

Kapitel 8

Materialmodelle II: Römisches Fensterglas

8.1 Die Verglasung der Hagia Sophia

Die große Zahl und Fläche der Fenster ist ein wichtiges Merkmal der Architektur der Hagia Sophia. Das gilt umso mehr für den rekonstruierten Bauzustand, bei dem die Fensterfläche noch nicht durch spätere Zusetzungen reduziert ist. Man kann fest davon ausgehen, dass die Fenster der Hagia Sophia – wie die anderer römischer und spätantiker Bauten – verglast waren.¹ Beispiele römischer Verglasung weisen allerdings andere optischen Eigenschaften auf als modernes Glas (Abbildung 8.2). Diese Eigenschaften könnten daher eine bedeutende Rolle für die Lichtverteilung und die Lichtwirkung des Gebäudes spielen. Leider hat sich von dieser Verglasung, die Paulus als dünne Glasscheiben bezeichnet² nichts erhalten. Heute findet man in den Fenstern verschiedene Materialien, an vielen Stellen Drahtglas, offensichtlich Material aus jüngster Zeit (Abbildung 8.1). Damit ist auch die Bedeutung der optischen Eigenschaften der historischen Verglasung am heutigen Bau nicht mehr nachzuvollziehen.

Mainstone beschreibt das ursprüngliche Glas als »slightly opaque by present standards« und vermutet, dass diese Eigenschaft zu einer gleichmäßigeren Beleuchtung beiträgt und die Blendung reduziert.³ Schibille stellt fest, dass sich zwar die Fensterrahmen erhalten haben, aber nichts von der originalen Verglasung. Sie schließt andere Materialien (z. B. dünne Marmorscheiben) aus und verweist auf die zu diesem Zeitpunkt lange Tradition römischen Fensterglases. Als für die Zeit typisches Baumaterial beschreibt sie es als von »translucent to near transparent quality«. Sie stellt spektrale Messungen einiger Gläser vor und begründet so die Vermutung, dass die Glasscheiben farblich leicht variiert haben.⁴ Sie geht aber nicht weiter auf den Einfluss solcher Scheiben auf die Lichtverteilung ein.

Hinweise auf Fensterglasfunde im Kontext der Hagia Sophia finden sich in der Literatur nicht, es gibt aber in Istanbul an anderer Stelle Fensterglasfunde, die sich dem 6. Jh. zuordnen

¹ Schibille 2014b.

² Vers 409.

³ Mainstone 1988, S. 124 f.

⁴ Schibille 2014b, S. 34 f.

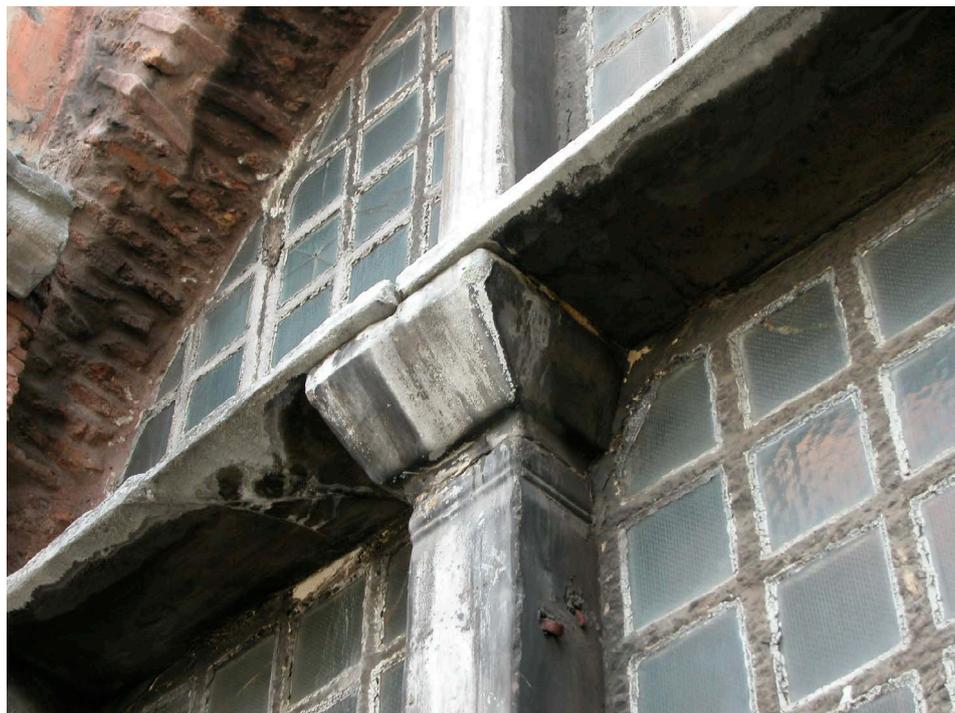


Abbildung 8.1: Das heutige Glasmaterial an einem Fenster im Exonarthex. Drahtglas findet sich an vielen Fenstern im Gebäude. Zustand 2004.

lassen.⁵ Auch an anderen Stellen des römischen Reichs findet sich Fensterglas aus dieser Zeit.⁶ Auf dieser archäologischen Basis sollten sich die optischen Eigenschaften rekonstruieren lassen.

8.2 Römisches Fensterglas

8.2.1 Nachweis und Produktion von römischem Fensterglas

Der Baustoff Glas ist eine Innovation der römischen Architektur. Sie beginnt mit der Verwendung von Fensterglas in den Thermen der frühen Kaiserzeit.⁷ Vitruv erwähnt Fensterglas nicht, Seneca beschreibt die Verwendung als in seiner Zeit gängig.⁸ Damit ergibt sich für das Aufkommen von Fensterglas ein Zeitraum von immerhin 22 v. Chr. bis 64 n. Chr. Komp nennt in ihrer Untersuchung von Fensterglasfunden aus dem Rheingebiet als erste Belege für Fensterglas Funde aus den späten 40er Jahren des 1. Jh. n. Chr. in Magdalensberg in Kärnten.⁹ Bei der Erfin-

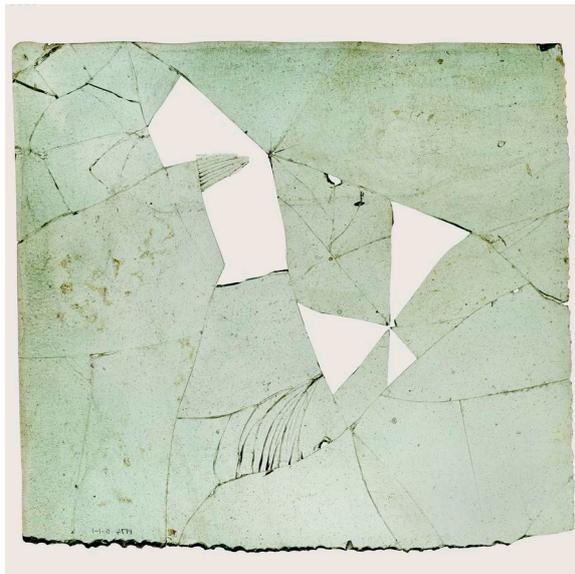
⁵ Z. B. Canav Özgümüş 2009; Harrison und Gill 1986.

⁶ Z.B. Schibille, Maril und Rehren 2008; Komp 2009; Arletti u. a. 2010.

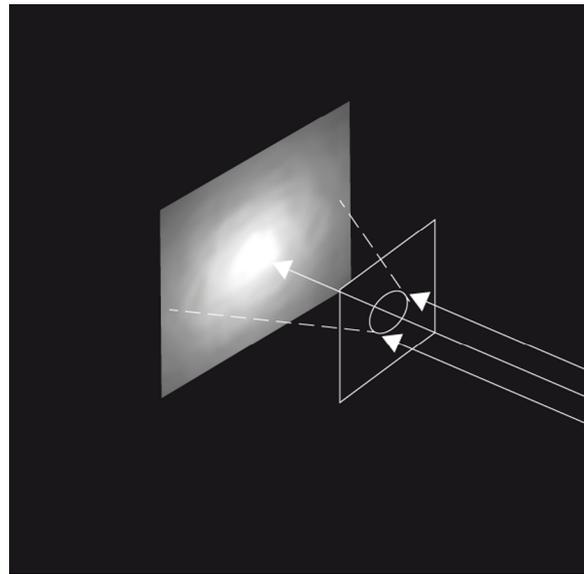
⁷ Baatz 1991, S. 4.

⁸ Baatz 1991, S. 5.

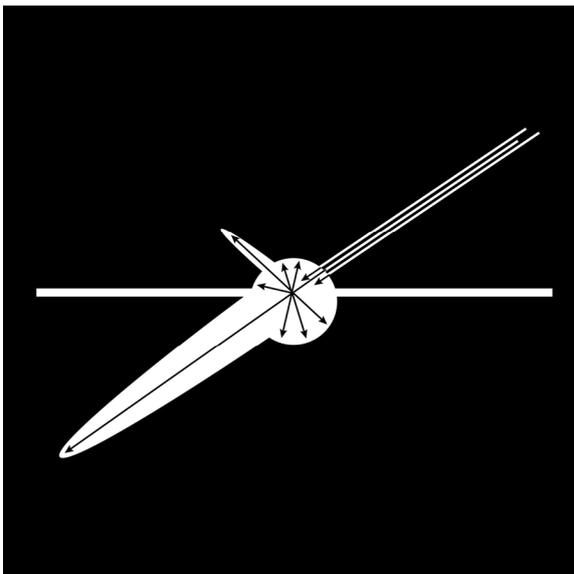
⁹ Komp 2009, S. 24.



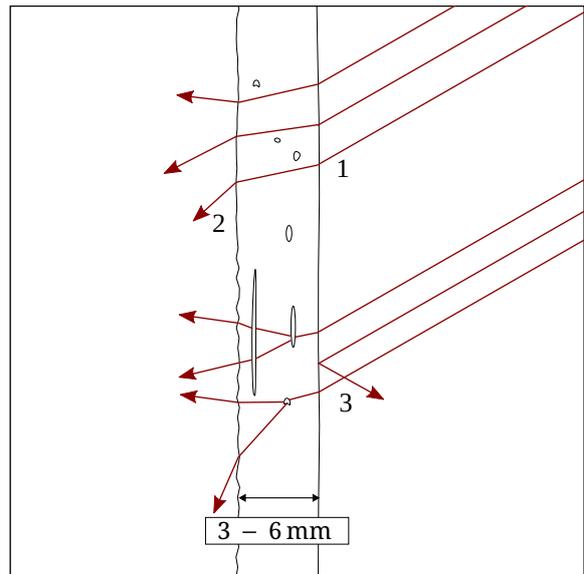
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 8.2: Lichttechnische Eigenschaften von römischem Fensterglas: Flache Fensterglasscheibe aus der Sammlung des British Museums (a). Einfallendes Sonnenlicht wird gestreut, für die Beleuchtung entsteht eine gerichtete und eine diffus gestreute Komponente (b) (c). Direktes Licht wird an der welligen oder rauen Oberfläche (1, 2) und an kleinen Luftbläschen (3) gestreut (d). Quelle: (a) © The Trustees of the British Museum. Shared under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) licence. Weitere Abbildungen: Hochschule Luzern.

