

Abschlussbericht
zu Forschungsprojekt Az. 35447/01-45

Thema: „Entwicklung und modellhafte Anwendung eines innovativen Flachglases (mundgeblasenes Zylinderglas) als Monoscheibe von ca. 2-3mm Dicke mit in die Glasstruktur integriertem UV- und IR-Schutz zum Schutz national wertvoller Kulturgüter“

Glashütte Lamberts Waldsassen GmbH
Schützenstraße 1
95652 Waldsassen

Verfasser:
Michael Brückner
Tel.: +49 9632 9251-17
brueckner@lamberts.de

Projektbeginn: 03.12.2019
Projektende: 03.06.2023

Gliederung:

1. Allgemeines zum Forschungsprojekt

- 1.1 Inhalt und Ziel des Forschungsprojekts
- 1.2 Vorgehensweise
- 1.3 Projektverlauf

2. Schmelzphase 1

- 2.1 Übersicht
- 2.2 Ergebnisse
 - 2.2.1 Massive Gläser
 - 2.2.2 Mehrschichtige Gläser
- 2.3 Auswertung
 - 2.3.1 Standardgläser
 - 2.3.2 UV-IR-Kombinationsgläser
 - 2.3.2.1 Glasbruch und unvollständige Proben
 - 2.3.2.2 Farbigkeit und Transparenz
 - 2.3.2.3 Schichtverteilung und Filterwirkung

3. Schmelzphase 2, 3 und 4

- 3.1 Übersicht
- 3.2 Ergebnisse
 - 3.2.1 Massive Gläser
 - 3.2.2 Mehrschichtige Gläser
 - 3.2.3 Verschiedene Herstellungstechniken
- 3.3 Auswertung
 - 3.3.1 Standardgläser
 - 3.3.2 UV-IR-Kombinationsgläser
 - 3.3.2.1 Farbigkeit und Transparenz
 - 3.3.2.2 Schichtverteilung und Filterwirkung
 - 3.3.2.3 Verschiedene Herstellungstechniken

4. Schmelzphase 5, 6 und 7

- 4.1 Übersicht
- 4.2 Ergebnisse
 - 4.2.1 Referenzproben
 - 4.2.2 Proben der verschiedenen Herstellungsverfahren
 - 4.2.3 Einfluss der UV-Glasschicht auf die Infrarot-Filterwirkung
- 4.3 Auswertung

5. Schmelzphase 8

- 5.1 Übersicht
- 5.2 Ergebnisse
 - 5.2.1 Anpassung der Arbeitsweise
 - 5.2.2 Anpassung des IR-Glasgemenges
- 5.3 Auswertung

6. Schmelzphase 9 und 10

- 6.1 Übersicht
- 6.2 Ergebnisse
 - 6.2.1 Anpassung der Produktionsbedingungen

- 6.2.2 Anpassung der Glasgemenge
- 6.2.3 Produktion UV-IR-Kombinationsglas
- 6.3 Auswertung

7. Einsatz des UV-IR-Kombinationsglases im Modellprojekt

8. Fazit

9. Danksagung

10. Fotoanhang

1. Allgemeines zum Forschungsprojekt

1.1 Inhalt und Ziel des Forschungsprojekts

Im Zentrum des Forschungsprojekts steht die innovative und technisch anspruchsvolle Zusammenführung von einem UV- und einem Infrarotschutzglas in einer einzigen Glastafel.

Am Ende des Projekts soll ein spannungsfreies und schneidbares Flachglas entstehen, welches in seiner Oberflächenstruktur und Farbigkeit dem Erscheinungsbild historischer mundgeblasener Fenstergläser entspricht.

1.2 Vorgehensweise

Da es sich bei dem UV-IR-Kombinationsglas um ein sogenanntes Überfangglas handelt und somit aus mindestens zwei Glasschichten besteht, sollen insbesondere zu Projektbeginn im Rahmen mehrerer Schmelzphasen verschiedene Glasaufbauten getestet und im Anschluss nach eingehender Prüfung widerlegt oder weiterverfolgt werden.

Augenmerk liegt dabei auf folgenden Kriterien:

- physikalische Verträglichkeit der Gläser untereinander
 - d. h. stabile, spannungsfreie und damit schneidbare Glastafeln
- keine unerwünschten Reaktionen und Veränderungen innerhalb der Glasbestandteile
 - d. h. vollständig transparente und möglichst farbneutrale Glastafeln
- Maximum an UV- und Infrarotschutzwirkung
 - d. h. 100%iger UV-Schutz bis 380nm und Minderung der infraroten Strahlung um mind. 50% im Spektralbereich von 780-1500nm
- Gleichbleibende Glasqualität und Schutzwirkung
 - d. h. Einhaltung gewisser Schichtstärken, deren Dicke von der Glassorte und dem zu erzielenden Wirkungsgrad abhängig ist
- produktionstechnische Umsetzbarkeit
 - d. h. verlässlicher Schmelzprozess, unkomplizierte Überwachung der technischen Rahmenbedingungen (Temperatur und Atmosphäre in den Öfen) sowie einfache und konstante Arbeitsabläufe beim Glasmachen mit reproduzierbaren Ergebnissen

1.3 Projektverlauf

Die Projektbewilligung seitens der DBU erfolgte am 3.12.2019.

Die 1. Schmelzphase fand in der Woche vom 16.3.2020 statt und wurde nach drei Tagen aufgrund des 1. Lockdowns zur Bekämpfung der Corona-Pandemie unterbrochen. Es folgten mehrere Wochen Kurzarbeit und produktionstechnische Einschränkungen. Infolgedessen verzögerte sich die Aufbereitung der Glasproben und damit die labortechnischen Messungen sowie die Gesamtauswertung der 1. Schmelzphase zur Vorbereitung der nächsten Schmelzphasen. Da die wenigen bis dahin angefertigten Schmelzproben noch keine ausreichend aussagekräftigen Ergebnisse liefern konnten, war ein Erreichen des Projektziels bis Dezember 2020 nicht absehbar. Aus diesem Grund wurde im Oktober 2020 eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis 3.6.2022 seitens der DBU genehmigt. Weitere drei Schmelzphasen wurden vom 9.11.2020 bis 27.11.2020 auf Grundlage der bis dahin gewonnenen Erkenntnisse durchgeführt. Die daraus resultierenden Glasproben wurden aufgearbeitet, im Labor gemessen und innerhalb des Projektteams ausgewertet. Die Zusammenfassung aller bis dahin vorliegenden Ergebnisse erfolgte im Rahmen des 1. Zwischenberichts im April 2021. Dieser wurde am 27.4.2021 bei der DBU eingereicht. Vom 12.7.2021 bis 16.7.2021 erfolgte die 5. Schmelzphase. In den Folgemonaten und insbesondere im Herbst 2021 und Winter 2021/2022 kam es pandemiebedingt erneut zu Störungen im Produktionsablauf und damit zu weiteren Verzögerungen im zeitlichen Ablauf des DBU-Forschungsprojekts. Am 28.10.2021

sowie am 14.3.2022 erfolgten jeweils eintägige Probeschmelzen. Aufgrund eines mehrmonatigen Krankheitsausfalls unseres technischen Betriebsleiters konnten im Jahr 2022 keine weiteren Schmelzphasen mehr durchgeführt werden. Da ein Erreichen des Projektziels folglich nicht in Aussicht stand, wurde eine weitere kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis 3.6.2023 beantragt und von der DBU genehmigt. Die 8. Schmelzphase erfolgte vom 27.3.2023 bis 31.3.2023, in der erste UV-IR-Kombinationsgläser zur Bemusterung am Modellprojekt Klosterkirche St. Michael in Bamberg hergestellt werden konnten. Zu deren qualitativer Optimierung erfolgten in den Schmelzwochen vom 2.5.2023 bis 12.5.2023 Anpassungen am Gemenge und der Verarbeitung des UV-Schutzglases. Das DBU-Forschungsprojekt endete offiziell am 3.6.2023. Damit für einen weiteren Bemusterungstermin am Modellprojekt eine ganze Bleiverglasung angefertigt werden konnte, folgte vom 12.6.2023 bis 16.6.2023 eine weitere Schmelzphase. Im Rahmen dieser Phase entstand die erste erfolgreiche Produktionscharge des UV-IR-Kombinationsglases.

2. Schmelzphase 1

2.1 Übersicht

Im Rahmen der SP1 wurden 4 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten von UV und IR-Schutzglas getestet (A, B, C, D). Darüber hinaus wurden Proben unseres Standardglases restauro®UV mit Klargläsern aus zwei verschiedenen Schmelzhäfen zu Vergleichszwecken erstellt (E2 und F2). Um Laboranalysen von den drei Basisgläsern durchführen zu können, wurden zudem massive Glasproben vom UV-Glas (G), vom IR-Glas (H) sowie von zwei Klargläsern aus unterschiedlichen Schmelzhäfen (I, J) angefertigt.

