

ACRYLGLAS IM BAUEN – MATERIAL- GERECHTE KONSTRUKTION ODER KONSTRUKTIONSGERECHTES MATERIAL?

Zusammenfassung

Acrylglas ist ein recht junger und vielseitiger Werkstoff, der aufgrund seines Brechungsindex und seiner Oberfläche mineralischem Glas sehr nahekommt. Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung der Produkte aus Polymethylmethacrylat (PMMA), diverse Additive und Unterschiede in den formgebenden Herstellungstechniken ermöglichten die Festlegung anwendungsspezifischer Materialeigenschaften für vielseitige Verwendungen auch im Bauwesen. Der Beitrag diskutiert anhand dieses synthetischen Baustoffs und seiner Alterung in zwei Fallbeispielen Fragen der materialgerechten Konstruktion und konstruktionsgerechten Materialwahl.

Abstract

Acrylic glass is a fairly young and versatile material, which is very similar to mineral glass due to its refractive index and surface. Differences in the material composition of polymethyl methacrylate (PMMA) products, various additives and differences in the shaping manufacturing techniques have made it possible to define application-specific material properties for different uses, including in the construction industry. The article discusses questions of material-appropriate design and design-appropriate material selection on the basis of this synthetic building material and its aging in two case studies.

Dem Material gerecht bauen

Der Topos einer ›materialgerechten Konstruktion‹ ist nur verständlich in Bezug auf die Diskussionen zur ›Materialehrlichkeit‹ in der Architektur im 19. Jahrhundert. Er ist ein Schlagwort gegen die festgestellte Diskrepanz von äußerer Erscheinung und geistigem Inhalt des Gebauten, an der sich die früh einsetzende Kritik des Historismus entzündete.¹ Bereits Heinrich Hübschs *In welchem Style sollen wir bauen?* (1828) kreist ganz wesentlich um einen Begriff von vorgeblich zeitloser Wahrhaftigkeit. Sie lag gemäß Hübsch in der bestimmungsgemäßen, zeitgebundenen Gestaltung, Zurschaustellung des tragenden Materials und eben »materialgerechter Konstruktion«.² Von hier lässt sich eine direkte Linie zu den ingenieurtechnischen und architektonischen Idealen der Moderne des 20. Jahrhunderts ziehen, doch war ›Materialehrlichkeit‹ auch damals nicht die einzig denkbare Prämisse des Bauens. Gottfried Sempers Stoffwechseltheorie beispielsweise bildete den Versuch, die Architektur von der Vorstellung eines materialgerechten Bauens zu befreien, weil sie erst dann zur Baukunst, zur ›erstarrten Musik‹, werden könne. Während im Architektur- und Kulturdiskurs auf die Übertragung historischer, überlieferter Formen auf andere, der Konstruktion ›fremde‹ Materialien zumeist als Imitation, betrügerische Täuschung und billiges Surrogat herabgesehen wurde und wird, stellte Semper mit dem Begriff des ›Stoffwechsels‹ ein Prinzip vor, das den Objekten Erinnerungsfähigkeit zu geben im Stande sei, und damit auch kulturelle Bedeutung habe.³

Wenig Beachtung findet der Aspekt der Alterung der Materialien, ihre selbstverständliche Veränderung über die Zeit hinweg. Materialgerecht kann eine Konstruktion in einem umfassenderen Verständnis eigentlich nur sein, wenn sie die stoffliche, chemisch-physikalische Transformation des Baustoffs aufgrund von inhärenten Materialeigenschaften, äußeren Umwelteinflüssen, Beanspruchung oder Nutzung einkalkuliert. Stattdessen werden aber die baulichen Redundanzen, die in vielen handwerklich errichteten Bauten die Risiken der Materialalterung und des Verschleißes beherrschbar machen, oft gerade nicht als ›materialgerecht‹ angesehen, da die Konstruktion nicht die Möglichkeiten des Materials auszureizen versucht.

Die Diskussionen zur Materialität, die im vorletzten Jahrhundert begannen, waren Folge des Materialisierungsschubs der gewerblichen und baulichen Produktion im Zeitalter der Industrialisierung. Der Wertekanon tradierter, scheinbar besserer, weil vertrauter und vielleicht auch dauerhafterer Materialien wurde gegen die neuen, preiswerten Gussmaterialien und künstlichen Ersatzbaustoffe nicht zuletzt aus einem soziokulturellen Distinktionsbedürfnis heraus entwickelt.⁴ Der

¹ Grundlegend: Brix, Michael; Steinhauser, Monika (Hg.): *Geschichte allein ist zeitgemäß. Historismus in Deutschland*. Lahn-Gießen 1978.

² Hübsch, Heinrich: *In welchem Style sollen wir bauen?* Karlsruhe 1828, S. 47.

³ Moravánszky, Ákos: *Stoffwechsel. Materialverwandlung in der Architektur*. Basel 2018.

⁴ Wagner, Monika: »Materialgerechtigkeit«: *Debatten um Werkstoffe in der Architektur des 19. und frühen 20. Jahrhunderts*. In: Pursche, Jürgen (Hg.), *Historische Architekturoberflächen. Kalk – Putz – Farbe*. Internationale Fachtagung des Deutschen Nationalkomitees von ICOMOS und des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege München, 20.–22. November 2002 (Hefte des Deutschen Nationalkomitees 39). München 2003, S. 135–138, hier S. 135.

Topos der ›materialgerechten Konstruktion‹ baut denn auch auf der Vorstellung sogenannter ›natürlicher Baustoffe‹ auf, tradierter, etablierter Materialien, deren Charakteristika weitgehend bekannt, jedenfalls unveränderlich stabil erscheinen. Erst dann ist die Voraussetzung gegeben, dass eine Konstruktion als dem Baustoff gerecht angesehen werden kann. Indem sie bisher ungewisse, unerprobte Eigenschaften und Alterungsverhalten mit sich brachten, stellten die synthetischen Baustoffe die Vorstellung einer ›Materialgerechtigkeit‹ infrage. Ihre Eigenschaften konnten zunehmend beliebig gewählt und bestimmt werden – ganz nach den Bedürfnissen von Gebrauch und Konstruktion. Damit stellt sich die Frage neu. Nicht, ob die Konstruktion dem Material gerecht wird, sondern ob das verwendete, entwickelte Material der Konstruktion gerecht wird. Letztlich zu diskutieren ist die Verschiebung, wenn nicht gar Auflösung der Grenze zwischen Konstruktion und Material.

