

Umweltbedingte Schädigungen an historischen Glasfenstern: Phänomene, Mechanismen, Konservierungskonzepte

D. R. Fuchs und H. Schmidt

Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung, Würzburg

1. Einleitung

Die Farbenpracht und der spezifische strukturelle Charakter von Kirchenfenstern sind jedem Besucher großer Sakralbauten im Bewußtsein. Aus zahllosen Buntglassegmenten in einem Netz von Bleiruten zusammengefügt bestimmen diese Glasmalereien wesentlich den Gesamtcharakter unserer Kirchen und Kathedralen, insbesondere seit durch die filigrane Baukunst der Gotik größere Fensterflächen möglich wurden.

Daß durch von Menschen verursachte mechanische Beschädigung sowie durch Hagelschlag und Winddruck im Laufe der Jahrhunderte, die diese Kunstwerke überdauerten, ständige Wartungsarbeiten erforderlich waren und sind, ist leicht einzusehen. Zerbrochene Gläser sind zu ersetzen oder zu restaurieren, das gelockerte Bleilot auszubessern oder zu erneuern. Eine wesentlich größere Bedrohung der historischen Glasmalereien, die bis ins 11. Jahrhundert zurückdatieren, ist jedoch noch immer der breiten Öffentlichkeit zu wenig bekannt: Die Glassubstanz selbst wird in vielen Fällen angegriffen.

Die unterschiedlichen Korrosionserscheinungen beruhen auf chemischen und strukturellen Veränderungen, die Witterungseinflüssen zugeschrieben werden, welche in den letzten Jahrzehnten durch zusätzliche Schadstoffbelastungen verstärkt werden /1, 2/. Diese Art von Schädigung ist es, die im folgenden diskutiert werden soll.

(Bild 1:)

2. Phänomene

Bereits eine oberflächliche Betrachtung historischer Glasfenster läßt einige der eklatantesten Zerstörungsformen deutlich werden: Glassubstanz geht durch flächige oder auch kraterförmige Ablösungserscheinungen verloren, die Restauratoren sprechen von Flächenkorrosion und Lochfraß.

Insbesondere bei vielen mittelalterlichen Gläsern hat dieser Substanzverlust dazu geführt, daß die Glasdicke nur noch einen Bruchteil der ursprünglichen Stärke ausmacht und die akute Gefahr des Totalverlustes besteht. In Bild 1 ist ein typisches Beispiel dargestellt.

(Bild 2:)

Ebenso häufig wie dieser destruktive Vorgang ist ein konstruktiver Effekt zu beobachten: Krusten aus Verwitterungsprodukten, vor allem aus Gips und Syngenit, bedecken die Glasoberfläche (Bild 2). Diese als Wetterstein bezeichneten Ablagerungen sind nicht selten mehrere Millimeter dick und reduzieren die Transparenz der Gläser ganz erheblich. In vielen Fällen ist der Glascharakter des Objektes kaum mehr zu erkennen und der Bildinhalt der Glasmalerei nicht mehr lesbar.

Beide bereits genannten Hauptschadenstypen verursachen darüber hinaus eine weitere Gefahr: Die als Schwarzlotkonturen oder Halbtonbemalung auf die Gläser aufgeschmolzenen Malerschichten werden vom Grundglas gelockert und können verloren gehen. An zahlreichen Objekten verblieben von einst reichen Detailzeichnungen nur noch einförmige Flächen zwischen den das Motiv nur noch ahnen lassenden Strukturen des Bleinetzes.

(Bild 3:)

Ein anderes Phänomen, das häufig auftritt, ist die sogenannte Verbräunung oder Verschwärzung mancher Gläser (Bild 4). Es handelt sich um extreme Dunkelung aufgrund von Eisen- und Manganverbindungen aus dem Glas, die sich in feinsten Rissen und Defekten der Korrosionsschichten anreichern /3/ und hierdurch einen starken Transparenzverlust an den Objekten bewirken. Dabei spielen Oxidationsvorgänge durch Einfluß der Atmosphärrillen eine entscheidende Rolle.

(Bild 4:)

Mit den hier skizzierten Schadenstypen ist keinesfalls das vielfältige Spektrum an Verwitterungsphänomenen abgedeckt. Es handelt sich jedoch um die prinzipiellen und häufigsten Probleme, mit denen die Restauratoren konfrontiert werden, und dies muß die Ausgangsbasis zur Suche nach den Schadensursachen und für Lösungsansätze sein.

3. Mechanismen

Bei der Herstellung von Farbgläsern im Mittelalter wurden zum Teil andere Rohstoffe verwendet als heute, daher wurden im Gegensatz zu den stabileren Kalk-Natron-Silicatgläsern häufig Kalk-Kali-Silicatgläser erschmolzen. Diese Gläser verhalten sich hinsichtlich korrosiven Belastungen anders als heute übliche Gebrauchsgläser /4/. Dennoch lassen sich die Mechanismen auf die gleiche Ionenaustausch-Reaktion zurückführen, wie sie auch Kalk-Natron-Gläsern zugrunde liegt.