A	UV + IR
B	IR + UV
C	UV + Klarglas + IR
D	UV + IR + Klarglas
E2	Klar Hafen 1 + UV
F2	Klar Hafen 4 + UV
G	UV massiv (Hafen 3)
H	IR massiv (Hafen 2)
I	Klarglas massiv (Hafen 1)
J	Klarglas massiv (Hafen 4)

2.2 Ergebnisse

2.2.1 Massive Gläser

Probe H

Probe H entspricht unserem Standardglas restauro®IR und wird immer als massives Glas hergestellt. Aus diesem Grund entsprach die bläuliche Färbung, die Oberflächenqualität und Filterwirkung¹ an allen drei Tagen den Erwartungen

¹Transmissionsmessung lt. IGR

	bei Glasstärke 3,0mm	bei Glasstärke 1,7mm
Resttransmission IR-Strahlung bei 1100nm	ca. 20%	ca. 36%
max. IR- Filterwirkung (bei 1100nm)	ca. 80%	ca. 64%

Probe G

Probe G ist das Basisglas unseres Standardglases restauro®UV, welches durch eine Nachbehandlung seine UV-Filterfunktion erhält.

Als massives Glas gearbeitet wies das Glas an allen drei Tagen erwartungsgemäß eine starke Gelbfärbung sowie eine flächige Trübung auf.

Lichttransmissionsmessungen sind bei diesen Proben nicht nötig. Sie wurden bei Proben E2 und F2 durchgeführt.

Probe I und J

Beide Proben entsprechen unserem klaren Standardglas *restauro*[®] und hinsichtlich des optischen Erscheinungsbilds den Erwartungen.

Lichttransmissionsmessungen waren bei diesen Proben nicht nötig.

Ergebnisse Glasanalyse / Ausdehnungskoeffizient (G, H, I, J)

Die durchgeführten Glasanalysen zur Glaszusammensetzung zeigten bei allen gemessenen Proben (G, H, I, J) keine Auffälligkeiten.

Die aus der chemischen Analyse berechneten Ausdehnungskoeffizienten lagen bei allen gemessenen Proben zwischen 9,6 und 10,0.

Proben E2 und F2

Beide Proben entsprechen unserem Standardglas *restauro*[®]UV. Das Glas besteht aus einer Basisschicht UV-Glas und einer Überfangschicht Klarglas. Das Klarglas wurde aus zwei verschiedenen Schmelzhäfen entnommen. Bei E2 stammt das Glas aus Hafen 1 und bei F2 aus Hafen 4.

Das Klarglas wurde zuerst auf die Glasmacherpfeife aufgenommen. Danach folgte das UV-Glas. Dies entspricht der Standardproduktion, weswegen das Ergebnis in Farbigkeit¹, Filterwirkung², Schichtverteilung³ und Schneidbarkeit⁴ den Erwartungen entsprach.

¹ transparent, leicht gelbliche Färbung

² UV-Filterwirkung 100% bei 380nm bei allen gemessenen Proben

³ durchschnittliche Gesamtglasstärke ca. 2-3mm;

durchschnittliche Schichtverteilung von UV:Klar = ca. 2:1 bis 3:1

⁴ verwendbar

Proben A und B

Bei den Proben A und B wurden die beiden o.g. Schutzgläser G (UV-Schutz) und H (IR-Schutz) in unterschiedlicher Schichtenfolge miteinander kombiniert.

Probe A besteht aus einer Basisschicht aus Infrarotschutzglas und einer Überfangschicht aus UV-Schutzglas. Hierfür wurde zuerst das UV-Schutzglas auf die Glasmacherpfeife aufgenommen und anschließend das Infrarotschutzglas. Die Proben weisen damit eine dickere IR-Schicht und eine dünnere UV-Schicht auf.

Probe B besteht aus einer Basisschicht aus UV-Schutzglas und einer Überfangschicht aus Infrarotschutzglas. Hierfür wurde zuerst das IR-Schutzglas auf die Glasmacherpfeife aufgenommen und anschließend das UV-Schutzglas. Die Proben weisen damit eine dickere UV-Schicht und eine dünnere IR-Schicht auf.

Das Ergebnis beider Probeaufbauten hinsichtlich Farbigkeit¹, Schichtverteilung², Filterwirkung³ und Schneidbarkeit⁴ fiel sehr unterschiedlich aus.

¹ Aufgrund der Kombination eines bläulichen (H) und eines gelblichen Glases (G) wiesen A und B erwartungsgemäß einen grünlichen Farbstich auf. Jedoch fiel auf, dass die beiden Proben B vom 16.3. und 17.3. vollständig transparent blieben und bei den beiden Proben A nur die vom 16.3. transparent blieb. Die vom 17.3. wies eine starke gelbgrüne Färbung und eine deutliche flächige Trübung auf.

² Bei Aufbau A lag erwartungsgemäß eine deutlich dickere IR-Schicht vor als bei Aufbau B.

³ Die Infrarot-Filterwirkung bei Aufbau A war folglich besser als bei Aufbau B.

	Proben A	Proben B
Resttransmission IR-Strahlung bei 1100nm	ca. 23-27%	ca. 53 - 58%
max. IR- Filterwirkung (bei 1100nm)	ca. 73-77%	ca. 42 - 47%

	Proben A	Proben B
durchschnittliche Schichtverteilung	UV:IR = ca. 1 : 2	UV:IR = ca. 2 : 1

Die UV-Filterwirkung bis 380nm lag bei Aufbau A und B bei 100%.

⁴ Bereits bei der Herstellung der Gläser kam es zum Bruch mehrerer Glaszylinder. Weswegen vom 18.3. keine Proben A und B existieren.

Proben C und D

Bei Probe C und D wurde das UV- und IR-Schutzglas noch mit einer zusätzlichen Schicht aus Klarglas in unterschiedlicher Abfolge kombiniert. Es handelt sich damit um ein Doppelüberfangglas.

Bei Probe C befindet sich die Klarglasschicht zwischen dem UV- und IR-Schutzglas. Die Überlegung war, dass eine dünne Trennschicht ungewünschte chemische Reaktionen (z. B. Trübung) zwischen den UV- und IR-Glasbestandteilen verhindern könnte. Wie bei Probe A wurde hierfür zuerst das UV-Schutzglas auf die Glasmacherpfeife aufgenommen, danach das Klarglas und zum Schluss das Infrarotschutzglas.

Bei Probe D wurde das Klarglas als äußere Schicht verwendet. Die Überlegung war, dass die Klarglasschicht wie eine Art Isolationsschicht wirkt und damit ein langsames und gleichmäßigeres Auskühlen der UV- und IR-Glasschicht gewährleisten könnte. Wie bei Probe A wurde hierfür zuerst das UV-Schutzglas auf die Glasmacherpfeife aufgenommen, danach das IR-Schutzglas und zum Schluss das Klarglas.

Das Ergebnis beider Probeaufbauten hinsichtlich Schichtverteilung¹, Filterwirkung² und Farbigkeit³ fiel sehr unterschiedlich aus.

¹ Die äußere Schicht war erwartungsgemäß deutlich dicker als die beiden inneren Schichten. Da die Stärke eines Doppelüberfangs in etwa der Stärke eines einfachen Überfangs entspricht, fallen die inneren Glasschichten und insbesondere die innerste (UV-Glas) besonders dünn aus. Teilweise war eine UV-Glasschicht mit Lupe nicht mehr erkennbar. Dies spiegelt sich auch in der Farbigkeit und Filterwirkung der Glasproben wider.

	Proben C	Proben D
durchschnittliche Schichtverteilung	UV:KLAR:IR = ca. 0,4 : 1 : 2,5	UV:IR:KLAR = ca. 0,3 : 1 : 2

² Bei fast allen Proben im Aufbau C und D konnte kein ausreichender UV-Schutz bei 380nm nachgewiesen werden. Die einzige Ausnahme bildet die Probe C vom 16.3., bei der die größte UV-Schichtstärke (0,5mm) vorlag. Bei allen anderen Proben betrug die Schichtstärke weniger als 0,2mm.

Die Infrarot-Filterwirkung bei Aufbau C war erwartungsgemäß besser als bei Aufbau D.