Acrylglas als Bau- und Werkstoff

Acrylglas ist ein exemplarisches synthetisches Material, das, so kann anhand seiner Verwendung in der Architektur der Nachkriegszeit gezeigt werden, durchaus mehr war und ist als nur ein bloßes Surrogat für Silikatglas. Im Gegensatz zu mineralischem Glas werden Scheiben aus transparentem Kunststoff den organischen Gläsern zugeordnet, solche aus Acrylsäureestern wie Polymethylmethacrylat (PMMA) werden Acrylgläser genannt.⁵ PMMA ist ein organisches Polymer, dessen Enden verestert sind und das lange Hauptketten ausbildet. Die Herstellung von PMMA erfolgt durch radikalische Polymerisation, wobei Druck, Temperatur und Dauer des Prozesses Einfluss auf die Länge und Vernetzung der gebildeten Polymerketten haben. Hierdurch können die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Polymers eingestellt werden. Weiter können die Eigenschaften etwa durch Co-Polymerisation mit anderen Kunststoffen und die Zugabe von Additiven verändert werden. Copolymerisate mit Acrylnitril erhöhen zum Beispiel die Schlagzähigkeit und Lösemittelbeständigkeit des Materials. Hinzu kommen Additive, etwa in Form von Flammenschutzmitteln und UV-Absorbern.⁶

Im Folgenden soll auf die Veränderungen der Materialeigenschaften eingegangen werden, die durch verschiedene Arten der Formgebung und Nachbehandlung entstehen. Denn das am Bau verwendete Material kann ganz unterschiedliche Charakteristika aufweisen, obwohl chemisch die gleiche Strukturformel vorliegt. Innerhalb der Konstruktion ist es dann auch ganz unterschiedlich wirksam und zeigt auch unterschiedliche Alterungsphänomene.

Fast zeitgleich kamen ab Ende der 1930er-Jahre weltweit PMMA-Produkte für verschiedenste Anwendungen unter diversen Markennamen auf den Markt, in Deutschland und den USA unter dem Namen Plexiglas® der Fa. Röhm & Haas, in Großbritannien als Perspex® von

⁵ Zur Einführung der Begriffe organisches Glas und (Meth)Acrylglas siehe: Bauer, Walter: *Zur Bezeichnung des organischen Glases*. In: *Kunststoffe* 52 (1962), H. 5, S. 261–265.

⁶ Domininghaus, Hans: *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. Düsseldorf 1976, S. 191.

Imperial Chemical Industries (ICI), in den USA zusätzlich als Lucite® von DuPont. Gegen andere transparente Kunststoffe, die es im Lauf der Jahrzehnte gab, setzte es sich wegen seiner glasklaren Transparenz (Brechungsindex $n = 1,49$) und der Eigenschaft, im Lauf der Alterung nicht zu gelben, durch. PMMA ist relativ stabil gegenüber UV-Licht.⁷

Ein wesentlicher Anwendungsbereich für das elastische und daher bruchssichere, transparente und gut formbare Material bildeten Fenster in Fahrzeugen und besonders Flugzeugen.⁸ Die ersten transparenten Scheiben mit Acrylanteilen fanden seit 1928 in Form von Sicherheitsglas in der Fahrzeugtechnik Anwendung. Komplette Scheiben aus festem PMMA waren aufgrund technischer Weiterentwicklungen ab circa 1934–1936 möglich, als es gelang, vopolymerisiertes Methylmethacrylat (MMA) im Kammverfahren zu Scheiben zu gießen.⁹ Erst in der Nachkriegszeit fanden transparente Acrylglasscheiben schließlich auch vielfältigen zivilen Einsatz im Bauwesen.¹⁰ PMMA war vor allem wegen hervorragender Transparenz und Lichtdurchlässigkeit geschätzt und das Material der Wahl für Oberlichter und transluzente Fassadenteile, die mit mineralischem Glas technisch nicht umgesetzt werden konnten.

Die Technische Entwicklungsstelle Lindau

Beispielhaft für diese Anwendung steht die ehemalige Technische Entwicklungsstelle Lindau – Institut der Fraunhofergesellschaft des Ingenieurs und Entwicklers Felix Wankel (1902–1988) in Lindau am Bodensee (Abb. 1). Wankel war seit 1936 bereits in Lindau ansässig gewesen, wo er mit seinem Team 1954 auch den funktionsfähigen Rotationskolbenmotor und darauf aufbauend den Kreiskolbenmotor (auch Wankel-Motor) entwickelte, der unter anderem im NSU Spider und im NSU Ro80 Anwendung fand. Auf diesen Erfolgen aufbauend, konnte er 1961, mit Unterstützung der Fraunhofer-Gesellschaft, mitten im Landschaftsschutzgebiet direkt am Bodensee und unweit seines Wohnhauses seinen Institutsbau errich-

⁷ Vieweg, Richard; Esser, Franz: *Polymethylmethacrylate. Herstellung, Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung* (Kunststoff-Handbuch, Bd. IX). München 1975, S. 202–203 sowie Waentig, Friederike: *Plastics in Art. A study from the conservation point of view*. Petersberg 2008, S. 271–278.

⁸ Röhm & Haas A. G. (Hg.): *Was geht hier vor?* Firmenschrift, Darmstadt 1936, S. 10 (Evonik Industries AG, Corporate Archives, Holding Röhm, Archiv Firmenschriften, Hanau). Zum Überblick über die Herstellung und Verwendung von Acrylgas zwischen 1936 und 1972 siehe: Brunner, Susanne: *Transparent acrylic constructions before and after 1950 – from the 1935 Opel Olympia to the 1972 Olympic roof*. In: Mateus, João Mascarenhas; Pires, Ana Paula (Hg.): *History of construction cultures. Proceedings of the 7th International Congress on Construction History (7ICCH 2021)*, July 12–16, 2021, Lisbon, Portugal. Vol. 1. London 2021, S. 275–282.

⁹ Röhm GmbH (Hg.): *100 Jahre Zukunft. Die Röhm GmbH von 1907 bis 2007*. Darmstadt 2007, S. 37.

¹⁰ Transparente Bauteile der Nachkriegszeit wurden auch aus Polyvinylchlorid (PVC) oder glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) wie ungesättigte Polyesterharze (UP) hergestellt. Im Vergleich zu ihnen ist PMMA ein recht teurer Kunststoff und weicher als andere transparente Kunststoffe, zum Beispiel nicht so kratzfest wie UP. Es ist weniger schlagzäh als beispielsweise Polycarbonat (PC), dafür immerhin sechsmal schlagzäher als Silikatglas. Vieweg/Esser 1975 (Anm. 7), S. 170 ff.