(Bild 5:)

Im Gegensatz zu diesen wird jedoch zusätzlich zu den Alkalien auch Ca ausgelaugt. Auf jeden Fall ist die Präsenz von Wassermolekülen im angreifenden Medium von entscheidender Bedeutung. Hierbei ist keineswegs flüssiges Wasser in Form von Niederschlägen oder durch Kondensationseffekte erforderlich, es reichen bereits die natürlich auftretenden Luftfeuchtegehalte der Atmosphäre /5/.

Zur weiteren Aufklärung bezüglich der primären Korrosionsschritte werden Modellgläser mit Zusammensetzungen im Bereich historischer Originalgläser verwendet (Bild 6). Eine ausführliche Beschreibung der präparativen und experimentellen Fakten zu den im Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) durchgeführten Untersuchungen ist an anderer Stelle wiedergegeben /6/.

(Bild 6:)

Die Labor- und Freilandbewitterungsversuche an diesen Modellgläsern führten zu detaillierten Kenntnissen der Schädigungsmechanismen. Durch IR-spektroskopische, licht- und rasterelektronenmikroskopische Analysen, ergänzt durch gravimetrische Bestimmungen und Elementtiefenprofile im submikroskopischen Bereich durch ESCA sind die von den historischen Gläsern phänomenologisch schon lange bekannten Vorgänge der Flächen- und Kraterkorrosion im Labormaßstab und quantitativ charakterisierbar nachvollziehbar.

Durch geeignete Wahl der Bewitterungsparameter bzw. Freilandstandorte und der chemischen Zusammensetzung der Modellgläser ließen sich in experimentell handhabbaren Zeiträumen von wenigen Monaten im Freiland bzw. wenigen Tagen in Klimaschrankversuchen im ISC folgende Befunde erarbeiten:

- Saure Schadgase wie SO_2 beschleunigen die Verwitterungsvorgänge entscheidend. SO_2 spielt nicht erst bei den Sekundäreffekten der Kristallisation von Korrosionsprodukten eine wesentliche Rolle, sondern ist nachweisbar auch für die primären Prozesse der Kalium- und Calciumauslaugung und damit Gelschichtbildung von Bedeutung.
- Die mikroskopisch erfaßbare mechanische Destabilisierung der Gelschichten untersuchter Modellgläser stimmt mit den bekannten Phänomenen der Originalobjekte überein:

Die chemischen und strukturellen Unterschiede zwischen der Gelschicht und der darunterliegenden Glassubstanz führen zu

Spannungen und Rißbildung. Die zuerst lokal auftretenden Defekte führen bei weiterer Bewitterung zu einem zusammenhängenden Rißnetz, in dem später vereinzelt Ablösung und schließlich Abplatzungen von Gelschichtschollen zu beobachten sind. Diese Entwicklungsphase endet mit einem oft in zahlreichen Niveaus ausgebildeten, lockeren Belag von einzelnen Gelschichtplatten. Darunter wird eine neue Phase der korrosiven Entwicklung durch Ausbildung einer resistenteren, nicht gerissenen neuen Oberfläche eingeleitet. Ab diesem Stadium setzt der flächige Substanzverlust durch Abschuppen aus, es kommt zu lokal konzentrierten Defekten, die sich zu Kratern, also Lochfraß, erweitern (Bild 7). Die weitere Oberflächenentwicklung ist durch das Vertiefen dieser Krater und Zusammenwachsen zu Furchen gekennzeichnet, so daß schließlich in dem stark aufgerauhten und zernarbten Relief nur noch Reste der sekundären, relativ glatten Oberfläche erkennbar sind.

(Bild 7:)

- Das Calcium-Kalium-Verhältnis des Ausgangsglases bestimmt die Zusammensetzung der kristallisierenden Verwitterungsprodukte: Bei ausreichend hohem Kaliumgehalt bildet sich (Bild 8) bevorzugt Syngenit ($\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$), der jedoch (vor allem auf der Wetterseite der Scheiben) sukzessive in Gips umgewandelt wird.

(Bild 8:)

Hinsichtlich zeittraffender Bewitterungsverfahren im Klimaschrank erwies sich bei zyklischer Temperatur- und Feuchtevariation (Bild 9) eine Erhöhung der SO_2 -Belastung beim Modellglas MI als geeignet. Innerhalb von Stunden wurden Auslaugraten erreicht, die im Freiland erst nach Monaten zu beobachten waren (Bild 10). Allerdings ist dieser Befund nicht ohne weiteres auf andere Modellglas-Zusammensetzungen zu übertragen, wie die Ergebnisse bei MIII zeigen, wo keine Beschleunigung der Korrosion im Klimaschrank gegenüber dem Freiland auftrat.