dung standen wahrscheinlich vor allem die technischen Eigenschaften der Verglasung im Fokus: Beheizte Thermen mit großzügiger Belichtung sind ohne einen thermischen Raumabschluss mit Glas gar nicht möglich.¹⁰

Zumindest auf den ersten Blick ähneln sich Fensterglasfunde hinsichtlich Farbe, Dicke und Oberflächenstruktur aus verschiedenen Teilen des Römischen Reiches und vergleichbaren zeitlichen Kontexten.¹¹ Fenstergläser sind offenbar in sehr ähnlichen Verfahren hergestellt worden. Bei den Rohgläsern geht man von einer zentralisierten Produktionsweise aus,¹² mit einer besonderen Bedeutung der östlichen Mittelmeerküste.¹³ Eine ähnliche Zentralisierung der Weiterverarbeitung von Rohglas zu Fenstergläsern ist nicht zu erkennen. Vielmehr werden viele kleine Werkstätten angenommen,¹⁴ möglicherweise auch wandernde Handwerker.¹⁵ Diese bedienen sich des Rohglases aus verschiedenen Produktionsstätten.¹⁶ Es gibt Hinweise auf den Handel mit Fertigprodukten.¹⁷

Ein fließender Übergang zu anderen Produktionsweisen ist ab der Mitte des ersten Jahrtausends festzustellen. Freestone et al.¹⁸ konnten ab der Mitte des 6. Jh. eine Änderung der chemischen Zusammensetzung von Gläsern aus Großbritannien durch den zunehmenden Einsatz von Natron aus Pflanzenasche nachweisen. Den Grund für diese Änderung der Technologie sehen sie in einer Regionalisierung der Rohglasproduktion. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Drauschke und Greiff¹⁹ für Glasfunde aus Caričin Grad in frühbyzantinischer Zeit. Sagui²⁰ diagnostiziert ein Erliegen der zentralen Rohglasproduktion an der östlichen Mittelmeerküste im 9. Jh. durch den Wegfall der Lieferung von ägyptischem Natron.

8.2.2 Herstellung und optische Eigenschaften von römischem Fensterglas

Neben der Rohglaszusammensetzung sind die optischen Eigenschaften römischer Fenstergläser abhängig von physischen Qualitäten, die aus unterschiedlichen Herstellungstechniken resultieren. In den Werkstätten werden ab dem ersten Jahrhundert zwei deutlich unterscheidbare Typen von flachen, rechteckigen Fenstergläsern gefertigt:

¹⁰ Baatz 1991; O’Hea 2007; Ring 1996. Bei der thermischen Betrachtung bleibt unerwähnt, dass Wasserbecken den größten Teil ihrer Wärmeenergie über Verdunstung verlieren, die im Zusammenhang mit der Luftfeuchte steht. Das Erhalten einer hohen Luftfeuchte durch geeigneten Raumabschluss spart viel Energie.

¹¹ Vergl. Bachmann 2011, Gliozzo, Barbone und D’Acapito 2013, Komp 2009, Arletti u. a. 2010. Drauschke und Greiff 2008, O’Hea 2001.

¹² Komp 2009.

¹³ Sagui 2007; Freestone, Hughes und Stapleton 2008.

¹⁴ Komp 2009, S. 216.

¹⁵ Komp 2009, S. 211.

¹⁶ Komp 2009, S. 206.

¹⁷ Komp 2009.

¹⁸ Freestone, Hughes und Stapleton 2008.

¹⁹ Drauschke und Greiff 2008.

²⁰ Sagui 2007.

1. *Geformtes Fensterglas*²¹ von 3 bis 6 mm Dicke mit einer rauhen und einer glatten Seite. Bei der Herstellung wird die Glasmasse auf eine Oberfläche gegossen und breitgedrückt. Dabei kühlt das Glas schnell ab und muss wieder erhitzt werden. Die Glasmasse wird mit Werkzeugen in eine rechteckige Form gebracht.²² Entsprechende Abdrücke finden sich auf der Oberseite. Die raue Unterseite weist oft eine lederartige Struktur auf, die möglicherweise beim Abkühlen durch die Oberflächenspannung an der kühlen Unterlage entsteht.²³ Auf dieser Seite finden sich oft Einschlüsse von Sand, der offenbar als Trennmittel eingesetzt wird²⁴. Dies ist das ursprüngliche Fensterglas der frühen Kaiserzeit.²⁵
2. Dünneres, *geblasenes Fensterglas* mit zwei glatten Seiten. Bei seiner Herstellung wird ein Zylinder geblasen, der aufgeschnitten und flachgedrückt wird.²⁶ Es weist oft mehr Lufteinschlüsse auf als das geformte Fensterglas.²⁷ Es findet sich ab dem Ende des 2. Jh.²⁸ und dominiert von da an die Fundmengen.²⁹

Von den beiden genannten Fensterglastypen ist nur das geblasene als transparent in dem Sinne zu bezeichnen, dass sich die Umgebung dahinter erkennen ließe. Das gegossene Fensterglas entspricht eher transluzenten Gläsern wie sie heute z. B. in Bädern zum Einsatz kommen. Neben diesen beiden Typen flachen Fensterglases finden sich runde geblasene Gläser, zum Teil mit Butzen, und schüsselartig gewölbte Gläser, die wohl im Kontext besonderer Fenstertypen Verwendung fanden.³⁰

Die optischen Eigenschaften römischer Fenstergläser (als archäologische Funde) werden auch durch mechanische und chemische Veränderungen der Oberflächen beeinflusst.³¹

8.2.3 Glaseigenschaften und römische Architektur

Dass die Verfügbarkeit eines lichtdurchlässigen Raumabschlusses die römische Architektur verändert hat, ist kaum zu übersehen. Die großen Fenster der Kaiserthermen, antiker Palastbauten wie der Konstantinsbasilika und frühchristlicher Kirchen zeugen davon. Die Fenster erlaubten

²¹ Hier und im Folgenden wird der Begriff *geformtes Fensterglas* für diesen Typus in Anlehnung an die Begriffsbildung bei Fünfschilling 2015 verwendet. Wiesenberg 2016 schlägt *gestrecktes* Fensterglas vor, in der Literatur findet sich oft *gegossenes* Fensterglas. Komp 2009 orientiert sich am Phänotyp und verwendet *rau-glatt* im Gegensatz zu *beidseitig glatt*. *Geformt* erscheint mir griffig und schließt die ganze Reihe von Arbeitsabläufen ein, die diesen Typus hervorbringen.

²² Wiesenberg 2016.

²³ Komp 2009, S. 60 ff.

²⁴ Allen 2002; Komp 2009, S. 66 ff.

²⁵ Arletti u. a. 2010.

²⁶ Wiesenberg 2016.

²⁷ Komp 2009, S. 73 ff.

²⁸ Komp 2009, S. 69.

²⁹ Arletti u. a. 2010.

³⁰ O’Hea 2001.

³¹ Einen Überblick liefern Brill und Stapleton 2012 und Fünfschilling 2015.

eine neue Gestaltung der Innenräume mit Wandmalerei, Inkrustation und Skulptur.³² Rasch³³ untersucht genauer die Auswirkungen der Lichtführung auf die Entwicklung von Farbigeit, Schattenwirkung und Struktur spätantiker Wandaufbauten. Schibille³⁴ setzt sich mit ästhetischen Aspekten von Lichtführung und Mosaiken auseinander. Baatz bringt einen Wechsel der Ausrichtung der Architektur von Innenhöfen zum Außenraum mit den neuen Möglichkeiten der Verglasung in Zusammenhang.³⁵

Die Rolle der optischen Eigenschaften der Verglasung für die Beleuchtung römischer Innenräume ist in der Forschung bisher aber kaum diskutiert worden. Da kein römischer Innenraum mit erhaltener Verglasung bekannt ist, fehlt es auch an der unmittelbaren Möglichkeit, sich deren Wirkung anschaulich zu machen. Komp fragt allerdings, ob es einen Zusammenhang zwischen der Glasfärbung und den Farben von bestimmten Wandmalereien gibt³⁶, übersieht hierbei das Adaptionsvermögen des menschlichen Sehapparates. Im Zusammenhang mit Textstellen bei Seneca und Plinius dem Jüngeren³⁷ diskutiert sie zudem die Frage, ob die Transparenz der Fenstergläser dieser Zeit, die nach ihrer Untersuchung nur vom geformtem Typ hätten sein können, das Betrachten einer Landschaft aus dem Innenraum einer Therme erlauben.³⁸ Baatz interpretiert diese Quellen hingegen als Beleg für die Verwendung von geblasenem Glas, da nur dieses ausreichend transparent sei.³⁹ Er stellt aber keinen Zusammenhang zu entsprechenden Glasfunden aus dieser Zeit her.

8.3 Pilotstudie zur Streuung von Licht durch römisches Fensterglas

Die lichtstreuenden Eigenschaften von römischem Fensterglas sind offenbar noch nicht gut erforscht. Deshalb wurde im Kontext dieses Promotionsvorhabens eine Pilotstudie mit dem Ziel durchgeführt, die Streueigenschaften römischer Fenstergläser erstmals goniophotometrisch zu vermessen, für die Lichtsimulation zu modellieren und ihre Lichtwirkung einzuschätzen.⁴⁰ Die Ergebnisse werden im Folgenden referiert, das entwickelte Materialmodell wurde in die Simulation integriert.

³² Baatz 1991; Günter 1968.

³³ Rasch 2011.

³⁴ Schibille 2014a.

³⁵ Baatz 1991.

³⁶ Komp 2009, S. 96 ff.

³⁷ Sen. epist. 86,8. und Plin. epist. 2, 17, 11.

³⁸ Komp 2009, S. 63 ff.

³⁹ Baatz 1991.

⁴⁰ Diese wurde gemeinsam mit Franziska Lang (Technische Universität Darmstadt), Lars O. Grobe (Hochschule Luzern), Susanne Greiff (Römisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz) und Jennifer Komp (LVR-Landesmuseums Bonn) durchgeführt. Die Ergebnisse wurden auf zwei Konferenzen vorgestellt: Noback, Grobe, Greiff u. a. 2017; Noback, Grobe und Lang 2021 (im Review). Ein Fachartikel (Grobe, Noback und Lang 2019) ist mittlerweile publiziert.

8.3.1 Auswahl und Zustand der Fensterglasproben

Für diese Untersuchung wurden vier Proben flachen römischen Fensterglases (G1-G4) aus der archäologischen Sammlung des LVR-LandesMuseum Bonn ausgewählt (Abbildung 8.3).⁴¹ Die Verschiedenartigkeit der Proben repräsentiert die Breite typischer Funde provinzialrömischen flachen Fensterglases (Tabelle 8.1).



Abbildung 8.3: Die Fensterglasproben (G1-G4) der Pilotstudie.

Tabelle 8.1: Fundkontext und Datierung der Proben. Daten: Komp 2009.

Inventarnummer	Fundort	Datierung
G1 #9349	Blankenheim-Hülchrath, Villa rustica	Ende 1. – Mitte 4. Jh.
G2 #75.169	Dormagen, Castellum	Ende 1. – 4. Jh.
G3 #70.0459	Bonn, Castrum	1. – 5. Jh.
G4 #675	Bonn, Castrum	1. – 5. Jh.

Eine mikroskopische und visuelle Charakterisierung der Eigenschaften und des Zustandes der Proben wurde gemeinsam mit Dr. Susanne Greiff vom Römisch-Germanisches Zentralmuseum, Mainz durchgeführt. Zusätzlich wurden Makroaufnahmen angefertigt.