	Proben C	Proben D
Resttransmission UV-Strahlung bei 380nm	ca. 0-9%	ca. 18 - 37%
Resttransmission IR-Strahlung bei 1100nm	ca. 31-42%	ca. 51 - 54%
max. IR- Filterwirkung (bei 1100nm)	ca. 58-69%	ca. 46 - 49%

³ Die Proben C und D weisen einen vornehmlich bläulichen Farbton auf. Zwei Proben des Aufbaus D vom 18.3. besitzen den bereits bei Aufbau A bemerkten gelbgrünen Farbton mit flächiger Trübung. Die anderen Proben sind transparent.

Bereits bei der Herstellung der Gläser kam es zum Bruch mehrerer Glaszylinder. Weswegen vom 17.3. keine Proben C und D existieren.

2.3 Auswertung

2.3.1 Standardgläser (G, H, I, J, E2, F2)

Die Schmelzergebnisse der Standardgläser entsprachen den Erwartungen und Qualitätsanforderungen. Die erforderlichen Lichttransmissionswerte wurden erreicht. Die Farbigkeit/Struktur der Gläser war für den momentanen Arbeitsstand des Forschungsprojekts akzeptabel.

2.3.2 UV-IR-Kombinationsgläser (A, B, C, D)

2.3.2.1 Glasbruch und unvollständige Proben

Der vermehrt aufgetretene Glasbruch bei den Probeaufbauten A, B, C und D kann auf Spannungen innerhalb der Glastafeln zurückgeführt werden. Mögliche Spannungsursachen wären:

- a) Unverträglichkeiten der unterschiedlichen Glassorten
- b) Inhomogenitäten in der produzierten Glastafel

zu a) Die Ausdehnungskoeffizienten aller massiven Gläser (G, H, I, J) wurden auf Grundlage der Glasanalyseergebnisse vom Labor IGR berechnet. Von zwei Proben des massiven UV-Glases (G) wurde der AK zusätzlich mittels Dilatometer gemessen.

Die Ausdehnungskoeffizienten aller vier Glassorten lagen sehr nahe beieinander. Glasbruch aufgrund von Unterschieden im Ausdehnungsverhalten der beteiligten Gläser ist demnach unwahrscheinlich.

Glasprobe	Ausdehnungskoeffizient (gemittelte Werte)
G	9,7
H	9,7
I	9,9
J	9,9

zu b) Es handelt sich bei den Glasproben A, B, C, D um Glaskombinationen, die von den Glasmachern bisher noch nicht hergestellt worden sind. Das Verhalten der einzelnen Gläser und deren Zusammenspiel im Produktionsprozess der Glaszylinder war demnach noch nicht geläufig. Aufgrund der coronabedingt verkürzten Produktionsphase war eine ausreichende Einarbeitung nicht möglich. Die nächste Schmelzphase muss deutlich verlängert werden.

2.3.2.2 Farbigkeit und Transparenz

Die Farbigkeiten (bläulich, grünlich) entsprachen weitestgehend den Erwartungen.

Besonders auffällig waren die gelbgrünen, trüben Glasproben. Die Eintrübung könnte im Zusammenhang mit der Schichtenabfolge im Produktionsprozess stehen. Es ist möglich, dass:

- zwischen den Glasbestandteilen des UV- und IR-Glases ungewünschte chem. Reaktionen ablaufen.
- wenn das UV-Glas zuerst auf die Glasmacherpfeife aufgenommen und von den anderen Gläsern umschlossen wird, zu lange in kritischen Temperaturbereichen verweilt und damit ungewünschte Veränderungen in der Glasstruktur auftreten.

Diesem Phänomen muss durch eine deutlich höhere Anzahl an Glasproben in der nächsten Schmelzphase nachgegangen werden.

2.3.2.3 Schichtverteilung und Filterwirkung

Grundlage für eine optimale Schichtverteilung ist folgender Sachverhalt:

Da es sich bei dem IR-Schutzglas (H) um ein Absorptionsglas handelt, ist dessen Wirkungsgrad stark abhängig von der Schichtstärke. Je dicker die IR-Schicht, desto größer ist die Lichtfilterwirkung im infraroten Bereich. Bei dem UV-Schutzglas (G) ist für die Filterwirkung nur eine gewisse Mindestschichtstärke notwendig.

Die Labormessungen zur Lichttransmission an den Proben A, B, C, D haben diesen Sachverhalt bestätigt.

Probenaufbau A erreichte die besten Transmissionsergebnisse im UV- und Infrarotbereich.

Probenaufbau B erreichte ebenfalls einen 100%igen UV-Schutz. Aufgrund der nur halb so starken IR-Glasschicht fiel die Infrarot-Filterwirkung um 30% geringer aus.

Probenaufbau C wies eine gute Infrarotfilterwirkung auf (ca. 60-70%). Da die Übergangsschicht jedoch aus zwei Gläsern besteht, fielen die einzelnen Schichtstärken und insbesondere die der inneren Schicht (UV-Glas) sehr gering aus. Teilweise war keine UV-Schicht vorhanden. Eine zuverlässige UV-Filterwirkung kann nicht gewährleistet werden.

Bei Probenaufbau D befinden sich die Funktionsgläser UV und IR in den dünnen Übergangsschichten, wohingegen das klare Glas die äußere dicke Schicht bildet. Dies hat eine verminderte Infrarotfilterwirkung (ca. 55%) einerseits und eine fehlende UV-Filterwirkung bei 380nm zur Folge.

Aufgrund der guten Transmissionsergebnisse sollte Aufbau A unverändert weiterverfolgt werden.

Aufbau B bietet ebenfalls vielversprechende Aussichten. In den folgenden Schmelzphasen sollte jedoch versucht werden, die Gesamtglasstärke zu erhöhen, um eine dickere IR-Schicht zu erreichen. Darüber hinaus sollte versucht werden, die funktionsgebenden Bestandteile im IR-Glas zu erhöhen, um ggf. eine hohe Filterwirkung bei geringerer Schichtstärke zu erzielen.

Aufbau C und D müssen nicht mehr weiterverfolgt werden.

3. Schmelzphase 2, 3 und 4

3.1 Übersicht

In diesen drei Schmelzphasen lag das Augenmerk auf der Verträglichkeit des UV- und Infrarot-Schutzglases. In der SP1 hatte sich gezeigt, dass bei der Kombination beider Gläser Trübungen auftreten konnten, deren Ursprung es nun galt herauszufinden und zu vermeiden. Um festzustellen, inwieweit dieses Phänomen mit der Reihenfolge zusammenhängt, in der die Gläser auf die Glasmacherpfeife aufgenommen werden, wurden Proben im Aufbau A und B in repräsentativer Menge angefertigt sowie Proben von restauro®UV in standardmäßiger (E2 und F2) und umgekehrter Reihenfolge (E und F).

Proben von den massiven Gläsern UV (G), IR (H), Klar Hafen 1 (I) und Klar Hafen 4 (J) wurden wieder zu Analysezwecken hergestellt.

Um die Infrarot-Filterwirkung insbesondere derjenigen Aufbauten zu steigern, bei denen tendenziell geringere IR-Schichtstärken zu erwarten waren, wurde das Gemenge des Infrarotschutzglases bei den Proben am 18.11. gezielt verändert und die Menge des funktionsgebenden Bestandteils erhöht.

Bis Mitte der dritten Schmelzphase wurden alle Proben ausschließlich in Neu-Antik-Technik¹, der bisherigen Standard-Technik für restauro®UV und restauro®IR, produziert. Um insbesondere die Schichtdicke des IR-Glases zu erhöhen, wurden weitere Produktionstechniken in Betracht gezogen und Proben der o.g. Aufbauten sowohl in Echt-Antik-Technik² als auch in einer Mischtechnik³ hergestellt. M entspricht hierbei dem Standard-Aufbau von restauro®UV (E2 bzw. F2) und N bzw. N2 den beiden UV-IR-Glasaufbauten (B bzw. A).