Für eine Vertiefung der Kenntnisse zu den exakten Mechanismen bleibt somit noch ein breites Feld für Grundlagenuntersuchungen bestehen.

(Bild 9:)

(Bild 10:)

4. Konservierungskonzepte

Auch ohne vollständige Klärung der zusammensetzungsspezifischen Probleme sind prinzipiell die Ansätze für Schutzmaßnahmen klar: Die schadensverursachenden flüssigen und gasförmigen Agenzien müssen von den Glasoberflächen abgehalten werden.

Nur diese präventiven Maßnahmen können langfristig den Bestand der gefährdeten Kunstobjekte sichern. Selbstverständlich ist die restauratorische Behandlung ebenfalls von entscheidender Bedeutung (Ersatz von verlorengangener Substanz, Sicherung gefährdeter Malschichten, Reinigung, Reparaturen am Bleinetz, Aufhellung verbräunter Partien etc.), sie kann jedoch nur den bestehenden Zustand provisorisch sichern, nicht jedoch ein Fortschreiten der zerstörerischen Vorgänge verhindern.

Einen nahezu optimalen Schutz gewährt die museale Aufbewahrung von besonders wertvollen Glasgemälden. Die Anzahl und große Fläche der vorhandenen Bestände ist so jedoch nicht zu berücksichtigen, es kann nur eine seltene Lösung in Ausnahmefällen bleiben. Außerdem tragen der Ausbau und die Exposition als Einzelscheibe dem Gesamtkunstwerk keine Rechnung. Losgelöst von seinem architektonischen Rahmen bleibt ein historisches Glasgemälde zwar ein bewundernswertes Objekt, seine Stellung und sein Charakter kommen jedoch nur als Fenster in-situ voll zur Geltung.

Die heute übliche Schutzmaßnahme ist eine Abschirmung gegen die Witterungseinflüsse durch vor die Originalscheiben gesetzte Außenschutzverglasungen. Es sind verschiedenste Konstruktionstypen im Einsatz, deren Eigenheiten zwar viel diskutiert werden /7/, deren tatsächliche Schutzwirkung jedoch umstritten ist. Auch wenn die Belastung durch direkte Niederschläge deutlich reduziert wird, bleiben in jedem Falle der Angriff durch die Luftfeuchte sowie, in vielen Fällen trotz der Schutzmaßnahme weiterhin zu beobachten, Kondensationsvorgänge.

Um zu dieser Situation quantitative Aussagen zu ermöglichen, wurden im Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) spezielle Modellglassensoren entwickelt /6/. Durch IR-spektroskopische Messungen lassen sich hiermit direkt die erreichte Schutzwirkung ablesen sowie Vergleiche unterschiedlicher Konstruktionsvarianten und Objektsituationen ableiten. Erste Ergebnisse, z. B. vom York Minster und St. Lorenz/Nürnberg, belegen die Eignung dieses neuen Kontrollverfahrens für Außenschutzverglasungen und zeigen, daß zwar eine Reduzierung des Korrosionsfortschrittes gegeben ist, an den untersuchten Objekten aber weiterhin korrosive Belastungen auftreten.

Eine weitere Anwendung resistenter Schutzgläser ist das Dublierverfahren nach Jacobi /8, 9/. Hierbei werden die Originalgläser beidseitig mittels eines weichen Acrylfilms mit morphologisch angepaßten Schutzglasscheiben belegt. Dieses Verfahren ist nur bei relativ großen Glassegmenten durchführbar, bei gelockerten Malschichten nicht zu verantworten und bezüglich der Reversibilität umstritten. Außerdem geht das gesamte Bleinetz verloren, so daß ein schwerer Eingriff in das Kunstwerk vorliegt.

Versuche, mit flächigen Schutzbeschichtungen auf der Basis organischer Polymere (z. B. Acrylaten) eine wirksame Konservierung zu erreichen, führten bisher zu keinen befriedigenden Ergebnissen /2/. Die Schichten wiesen eine noch zu hohe Durchlässigkeit für die Schadstoffe auf, und es kam zu Haftungsverlusten und weiterem Korrosionsfortschritt. Auch Probleme bezüglich der Langzeitstabilität der Lackschichten und zur Reversibilität der Maßnahme blieben ungelöst.

Eine mögliche Alternative oder auch ggf. Ergänzung zur somit derzeit einzigen tragbaren Schutzmaßnahme der Außenverglasung stellt das

neue Schutzkonzept des ISC dar (Bild 11), eine mehrschichtige Korrosionsschutzbeschichtung auf der Basis organisch modifizierter Silicate /6, 10/. Das Verfahren wurde im Rahmen einer internationalen NATO-CCMS-Studie erarbeitet und befindet sich seit drei Jahren in der Prüfphase nach werkstoffwissenschaftlichen Gesichtspunkten. Alle bisherigen Erfahrungen sprechen für die gute Eignung des neuen Schutzsystems, dessen Entwicklung gezielt gemäß den Forderungen und Desideraten der Konservatoren und Restaurierungsexperten erfolgte:

- hohe Schutzwirkung durch zusätzliche anorganische Pigmente
- optimale Haftung zu Glas und Korrosionsschichten
- optische Qualität entsprechend den Anforderungen
- Reversibilität durch gute Löslichkeit der Lacke
- einfache Applikation
- flexible Anwendbarkeit bei speziellen Problemen.