⁴¹ LVR-LandesMuseum Bonn, Rheinisches Landesmuseum für Archäologie, Kunst- und Kulturgeschichte; Die Auswahl geschah unter Beteiligung von Dr. Jennifer Komp. Die Herkunft der Proben ist in Komp 2009 dokumentiert. Sieh auch: Grobe, Noback und Lang 2019.

Die Proben wurden wie folgt charakterisiert:

- *G1: Geformtes Fensterglas mit einer lederartigen Unterseite. Oberseite:* unregelmäßig verteilte Merkmale beginnender Korrosion mit kleinen Fehlstellen; einige Bereiche mit stärkerer Korrosion. *Unterseite:* längliche wellige Struktur (lederartig), $l \approx 1$ mm; mit runden und ovalen Vertiefungen (Abbildung 8.4 (4)). Einige tiefere runde Löcher. Reste von Mörtel. Leichte diagonale Kratzer (wahrscheinlich Reinigungsspuren). Beginnende Korrosion. *Glasmasse:* wenige, kleine kreisrunde Luftbläschen ($\varnothing < 0,3$ mm). *Kanten:* scharf. *Dicke:* 2,1 – 4,7 mm.
- *G2: Geformtes Fensterglas mit einer flachen Unterseite. Oberseite:* unregelmäßig ausgerichtete Kratzer mit Anhaftungen, wenige längliche Vertiefungen, geringe Anzeichen von Korrosion. *Unterseite:* flach mit wenigen Unebenheiten ($l \approx 10$ mm); regelmäßig verteilte kleine Vertiefungen, die unter dem Mikroskop unregelmäßige scharfe Kanten zeigen und mit Anhaftungen gefüllt sind, möglicherweise Eindrücke von gelöstem Sand als Trennmittel; geringe Anzeichen von Korrosion. *Glasmasse:* einige, kleine kreisrunde Luftbläschen. *Kanten:* scharf, eine gleichmäßig abgerundet. *Dicke:* 3,7 – 5,2 mm.
- *G3: Geblasenes Fensterglas. beide Seiten:* Stärker ausgeprägte schimmernde Korrosion mit länglichen Korrosionsstrukturen (Abbildung 8.5), bräunliche Stellen mit Einschlüssen und stärker ausgeprägter Korrosion; Oberfläche teilweise abgeblättert; leicht gebogene Riffelung (Abbildung 8.4 (1)).⁴² *Glasmasse:* viele runde Luftbläschen. *Kanten:* scharf, eine Kante rund geschmolzen. *Dicke:* 1,9 – 2,9 mm.
- *G4: Geformtes Fensterglas mit Bearbeitungsspuren. Oberseite:* sehr uneben, zum Rand hin dicker; leichte Anzeichen von Korrosion, wahrscheinlich teilweise entfernt. *Unterseite:* flach, tiefe parallele Kratzer, tiefe kleine Löcher, wahrscheinlich angeschliffene Luftbläschen oder Eindrücke von Sand; einige flach mit der Oberfläche abschließende eingeschlossene Sandkörner (Abbildung 8.4 (2)); beginnende Korrosion gefüllt mit Anhaftungen. *Kanten:* scharf, eine Kante auf der Länge perfekt gerade und einheitlich abgerundet. *Dicke:* 4,7 – 6,0 mm

Die Charakterisierung zeigt, dass aus der Perspektive einer optischen Beurteilung flacher römischer Fenstergläser eine Unterscheidung in geformtes und geblasenes Fensterglas nicht ausreichend ist. Die Bearbeitungsspuren zeigen, dass bei geformten Fenstergläsern, insbesondere die Probe G4, unterschiedliche Formen der Weiterbearbeitung zum Einsatz kommen können, die offensichtlich Auswirkung auf die Streueigenschaften haben. Komp stellt fest, dass ein Drittel der Proben aus dem Rheinland Spuren einer Nachbearbeitung zeigt.⁴³ Reihenuntersuchungen sind notwendig um die Auswirkungen solcher Nachbearbeitungsverfahren systematisch zu erfassen.

⁴² Diese Riffelung könnte ein Hinweis sein, dass es sich auch um den Teil eines flachen Gefäßes handeln könnte. Da für diese Probe, und viele weitere Fensterglasfunde, kein eindeutiger Fundzusammenhang herstellbar ist, muss die Frage offenbleiben. Für die optische Charakterisierung ist das aber unerheblich.

⁴³ Komp 2009, S. 62.

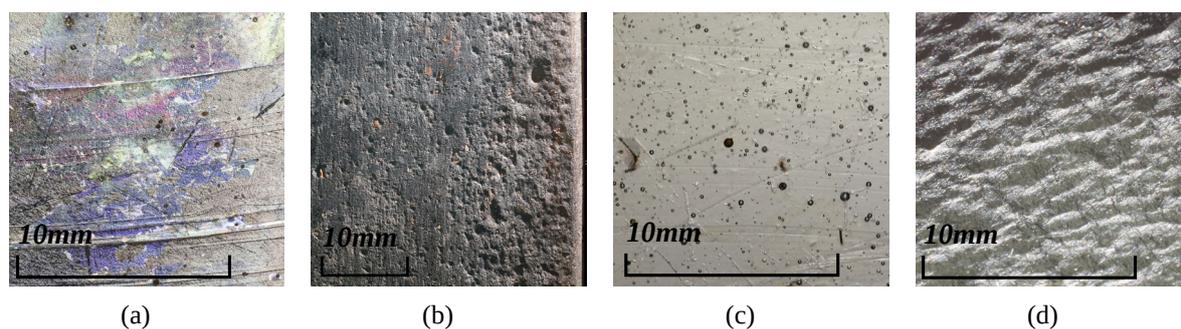


Abbildung 8.4: Materialeigenschaften römischer Fenstergläser: Schillernde Korrosionsspuren (a). Bearbeitungsspuren (flach geschliffene Unterseite und bearbeiteter Rand, (b)) an einem geformten Fensterglas. Bläschen in der Glasmasse eines geblasenen Fensterglases (c). Lederartige Unterseite eines geformten Fensterglases (d). Quelle: Noback, Grobe und Lang 2021; Grobe, Noback und Lang 2019. Proben aus dem LVR-LandesMuseum Bonn. $l = 10 \text{ mm}$.

Die Mörtelspuren und die Bearbeitung einzelner Ränder deutet darauf hin, dass drei der untersuchten Funde von den Rändern einer Scheibe stammen (G1, G3 und G4). Bei den geformten Fenstergläsern ist davon ausgehen, dass die Scheiben in der Mitte dünner gewesen sind. Die Lichtdurchlässigkeit wird daher größer und die Streuung durch Bläschen in der Glasmasse geringer sein. Die Untersuchung ganzer Scheiben könnte dafür Anhaltswerte liefern und so eine bessere Charakterisierung der Scheiben als Ganzes liefern.

Die größte Unsicherheit in Bezug auf die Messergebnisse, die diese visuelle Untersuchung offenlegt, sind die Spuren der Korrosion. Zumindest die weiter fortgeschrittene Korrosion der Probe G3, bei der auch Teile der Oberfläche abblättern und eine raue, schillernde Struktur zurückbleibt, führt sicherlich zu zusätzlicher Streuung. Die quantitative Einschätzung dieses Effektes ist allerdings ohne umfangreichere Untersuchungen kaum möglich. Ebenso schwierig ist es, abzusehen, welche Charakteristik diese zusätzliche Streuung hat. Sie könnte zu einer diffusen, also richtungslosen Streuung führen, aber auch eine vorwärts gerichtete direkte Komponente weiter aufstreuen. Die opaken Anhaftungen werden wohl zu einer leichten Verminderung des Transmissionsgrades führen.

8.3.2 Messung der Streueigenschaften und datenbasierte Modellierung

Die Proben wurden im Rahmen der Pilotstudie an der Hochschule Luzern goniophotometrisch vermessen.⁴⁴ Dafür wurden Halterungen gebaut, in welchen die Proben ohne Beschädigung aufgenommen werden konnten. Dabei kamen individuell angefertigte lasergeschnittene Holzplatten zum Einsatz (Abbildung 8.6).

Mit der Positionierung der Probe in der Halterung wird auch die von der Messung erfasste Fläche definiert. Die Position wurde so gewählt, dass ein möglichst ungestörter Bereich auf der Probe gemessen werden konnte. Dazu wurde der Ausschnitt für die Probe asymmetrisch in der

⁴⁴ Grobe, Noback und Lang 2019.

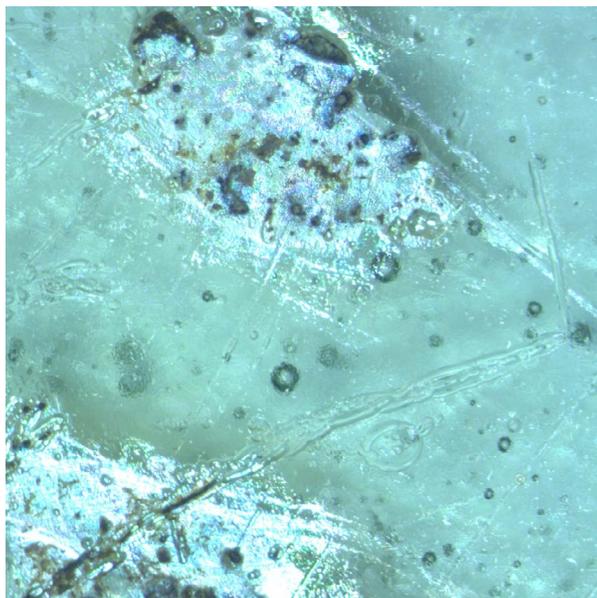


Abbildung 8.5: Korrosionsspuren. Mikroskopaufnahme. Quelle: Grobe, Noback und Lang 2019.

Halterung positioniert. Dabei wurde auch die elliptische Verzerrung des Messflecks bei flachen Einfallswinkeln berücksichtigt (Abbildung 8.6 rechts).

Aus den Messungen wurde die DSF-Verteilung berechnet. Alle vier Proben zeigen einen deutlich erkennbaren mehr oder weniger spitzen Hügel (Peak) in Transmissionsrichtung vor einem diffusen Hintergrund (Abbildung 8.7). Die Weite dieses Peaks und das Niveau des diffusen Hintergrunds unterscheiden sich zwischen den Proben. G2 und G3 zeigen einen ähnlich akzentuierten schmalen Peak mit geringem diffusem Hintergrund. G1 zeigt einen weiteren Peak und etwas mehr diffusen Hintergrund. Bei G4 hebt sich der Peak nicht mehr so deutlich vom wesentlich stärkeren diffusen Hintergrund ab.

Die gemessenen Verteilungen lassen auf die optische Charakteristik der Scheiben schließen. Je weiter ein gemessener Peak ist, desto geringer ist die Klarheit der Scheibe und damit auch die Möglichkeit Gegenstände auf der anderen Seite der Scheibe zu erkennen. Gleichzeitig werden die Schatten, die direktes Licht durch die Scheibe erzeugt weicher. Je stärker der diffuse Hintergrund, desto trüber erscheint die Scheibe, desto stärker leuchtet sie im Gegenlicht auf. Zugleich sinkt der Kontrast von Licht und Schatten.