Abb. 1 Technische Entwicklungsstelle Lindau – Institut der Fraunhofer-Gesellschaft (Felix-Wankel-Institut) 1961

ten lassen. Die Planung erledigte Wankel nach seinen eigenen Vorstellungen und Wünschen selbst, ohne Beiziehung eines Architekten und ohne selbst über vertiefte architektonische Kenntnisse zu verfügen. Primär sollte am Institut das Gleitkufenboot ›Zisch‹ weiterentwickelt werden, das aus der Montagehalle im Erdgeschoss über Schienen direkt in und aus dem See gezogen werden konnte.

Es heißt, dass der Autodidakt Wankel selbst kein fundiertes ingenieurtechnisches Wissen aufwies. Er entwickelte seine verschiedenen Bauteile, Geräte und Motoren nicht ingenieurmäßig durch Berechnung, sondern intuitiv aus einem Formgefühl heraus. Maßgeblich war für seine Konstruktionen ein ästhetisches Gespür, und dieses lässt sich prototypisch im Wankel-Motor wie auch in diesem Gebäude nachvollziehen. Das flache Bauwerk weist einen funktionalen und einfachen Aufbau auf. Die eingeschossige flache Werkhalle mit Nebenräumen von 30×50 Metern ist einseitig mit einem riegelartigen Trakt von 30×10 Metern aufgestockt, der Sozialräume und Konstruktionsbüros enthält. Die vertikale Erschließung erfolgt über eine Wendeltreppe in einem angefügten zylinderförmigen Turm, dessen oberstes Geschoss, das auch den Austritt zur Dachfläche ermöglicht, den Bau um ein Geschoss überragt.

Es handelt sich bei dem Bauwerk um eine Mischkonstruktion, die Stahlbetonskelettkonstruktion der Decken und Außenwände in Ortbauweise mit ihren markant in Erscheinung tretenden V-förmigen Stützen wird im Inneren durch Stahlstützen ergänzt. Die weiß gestrichenen, betonierten Außenwände sind zu großzügigen Fensterbändern aufgelöst. Die Fassade wurde unabhängig von der Nutzung und auf allen Gebäudeseiten gleich ausgebildet. Der Bereich zwischen den V-förmigen Stützen ist durch dazwischen gespannte HEA-Stahlstützen zehnteilt, im Bereich der Gebäudeecken neungeteilt. Die einfachverglasten Schiebefenster in

Aluminiumrahmen sind von außen an die Stahlstützen angeschlagen. Gestalterisches Merkmal ist zum einen der etagenweise vordachartig umlaufende Kranz aus grünen, transluzenten Lichtwellplatten. Die Wellung der glasfaserverstärkten Kunstharzplatten wurde sichtlich noch handwerklich hergestellt, insbesondere die viertelkreisförmigen Rundungen der Gebäudeecken, die das andere wesentliche Merkmal des Gebäudes darstellen. Die Fensterscheiben im Bereich der Eckabrundungen sind aus Acrylglas, das sich wie auch viele Materialien der Inneneinrichtung im Original erhalten hatte.

Die Bedeutung, die den transparenten, abgerundeten Ecken und der Wahl des Materials für Gestaltung und Wirkung zukommt, kann man neben den zeitgenössischen Fotografien, die etwa Wankel in seinem Büro vor den gebogenen Acrylglasscheiben der westlichen Gebäudeecke mit Blick auf den Bodensee zeigen, nachfolgenden Erläuterungen des Erfinders entnehmen:

»Die berufsmäßigen Fensterhersteller hatten die Anfertigung gebogener, seitlich verschiebbarer Fenster für unsere abgerundeten Gebäudeecken und den runden Treppenturm für unmöglich abgelehnt. Unsere Motorenfacharbeiter verstanden aber die für ihre geraden Fenster verwendeten Schienen und Laufrollenrahmentteile zu biegen. An Stelle der in genauem Halbmesser nicht herstellbaren Glasscheiben, [sic] erhielten wir schliesslich von den Bayerischen Spritzgusswerken passend gebogene Plexiglasscheiben.«¹¹

Tatsächlich weisen die Fenster der Gebäudeecken die gleiche filigrane Rahmenkonstruktion aus Aluminium auf wie die übrigen Fenster des Gebäudes mit flachen Mineralglasscheiben. Die Scheiben wurden zuerst flach gegossenen und anschließend über eine gewölbte Holzform thermisch gebogen.¹² Die Scheiben sind mit Fensterkitt dreiseitig in ein Aluminium-U-Profil eingesetzt. Die Acrylglasscheiben wurden vor der Verschraubung am Rahmen durchbohrt. Die obere Scheibenkante ist jedoch frei, sie sitzt lose in einem Aluminium-U-Profil mit Neopren-Zwischenpuffer, über welches die Fenster gegeneinander verschiebbar sind (Abb. 2a–b). Die gebogenen Acrylglasscheiben sind circa 109,7 Zentimeter breit (Bogenmaß circa 111,2 Zentimeter) und 176 Zentimeter hoch. Die Scheibenstärke beträgt durchgehend 6–6,5 Millimeter. Bereits aus der Einbausituation ergibt sich, dass die Scheiben nicht eingespannt sind, die Wölbung der Scheiben formstabil sein muss. Der Aluminiumrahmen ist im Grunde nur ein schmaler Kantenschutz und ermöglicht die seitliche Bewegung der Fenster, er zwingt die Scheiben nicht in die gebogene Form.

Im Laufe der Jahre aber haben sich die gebogenen Acrylglasscheiben weißlich getrübt, und die einstige Transparenz der Gebäudeecken ist nur noch bedingt nachvollziehbar (Abb. 3).

¹¹ Typoskript von Felix Wankel, datiert 30. Mai 1962 (Nachlass Felix Wankel, Archiv des TECHNOSEUM, Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim, VZ_2001_0077-1276).

¹² Vor circa 21 Jahren wurde von Bögel Gierer Architekten GmbH nach eigener Aussage eine Holzform im Keller des Felix-Wankel-Instituts aufgefunden, die für die thermische Formung der Scheiben in Betracht kam. Diese Form ist nicht mehr erhalten.