(Bild 11:)

Nach ersten Tests an ausgesuchten mittelalterlichen Originalgläsern, z. B. vom York Minster, in Klimaschrank- und Freilandversuchen, werden nun in der nächsten Projektphase Pilotstudien an verschiedenen Kirchenfenstern im In- und Ausland eine praxisrelevante Prüfung ermöglichen. Falls sich das neue Verfahren auch hierbei bewährt, dürfte damit ein weiterer Schritt in Richtung technischer Anwendung getan sein.

5. Literatur

- / 1/ Marschner, H.: Schäden an Glasgemälden. Denkmalpflegeinformationen des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege 35 (1982) 23 - 31.
- / 2/ Fitz, S., Fitz-Ulrich, E., Frenzel, G., Krüger, R. u. Kühn, H.: Die Einwirkungen von Luftverunreinigungen auf ausgewählte Kunstwerke mittelalterlicher Glasmalerei. Forschungsbericht 106 08 002, Hrsg.: Bundesminister des Innern in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Museum, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1984.
- / 3/ Müller, W., Poillon, H., Bochynek, G. u. Mehner, H.: Extreme Dunkelung von Glasmalereien. Glastechn. Ber. 59 (1986), Nr. 4, S. 96 - 102.
- / 4/ Schreiner, M. u. Scholze, H.: Korrosionsmechanismen an historischen Glasfenstern (Literaturstudie). Forschungsbericht UFOPLAN-Nr. 106 08 104, 1985.
- / 5/ Patzelt, H., Tünker, G. u. Scholze, H.: Untersuchungen zum Schutz mittelalterlicher Glasfenster - Ergänzende Versuche. Forschungsbericht UFOPLAN-Nr. 106 08 005/01, 1985.
- / 6/ Fuchs, D., Patzelt, H. u. Tünker, G.: Immissionsschutz für historische Glasfenster - Internationale Untersuchungen neuer Methoden. Forschungsbericht UFOPLAN-Nr. 106 08 005/02, 1987.
- / 7/ Jütte, B. A. H. G.: Außenschutzverglasung - Meßergebnisse in der St. Janskirche zu Gouda. Arbeitsheft 32, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (1985), 110 - 115.
- / 8/ Jacobi, R.: Die Konservierung alter Glasmalereien des Kölner Doms. Glastechn. Ber. 30 (1957), 509 - 514.
- / 9/ Wolff, A.: Die Konservierung der Glasmalereien am Kölner Dom. Arbeitsheft 32, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (1985), 102 - 104.
- / 10/ Tünker, G., Patzelt, H., Schmidt, H. u. Scholze, H.: Neue Wege zur Erhaltung historischer Glasfenster. Glastechn. Ber. 59 (1986), Nr. 9, 272 - 278.