Um diese Wirkungen genauer zu untersuchen, wurden aus den Messdaten in RADIANCE datenbasierte Materialmodelle generiert und der Tageslichteinfall in einer Testszene simuliert. Wie man Abbildung 8.7 entnehmen kann, stimmen die Materialmodelle gut mit den Messungen überein.⁴⁵ Beim Erstellen der Materialmodelle trat aber eine Einschränkung der Messung zutage: Die geringe Größe der Probe verhindert die Messung flacher Einfallswinkel, da die Ellipse des Messflecks der Kosinusfunktion folgend immer länger wird (Abbildung 8.8). Für die größeren

⁴⁵ Ausführlichere Diskussion in der Publikation: Grobe, Noback und Lang 2019.

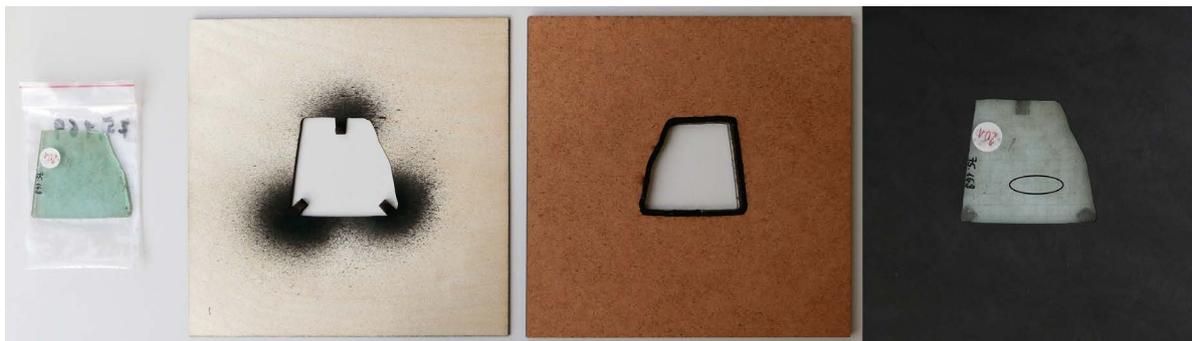


Abbildung 8.6: Probe G2 mit den Teilen der Halterung und im montierten Zustand (rechts). Die eingezeichnete Ellipse zeigt die von der Messung erfasste Fläche bei einem Einfallswinkel $\vartheta_i = 60^\circ$, $\varphi_i = 0^\circ$ ($l = 50\text{mm}$).

Proben konnten Winkel bis 75° gemessen werden, für die kleinere Probe des geblasenen Fensterglases G3 bis 60° . Um einfallendes Sonnenlicht unter realitätsnahen Bedingungen simulieren zu können, sind aber Winkel bis ca. $82,5^\circ$ nötig (Abbildung 8.9).⁴⁶ Die in RADIANCE implementierten Routinen zum Umgang mit datenbasierten Materialmodellen können zwar zwischen den Einfallswinkeln einer Messung interpolieren, nicht jedoch über die gemessenen Werte hinaus *extrapolieren*. Das Modell ist also für Winkel oberhalb des gemessenen Bereiches nicht mehr gültig, kann also weder aus diesen Richtungen einfallendes direktes Sonnenlicht noch diffuses Himmels- und Umgebungslicht berechnen. Bei modernen Materialien ist das für gewöhnlich keine Einschränkung, da ausreichend große Proben zur Verfügung stehen. Die oft kleinen Probeflächen aus archäologischen Funden erfordern aber eine Weiterentwicklung des Messaufbaus, der kleinere Messflecken und damit flachere Winkel erlaubt.

8.3.3 Demonstration der Streuwirkung der Proben in einer Testszene

Für die Demonstration der optischen Eigenschaften der Gläser in einer Testszene kann man den Einfallswinkel des Sonnenlichts aber passend wählen. Dazu wurde mit dem RADIANCE-Kommando `gensky -ang 29.9 -57.4` ein künstlicher Himmel generiert⁴⁷, bei dem die Sonne in einem Winkel von $\vartheta_i = 40,7^\circ$ ⁴⁸ auf die nach Osten orientierte Öffnung einfällt (Abbildung 8.10). Die Testszene besteht aus einem quadratischen Raum mit einem Kreuzgratgewölbe mit einem vereinfachten Thermenfenster. Die diffusen Oberflächen reflektieren 40 % des einfallenden Lichts, ähnlich dem Durchschnitt der Oberflächenmaterialien in der Hagia Sophia.

⁴⁶ Die Annahme ist, dass Licht mit größeren Einfallswinkeln von Fensterrahmen, Fensterwandungen etc. abgehalten wird. Nach den fresnelschen Formeln steigen die Reflexionsgrade für solche Winkel stark an, sodass kaum noch Licht transmittiert wird. Neben der geringen praktischen Bedeutung derart flacher Winkel, bestehen nahe 90° auch Grenzen der Messung: Die Ellipse des Lichtflecks wird unendlich lang, und stünde senkrecht zur Probefläche. Auch schmalste Halterungen würden Teile des Messstrahls abschatten.

⁴⁷ *Sunny sky with sun* nach CIE 003/E-1996 1996; *Ground reflection* $\rho = 0.20$.

⁴⁸ Berechnung nach Reda und Andreas 2008.

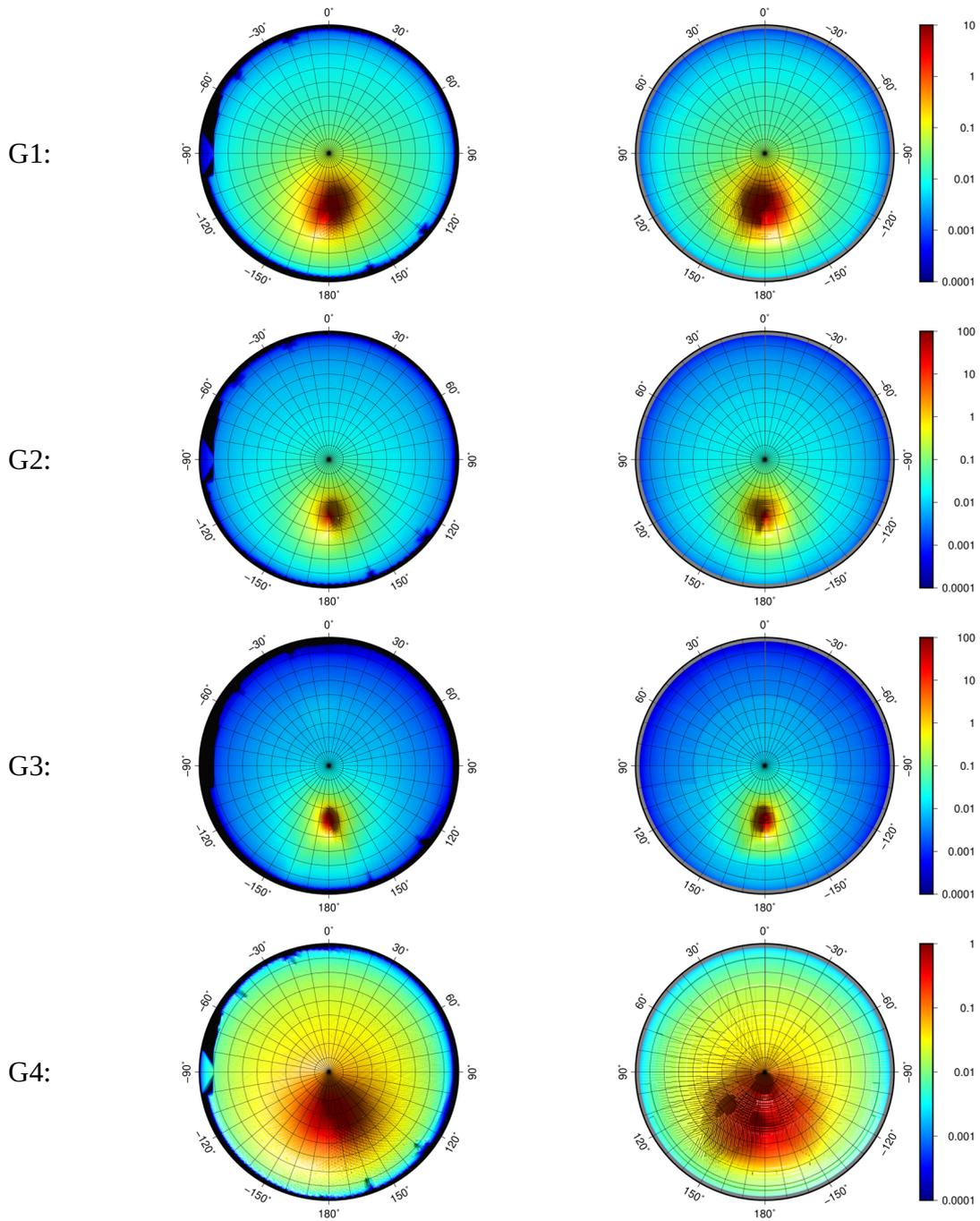


Abbildung 8.7: Gemessene DSFs-Verteilungen (links) im Vergleich zu den datenbasierten Modellen (rechts), für eine Einfallswinkel von $\vartheta_i = 40^\circ$, $\varphi_i = 0^\circ$. Gezeigt wird eine Projektion der Daten der Transmissionshemisphäre in logarithmischer Darstellung. Quelle: Grobe, Noback und Lang 2019.

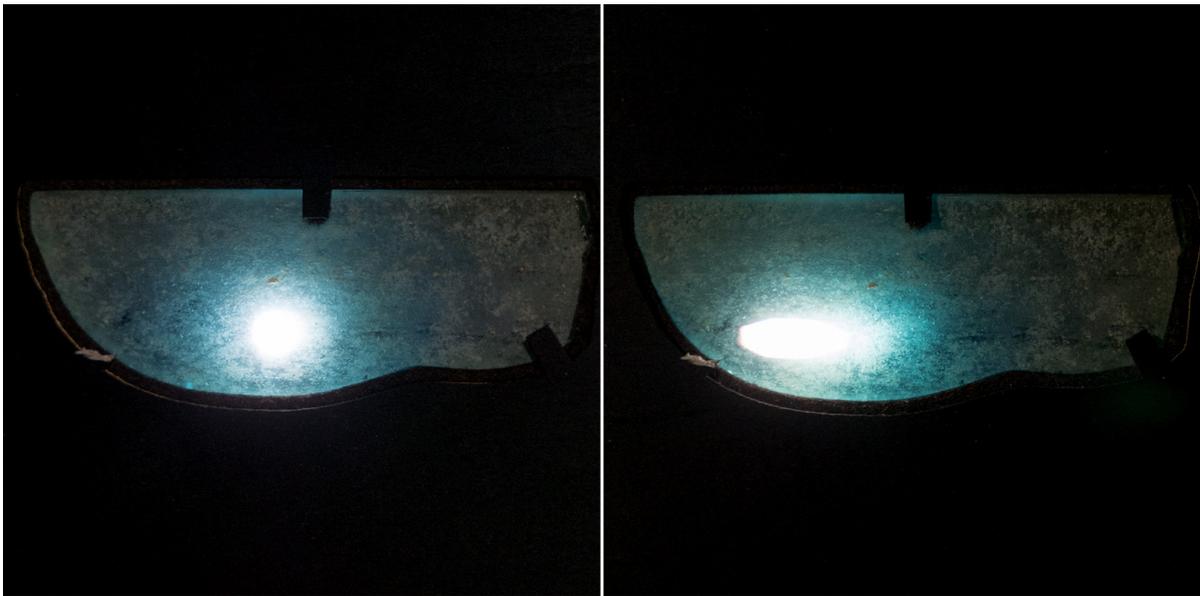


Abbildung 8.8: Lichtfleck der Messung auf der Fensterglasprobe G4 (sampling aperture) für die Einfallswinkel $\vartheta_i = 0^\circ$ (links) und $\vartheta_i = 60^\circ$ (rechts).