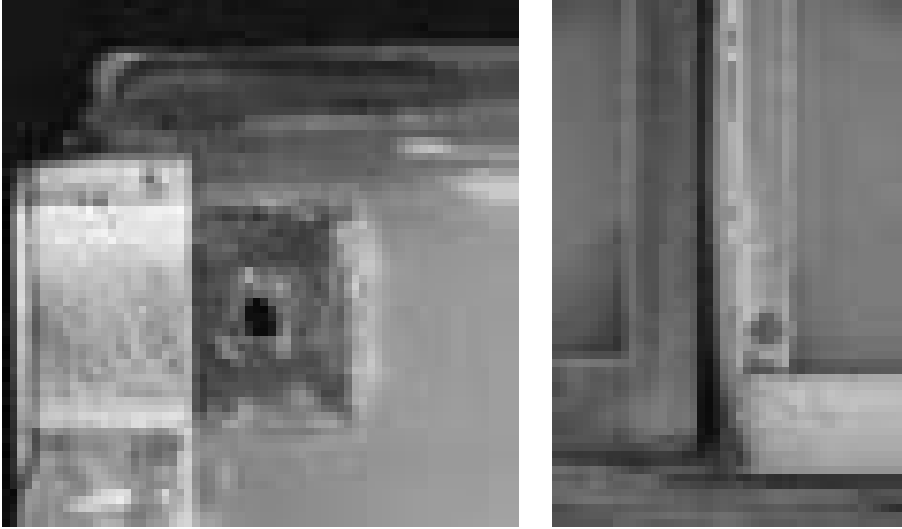


Abb. 2 Rahmenhalterung der Acrylglasscheiben aus Aluminium des ehemaligen Felix-Wankel-Instituts Lindau

Die von den Rändern ausgehende Trübung erscheint optisch störend, vor allem im Vergleich zu den direkt anschließenden langen transparenten Fensterflächen aus mineralischem Glas. Grundsätzlich ist jedoch zu bemerken, dass sich das Gebäude in einem guten und weitgehend sogar noch ursprünglichen Zustand befindet, trotz 60-jähriger Standzeit und zuletzt fast 10-jährigem Dämmer Schlaf ohne Nutzung.

Zur Alterung von Acrylglas

Im Frühjahr 2021 konnten die Verfasser mit Genehmigung des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege (BLfD) und im Auftrag des heutigen Besitzers eine besonders trübe und geschädigte Scheibe in München analysieren.¹³ Die Untersuchung zielte auf die Zustandsbeschreibung, materialanalytische Bestimmung und die möglichen Ursachen der Veränderung ab. Es interessierte das gegenüber anderen zeitgenössischen Acrylglasbauteilen abweichende Schadensbild, das an diesem Objekt zu beobachten ist. Grundsätzlich ist die Oberfläche aller Scheiben weiterhin sehr glatt und glänzend, es zeigen sich kaum oder nur wenige Risse oder Mikrorisse. Augenscheinlich wirkt es so, als handle es sich um eine durchgehende Trübung der Scheiben.

Die untersuchte Scheibe war im obersten Turmgeschoss südöstlich orientiert eingebaut und daher besonders stark Witterung und UV-Belastung ausgesetzt. Es handelte sich um

¹³ Die Schäden wurden untersucht unter anderem mittels Polariskopie, Mikroskopie, FTIR, py-GCMS (Evonik), GPC (PSS Polymers) und REM-EDX (Zentrallabor BLfD).



Abb. 3 Heutiger getrüübter Zustand der gebogenen Acrylglasplatten

die am stärksten von der Trübung betroffene Scheibe des Gebäudes. Die auch an den anderen Scheiben zu beobachtende, stets von den Randbereichen ausgehende milchige Trübung ist am untersuchten Objekt optisch besonders stark wahrnehmbar. Die Eintrübung weist in dieser Scheibe runde, wellenförmig schräge und linear senkrechte Morphologien auf. Die Scheibe hat Mikrorisse und als einzige im Gebäude eine Stelle im unteren und rechten Scheibenrandbereich mit einer rauen, erhabenen und opaken Oberfläche. Unterhalb des Aluprofils zeigt sich das Acrylglas ungetrübt und unbeschädigt. Die mikroskopische Messung ergab, dass sich die Trübung hauptsächlich an den äußeren 0,4 Millimetern der bewitterten Außenseite des Kunststoffglases befindet, wo der stärkste chemische Abbau aufgrund von äußeren Faktoren zu erwarten ist (UV-Strahlen, Wasser, Sauerstoff, Ozon). Eine leichte Trübung an der vor Bewitterung weitestgehend geschützten Innenseite der Scheibe könnte eher chemisch-mechanischen Ursprungs sein, verursacht durch Putzmittel und Verkratzen durch Reibung mit einem Tuch. Die GPC-Analysen an Proben der getrübten Bereiche sowohl an der bewitterten Außenseite als auch der unbewitterten Innenseite ergeben Spektren ohne Anteile im niedermolekularen Bereich. Dies veranlasst zur Hypothese, dass in trüben Bereichen niedermolekulare Anteile durch Lösemittel ausgewaschen wurden.

Bei der Klärung möglicher Ursachen für die uneinheitliche Trübung sind unter anderem der Einfluss von UV-Strahlung, Witterung und Umwelteinflüsse zu berücksichtigen sowie das Zusammenspiel von Metallrahmen, Puffer und Acrylglas. Nicht auszuschließen für die Erklärung des Schadensbildes ist eine Wanderung von Metallionen und eine damit einhergehende Störung der Polymerstruktur. Aber auch die unsachgemäße Reinigung und Pflege der Scheiben über die Jahre, etwa mit einem alkoholhaltigen Reinigungsmittel, könnte ihren Beitrag geleistet haben. Die Materialanalyse mittels py-GCMS und GPC ergab Hinweise auf photo-oxidative Schädigung und Abbau in Verbindung mit Wasser sowie eine Verringerung des Molekulargewichts aufgrund von radikalischem Polymerabbau, das heißt Kettenkürzung in Verbindung mit Licht, Säure und Lösemitteln. Jedenfalls handelt es sich nicht um einen natürlichen, unabwendbaren Alterungsprozess – PMMA ist eigentlich ein relativer stabiler, dauerhafter Kunststoff.

Die Alterung von Acrylglas lässt sich grundsätzlich auf mehrere Faktoren zurückführen: Herstellungsbedingte Faktoren, spannungsreiche Konstruktion, frühzeitig alternde Additive, Anwesenheit von Metallionen, Fotooxidation (begünstigt durch UV-Strahlung, Ozon und Wasser), Auswaschung von niedermolekularen Anteilen durch Lösemittel (meist Wasser/Alkohol), Säure (bildet sich in Verbindung von Regen mit Luftschadstoffen), Kristallisation (natürlicher Prozess, begünstigt durch weitere Alterungsfaktoren), mechanische Einwirkung (Kratzer durch Reinigung, Stöße etc. begünstigen weitere Alterung).¹⁴ Im vorliegenden Fall sind neben wenigen mechanischen Beschädigungen vorrangig Fotooxidation und die Auswaschung niedermolekularer Anteile für die zu beobachtende Kristallisationsphänomene

¹⁴ Vgl. Waentig 2008 (Anm. 7), S. 274–275.

anzunehmen. Bei PMMA handelt es sich um eine erstarrte Schmelze. Wenn sich mit der Zeit der amorphe Zustand der Polymerketten in einen auf längere Zeit energetisch stabileren kristallinen Zustand ordnet, kann das Material aufgrund der anderen Lichtbrechung am Kristallgitter trüb erscheinen.