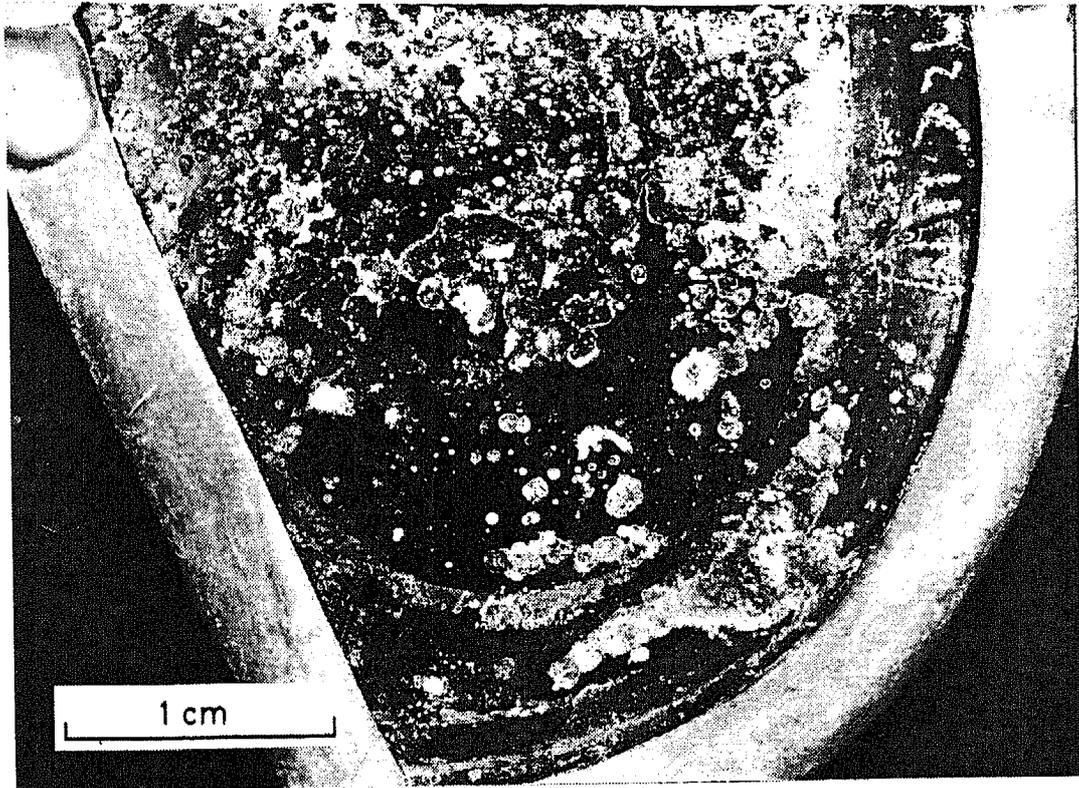


Bild 1: Kraterkorrosion an einem Glas vom York Minster, 12. Jh.



Bild 2: Wettersteinkrusten auf einer Scheibe vom Regensburger Dom, 13. Jh.

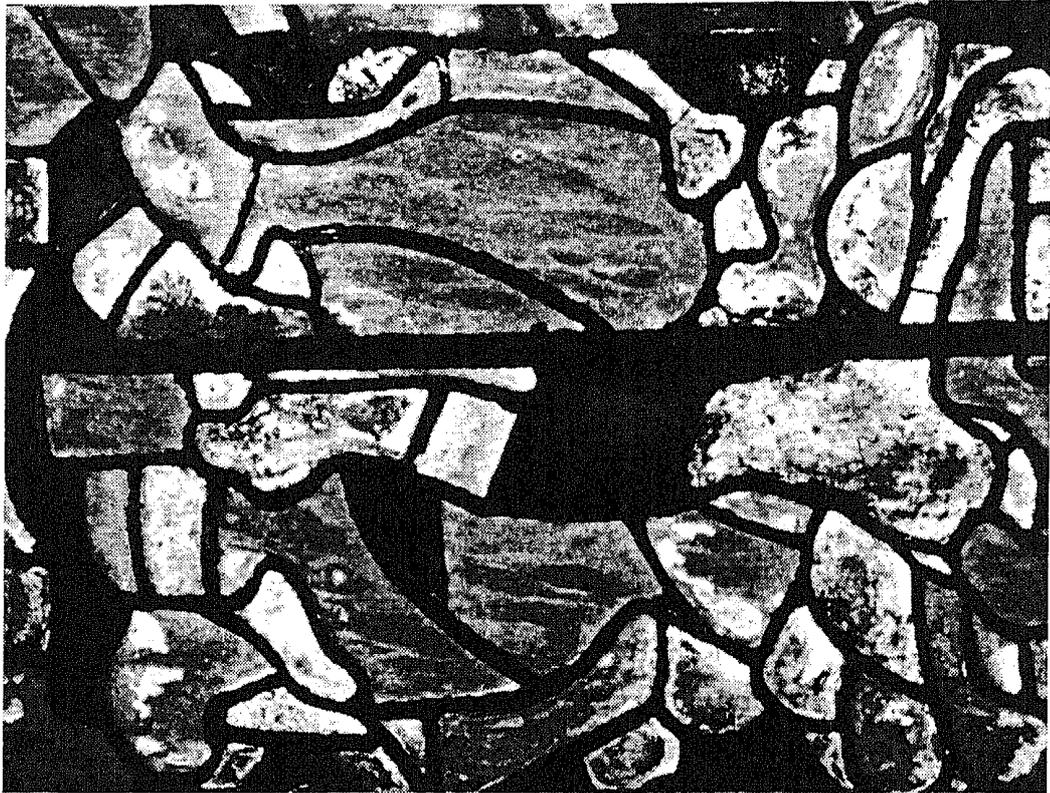


Bild 3: Malschichtverlust (Amberger Dom, 15. Jh.)



Bild 4: Verschwärzung (Gotland, 13. Jh.)

