und py-GC/MS mittels geringer Probennahme. Eine Prüfung der mechanischen Stabilität erfolgt mit zerstörenden Untersuchungsmethoden über Zug-, Biege- und Drucktests sowie Härtebestimmung. Als große Schadfaktoren haben sich neben Verschmutzung und atmosphärischen Einflüssen vor allem Vandalismus (Bruch, Graffiti) und unsachgemäßes Verhalten bei der Reinigung (Verkratzen, chemischer Angriff, Temperatur und Druck) ausmachen lassen.

Übersicht üblicher Schadensphänomene und -ursachen siehe DBU-Bericht S. 15-20.

5

Erhaltung: Ziel & Methoden

- Definition von Erhaltungszielen und -methoden
- Erhaltungsziele entsprechend zeitlichem Rahmen, gestalterischer und denkmalpflegerischer Ansprüche, Dringlichkeit, Notwendigkeit definieren
- Erhaltungsmethoden: möglichst nicht invasiv / wenig minimal invasiv / stark invasive Maßnahmen so sparsam wie möglich
- Vermeidung / Verminderung von Schadfaktoren
- Aufklärung über sachgerechtes Verhalten
- Finanzierung abklären, ggf. finanzielle Unterstützung beantragen

Bezug zur DBU-Studie: Die Aufklärung über die Materialeigenschaften und das Alterungsverhalten von Acrylglas ist die erste Erhaltungsmethode. Non und minimal invasive Maßnahmen beinhalten Verschattung, Monitoring und Schutz vor Vandalismus durch Überwachung. Bei invasiven Maßnahmen, z.B. Reinigung / Reparatur / Austausch ist die Beratung / Durchführung durch Restaurator:innen / Konservator:innen zwingend. Maßnahmen sollten ergriffen werden, bevor es zu sichtbaren Alterungsphänomenen kommt. Die Herkunft von Trübung sowie der Zusammenhang zwischen Stabilität und sichtbaren Schädphänomenen ist noch nicht abschließend geklärt. Zeit für Tests von Erhaltungsmethoden sollte eingeplant werden. Bevor es zum Austausch historischer Substanz kommt, sollten eine Entfernung der Trübung im äußeren 1 mm und ein Oberflächenschutz erwägt werden, darin hat bspw. das Deutsche Museum München Erfahrung.

Übersicht möglicher Erhaltungsstrategien siehe DBU-Bericht S. 20-24.

6

Pflegeprogramm & Monitoring

- Definition von Pflegemaßnahmen: so viele wie nötig, so wenig wie möglich
- Monitoring: Beobachtung und Dokumentation des Fortschritts der Alterungs- und Schadensphänomene in regelmäßigem Turnus
- Beobachtung der Schadfaktoren und deren Auswirkung
- Anwendung von Untersuchungsmethoden
- Planung: Turnus, Durchführung, Finanzierung: Conservation Management Plan erstellen

Bezug zur DBU-Studie: Eine besondere Situation bietet der geschützte Baum- und Denkmalbestand in den Olympischen Sportstätten. Sog. „Honigtau“ schädigt Acrylglas. Ohne einen anderen Schutz ist eine regelmäßige schonende Reinigung zwingend. In der Transall und im Zwischenraum zwischen Olympiadach und abgehängter Innenfolie in der Olympiahalle kommt es zu einer starken Erwärmung. Eine Temperaturüberwachung ist für die gereckten Scheiben ratsam, um rechtzeitig gegensteuern zu können. Stark geschädigte Stellen wie bspw. Ablättern in Schichten an der Hauptkasse Süd in den Olympischen Sportstätten sollte beobachtet und dokumentiert werden, sowohl von der Außen- als auch von der Innenseite, um einem Durchbruch entgegenwirken zu können. Die Etablierung regelmäßiger Überwachungs- und Pflegemaßnahmen erfordert Austestung, Einübung und Optimierung.

Reinigungsstudien siehe DBU-Bericht S. 22 f.