Die Ergebnisse der FTIR- und py-GCMS Analysen haben gezeigt, dass es sich bei den Scheiben des Felix-Wankel-Instituts bauzeitlich um ein qualitativ hochwertiges Material handelte – ein gegossenes Acrylglas von hoher Scheibendicke ohne Additive. Weder im Archiv der Bayerischen Spritzgusswerke noch im Archiv der Fa. Röhm ließen sich Hinweise auf die Verwendung von Plexiglas® oder die Herstellung finden. Einen Beleg über die Anlieferung von »gebogene[n] Scheiben aus org. Glas T I N 2200 × 1400 × 6 mm« liefert eine Rechnung der Bayerischen Spritzgusswerke vom 6. Juli 1961, darin aufgeführt sind einmalige Kosten zur Formerstellung von 500 DM sowie 404 DM pro Scheibe.¹⁵ Die Scheiben wurden demnach vor Ort individuell zugeschnitten und eingepasst. Die Kunststoffscheiben wurden vermutlich zeittypisch in Kammern zwischen mineralischen Glasscheiben gegossen und thermisch über eine gerundete Form gebogen.¹⁶ Die Scheiben weisen, wie sich in der Polariskopie bestätigte, keine nennenswerten mechanischen Spannungen auf. Aufgrund der Herstellung sind die gebogenen Scheiben selbsttragend. Die Art der Herstellung entspricht somit weitestgehend der Herstellung der gerundeten Fahrzeugscheiben aus der frühen Phase der Anwendung von PMMA. Beim warmen Biegen der Scheiben wurde kaum gezogen, wodurch sich die Polymerketten nicht ausgerichtet haben. Diese Art der Herstellung – Guss und anschließende schonende thermische Formung – garantiert ein spannungsarmes Acrylglas, also die besten Voraussetzungen für eine möglichst geringe alterungsbedingte Veränderung. Denn für die Dauerhaftigkeit der Transparenz ist eine lose Anordnung der Polymerketten vorteilhaft. Erst wenn die Scheiben stärker gezogen werden, ordnen sich die Polymerketten nahezu parallel an. Durch diesen Recken genannten Vorgang wird eine höhere Stabilität des Materials angestrebt.

Die Eindeckung des Olympiادaches von 1972 in München

Der Unterschied, den das Recken für die Alterung bedingt, zeigt sich bei der wohl bekanntesten Konstruktion der Nachkriegszeit, bei der Scheiben aus Acrylglas maßgeblich zum Einsatz gekommen sind: der Dacheindeckung der berühmten Zeltdachkonstruktion über

¹⁵ Bestellt wurden die Scheiben laut Rechnung am 24. Januar 1961, die Rechnung stammt aus dem Archiv des TECHNOSEUMs in Mannheim, das den Nachlass Felix Wankels verwahrt.

¹⁶ Vor circa 21 Jahren wurde von Bögel Gierer Architekten GmbH nach eigener Aussage eine Holzform im Keller des Felix-Wankel-Instituts aufgefunden, die für die thermische Formung der Scheiben in Betracht kam. Diese Form ist nicht mehr erhalten. Zum Formenbau vgl.: Röhm & Haas GmbH (Hg.): *Werkstattmitteilungen. Verfahren, Werkzeuge und Maschinen für die Bearbeitung von *plexiglas und *plexidur*. Bd. 7 Formenbau (1965) (Evonik Industries AG, Corporate Archives, Holding Röhm, Archiv Firmenschriften, Hanau).

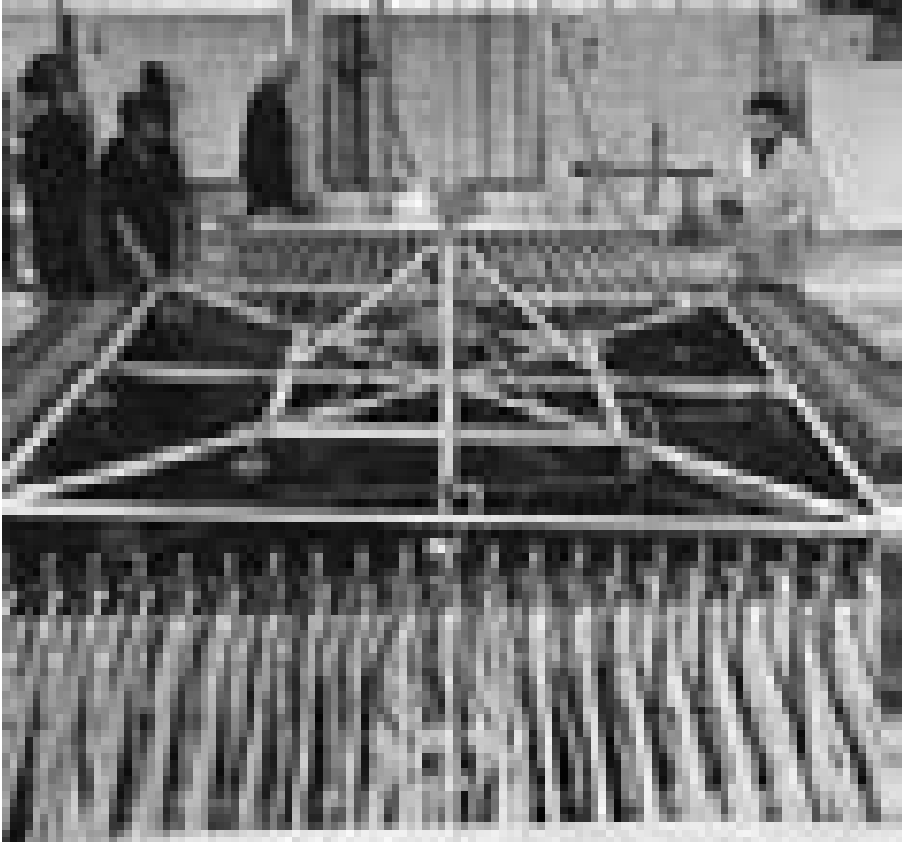


Abb. 4 Biaxiales Streckziehen von gegossenem Plexiglas bei Röhm & Haas in Darmstadt im Jahr 1970

den zentralen Olympischen Sportstätten von 1972 in München – entworfen und ausgeführt unter Leitung von Behnisch und Partner (Günther Behnisch, Fritz Auer, Carlo Weber) sowie Frei Otto, Jörg Schlaich, Rudolf Bergermann und weiteren Beteiligten.