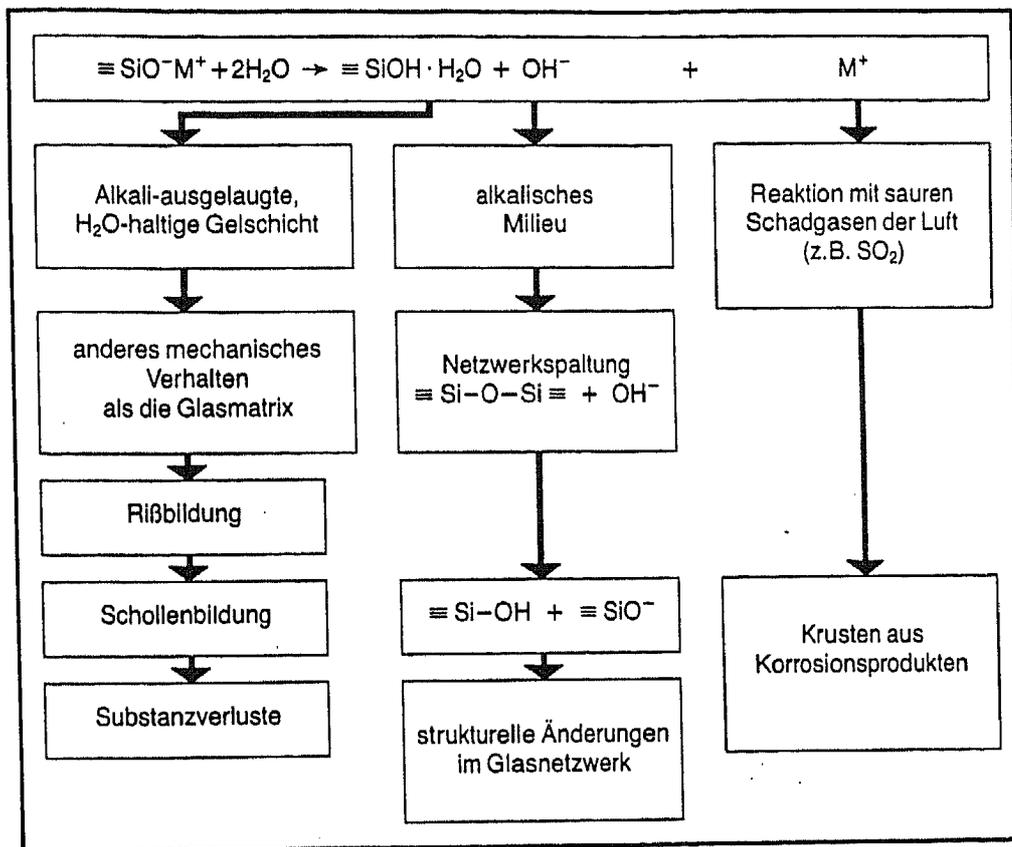


Bild 5: Schematische Darstellung der primären Korrosionsmechanismen

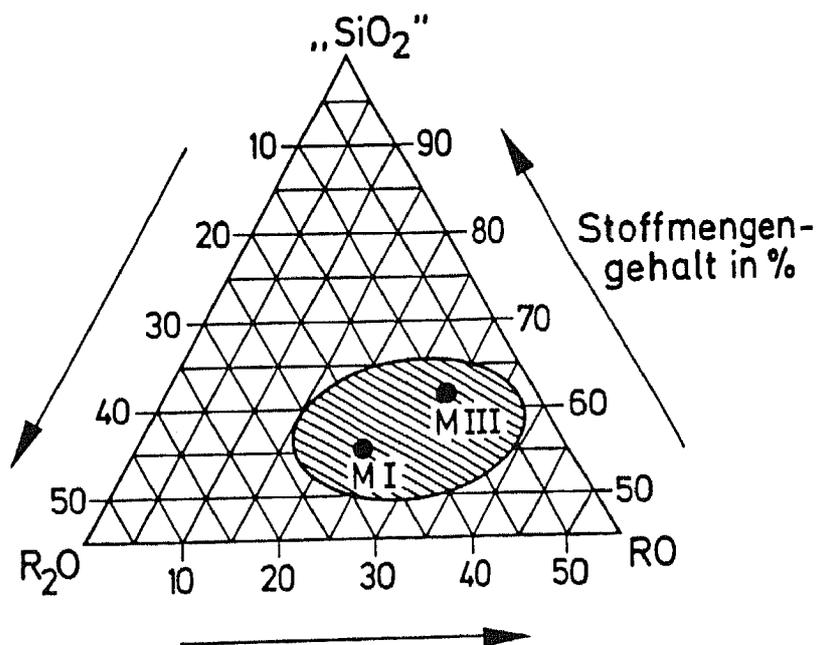


Bild 6: Zusammensetzung der untersuchten Modellgläser MI und MIII (schraffierter Bereich gibt Variationsbreite mittelalterlicher Originalgläser an)