Die Testszene soll einen visuellen Eindruck der Glaswirkung vermitteln und dazu eine realistische Menge diffusen indirekten Lichts bereitstellen. D. h. der Kontrast zwischen Lichtern und Schatten soll den Bedingungen in einem realen Gebäude nahekommen.

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 8.11 visualisiert. Die Bilder wurden mit dem RADIANCE-Programm pcond an die menschliche Kontrastwahrnehmung und Blendungseffekte angepasst.⁴⁹ Um auch quantitative Vergleiche zu ermöglichen, wurden Leuchtdichten und Kontrastverhältnisse für die Messfelder A – D berechnet (Tabelle 8.2). Die Ergebnisse kann man wie folgt zusammenfassen:

- *Referenzberechnung.* Die höchsten Leuchtdichten finden sich im Himmel und im Lichtfleck auf der Wand, der sich mit klaren Kanten abzeichnet. Das Kontrastverhältnis zwischen Fleck und der umgebenden Wandfläche ist hoch, so auch die Kontraste zwischen dem Fenster und der Wand darunter.
- *G1: Geformtes Fensterglas mit einer lederartigen Unterseite.* Die Leuchtdichten innerhalb der Fensterfläche sind mehr als dreimal so hell wie der Lichtfleck auf der Wand, der sich nicht mehr klar abzeichnet. Der Kontrast innerhalb der Wand hat sich nahezu halbiert. Der Kontrast zwischen dem Fenster und der Wand darunter hat sich mehr als verdreifacht.
- *G2: Geformtes Fensterglas mit einer flachen Unterseite.* Die Szene zeigt sich ähnlich wie bei G1, allerdings mit etwas reduzierten Kontrastverhältnissen und einem etwas deutlicher wahrnehmbaren Lichtfleck.

⁴⁹ Das Verfahren ist in Larson, Rushmeier und Piatko 1997 beschrieben, mehr bei den Auswertungsverfahren.

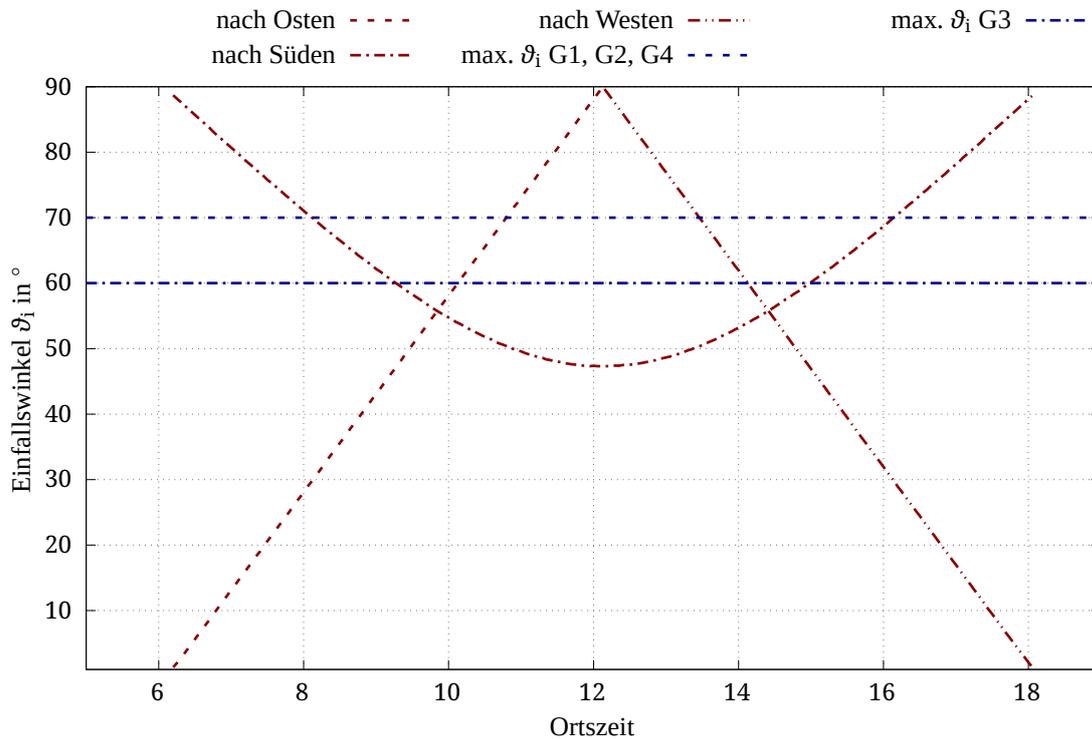


Abbildung 8.9: Einfallswinkel des Sonnenlichts ϑ_i für nach Osten, Westen und Süden ausgerichtete Fenster am 20. März (Equinox) in Rom über den Tag hinweg. Zum Vergleich die größten gemessenen Winkel der Modelle G1, G2 und G4 bzw. G3. nach: Grobe, Noback und Lang 2019.

- **G3: Geblasenes Fensterglas.** Im Gegensatz den anderen Modellen liegt die Szene näher an der Referenzberechnung. Besonders die Kontrastverhältnisse sind ähnlich. Allerdings hat der Lichtfleck weichere Kanten und verschwimmt mit größerem Abstand zum Fenster. Insbesondere am oberen Rand des Fensters sind Blendungseffekte zu erkennen.
- **G4: Geformtes Fensterglas mit Bearbeitungsspuren.** Die Eigenschaften dieses Glases führen zu einer diffusen Ausleuchtung der Szene. Der Lichtfleck auf der Wand ist kaum noch zu erkennen, innerhalb der Wand ist der Kontrast deutlich reduziert. Der Kontrast zwischen dem Fenster und der Wand darunter ist hingegen sehr stark angestiegen, rund ums Fenster sind starke Blendungseffekte zu erkennen. Die rechte Wandfläche und das Gewölbesegment über dem Fenster sind deutlich heller als bei den anderen Modellen.

Die Berechnungen zeigen einen deutlichen Unterschied in der Beleuchtung für geformtes und geblasenes Fensterglas. Innerhalb der geformten Gläser gibt es wahrnehmbare Unterschiede. Alle, auch das geblasene Fensterglas, verändern den Charakter der Beleuchtung in der Testszene. Weichere Schatten und eine Blendung durch das von der Scheibe gestreute Licht sind Wirkungen, die sie von moderner Verglasung unterscheiden würden. Hervorzuheben ist, dass die Schatten mit zunehmendem Abstand vom Fenster immer weicher werden.

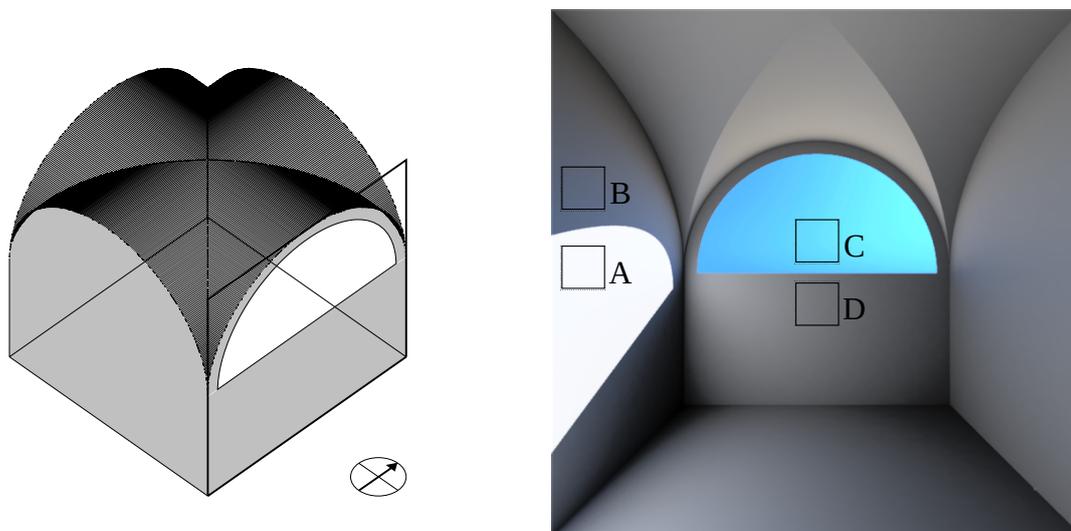


Abbildung 8.10: Die Testszene und Referenzberechnung ohne Verglasung. Die Quadrate zeigen die Messflächen für die Kontrastberechnung. Quelle: Grobe, Noback und Lang 2019.

Modernes Fensterglas verändert die Lichtführung nicht relevant und kann daher bei der Betrachtung von Innenräumen oft vernachlässigt werden. Bei römischen, aber auch anderen historischen Fenstergläsern ist das Gegenteil der Fall. Sie sind wegen der Streuung wie eigenständige Lichtquellen zu betrachten, deren Eigenschaften signifikant von ihrer handwerklichen Produktion abhängen. Unebenheiten der Oberflächen wie die lederartigen oder geschliffenen Unterseiten geformten Fensterglases, aber auch Riffelungen auf dem geblasenen Glas und die Vielzahl an kleinen Luftbläschen streuen das einfallende Licht.

Es ist zu vermuten, dass diese Wirkung Einfluss auf die Entwicklung der römische Architektur genommen hat. Die Entwicklung der Fenstertypen hat sich parallel zur Glastechnik entwickelt. Bezüge zwischen diesen Entwicklungen sollte die Forschung ins Auge fassen. Die von Komp⁵⁰ und Arletti⁵¹ festgestellte Ablösung geformten Fensterglases durch geblasenes gegen Ende des zweiten Jahrhunderts wäre von besonderem Interesse. Auch für die Ausstattung der Innenräume mit Inkrustationen, Mosaiken und Bemalung ist die Charakteristik der Beleuchtung von Relevanz. Es macht daher Sinn, die Glasscheiben als eigenständige künstlerische Objekte zu betrachten.

Einschränkend ist zu sagen, dass die Wirkung des gemessenen geblasenen Fensterglases zum Teil von den Korrosionsfolgen herrührt. Wie bedeutend der Beitrag ist, müssen weitere Untersuchungen klären. Festzustellen ist auch, dass die Berechnungen mit den Modellen keine Farben zeigen, eine Einschränkung des in RADIANCE implementierten datenbasierten Materialmodells. Die oben genannten Einschränkungen der Modelle bezüglich der Einfallswinkel zeigen sich

⁵⁰ Komp 2009, S. 69.