	Glasaufbau	Technik
A	UV + IR	NA ¹
B	IR + UV	NA
E	UV + Klar1	NA
E2	Klar1 + UV (Standard UV)	NA
F	UV + Klar4	NA
F2	Klar4 + UV (Standard UV)	NA
G	UV massiv	NA
H	IR massiv	NA
I	Klar1	NA
J	Klar4	NA
M	Klar + UV (Standard UV)	EA ² / NEA ³
N	IR + UV	EA / NEA
N2	UV +IR	EA / NEA

¹ Neu-Antik-Technik (NA): Zunächst wird ein Teil der benötigten Gesamtglasmenge (Posten) vom Glasmacher aus dem Schmelzhafen auf die Glasmacherpfeife aufgenommen und in Holzmodeln zu einem kugelförmigen Ballon vorgeformt. Im zweiten Schritt wird die restliche Glasmenge (Glas) aufgenommen und erneut geformt. Der „Posten“ ergibt die dünnere und innere Schicht (Überfang) und das „Glas“ die dickere äußere Trägerschicht. Sobald Posten und Glas die richtige Form erhalten haben, wird die entstandene Kugel zu einem länglichen Ballon aufgeblasen. Damit dieser besonders lang wird (ca. 1,20m) und die Oberflächenbewegung des Glases möglichst gering ausfällt, wird der Ballon während des Aufblasens zusätzlich in einer Grube geschwenkt. Im Anschluss wird eine Seite des Ballons geöffnet und die Glasmacherpfeife abgeschlagen, sodass ein hohler Zylinder entsteht. Im Abgekühlten Zustand der Länge nach aufgeschnitten wird er im sogenannten Streckofen erneut bis zum Erweichungspunkt erwärmt, auseinander gefaltet und zu einer flachen Glastafel von ca. 1,5-3mm Stärke geglättet.

² Echt-Antik-Technik (EA): Der Arbeitsablauf bei dieser Produktionstechnik entspricht weitestgehend dem der Neu-Antik-Technik. Der Ballon wird jedoch nur bis zu einer Länge von knapp 1,00m in einer rinnenförmigen Metallform (Hobel) aufgeblasen, ohne ihn frei zu schwenken. Die Glastafeln fallen daher deutlich dicker aus (ca. 3-4mm) und die Bewegung in der Glasoberfläche ist deutlich prägnanter.

³ Neu-Echt-Antik-Technik (NEA): Bei dieser Technik handelt es sich um eine Mischform aus den beiden o.g. Produktionstechniken. Nachdem der Posten fertig vorgeformt wurde, wird er zu einem Ballon von etwa 1,00m-1,10m Länge frei in einer Grube geblasen. Er wird dabei nicht bis zur maximalen Größe aufgeblasen und auch nicht so stark geschwenkt. Dadurch bleibt eine mittlere Glasstärke von ca. 3mm erhalten und die Glasoberfläche liegt in ihrer Ausprägung zwischen den Echt-Antik- und Neu-Antik-Gläsern.

3.2 Ergebnisse:

3.2.1 Massive Gläser

Probe H

Die Zusammensetzung des Gemenges entsprach dem Standard-Gemenge *restauro*®IR und damit auch der Zusammensetzung während der 1. Schmelzphase. Am 18.11. wurde jedoch die Menge des funktionsgebenden Bestandteils deutlich erhöht.

Proben	Resttransmission IR-Strahlung bei 1100nm	
	bei Glasstärke 2,8mm	bei Glasstärke 1,7mm
18.11.2020 (funktionsgebender Bestandteil erhöht)	5%	ca. 15%
alle anderen Proben H (Standard-Gemenge)	19% (Durchschnitt)	34% (Durchschnitt)

Die bläuliche Färbung, die Oberflächenqualität und Filterwirkung entsprach bei allen Proben den Erwartungen und war vergleichbar mit den Ergebnissen aus SP1.

Die Proben vom 18.11. wiesen bei den Referenzglasstärken von 1,7 und 2,8mm einen dunkleren Blauton auf und eine um ca. 15-20% stärkere Filterwirkung.

Probe G

Probe G entsprach dem Standard-Gemenge *restauvo*[®]UV (massiv) und damit auch der Zusammensetzung während der 1. Schmelzphase. Das Glas wies wie in SP1 bei fast allen Proben eine starke Gelbfärbung sowie eine flächige Trübung auf. Eine Ausnahme bildeten die Proben vom 13.11. und 17.11., bei denen die Gläser einen trübungsfreien, leicht gelblichen Ton (ähnlich E2 und F2) hatten. Am 23.11., 24.11. und 25.11. wiesen die Proben einen starken Gelbton auf, blieben jedoch ebenfalls transparent.

Anhand der Glasanalysen konnten keine Unregelmäßigkeiten im Gemenge festgestellt werden. Lichttransmissionsmessungen waren bei diesen Proben nicht nötig. Sie wurden bei Proben E2 und F2 durchgeführt.

Probe I und J

Beide Proben entsprachen dem klaren Standardglas *restauvo*[®] und hinsichtlich des optischen Erscheinungsbilds den Erwartungen. Die Proben wurden zu Vergleichszwecken bezüglich der Verträglichkeit des Klarglases mit dem UV-Glas erstellt (für E, E2, F und F2).

Lichttransmissionsmessungen waren bei diesen Proben nicht nötig.

Glasanalysen wurden nicht durchgeführt.

3.2.2 Mehrschichtige Gläser

Proben E2 und F2 / E und F

Die Proben E2 und F2, die Standardglasaufbauten für *restauvo*[®]UV, wurden analog der SP1 angefertigt. Dabei wurde das Klarglas wieder aus zwei verschiedenen Schmelzhäfen entnommen. Bei E2 stammt das Glas aus Hafen 1 und bei F2 aus Hafen 4.

Wichtig: Das Klarglas wurde zuerst auf die Glasmacherpfeife aufgenommen. Danach folgte das UV-Glas.

Das Ergebnis entsprach in Farbigkeit¹, Filterwirkung², Schichtverteilung und Schneidbarkeit den Ergebnissen aus SP1 und damit den Erwartungen.

¹ transparent, leicht gelbliche Färbung

² UV-Filterwirkung 100% bei 380nm bei allen gemessenen Proben

Die Proben E und F entsprechen dem umgekehrten Standardaufbau für *restauvo*[®]UV.

Wichtig: Hier wurde das UV-Glas zuerst auf die Glasmacherpfeife aufgenommen. Danach folgte das Klarglas.

Dieser Aufbau diente dem Vergleich mit Probeaufbau A und N2, bei denen ebenfalls das UV-Glas zuerst aufgenommen und anschließend mit IR-Glas überzogen wird.

Im Ergebnis lag eine starke Gelbfärbung sowie eine starke Trübung vor. Aufgrund des schlechten optischen Erscheinungsbildes wurden keine Lichttransmissionsmessungen durchgeführt.

Probe M

Probe M entspricht dem Standardaufbau für restauro®UV und damit der Schichtenabfolge von E2 und F2. Allerdings wurden die Proben in Echt-Antik-Technik (wie oben beschrieben) hergestellt. Die Proben waren trübungsfrei und hellgelb analog dem Ergebnis von E2 und F2, aber in ihrer Oberfläche deutlich stärker bewegt. Lichttransmissionsmessungen erfolgten keine, da die UV-Filterfunktion anhand der Proben E2 und F2 ermittelt wurde.

Proben A und B bzw. N und N2

Es handelt sich hierbei um die Probeaufbauten des UV-IR-Kombinationsglases.

Bei B und N wurde zuerst das IR-Schutzglas auf die Glasmacherpfeife aufgenommen und dann mit dem UV-Schutzglas überzogen. Bei A und N2 erfolgte die Glasaufnahme in umgekehrter Reihenfolge. B und N wiesen durchgehend einen leicht grünlichen Farbton ohne Trübung auf.

A wies an nahezu allen Probetagen eine starke gelb-grüne Färbung mit flächiger Trübung auf. Lediglich am 25.11. blieb eine Probe transparent.

N2 hatte an allen Probetagen eine grünliche Färbung. Nur eine der drei Proben wies leichte trübe Schlieren auf. Die anderen zwei Proben blieben transparent.

Die sich in SP1 abzeichnende Tendenz der Schichtstärkenverteilung wurde im Rahmen der drei Schmelzwochen bestätigt. Die innere Schicht war stets die dünnere, die äußere Schicht stets die dickere.

Bei den Proben B lag die IR-Glasschicht im Durchschnitt unter 1mm. Mit einer Schicht von 0,7mm lag die durchschnittliche Resttransmission bei 56%. Durch eine deutliche Erhöhung des funktionsgebenden Bestandteils im Gemenge am 18.11. konnte mit einer IR-Schichtstärke von nur 0,5mm eine Resttransmission von 50% erzielt werden. Mit einer 28% geringeren Schichtdicke konnte ein 10% besserer IR-Schutz erzielt werden.

Bei den Proben N (IR+UV in EA- und NEA-Technik) waren die IR-Schichten dicker und lagen bei +- 1mm. Bei einer IR-Schichtstärke von 1,0mm wurde eine Resttransmission von 48% erreicht.

Bei den Proben A und N2 lagen die Schichtstärken durchschnittlich zwischen 1,0 und 2,0mm und die Resttransmissionswerte zwischen 30 und 40%.