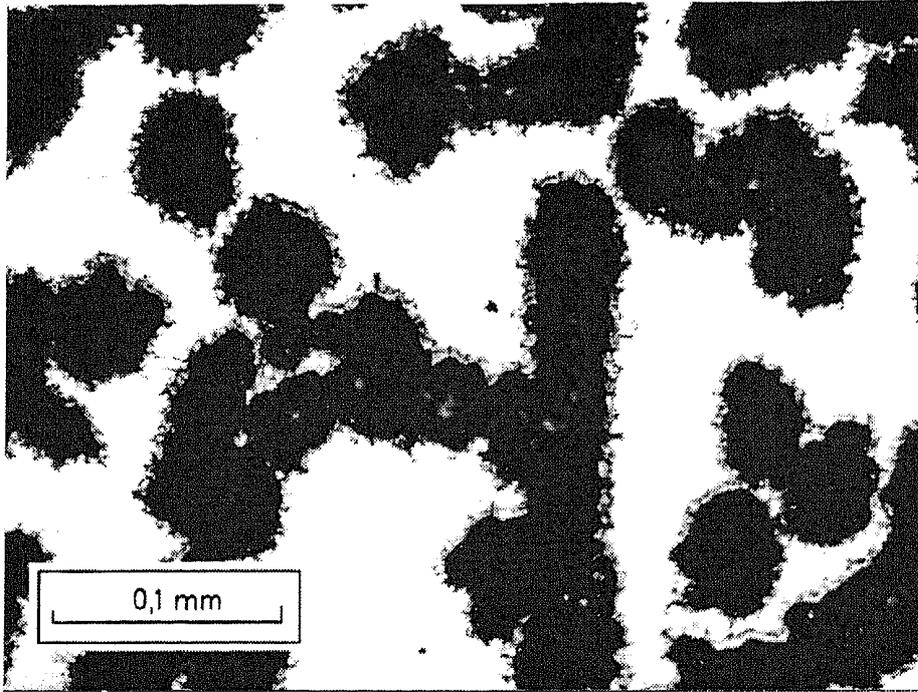


Bild 7: Stark durch Lochfraß zerstörte Modellglasoberfläche (Glastyp MI, ein Jahr Freilandbewitterung)

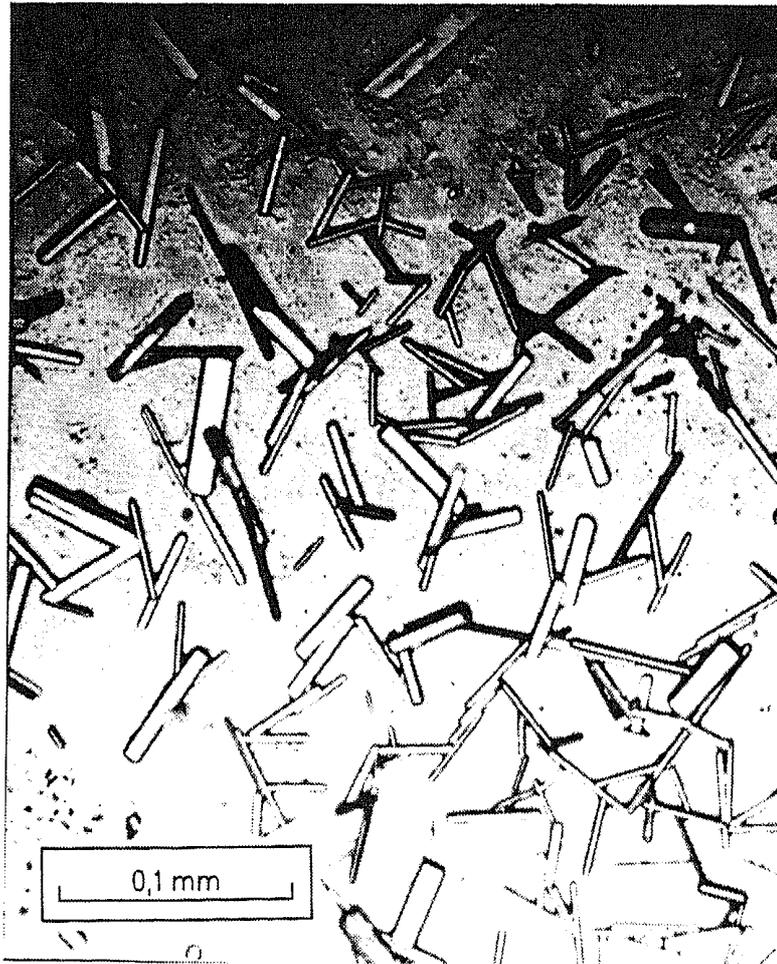


Bild 8: Syngenitkristalle (Klimaschrankbewitterung, Originalglas vom York Minster, 15. Jh.)