⁵¹ Arletti u. a. 2010.

unter anderem an der Ausleuchtung der Gewölbe. Wo, wie bei G3, die Streuung der Scheibe keinen wesentlichen Beitrag leistet, sind die Gewölbe erkennbar dunkler. Das verfälscht auch die Ergebnisse der anderen Berechnungen an der Decke und an den vom Himmel beleuchteten Flächen.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Pilotstudie wichtige Erkenntnisse für die Tageslichtbeleuchtung römischer Innenräume geliefert hat. Sie zeigt zugleich, dass weitere Untersuchungen notwendig sind, insbesondere um den Einfluss der Korrosion bei geblasenem Fensterglas zu ermitteln. Zudem wäre eine deutlich größere Anzahl von Proben aus verschiedenen Epochen und Regionen zu vermessen, um einen Überblick über das Spektrum der optischen Eigenschaften dieses Materials zu gewinnen. Um datenbasierte Modelle für die Tageslichtsimulation römischer Innenräume zu verwenden, ist der Messaufbau hinsichtlich der Größe des Messflecks zu verbessern. Eine Möglichkeit das Streuverhalten für größere Einfallswinkel im datenbasierten Modell zu extrapolieren und Farben zu verarbeiten, wäre ebenfalls wünschenswert.

Tabelle 8.2: Leuchtdichten und Kontrastverhältnisse (\bar{L}_A, \bar{L}_B) und (\bar{L}_C, \bar{L}_D). Quelle: Grobe, Noback und Lang 2019.

Modell	\bar{L}_A (Lichtfleck) [cd m ⁻²]	\bar{L}_B (Wand) [cd m ⁻²]	$\frac{\bar{L}_A}{\bar{L}_B}$	\bar{L}_C (Fenster) [cd m ⁻²]	\bar{L}_D (Wand) [cd m ⁻²]	$\frac{\bar{L}_C}{\bar{L}_D}$
Reference	1774	217	8,18	1923	271	7,10
G1	941	211	4,46	3375	141	23,90
G2	731	166	4,40	1877	116	16,12
G3	1021	102	10,00	980	141	6,93
G4	450	262	1,72	5934	77	77,36

8.4 Untersuchung der Lichtstreuung in der Hagia Sophia

Die bisherigen Untersuchungen zur Verglasung lassen erwarten, dass die Streuung an den handwerklich hergestellten Gläsern auch die Beleuchtung des Innenraumes der Hagia Sophia beeinflusst hat. Als Materialmodell für deren Verglasung kommen die gewonnenen datenbasierten Modelle aufgrund ihrer Einschränkung möglicher Einstrahlungswinkel aber nicht in Betracht, denn viele Sonnenstände ließen sich mit den Modellen nicht berechnen. Zudem sind Fehler bei der Beleuchtung durch den Himmel und durch im Außenraum reflektiertes Licht zu erwarten. Es muss nach einem anderen Ansatz zur Modellierung gesucht werden. Darüber hinaus ist eine Wahl zwischen geblasenem und geformtem Fensterglas zu treffen. Beides wurde im zweiten Teil der Pilotstudie umgesetzt und die Lichtwirkung für eine Beleuchtungssituation exemplarisch gezeigt.⁵²

⁵² Die Ergebnisse wurden auf der AIHV21 Tagung in Istanbul präsentiert und werden im Tagungsband publiziert.

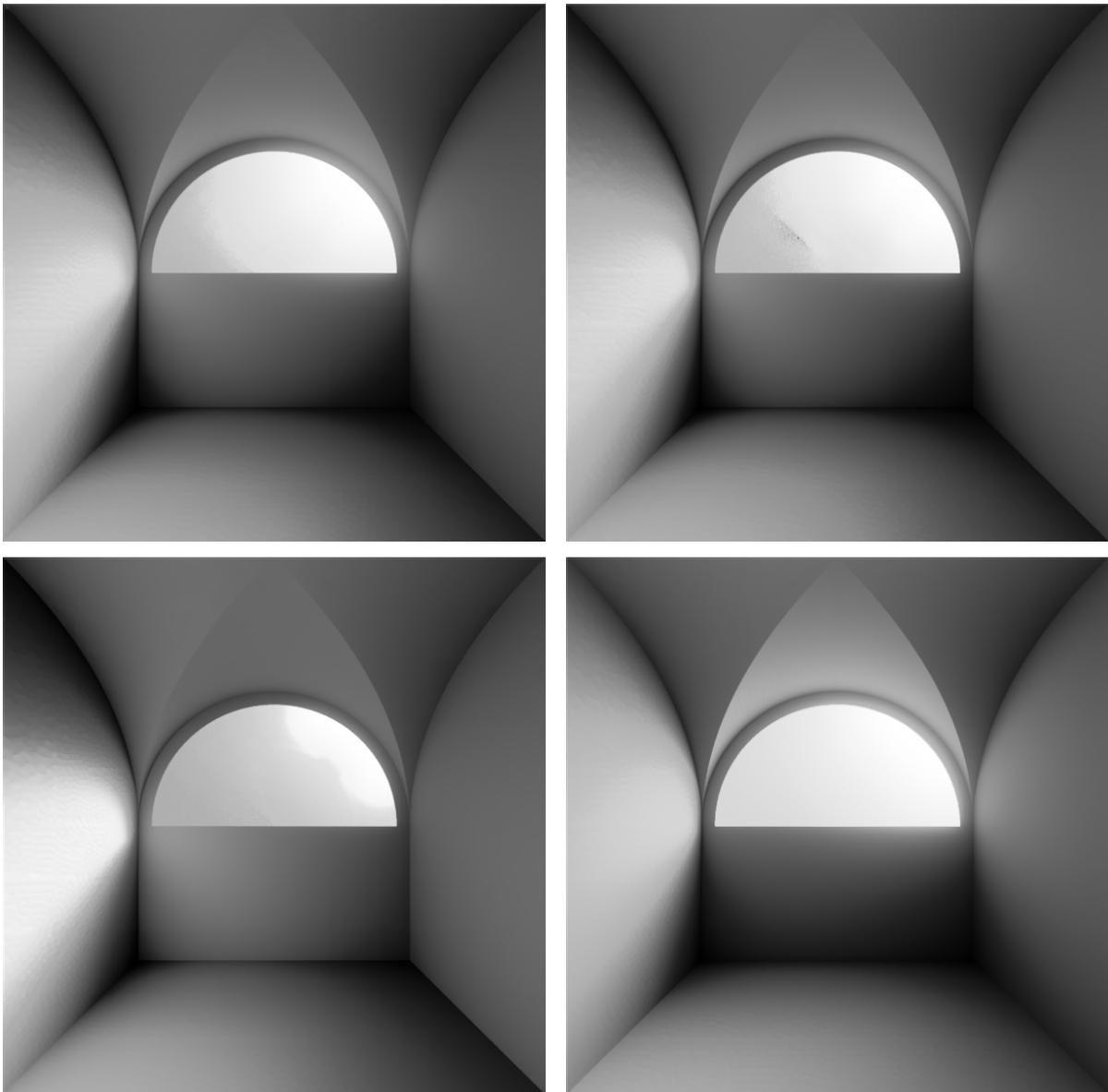


Abbildung 8.11: Visualisierung der Testszene für die datenbasierten Modelle der Gläser G1–G4. Quelle Grobe, Noback und Lang 2019.

Der erste Schritt ist die Auswahl des passenden Glases. Die Studie folgt Schibille, die geblasenes Glas für die Hagia Sophia annimmt.⁵³ Ihre Ansicht fügt sich in die Erkenntnisse von Komp und Arletti ein, die vermuten, dass geformtes Fensterglas nach Ende des zweiten Jahrhunderts kaum noch zu finden ist.⁵⁴ Die Herstellungstechniken haben sich im Reich wohl nicht wesentlich unterschieden, publizierte Funde lassen zumindest keine augenfälligen Unterschiede bei Dicke, Oberflächengeometrie und Lufteinschlüssen erkennen.⁵⁵ Das erlaubt es, mit etwas Vorsicht, die in einem Castrum in Bonn gefundene, gemessene Probe geblasenen Fensterglases (G3) als Grundlage für eine Untersuchung heranzuziehen.

Für diese Probe wird ein Materialmodell erstellt, indem die Messdaten an das in RADIANCE implementierte *trans*-Modell⁵⁶ automatisch *gefittet* wird. Das *trans* Modell ist für transparente Medien gedacht und wird anhand von sieben Werten parametrisiert. Gefittet heißt, die Parameter des Modells werden mittels eines Algorithmus so lange verändert bis eine optimale Übereinstimmung der Berechnungswerte mit den Messergebnissen in Form einer 2-dimensionalen Kurve erreicht wird. Das geschah mithilfe der Software Gnuplot, in der dafür das Marquardt-Levenberg-Verfahren zur Verfügung steht.⁵⁷ Der Wertebereich für die Parameter wurde zuvor auf plausible Annahmen eingeschränkt (Tabelle 8.3).⁵⁸

Ein solches *fitting* gelingt mit dem vorgegebenen Modell nicht für alle Einfallswinkel (Abbildung 8.12) in gleicher Genauigkeit. Im konkreten Fall wurden die Werte für die gemessenen Verteilungen für die Einfallswinkel $\vartheta_i = 20^\circ$ und $\varphi = 0^\circ$ optimiert. Die Fläche unter den Peaks stellt dabei das direkt transmittierte Licht dar. Die Breite des Peaks ist ein Maß für den steileren oder weicheren Verlauf der Schatten. Man kann sehen, dass das *trans*-Modell plausible Werte für Winkel zurückliefern kann, die nicht gemessen wurden ($\vartheta_i = 80^\circ$). Man kann ebenso sehen, dass die Breite der Peaks bei den großen Einfallswinkeln hinter den Messdaten zurückbleibt. Das *trans*-Modell hat dort Schwierigkeiten, die zunehmende Streuung parallel einfallenden Lichts durch das geblasene Glas korrekt wiederzugeben.

In der Pilotstudie wird das Materialmodell für eine Tageslichtstudie mit dem Darmstädter Modell der Hagia Sophia eingesetzt. Das Himmelsmodell⁵⁹ wird für einen sonnigen Ostermorgen im Jahr 538⁶⁰ drei Stunden nach Sonnenaufgang parametrisiert. Die Berechnungen werden wiederholt mit einem Modell klaren (modernen) Glases und einem Modell vollkommen diffusen Glases. Die Ergebnisse werden gegenübergestellt. Dazu werden Beleuchtungsstärken auf dem Boden ermittelt und zusätzlich eine Visualisierung der Leuchtdichten mit den schon oben

⁵³ Schibille 2014b, S. 34 f.

⁵⁴ Komp 2009, S. 69 und Arletti u. a. 2010.

⁵⁵ Vergl. Schibille, Maril und Rehren 2008; Drauschke und Greiff 2008; Gliozzo, Barbone und D'Acapito 2013.

⁵⁶ Ward 2004; Geisler-Moroder und Dür 2010.

⁵⁷ Williams und Kelley 2018.

⁵⁸ Das Fittingverfahren wurde von Lars Grobe durchgeführt.

⁵⁹ CIE 003/E-1996 1996.

⁶⁰ Die Hagia Sophia wurde Weihnachten 537 eingeweiht. Der gewählte Tag wäre das erste Osterfest im fertigen Bau. Den Berechnungen der Pilotstudie liegt das publizierte Modell zugrunde, das sich auf den ersten Bauzustand bezieht.