3.2.3 Verschiedene Herstellungstechniken

Die in Neu-Antik-Technik hergestellten Glasproben wiesen erwartungsgemäß eine ruhige Glasoberfläche mit nur leichten Verzerrungen in der Durchsicht auf. Das Erscheinungsbild entspricht dem mundgeblasener Fenstergläser des ausgehenden 19. Jahrhunderts und frühen 20. Jahrhunderts. Aufgrund der Schwenktechnik entstehen recht große Tafelformate von ca. 85x100cm, deren Gesamtglasstärke teilweise jedoch unter 2mm liegt. Aufgrund des handwerklichen Herstellungsprozesses können die Stärken innerhalb einer Tafel zudem stark variieren.

Wie die Ergebnisse der Proben A und B belegen, sind bei der Kombination von UV- und IR-Schutzglas in dieser Technik die einzelnen Schichten in Ihrer Stärke sehr begrenzt. Insbesondere auf die Filterwirkung des Infrarot-Schutzglases bei den Proben B wirkt sich dieser Sachverhalt negativ aus.

In Echt-Antik-Technik entstehen kleinere Tafeln im Format von etwa 60x90cm mit einer deutlich stärkeren Oberflächenbewegung und Verzerrung in der Durchsicht. Die Glasstärke liegt bei etwa 3mm und bietet damit einen deutlich größeren Spielraum in der Schichtenverteilung. Wie die Proben N zeigen, konnten mit dieser Technik IR-Schichten von ca. 1mm und ein IR-Schutz von über 50% erzielt werden.

Um die teils starken Verzerrungen der in Echt-Antik-Technik gefertigten Gläser zu minimieren und damit deren Einsatzbereich auch auf museal oder zu Wohnzwecken genutzte historische Gebäude auszudehnen, wurde im Zuge des DBU-Projekts eine neue Mischtechnik (Neu-Echt-Antik-Technik)

entwickelt. Zwar lassen sich in dieser Technik nicht ganz so ruhige Tafeln wie in der Neu-Antik-Technik herstellen, dafür aber tendenziell dickere Glasstärken.

3.3 Auswertung

3.3.1 Standardgläser (G, H)

Die Schmelzergebnisse der Standardgläser entsprachen den Erwartungen und Qualitätsanforderungen. Die erforderlichen Lichttransmissionswerte wurden erreicht. Die Farbigkeit/Struktur der Gläser war akzeptabel.

3.3.2 UV-IR-Kombinationsgläser (A, B, N, N2)

3.3.2.1 Farbigkeit und Transparenz

Die Farbigkeiten (bläulich, grünlich) entsprachen bei den Probeaufbauten B und N den Erwartungen.

Die deutliche gelbgrüne Färbung sowie die flächige Trübung trat bei fast allen Proben der Aufbauten A, E, F, G und bei einer Probe des Aufbaus N2 auf. Bei all diesen Proben wurde zuerst das UV-Schutzglas auf die Glasmacherpfeife aufgenommen. Proben, die zuerst mit IR-Schutzglas angefangen wurden, wiesen dieses Phänomen nicht auf. Es ist daher davon auszugehen, dass die Trübung eng mit der Schichtenabfolge zusammenhängt und vermutlich thermische Ursachen hat, da die innere Schicht länger warm bleibt und kritische Temperaturbereiche langsamer durchschritten werden. Der genaue Grund dieses Phänomens ist jedoch nicht bekannt.

In den nächsten Schmelzversuchen wird von den Schichtaufbauten A und N2 Abstand genommen und sich vorrangig auf die Aufbauten B und N (IR innen/UV außen) fokussiert.

3.3.2.2 Schichtverteilung und Filterwirkung

Die für den Infrarotschutz günstigste Schichtenverteilung wurde mit den Probeaufbauten A und N2 erreicht. Allerdings erwiesen sich diese beiden Varianten hinsichtlich Farbigkeit und Transparenz als problematisch. Anhand der Schmelzergebnisse zeichnet sich ab, dass eine Produktion mit verlässlich guter Farbqualität nur mit den Aufbauten B und N erreicht werden kann, wenngleich dies zu Lasten der IR-Schichtstärke und IR-Filterwirkung geht.

Um diesem Sachverhalt entgegenzuwirken, sollte das Gemenge des IR-Schutzglases in der nächsten Schmelzphase entsprechend der Proben vom 18.11. angepasst und der funktionsgebende Bestandteil erhöht werden. Darüber hinaus muss im Produktionsprozess versucht werden, die innere Glasschicht (IR-Glas) dicker aufzubauen.

3.3.2.3 Verschiedene Herstellungstechniken

Die Versuche M, N, und N2 zeigten, dass durch die Veränderung der Produktionsweise insgesamt dickere Glastafeln und damit verbunden auch größere Schichtstärken erzielt werden können. Insbesondere die Mischtechnik besitzt hierbei das Potenzial, eine angemessene Filterwirkung mit einem gleichzeitig guten optischen Erscheinungsbild zu kombinieren.

4. Schmelzphase 5, 6 und 7

4.1 Übersicht

In diesen drei Schmelzphasen lag das Augenmerk auf der Verarbeitungstechnik des heißen Glases. Die vorangegangenen Schmelzphasen haben gezeigt, dass sich Trübungen in den Glastafeln vermeiden lassen, wenn zuerst das IR-Glas und danach das UV-Glas auf die Glasmacherpfeife aufgenommen wird. Da sich diese Reihenfolge aber ungünstig auf die IR-Schichtstärke auswirkt, galt es nun eine Produktionstechnik zu entwickeln, mit der eine möglichst dicke IR-Schicht und eine weitgehend gleichmäßige Schichtenverteilung in der Glastafel erreicht werden kann.

Als Grundlage für die Entwicklung dient weiterhin die Neu-Antik-Technik (NA) und die Echt-Antik-Technik (EA). Deren Mischtechnik (NEA) wird ebenfalls weiterverfolgt. Hinzu kommen zwei weitere Varianten^{1, 2}, mit deren Hilfe zusätzlich ein zu häufiges Erwärmen während des Produktionsprozesses und möglicherweise darauf zurückzuführende Verfärbungen im Glas vermieden werden sollen.

Darüber hinaus ist zu klären, ob die UV-Schicht einen verstärkenden Einfluss auf die Infrarot-Filterwirkung hat und ob es Sinn macht, dickere UV-Glasschichten zu erzeugen.

	Glasaufbau	Technik
B	IR + UV	NA
E2/F2	Klar + UV (Standard UV)	NA
G	UV massiv	NA
H	IR massiv	NA
M	Klar + UV (Standard UV)	EA
N	IR + UV	EA
Q	Klar + UV (Standard UV)	NEA
R	IR + UV	NEA
T	IR + UV	EA-BALLON ¹
U	IR + UV	EA-HOLZFORM ²
V	IR massiv	EA-HOLZFORM
W	Klar + UV (Standard UV)	EA-HOLZFORM

¹ Echt-Antik-Ballon (EA-BALLON): Der Arbeitsablauf entspricht dem der Echt-Antik-Technik (EA). Allerdings wird der längliche Ballon nicht beidseitig geöffnet. Es wird lediglich die Glasmacherpfeife abgesprengt. Der Glasballon wird im Anschluss kontrolliert auf Raumtemperatur abgekühlt. Im kalten Zustand werden die beiden abgerundeten Seiten des Ballons angeritzt und abgesprengt, sodass ein hohler Zylinder entsteht. Der Streckprozess (längs aufschneiden, auseinanderfalten und glätten) erfolgt analog der Echt-Antik- und Neu-Antik-Technik.

² Echt-Antik-Hohlkörper (EA-HOLZFORM): Der Arbeitsablauf entspricht dem der Echt-Antik-Technik (EA). Allerdings wird der Ballon nicht frei in der Luft geblasen, sondern in eine Zylinderförmige Holzform. Es entsteht ein Hohlkörper in Flaschenform mit Boden und einem Durchmesser von ca. 30cm. Dieser wird im Anschluss entformt und kontrolliert auf Raumtemperatur abgekühlt. Im kalten Zustand wird der Hohlkörper an der oberen Kappe und knapp über dem Flaschenboden angeritzt und abgesprengt, sodass ein hohler Zylinder entsteht. Der Streckprozess (längs aufschneiden, auseinanderfalten und glätten) erfolgt analog der Echt-Antik- und Neu-Antik-Technik.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Referenzproben

Probe H

Die Zusammensetzung des Gemenges entsprach dem Standard-Gemenge restauro®IR und damit auch der Zusammensetzung während der vorangegangenen Schmelzphasen.