Seit den 1960er-Jahren war es möglich, Acrylglasplatten mono- oder biaxial zu recken.¹⁷ Dabei wird die gegossene Platte eingespannt und unter Wärme in ein oder zwei Richtungen gezogen, sodass sich die Kantenlängen jeweils fast verdoppeln und die Gesamtfläche vervierfacht (Abb. 4). Die thermisch gereckten Platten des Olympiadachs von maximal 3×3 Metern (Gewicht 42,5 Kilogramm) wurden aus gegossenen Scheiben von $1,75 \times 1,75$ Metern hergestellt. Die Polymerketten ordnen sich beim Recken fast parallel an, was eine höhere Kristallinität, Schlagzähigkeit, einen höheren Rissfortpflanzungswiderstand und

¹⁷ Domininghaus 1976 (Anm. 6), S. 191.

größere Resistenz gegenüber Freibewitterung zur Folge hat. Bei erneuter Erhitzung des Materials tritt bei gereckten Acrylglasplatten ein Memoryeffekt ein, das heißt, im Falle eines Brandes ziehen sich die Platten wieder zur ursprünglichen Größe zusammen und Rauch kann entweichen. Diese Eigenschaften führten letztlich zur Auswahl gereckter Plexiglas®platten, als für das Stadiondach der Olympischen Sportstätten in München 1972 ein transparentes Material gesucht wurde.¹⁸ Während aber die gereckten Scheiben durch die Ausrichtung der Polymerketten in x- und y- Richtung stabiler werden, gilt dies nicht für die z-Richtung. Eine typische Alterungserscheinung und Schadensbild ist dann das flächige Abblättern.¹⁹

Die circa 10.000 biaxial gereckten Platten von circa 4 Millimetern Stärke des Olympiadaches wurden kalt eingebogen, jede Platte vor Ort individuell zugeschnitten, die Löcher eingestanzt und mit den rahmenartigen Aluminium-Klemmprofilen zu einer durchgehenden Dachfläche montiert (Abb. 5). Verwendet wurde neben Plexiglas® GS 215 farblos an den linsenförmigen Dachabschnitten außerhalb der Stahlpfosten im größeren Teil des Daches Plexiglas® GS 215 in 816 grau, das zum Sonnenschutz abgetönt wurde. Die Konstruktion musste



Abb. 5 Baustelle, Transport der Acrylglasplatten auf das Olympische Dach 1971 in München

¹⁸ Buck, Manfred: *Die Entwicklung des Materials für die Dachhaut*. In: plasticconstruction (1972), H. 3, S. 180–184; Röhm GmbH (Hg.): *Neues über den Werkstoff für Münchens Olympia-Dach*. In: Spektrum (1971), H. 5, S. 6–10.

¹⁹ Brunner, Susanne; Pamplona, Marisa; Putz, Andreas: *Zum Wert von Polymethylmethacrylat. Erhaltungsstrategien für transparentes Acrylglas im Außenraum*. In: Die Denkmalpflege 113 (2020), H. 2, 155–163.

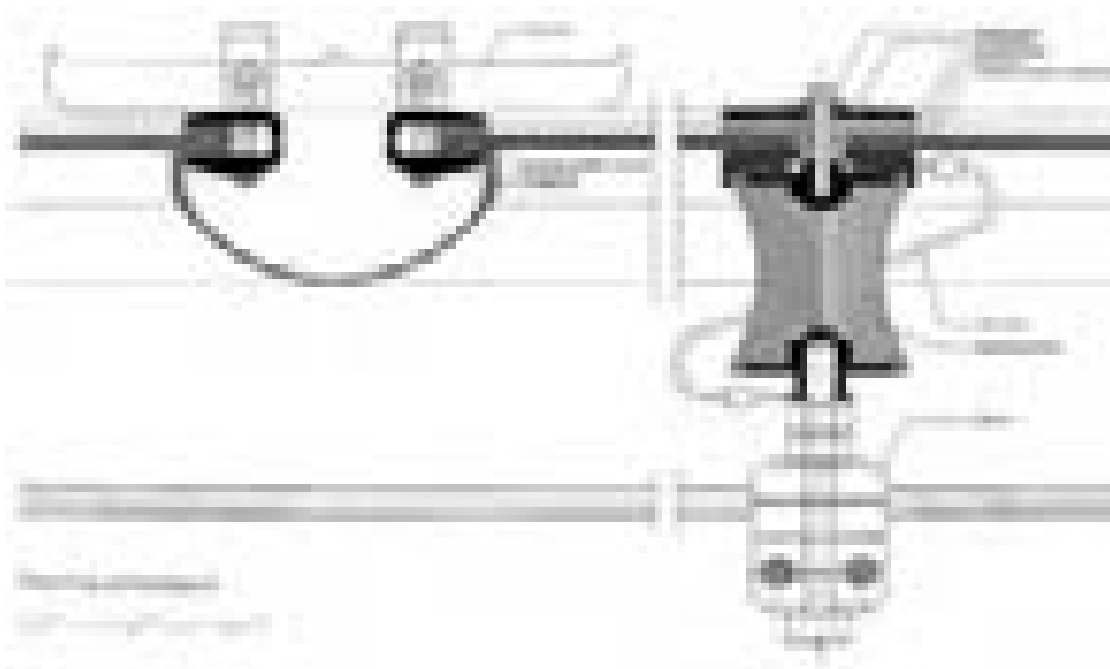


Abb. 6 Querschnitt durch die Konstruktionselemente mit Plexiglas und deren Verbindung auf dem Olympiادach (Röhm GmbH 1989:2, 2.c.2)

wegen der Wind- und Schneelasten sowie der Wärmeausdehnung der Acrylglasplatten flexibel sein. Daher wurde in direktem Kontakt mit den Acrylglasplatten ein Elastomermaterial verwendet – schwarze Chloroprenkummipuffer, ein vulkanisierter Synthesekautschuk, auch unter der Marke Neopren bekannt.²⁰

Zwischen den Rahmen wurde unten ein 6–8 Zentimeter breites Fugenband (Chloropren) als Dichtprofilrinne installiert. Zusätzlich verbanden zwei Aluminiumstäbe auf der Oberseite die Rahmen, jeweils bis zu zwei Stäbe pro Seite. Über insgesamt 135.000 Puffer ist die Dachhaut mit den Seilknoten mit M14-Gewinden fest verschraubt (Abb. 6). Die ganze Konstruktion steht somit unter Spannung.²¹ Gerade um die Löcher herum bildeten sich Risse, da nach dem Stanzen nicht mehr getempert wurde. Für das Alterungsverhalten des Acrylglases half es nicht, dass die Montage unter Zeitdruck und offenbar auch recht rabiat erfolgte. Die Platten

²⁰ Röhm GmbH (Hg.): *Handbuch des Architekten*. Bd. 2, 1989, Abschnitt 2.c.2 (Evonik Industries AG, Corporate Archives, Holding Röhm, Archiv Firmenschriften, Hanau).