Tabelle 8.3: Parameter des *trans* Modells mit den Grenzwerten und den ermittelten Werten. Quelle Grobe, Noback und Lang 2019.

Parameter	Beschreibung	min	max	fit
$a_1 \dots a_3$	nicht absorbierter Anteil des einfallenden Lichts	0.0	1.0	0.964
a_4	spekularer Anteil von $a_1 \dots a_3$	0.0	1.0	0.229
a_5	roughness	0.0	0.2	0.046
a_6	transmittierter Anteil von $a_1 \dots a_3 - a_4$	0.0	1.0	0.972
a_7	transmittierter Anteil von a_4	0.0	1.0	0.955

beschriebenen Anpassungen an Kontrastwahrnehmung und Blendungseffekten berechnet.⁶¹ Die Ergebnisse finden sich in Abbildung 8.13, Abbildung 8.14 und Abbildung 8.15.

Die Verteilung der Beleuchtungsstärken ist zu diesem Zeitpunkt für alle Materialmodelle von einem relativ gleichmäßigen Abfall von Osten nach Westen geprägt. Die klare Verglasung zeigt dabei tiefere Schatten, besonders im Westen der seitlichen Galerien. Dieser Verlauf wird bei der klaren Verglasung und dem geblasenen Glas durch helle Flecken direkten Sonnenlichts aus den Fenstern unterbrochen. Diese sind beim klaren Glas überall scharf begrenzt. Beim geblasenen Glas verschwimmen die einzelnen Flecken mit zunehmendem Abstand zu den Fenstern immer mehr zu hellen Bereichen, in denen sich die Fenster schließlich kaum noch erkennen lassen. Wie sich das auf die Beleuchtung der Eingangswand auswirkt, sieht man in Abbildung 8.14. Beim diffusen Glas finden sich im Osten sehr helle diffus ausgeleuchtete Bereiche.

Auch auf die Wahrnehmung der Inkrustation haben die Materialeigenschaften eine sichtbare Auswirkung. Abbildung 8.15 zeigt für das geblasene Glas hellere Unterseiten und plastischer wirkende Details. Interessanterweise ist die Wirkung des Reliefs beim klaren und beim diffusen Glas ähnlich flach.

8.5 Weitere Untersuchungen an römischen Fenstergläsern

Der Pilotstudie sollen weitere Untersuchungen folgen. Diese sollen helfen, die Effekte der chemischen Alterung genauer einzugrenzen. In einem ersten Schritt wurde dazu ein Fensterglasfund aus einem Wohngebäude in Ephesos untersucht.⁶² Diesmal wurden die goniophotometrischen Messungen mit einer Erfassung der Oberflächenstruktur kombiniert (Abbildung 8.16). Bei der goniophotometrischen Messung wurde diesmal ein Laser eingesetzt um auch flache Winkel zu erfassen. Die geometrischen Strukturen wurden mittels Konfokalmikroskopie gewonnen. Auf der Grundlage der beiden Datensätze wurde jeweils ein datenbasiertes Materialmodell gewonnen.⁶³ In Abbildung 8.17 kann man beide Modelle vergleichen.

⁶¹ Larson, Rushmeier und Piatko 1997.

⁶² Die Ergebnisse werden parallel zu dieser Arbeit publiziert: Grobe, Noback, Lang u. a. 2021.

⁶³ Das geschah bei den geometrischen Daten mit dem RADIANCE-Programm genBSDF.

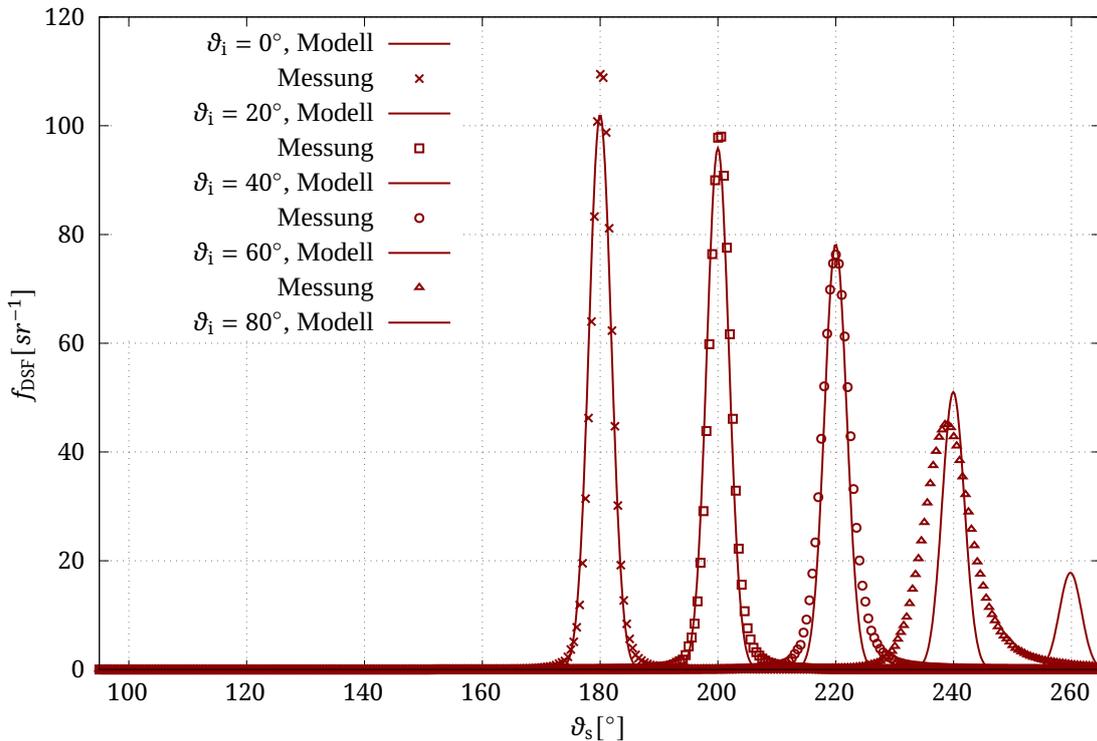
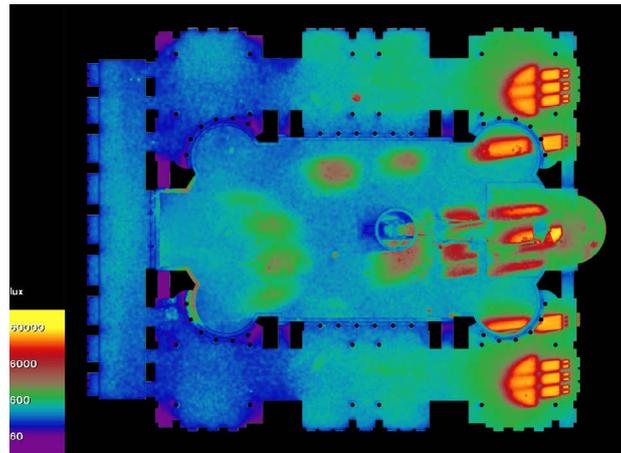


Abbildung 8.12: Modell gefittet für einen Einfallswinkel von $\vartheta_i = 20^\circ$ und Vergleich zu den Messungen ($\varphi = 0^\circ$). Quelle Noback, Grobe und Lang 2021.

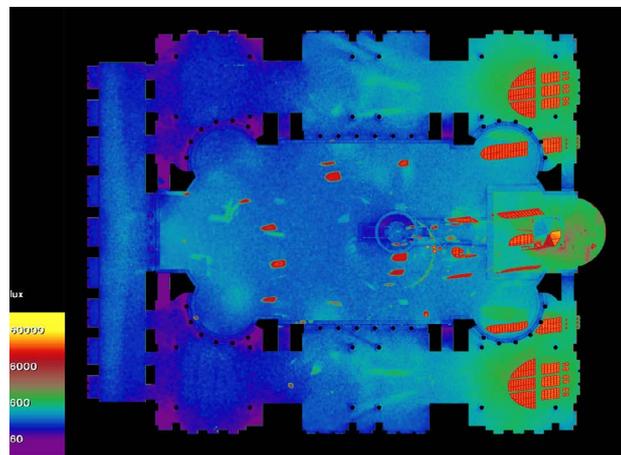
Die Ergebnisse zeigen, dass bei dieser Probe die Geometrie der korrodierten Oberfläche ausschlaggebend für die Streuung ist. Allerdings zeigt sie auch eine wesentlich stärkere Streuwirkung als die Probe aus Bonn (Abbildung 8.3 G3 und Abbildung 8.7), die offenbar in einem besseren Zustand ist. Damit bleibt die Frage nach dem ursprünglichen Streuverhalten solcher Gläser weiter offen. Weitere Untersuchungen sind nötig.

8.6 Ergebnisse der Pilotstudie

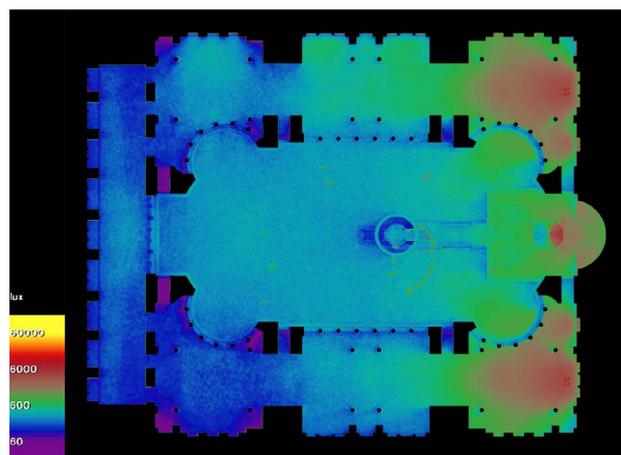
Der zweite Teil der Pilotstudie konnte exemplarisch zeigen, dass sich die optischen Eigenschaften des handwerklich hergestellten römischen Fensterglases signifikant auf die Beleuchtung des Innenraumes der Hagia Sophia und die Wahrnehmung von Architektur und Ausstattung auswirken. Bei der Interpretation ist allerdings aufgrund der schmalen empirischen Basis und der Probleme der chemischen Alterung Vorsicht angebracht. Vorerst kann man die optischen Eigenschaften des Glases nur eingrenzen (Abbildung 8.18). Den folgenden Berechnungen liegt das gefittete Materialmodell des geblasenen Fensterglases zu Grunde.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 8.13: Vergleich der Beleuchtungsstärken auf dem Boden des Hauptraumes und der Galerien: Wirkung des geblasenen römischen Fensterglases G3 (a). Wirkung von klarem Fensterglas (b) und diffus streuendem Glas (c).



Abbildung 8.14: Die Eingangswand beleuchtet durch die Fenster der Kuppel. Die Wirkung des geblasenen Fensterglases führt zu einer gleichmäßigen hellen Ausleuchtung. Quelle: Noback, Grobe und Lang 2021.