Eine Sonderschmelze, bei der der funktionsgebende Bestandteil deutlich erhöht wird (vgl. Punkt 3.2.1 H_18.11.2020), war aus produktionstechnischen Gründen im Rahmen dieser Schmelzphasen nicht möglich.

Die bläuliche Färbung, die Oberflächenqualität und Filterwirkung entsprach den Erwartungen und war vergleichbar mit den Ergebnissen aus SP1-4 und den Standard-Produktionen.

	bei Glasstärke 1,7mm
Resttransmission IR-Strahlung bei 1100nm	ca. 33%*

* Durchschnittswert der Wochenproduktion SP5

Probe G

Probe G entsprach dem Standard-Gemenge restauro®UV (massiv). Das Glas wies an allen Produktionstagen eine starke Gelbfärbung sowie eine flächige Trübung auf.

Proben E2 und F2

Die Proben E2 und F2 entsprechen dem Standardglasaufbau von restauro®UV. Sie wurden zu Vergleichszwecken angefertigt, um feststellen zu können, ob eventuelle Verfärbungen/Trübung auf die Glaszusammensetzung oder die Herstellungstechnik zurückzuführen sind.

Das Ergebnis entsprach in Farbigkeit¹, Filterwirkung², Schichtverteilung und Schneidbarkeit den Erwartungen.

¹ transparent, leicht gelbliche Färbung

² UV-Filterwirkung 100% bei 380nm bei allen gemessenen Proben

4.2.2 Proben der verschiedenen Herstellungsverfahren

Die Beurteilung der Proben erfolgt anhand drei für den Fortgang des Projekts relevanter Kriterien:

a) Glasstärke und Dickenverteilung

Grundsätzlich wurde bei allen Proben versucht, zu Beginn des Arbeitsprozesses eine möglichst große Menge an IR-Glas auf die Glasmacherpfeife aufzunehmen, um eine insgesamt dickere Glastafel zu erzeugen und damit die Chance auf eine dickere Schicht aus Infrarotschutzglas zu erhöhen.

Es entstanden dabei in allen Techniken Glastafeln mit den üblichen Gesamtglasstärken von ca. 2-3mm. Teilweise variieren sie innerhalb einer Tafel aber auch sehr stark (max. 4-5mm / min. 1,5mm).

Dabei ist festzustellen, dass sich der Schichtanteil des IR-Glases bei beiden Extremen etwa zwischen 20% und 30% bewegt. Diese Tendenz lässt sich an vielen anderen Proben ebenfalls feststellen. Die Schichtverteilung weist jedoch immer wieder Unregelmäßigkeiten auf, weswegen eine besonders dicke Glastafel nicht zwangsläufig eine dicke Infrarot-Schutzschicht zur Folge haben muss.

Bei den meisten Proben wurde eine Minimum-Infrarotschichtstärke von 0,5mm erreicht (ca. 64% Resttransmission bei 1100nm). Dies trifft auf alle Herstellungsverfahren gleichermaßen zu.

b) Farbigkeit:

Auffällig ist die starke Gelbfärbung der in Echt-Antik-Technik (M, N, T, U, V, W) und in Neu-Echt-Antik-Technik (Q, R) gefertigten Glasproben, die sich durch eine Nachbehandlung nur mehr oder weniger stark aufhellen lässt.

Die in Neu-Antik-Technik hergestellten Glasproben (B) weisen hingegen nur eine sehr leichte

Gelbfärbung auf, die durch gezielte Nachbehandlung noch deutlich aufgehellt werden kann. Der verbleibende Gelbstich in der UV-Glasschicht ergibt im Zusammenspiel mit der bläulichen Infrarot-Glasschicht einen leichten Grünton und ist damit optisch nicht mehr wahrnehmbar.

c) Qualität:

Die Herstellung der Proben in Neu-Antik-Technik (NA) und Echt-Antik-Technik (EA) erfolgte an den bereits eingerichteten Arbeitsplätzen mit Stammbesetzung. Für die anderen Techniken mussten neue Werkstellen mit eigens dafür zusammengestellten Teams eingerichtet werden. Da für jeden Glasaufbau immer nur 5-10 Probetafeln benötigt wurden, war ein effektives Einarbeiten in den Produktionsprozess nur schwer umsetzbar. Ungleichmäßige Tafeln mit z. T. starken Dickenunterschieden und Wellen sowie vermehrter Glasbruch waren die Folge.

Bei Proben T, U, V und W ist aufgrund der geschlossenen Hohlkörperform ein zusätzlicher Arbeitsschritt nötig, um eine flache Glastafel zu erhalten. Beide Enden des Hohlkörpers müssen in erkaltetem Zustand angeritzt und abgesprengt werden, damit als Zwischenstufe zunächst ein hohler Glaszylinder entsteht.

Bei den in die Holzform geblasenen Proben U, V, W und insbesondere bei Probe T kam es aufgrund des schrägen „Flaschenhalses“ bzw. wegen der Ballonform zu erhöhtem Verschnitt. Da die z.T. stark abgerundeten Enden großflächig entfernt werden mussten, entstanden sehr kurze Zylinder und folglich nur sehr schmale Tafeln.

4.2.3 Einfluss der UV-Glasschicht auf die Infrarot-Filterwirkung

Um diesen Sachverhalt zu klären, wurden Lichttransmissionsmessungen an Kombinationsglasproben (B, U) mit besonders dicker IR-Glasschicht durchgeführt und mit dem Transmissionsergebnis eines massiven IR-Glases bei entsprechend gleicher Schichtstärke verglichen.

Probenbezeichnung	Dicke UV-Schicht [mm]	Dicke IR-Schicht [mm]	Resttransmission bei 1100nm
B 16/07/21_exdi	2,0	1,5	35%
H 16/07/21_dü	-	1,5	34%
G 16/07/21_unt	2,0	-	-
U 15/07/21_di	2,1	1,6	34%
V 15/07/21_dü	-	1,6	33%
G 15/07/21_di	2,1	-	-

Es zeigt sich, dass die

UV-Glasschicht keinen verstärkenden Einfluss auf die Infrarot-Filterwirkung hat.

4.3 Auswertung:

Die in unterschiedlichen Herstellungstechniken angefertigten Proben zeigten, dass insbesondere in Echt-Antik-Technik und deren abgewandelten Formen durchschnittlich dickere Glastafeln entstehen als in der Neu-Antik-Technik. Da man aber aufgrund der ungleichmäßigen Schichtenverteilung innerhalb einer Tafel nicht davon ausgehen kann, dass eine größere Glasstärke gleichzeitig auch eine dickere IR-Glasschicht bedeutet, ist die Echt-Antik-Technik nicht zwangsläufig zu favorisieren. Durch die Aufnahme einer größeren Menge an IR-Glas beim Formen des Postens in Neu-Antik-Technik entstanden im Durchschnitt ähnlich dicke IR-Schichtstärken wie in den anderen Techniken.

Hinzu kommt, dass sich mit der Neu-Antik-Technik weniger stark wellige Glastafeln sowie größere Tafelformate erzeugen lassen. Darüber hinaus sind für den Streckprozess (Auseinanderfalten und Glätten der Tafel) keine zusätzlichen mit Bruchrisiko verbundenen Arbeitsschritte nötig.

Entscheidend aber ist, dass alle auf der Echt-Antik-Technik basierenden Gläser selbst nach intensiver

Nachbehandlung noch einen starken, nicht verwendbaren Gelbstich aufweisen. Im Gegensatz dazu wurde bei allen in Neu-Antik-Technik hergestellten Proben der gewünschte leicht grünliche Farbstich erreicht.

Aufgrund des qualitativ besseren Erscheinungsbildes der Neu-Antik-Proben und der sich von den anderen Herstellungstechniken kaum unterscheidenden Ergebnisse hinsichtlich der IR-Schichtstärken, sollte sich in der nächsten Schmelzphase wieder ausschließlich auf die Neu-Antik-Technik fokussiert werden.

Ziel ist, die IR-Schichtstärke durch Aufnahme einer größeren Menge an IR-Glas und ggf. durch Anpassung der Werkzeuge weiter zu erhöhen und die Filterwirkung des IR-Glases durch Anheben des funktionsgebenden Bestandteils im Gemenge entsprechend der Proben vom 18.11.2020 zu steigern.

5. Schmelzphase 8

5.1 Übersicht

Im Zentrum dieser Schmelzphase stand die Optimierung der Infrarot-Schutzschicht. Die vorangegangenen Schmelzphasen zeigten, dass sich mit der Produktion in Neu-Antik-Technik die qualitativ besten Ergebnisse erzielen lassen, die IR-Schichtstärken bisher jedoch noch nicht ausreichen, um den gewünschten Infrarotschutz von mind. 50% zu erreichen.