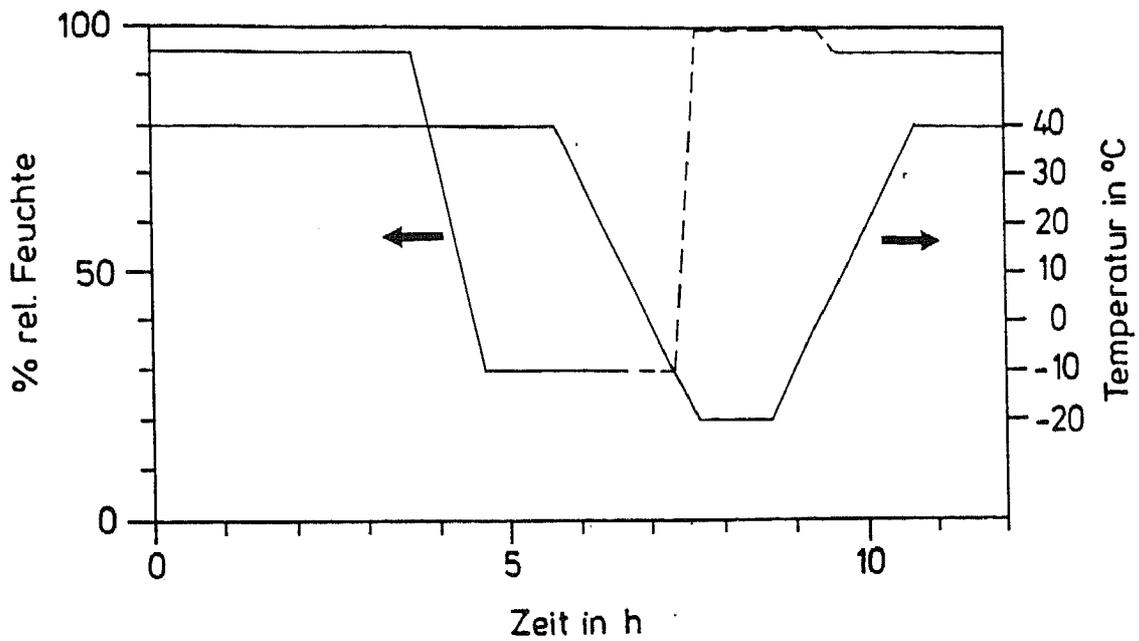


Bild 9: Zyklischer Temperatur- und Feuchteverlauf im Klimaschrankversuch

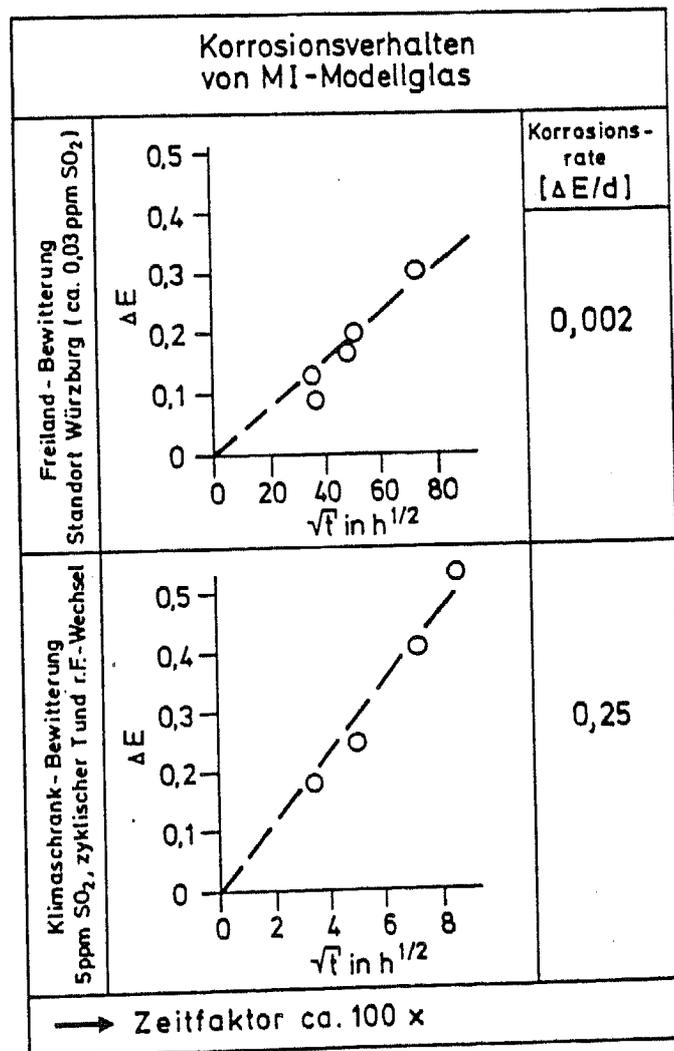


Bild 10: Vergleich Freiland- und Laborbewitterung (ΔE = IR-spektroskopisch bestimmte Wasseraufnahme und Gelschichtbildung als Maß für den Korrosionsfortschritt)

	<p>Deckschicht</p>	<p>geringe Verschmutzungsneigung Kratzfestigkeit UV- und Oxidationsschutz</p>
	<p>Schutzschicht mit anorganischen Pigmenten</p>	<p>Korrosionsschutz durch zusätzliche Diffusionsperre</p>
<p>Korrodiertes Glas</p>	<p>Grundierung</p>	<p>Haftung zu Glas und Korrosionsprodukten Reliefausgleich</p>

Bild 11: Schematischer Aufbau der ISC-Beschichtung