Zusammenfassend hat die Pilotstudie wichtige Ergebnisse erzielt:

- Sie hat einen bedeutenden Zusammenhang zwischen Herstellungsverfahren und optischer Wirkung römischer Gläser aufgezeigt.
- Die Ergebnisse helfen die Verglasung der Hagia Sophia für die Tageslichtbeleuchtung besser einzuschätzen und erschließen ein ganzes Feld historischer Glasforschung.
- Sie wirft ein ganzes Bündel von Fragen für die Untersuchung historischer Innenraumbeleuchtung und ihrer typologischen Entwicklung auf.
- Sie hat gezeigt, dass die Modellierung handwerklich gefertigter historischer Gläser eine viel komplexere Methodik erfordern als moderne Verglasungen. Dazu hat sie wichtige Hinweise zur Verbesserung der Verfahren der Modellierung optischer Eigenschaften historischer Gläser aufgezeigt und die Grenzen der vorhandenen Verfahren vorgeführt.

Vergleicht man die Erfahrungen bei der Modellierung des Fensterglases mit denen bei den Marmoroberflächen kann man übereinstimmend feststellen, dass die Herstellungsmethoden bedeutenden Einfluss auf ihre optischen Eigenschaften haben und ihre Erforschung von entscheidender Bedeutung für die Lichtsimulation ist. Bei den Gläsern zeigt sich, dass die chemische Alterung ebenfalls ein die Lichtsimulation betreffendes Problem ist. Konnte man beim Marmor noch vermuten, dass man die Eigenschaften der Oberfläche durch Reinigung und passende Pflege wieder herstellen kann, sind beim Glas solche Anstrengungen aufgrund der dauerhaften Korrosion vergebens. Die Herangehensweise, die im Moment den größten Erfolg verspricht,

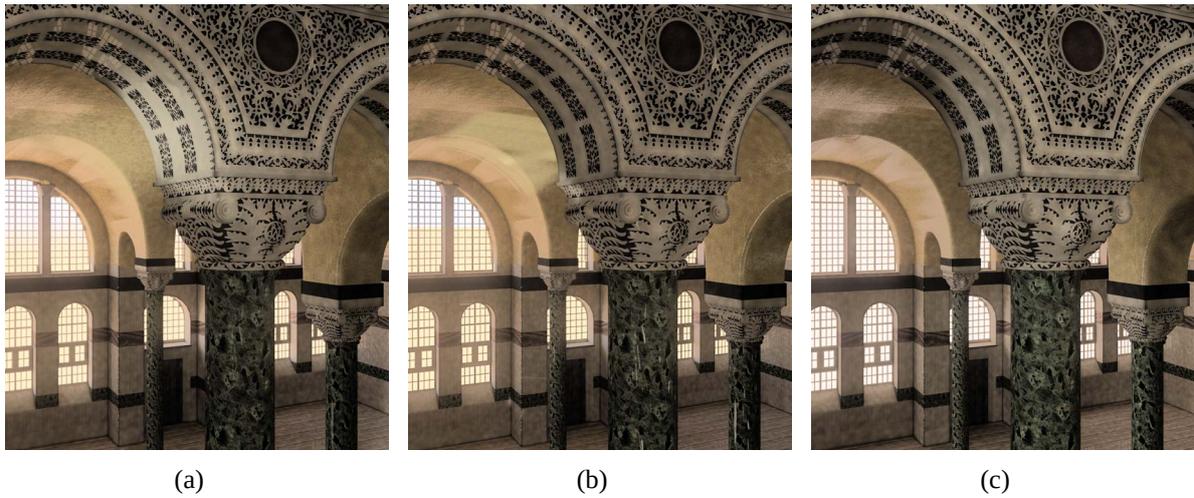


Abbildung 8.15: Wirkung der Streuung durch römisches Festerglas auf architektonische Elemente: römisches Fensterglas (a), modernes klares Glas (b) und diffus streuendes mattes Glas (c). Quelle: Noback, Grobe und Lang 2021.

ist die Nachfertigung der Gläser, was wiederum die Herstellungsmethoden in den Fokus der Betrachtung rückt. Auch hieraus folgt, dass die Modellierung der Oberflächen methodisch eine *Rekonstruktion* ist.

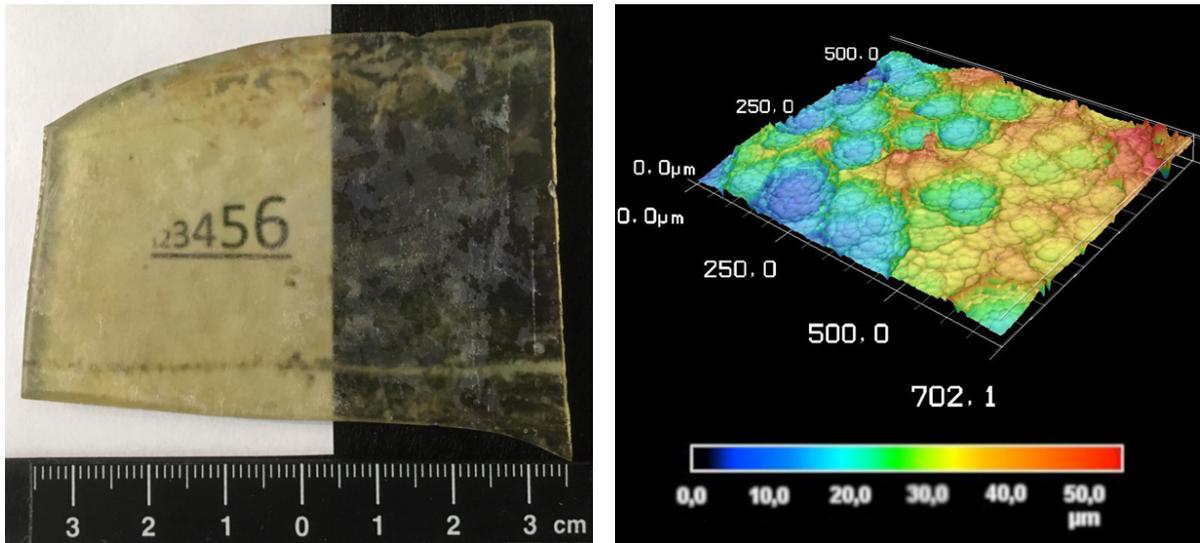


Abbildung 8.16: Ein in Ephesos gefundenes Bruchstück einer Fensterglasscheibe. Oben: Foto der Probe. Unten: Höhen einer der Oberflächen in Fehlfarbandarstellung, gewonnen durch Konfokalmikroskopie (rechts). Quelle: Grobe, Noback, Lang u. a. 2021 (abweichende Darstellung).

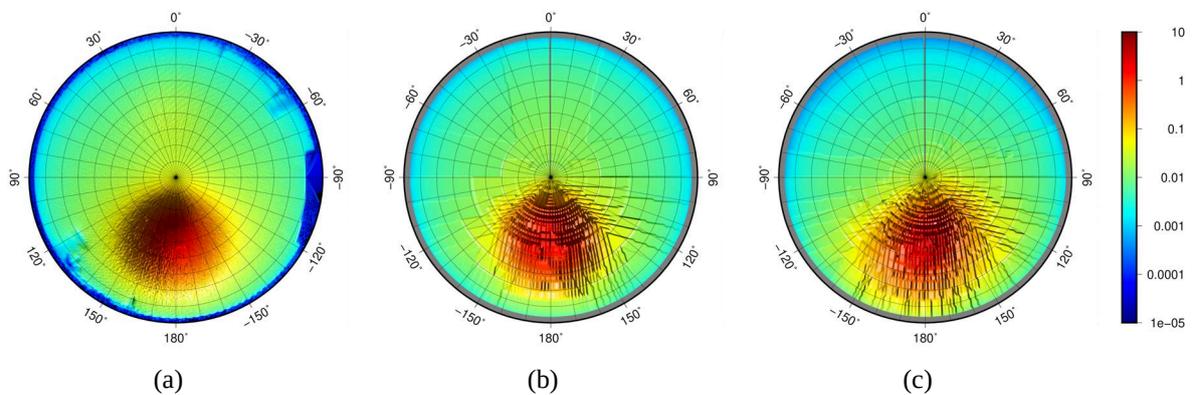


Abbildung 8.17: Vergleich der gemessenen Streuung (a) von einem Fensterglasfund aus Ephesos mit einem auf diesen Streuungsmessungen basierenden Modells (b) und einem Modell, dem die erfasste Geometrie der chemisch gealterten Oberfläche zugrunde liegt (c). Die im Wesentlichen durch die Alterung hervorgerufene Oberflächenstruktur ist die dominierende Ursache der Streuung. DSF für $\vartheta_i = 40^\circ$, $\varphi_i = 0^\circ$. Quelle: Grobe, Noback, Lang u. a. 2021.

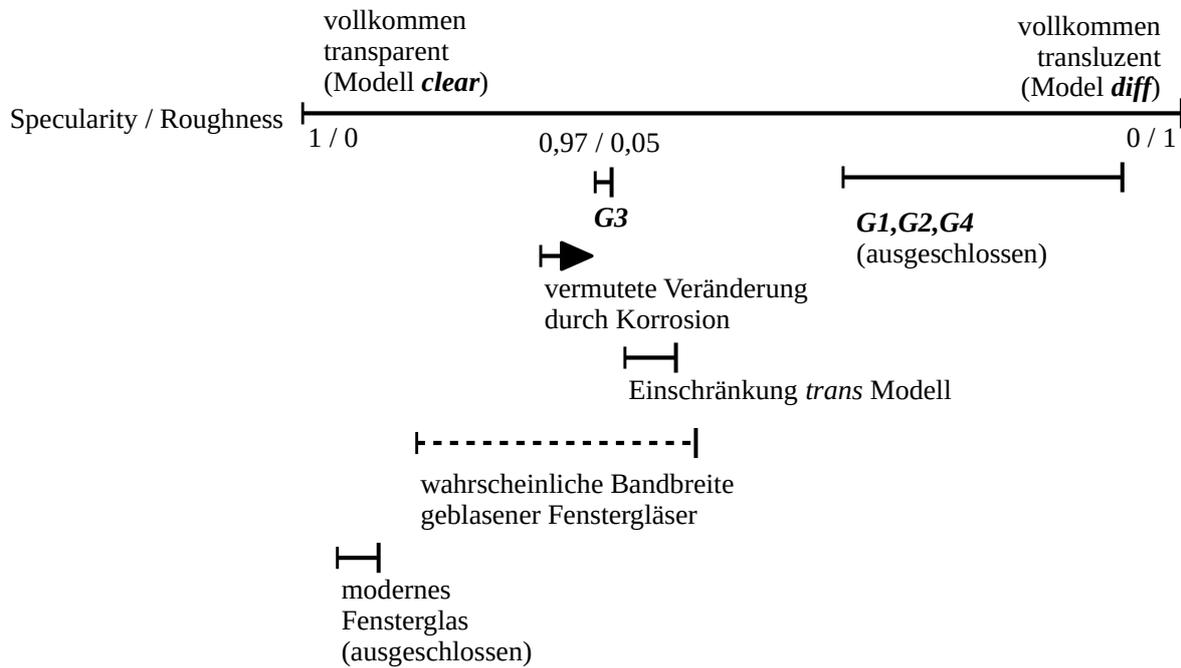


Abbildung 8.18: Schematische Einordnung der Streueigenschaften von geblasenem Fensterglas anhand der Parameter des RADIANCE *trans*-Modells in Bezug auf die berechneten Grenzfälle. Schematische Darstellung der Abweichungen durch die Einschränkungen des *trans*-Modells bei größeren Winkeln und die vermuteten Abweichungen der Messergebnisse durch die Korrosionserscheinungen von den ursprünglichen Glaseigenschaften.