²¹ Die Untersuchung mit dem Polariskop wurde durchgeführt im Restaurierungsforschungslabor von Dr. Marisa Pamplona am Deutschen Museum München. Zwischen zwei gekreuzt zueinanderstehenden, linear polarisierten Folien wird das zu untersuchende Material gestellt. Steht das Material unter mechanischer Spannung, so zeigen sich schwarz-weiße Isoklinen oder farbige Isochromaten.

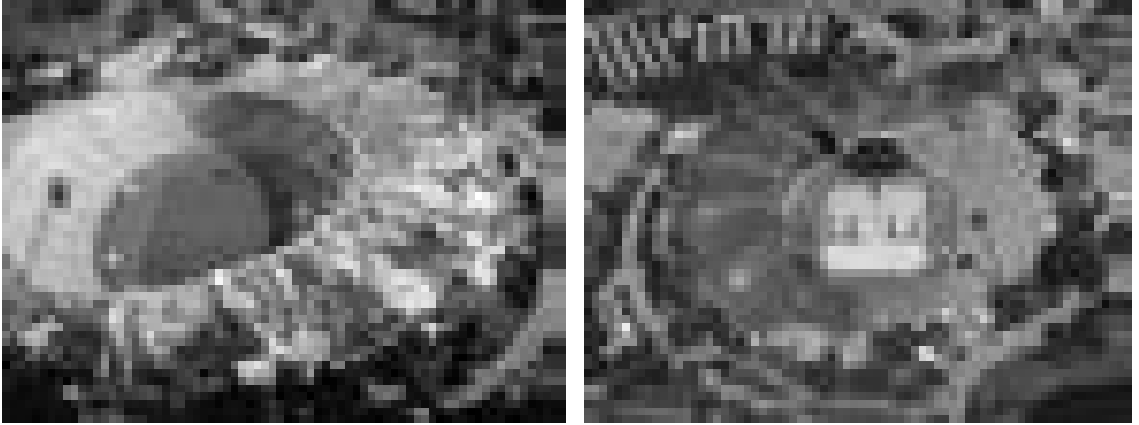


Abb. 7 Zustand des Olympiadaches vor und nach der Neueindeckung 1998

trugen bereits nach dem Einbau durch Werkzeuge und grobkörnige Verunreinigungen im Schuhprofil der Monteure Risse und Kratzer.²²

Nach dem Reckvorgang lässt sich Acrylglas der Brandschutzklasse B2 einordnen, es ist normal entflammbar. Um dem Material die für das Olympiadach geforderte Brandschutzklasse B1 (schwer entflammbar) zu verleihen, musste zusätzlich zum Recken eine große Menge Flammenschutzmittel beigemischt werden. Die Spezifikation »selbstverlöschend« für die Olympiadachplatten aus Plexiglas® GS 816 grau hatte man durch Beigabe von 10–30 Gewichtsprozent Flammenschutzmittel erreicht. Dieses Brandschutzmittel war in unbeschichteten Metallfässern gelagert, wodurch als Verunreinigung Metallionen in das Acrylglas des Daches gelangten. In der Folge nahmen die Platten zweimal so viel Wasser auf wie nicht mit Metallionen verunreinigte, wodurch der mittels Wasser verursachte Molekulargewichtsabbau (Hydrolyse) der Acrylglasplatten beschleunigt wurde. Das durch die Verletzung der Oberfläche freigelegte Eisen konnte außerdem mit Feuchtigkeit und Sauerstoff oder sauren Niederschlägen in Kontakt kommen und damit weitere Korrosionsprodukte ausbilden. Bei der natürlichen Alterung werden Polymerketten gespalten und die reaktionsfreudigen Endgruppen vernetzen sich erneut, was der Stabilität des Polymers dient. Die Metallionen unterbanden jedoch diese Rekombination der Molekülketten des PMMA und trugen dadurch als Katalysatoren zum photo-induzierten Abbau des Polymers bei. Dabei kommt es zu Kettenkürzungen, zu Mikrorissen und einer Schichtentrennung in der z-Achse des gereckten Materials.²³

Auf der Dachfläche wurden in der Folge spätestens ab 1975 komplexe Schädigungen sichtbar: gräuliche Eintrübung, ein Abschuppen und deutlich erhöhte Empfindlichkeit gegenüber

²² Madsack, Denise: *Acrylglas in der Architektur. Das Münchner Olympiadach von 1972*. In: Zeitschrift für Kunst und Kulturgut 24 (2010), H. 2, S. 292–293.

²³ Ebd., S. 293.



Abb. 8 Dachelement der Olympischen Sportstätten München (Inv.-Nr. 2768, BLfD Bauarchiv – Fortbildungs- und Beratungszentrum für Denkmalpflege Thierhaupten); die ursprünglich transluzente, glatte Acrylglasscheibe erscheint verschmutzt, rau und weiß opak gealtert

mechanischer Beanspruchung (Abb. 7). Die Platten waren unterschiedlich stark von den Schäden betroffen. Ende der 1990er-Jahre entschied man sich zu einer vollständigen Neueindeckung, die 1998 abgeschlossen wurde. Heute finden sich nur noch wenige Relikte der originalen Platten (Abb. 8). Die Neueindeckung unterband einmal erkannte Verunreinigung des PMMA. Die Rezeptur von 1998 enthielt laut Herstellerangaben eine Verbesserung der Flammschutz- und UV-Schutzmittel, die explizit in beschichteten Fässern gelagert wurden.²⁴ Insgesamt aber ist das Bild der Schadensursachen komplex, das kon-

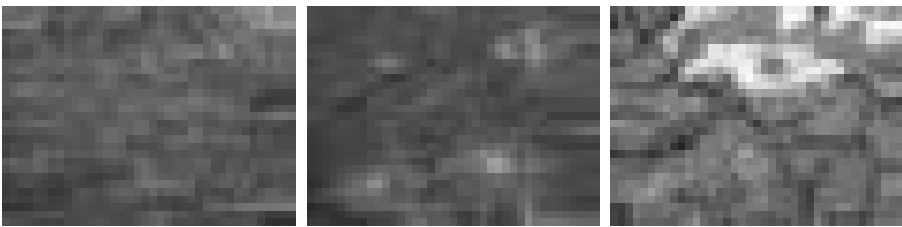


Abb. 9 Mikroskopische Aufnahmen der gealterten PMMA-Oberflächen an einem Dachelement der Olympischen Sportstätten München aus dem BLfD-Bauarchiv Thierhaupten (Inv.-Nr. 2769): Mikrorisse an der gealterten PMMA-Oberfläche (links), ausgehend von Kratzern haben sich ovale, weiß-opake Strukturen gebildet (Mitte), die Oberfläche ist komplett opak und rissig, die reflektierende Außenschicht platzt ab und legt darunterliegende matte Oberflächen frei (rechts)