Es galt nun, einerseits die Arbeitsweise der Glasmacher so anzupassen, dass eine möglichst dicke und gleichmäßige Schicht IR-Schutzglas entsteht. Andererseits galt es, den funktionsgebenden Bestandteil im Glasgemenge so zu erhöhen, dass selbst bei geringen Schichtstärken ein ausreichend guter Infrarotschutz entsteht.

In dieser Schmelzphase wurde ausschließlich die Neu-Antik-Technik weiterverfolgt.

	Glasaufbau	Technik
B	IR + UV	NA

5.2 Ergebnisse:

5.2.1 Anpassung der Arbeitsweise

Wie bereits in Schmelzphase 7 wurde versucht, gleich zu Beginn des Produktionsprozesses eine große Menge Infrarot-Schutzglas auf die Glasmacherpfeife aufzunehmen. Aufgrund der sehr guten Wärmeaufnahmefähigkeit bleibt das Infrarot-Schutzglas verglichen mit Klarglas oder UV-Schutzglas sehr lang warm und „flüssig“. Es erwies sich daher als vorteilhaft, das Glas schrittweise und jeweils mit kurzem Zwischenkühlen auf die Glasmacherpfeife aufzunehmen, um es dann im Holzmodel zu formen. Die Werkzeuge wurden dabei nicht angepasst.

In den fertigen Glastafeln konnten auf diese Weise Infrarotschichtstärken von mindestens 0,5mm erzielt werden.

5.2.2 Anpassung des IR-Glasgemenges

Der funktionsgebende Bestandteil wurde entsprechend der Erfahrungen aus Schmelzphase 3 (vgl. Punkt 3.2.1 H_18.11.2020) an den Produktionstagen vom 28.3. – 31.3.2023 erhöht.

Zu Vergleichszwecken wurden am 27.3.2023 Proben mit dem Standard-IR-Glasgemenge angefertigt.

Proben	Resttransmission IR-Strahlung bei 1100nm	
	bei Schichtstärke 0,6mm	bei Schichtstärke 0,8mm
27.3.2023 (Standard-Gemenge)	60%	54%
28.3.2023	45%	36%
29.3.2023	45%	--
30.3.2023 (funktionsgebender Bestandteil erhöht)	--	40%

Mit Erhöhung des funktionsgebenden Bestandteils konnte wie bereits in Schmelzwoche 3 eine um rund 15-20% bessere Infrarot-Schutzwirkung erzielt werden.

Die bläuliche Färbung bei den Gläsern vom 28.3 bis 31.3. fiel aufgrund der erhöhten Menge des funktionsgebenden Bestandteils erwartungsgemäß dunkler aus. In Kombination mit der UV-Glasschicht entstanden dabei je nach Intensität der Nachbehandlung Tafeln mit grünlichem bis gelblich-grünem Farbton.

Auffällig in dieser Schmelzwoche waren z. T. deutlich erkennbare gelbe Schlieren und Trübungen in den Tafeln.

5.3 Auswertung:

Anhand der angefertigten Probetafeln konnte bestätigt werden, dass sich eine Verdopplung des funktionsgebenden Bestandteils im Infrarot-Schutzglas positiv auf die IR-Schutzwirkung des UV-IR-Kombinationsglases auswirkt und sie um 15-20% verbessert. Durch eine schrittweise Aufnahme des IR-Schutzglases auf die Glasmacherpfeife entstehen im Durchschnitt IR-Schichtstärken von 0,6 - 0,8mm mit gewissem Puffer in der Resttransmission, sollten Schichtstärken punktuell etwas geringer ausfallen. Um die IR-Schutzwirkung noch weiter zu steigern, wäre eine weitere Erhöhung des funktionsgebenden Bestandteils zu erwägen.

Die Farbigkeit der Gläser variiert innerhalb der Produktionschargen und Tafeln. Einige Tafeln weisen den gewünschten grünlichen Farbton auf, andere besitzen gelbe Schlieren und Trübungen. Diese rühren von der UV-Glasschicht her und sind vermutlich auf Inhomogenitäten im UV-Glasgemenge und nicht optimale Verarbeitungstemperaturen zurückzuführen.

Um das optische Erscheinungsbild des UV-IR-Kombinationsglases zu verbessern, sollte in einer weiteren Schmelzphase der Produktionsprozess insgesamt noch einmal genauer betrachtet werden.

6. Schmelzphase 9 und 10

6.1 Übersicht

Aufbauend auf den erfolgreichen UV-IR-Kombinationsversuchen der vorangegangenen Schmelzphase war nun das Ziel, das optische Erscheinungsbild des Glases zu verbessern. Dass insbesondere der Faktor Temperatur einen Einfluss auf Schlierenbildung, Gelbfärbung und Trübung haben könnte, wurde bereits in den Schmelzphasen 2, 3 und 4 vermutet (vgl. Punkt 3.3.2.1). Durch gezielte Messungen der Ofen- und Verarbeitungstemperaturen und geringe Anpassungen der Glasgemenge sollte sich dem Phänomen im Rahmen der Schmelzphasen 9 und 10 angenähert werden.

Ein weiteres Ziel dieser Schmelzphasen war es herauszufinden, ob sich die Schutzwirkung des Infrarot-Schutzglases durch eine weitere Erhöhung des funktionsgebenden Bestandteils noch einmal steigern lässt.

6.2 Ergebnisse:

6.2.1 Anpassung der Produktionsbedingungen

Über den gesamten Zeitraum der Produktion wurden halbstündlich die Ofentemperaturen dokumentiert und mittels Laser Temperaturmessungen am heißen Glas sowohl in den Schmelzgefäßen als auch während des Ausarbeitens an der Glasmacherpfeife durchgeführt. Gemessen wurde ebenfalls die Dauer der einzelnen Aufwärm- und Abkühlphasen, die das Glas während des Produktionsprozesses durchläuft.

Dabei fiel auf, dass das UV-Schutzglas deutlich stärker auf veränderte Temperaturverläufe reagiert als das Infrarot-Schutzglas. Im Verlauf der beiden Schmelzphasen zeichnete sich ab, dass je stärker die Temperaturschwankungen während der Ausarbeitung des Glases ausfielen, umso größer die Gefahr war, dass das Glas bereits als Rohglas gelb und trüb anläuft.

Des Weiteren fiel auf, dass Schlieren und Inhomogenitäten in den Glastafeln insbesondere dann auftraten, wenn die Temperatur im Schmelzgefäß des UV-Glases zu niedrig war. Entsprechend dieser Erkenntnis musste die Platzierung der Glasschmelzen im Ofen angepasst werden. Da das Infrarot-Schutzglas Wärme sehr gut speichert, damit deutlich länger heiß bleibt und gegebenenfalls durch Luftzufuhr von außen gekühlt werden muss, erwies sich ein möglichst großer Abstand zum Schmelzgefäß des UV-Schutzglases als vorteilhaft.

6.2.2 Anpassung der Glasmenge

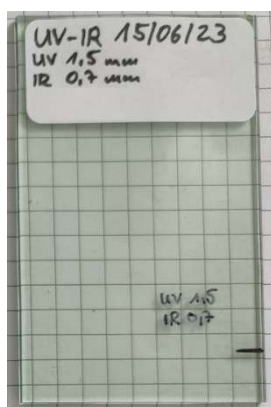
Gemengeanpassungen wurden sowohl am UV-Glas als auch am IR-Glas durchgeführt.

Im Falle des UV-Glases führen bereits geringste Anpassungen der funktionsgebenden Bestandteile zu deutlichen Veränderungen der Glaseigenschaften. Neben anfänglichen Fehlschmelzen konnte im Verlauf der Schmelzphasen insbesondere die Farbigkeit und die Homogenität der Roh tafeln verbessert werden. Die notwendige Intensität der Nachbehandlung veränderte sich hingegen teilweise negativ.