²⁴ Ebd., S. 294.

struktionsbedingte Problem der starken Beanspruchung der kaltgebogenen Platten durch die Einspannung besteht bis heute. Es kommt aufgrund der ständigen Beanspruchung und der Bewitterung zu (Mikro-)Rissen und Brüchen und einem schichtartigen Abblättern (Abb. 9a–c). Obwohl gerecktes Material bruchfester ist als ungerecktes, gilt dies nicht in z-Richtung quer zur Plattendicke. Hier wird also das gewählte Material weiterhin der Konstruktion nicht gerecht.

Aktuell ist die Garantie für die Dacheindeckung in München abgelaufen.²⁵ Die Materialfrage stellt sich also erneut. Die Fa. Röhm kann das gleiche Material nicht mehr liefern. Die Rezeptur der 1990er-Jahre ist heute aufgrund neuer Sicherheitsbestimmungen, die die Verwendung der damaligen Brandschutzmittel verbieten, nicht mehr herstellbar. Aber auch die damaligen Reckmaschinen gibt es nicht mehr. Nach wie vor wird die Dachhaut regelmäßig auf Schäden untersucht und schadhafte Platten werden ausgetauscht. Dabei kommt ein Lager an Platten der Charge von 1998 zur Anwendung, die sich aber langsam erschöpft.²⁶ Im Sommer 2021 waren dies noch drei transparente Platten und zwei Paletten mit grauen Platten (Abb. 10). Aktuell läuft im Zuge der Sanierungsarbeiten die Diskussion über die Neueindeckung.



Abb. 10 Stadtwerke München, Dachwerkstatt: auf Paletten übrige, 1998 produzierte Platten aus Plexiglas® GS 215 gereckt, in transparent (nur drei Scheiben) und 816 grau (Rest); rechts befinden sich schadhafte Platten, die ausgetauscht wurden und nun für die Forschung zur Verfügung stehen

²⁵ Das Plexiglas von 1972 hatte eine Garantie von 25 Jahren, vgl. Madsack, Denise: *Acrylglas in der Architektur. Das Münchner Olympiadach von 1972*. Unveröffentlichte Bachelor-Thesis, Hochschule der Bildenden Künste, Bern 2009, S. 12. Heutige Plexiglasprodukte haben in der Regel eine Garantie von bis zu 30 Jahren. Zu Beginn der Dachsanierung 1997 wurde die nächste Dachsanierung für 2022 prognostiziert. Die Alterung von Acrylglas ist schwer vorhersehbar: Wedig, Marco: »Wir sind zuversichtlich, dass wir das Dach noch 50 Jahre bei Laune halten können«, <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/instandhaltung-die-spannung-bleibt-1.3704035> (12. Oktober 2017).

²⁶ Information von Georg Herrmann, Stadtwerke München, Technischer Service Bau- und Betriebsingenieur, am 19. Februar 2021.

Fazit

Kunststoffe sind schnelllebige Materialien, Rezepturen sind Zeitgeist und Bestimmungen unterworfen, ändern sich oft und werden selten dokumentiert. Rezepturen werden erprobt, und was sich verarbeiten lässt, wird genommen. Selten wird wie beim Olympiادach Material extra entwickelt und nach erster Schädigung langwierige Schadensursachenforschung betrieben.²⁷ Der Einsatz von Kunststoffen im Bauwesen – ob im Neubau oder in der Baudenkmalpflege der Moderne – zeigt weiterhin einen experimentellen Charakter. Vielfach wissen wir nicht wirklich über die synthetischen Materialien, ihr Alterungsverhalten, ihre Reaktion auf Umwelt- und anthropogene Einflüsse Bescheid. Jedenfalls ist Acrylglas nicht gleich Acrylglas, und schon gar nicht ist jedes Acrylglas einfach nur Plexiglas®.²⁸

Acknowledgement

Der Vortrag baut auf laufenden Forschungsvorhaben an der Professur für Neuere Baudenkmalpflege der TUM auf, insbesondere des Projekts 'Zur Erhaltung historischer Acrylgläser. Erhaltungsstrategien für transparentes Polymethylmethacrylat (PMMA) in Architektur und musealem Kulturgut im Außenraum', in Kooperation mit Dr. Marisa Pamplona-Bartsch, Leiterin der Abteilung Objekt- und Restaurierungsforschung Deutsches Museum München, und Dipl.-Chem. Martin Mach, Leiter des Zentrallabors am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege. Das Projekt wird seit 2020 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert. Allerdings beschäftigt sich Susanne Brunner bereits länger mit transparenten Acrylgläsern, auch dank eines Fellowships am Deutschen Museum. Zusätzliche Unterstützung erhielt das Vorhaben durch Franziska Schittler, Scholar in Residence am Deutschen Museum, und Domenika Marks, Studierende der Konservierungswissenschaften der Technischen Hochschule Köln.

Angebunden an das DBU-Vorhaben sind zwei objektbezogene Studien, einmal zum ehemaligen Felix-Wankel-Institut in Lindau am Bodensee sowie, gefördert durch die Otto-Meisinger-Stiftung, zu den ehemaligen Kartenverkaufsanlagen im Olympiapark München.

²⁷ Schulz, Ulrich; Trubiroha, Peter: *Acrylglasdächer. Untersuchung der Umwelteinflüsse auf die Lebensdauer*. In: Materialprüfung 40 (1998), H. 7/8, S. 310–317. Schulz, Ulrich; Tjandraatmadja, Grace: *Alterungsprüfung transparenter Kunststoffdächer. Künstliche Bewitterungsmethoden mit vertretbarer Untersuchungsdauer*. In: Materialprüfung 45 (2003), H. 11/12, S. 535–540.

²⁸ Schon 1952 hat sich Plexiglas® als Warenname für Scheiben aus Acrylglas etabliert, war doch Röhm deren einziger Hersteller in Deutschland. Krausskopf, Otto K. (Hg.): *Deutsche Kunststoffe. Rohstoffe, Waren, Hersteller*. Wiesbaden 1952, S. 66.