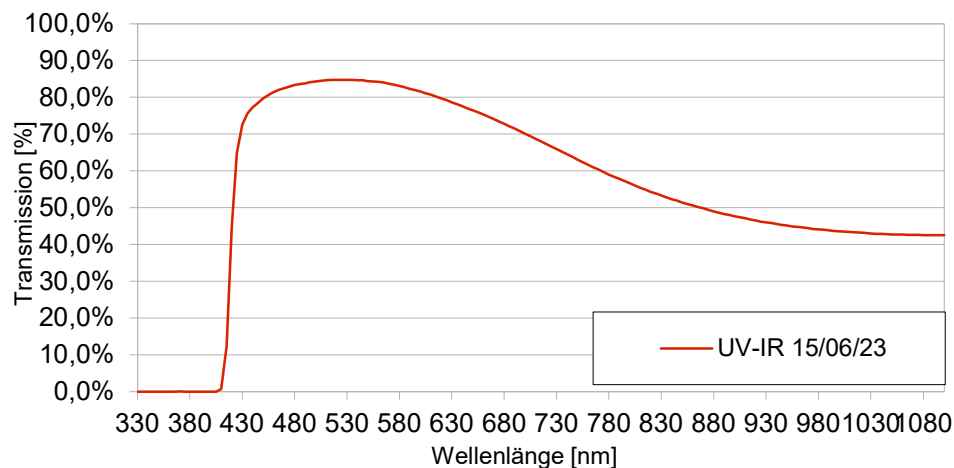
Im Falle des IR-Glases wurde der funktionsgebende Bestandteil am 12.6.2023 noch ein weiteres Mal erhöht. Beim Ausarbeiten des Glases durch den Glasmacher fiel auf, dass es deutlich länger dauerte, bis das Glas auf die nötige Verarbeitungstemperatur abgekühlt war. Im Vergleich zur IR-Glasmischung aus Schmelzphase 8 war das Glas flüssiger und ließ sich nur schlecht auf die Glasmacherpfeife aufnehmen. Von weiteren Versuchen wurde vorerst abgesehen und am Folgetag wieder auf die Mischung aus Schmelzphase 8 zurückgegangen.

6.2.3 Produktion UV-IR-Kombinationsglas

Am 15.6.2023 entstand zum ersten Mal eine Charge des UV-IR-Kombinationsglases, die alle im Förderprojekt genannten Anforderungen hinsichtlich Farbigkeit, Transparenz und Schutzwirkung erfüllt.



UV-IR-Kombinationsglas (Probe vom 15.06.2023)	
	Resttransmission
UV-Bereich Schichtstärke 1,5mm	0%%
IR-Bereich Schichtstärke 0,7mm	42,5%



5.3 Auswertung:

Grundsätzlich erwies sich eine kontinuierliche Überwachung von Temperatur und Zeit während des Produktionsprozesses als vorteilhaft. Durch eine gezielte Regulierung der Ofentemperaturen sowie der Aufwärm- und Abkühlphasen bei der Glasverarbeitung konnten zunehmend hellere und gleichmäßiger gefärbte Rohtafeln produziert werden. Dazu trugen ebenfalls Gemengeveränderungen am UV-Glas bei. Hierbei ist jedoch die Gefahr ungewünschter Nebeneffekte sehr groß. Für eine diesbezügliche Optimierung wären weitere Tests notwendig, die im Rahmen dieses DBU-Förderprojekts zeitlich nicht mehr durchgeführt werden konnten.

Eine weitere Steigerung des funktionsgebenden Bestandteils im IR-Glasgemenge scheint die Wärmespeicherfähigkeit des Infrarot-Schutzglases weiter erhöht zu haben, da das Glas noch länger heiß und flüssig blieb. Eine Glasprobe ließ sich aufgrund mangelnder Verarbeitbarkeit nicht herstellen, sodass die Auswirkung auf die Lichttransmission im Verlauf der Schmelzphase nicht geprüft werden konnte.

Wenngleich nicht alle in Schmelzphase 9 und 10 aufgeworfenen Fragen abschließend geklärt werden konnten, so entstand unter Berücksichtigung aller bisheriger Erkenntnisse am 15.6.2023 ein für das Modellprojekt Klosterkirche St. Michael in Bamberg verwendbares UV-IR-Kombinationsglas.

7. Einsatz des UV-IR-Kombinationsglases im Modellprojekt

Die Entwicklung des UV-IR-Kombinationsglases stand in engem Zusammenhang mit der umfangreichen Restaurierung der Klosterkirche St. Michael in Bamberg und der Bürgerspitalstiftung Bamberg als Bauherr. Im Konservierungskonzept für die kunsthistorisch wertvolle Ausstattung spielte Lichtschutz eine entscheidende Rolle, um die durch UV- und Infrarotstrahlung fortschreitenden Schädigungen an den Farbfassungen und am Bildträger einzudämmen sowie durchgeführte Restaurierungsmaßnahmen vor frühzeitigen Veränderungen zu schützen. Ein dauerhafter UV-Schutz durch Einfachgläser in Form von Bleiverglasungen war bereits zu Beginn des Bauprojekts anvisiert. Die Möglichkeit, diesen noch zusätzlich mit Infrarotschutz zu kombinieren, bewog die Bauherrschaft zur Unterstützung des DBU-Forschungsprojekts. In den Fokus trat der Schutz des barocken Hochaltars und damit die direkt dahinter liegenden zwei Chorfenster (ca. 70m²).

Im Verlauf der rund dreieinhalbjährigen Dauer des Forschungsprojekts wurde bereits mit der Bauausführung begonnen, der Hochaltar abgebaut und restauriert sowie Arbeiten an den Steingewänden und an den Metallarmierungen durchgeführt. Im August 2023 wurde zur Bemusterung der bisher produzierten UV-IR-Kombinationsgläser eine Bleiverglasung im Maßstab 1:1 angefertigt. Das Musterfeld bestand aus Gläsern verschiedener Produktionschargen und

unterschiedlicher Entwicklungsstände (Schmelzphasen 8 und 10). Während der Farbton generell für gut befunden wurde, gab es Kritik an der leichten Trübung mancher Gläser aus Schmelzphase 8, die sich insbesondere in der Außenansicht bemerkbar machte. Die Fertigung und der Einbau der Sechseck-Bleiverglasungen ist für Ende 2023 vorgesehen. Die genauen Termine werden noch festgelegt.

8. Fazit

Im Rahmen des rund dreieinhalbjährigen Forschungsprojekts wurde über verschiedene Entwicklungsschritte in insgesamt 10 Schmelzphasen das Projektziel, der Entwicklung eines Flachglases mit kombiniertem UV- und Infrarotschutz, erreicht. Es entstanden Produktionschargen, die zu Bemusterungszwecken am Modellprojekt Klosterkirche St. Michael in Bamberg als Bleiverglasung bereits verwendet wurden. Hinsichtlich Farbigkeit, Oberflächenstruktur und Schutzwirkung wurden alle im Projekt gestellten Anforderungen erfüllt, wenngleich das optische Erscheinungsbild und insbesondere der Produktionsprozess noch weiterer Optimierung bedürfen. Da es sich generell jedoch um einen handwerklichen Herstellungsprozess handelt, der sowohl von der Person des Glasmachers als auch von natürlichen Schwankungen bei den Rohstoffen und den täglich wechselnden Umwelteinflüssen auf Ofen und Glasschmelze abhängt, werden sich chargenweise Qualitätsunterschiede vermutlich nicht ganz vermeiden lassen. Vielmehr sollten sie dann als typische Eigenart dieses für die Denkmalpflege einzigartigen Spezialglases verstanden werden.

9. Danksagung

Dank gilt allen internen und externen Projektbeteiligten, die sich in unterschiedlicher Weise für das DBU-Forschungsprojekt stark gemacht und vorangetrieben haben.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Bellendorf (Otto-Friedrichs-Universität Bamberg), Dr. Ivo Rauch (Sachverständigenbüro Dr. Ivo Rauch, Koblenz) sowie Manfred Eisbein (Landesamt für Denkmalpflege Sachsen) für die Unterstützung bei der Initiierung des Förderprojekts.

Besonderer Dank gilt ebenfalls den projektbeteiligten Mitarbeiter*innen des Immobilienmanagements der Stadt Bamberg sowie der Bürgerspitalstiftung Bamberg für die Wertschätzung unserer Entwicklungsarbeit und die Bereitstellung der Klosterkirche St. Michael als Modellprojekt, namentlich Karin Hamper (Projektleiterin).

10. Fotoanhang



Abb. 1: Glasproben UV-IR-Kombinationsglas in Form mundgeblasener Glaszylinder



Abb. 2: UV-IR-Glastafeln nach dem Strecken der Glaszylinder



Abb. 3: Produktion von mundgeblasenem Flachglas in Neu-Antik-Technik



Abb. 4: Produktion von mundgeblasenem Flachglas in Echt-Antik-Technik



Abb. 5: Glasblasen in eine Holzform



Abb. 6: Echt-Antik-Ballons (hinten) und in Holzform geblasener Hohlkörper (vorn)



Abb. 7: Produktionscharge UV-IR-Glas vom 15.06.2023 als Rohglaszylinder



Abb. 8: UV-IR-Kombinationsglas vom 15.06.2023 als verwendbare flache Glastafel