

Anhang 1

Liste der behandelten Kirchenobjekte im Projekt

„Schutzverglasungen historischer Glasmalereien und Kunstverglasungen im Spannungsfeld von Denkmalpflege und energetischer Verbesserung von Baudenkmalern“

Kanton	Ort	Objektname	Baujahr
AG	Auenstein	Ev.-ref. Kirche	1832
AG	Baden	Ref. Kirche	1714
AG	Berikon	Kath. Kirche St. Mauritius	1858
AG	Birrwil	Ref. Kirche	1689
AG	Brittnau	Ref. Kirche	1585
AG	Densbüren	Ref. Kirche	1558
AG	Gontenschwil	Ref. Kirche	1622
AG	Kirchdorf	Kath. Kirche St. Peter und Paul	1678
AG	Königsfelden	Ehem. Klosterkirche	1330
AG	Leuggern	Kath. Kirche St. Peter und Paul	1853
AG	Märwil	Ev. Kirche	1884
AG	Rupperswil	Ev. Kirche	1920
AG	Schöftland	Ev. Ref. Kirche	1683
AG	Wettingen	Ref. Kirche	1939
AI	Appenzell	Klosterkirche des Kapuzinerklosters	1587
AR	Herisau	Pfarrhaus der Ref. Kirche	1910
AR	Rehetobel	Ev. Kirche	1669
BE	Aarberg	Ref. Kirche	1575
BE	Amsoldingen	Ref. Kirche	1000
BE	Belp	Ref. Kirche	1228
BE	Bern	Heiliggeistkirche	1720
BE	Bern	Kath. Kapelle St. Elisabeth des	1963
BE	Bern	Katholisch-Apostolische Kirche	um 1900?
BE	Bern	Münster	1421
BE	Biel	Stadtkirche	1470
BE	Interlaken	kath. Kirche	1908
BE	Münsingen	"Casino" der Psychiatrie	1895
BE	Münsingen	Ref. Kirche	1709
BE	Schlosswil	Kirche	1660
BL	Arlesheim	Dom zu Arlesheim	1681
BL	Oberdorf	Kath. Kirche	1976
BL	Sissach	Ref. Kirche	1525
BS	Basel	Kunstmuseum	1936
BS	Basel	St. Albankirche	1270 / 1845
FL	Eschen	Kirche St. Martin	1894
FL	Schaan	Karth. Kirche St. Laurentius	1893
FR	Fribourg	Eglise des Ursulines	1655
FR	Fribourg	Eglise Notre Dame / Liebfrauenkirche	1200
FR	Fribourg, Freiburg	Kathedrale, Cathédrale Saint Nicolas	1283
FR	Fribourg, Freiburg	St. Maurice	1300
FR	Marly	Eglise des Saints Pierre-et-Paul	1787
FR	Matran	Eglise St. Julien	1146
FR	Romont	Eglise des Capucins	1617
FR	Villaraboud	Eglise St. Laurent	1867

Kanton	Ort	Objektname	Baujahr
FR	Vuisternens-devant-Romont	Eglise Sainte-Marie	1825
GE	Bernex	Saint-Maurice	1865
GE	Genève	Saint-François-de-Sales, église catholique	1904
GE	Genf	Basilique Notre-Dame	1857
GE	Genf	Cathédrale Saint-Pierre	1250
GE	Saint-Gervais	Temple	1436
GR	Chur	Kathedrale	1150
GR	Chur	St. Martin	1491
GR	Disentis	Klosterkirche St. Martin	1712
GR	Zillis	Ev. Kirche	1114
GR	Zuoz	Ref. Kirche San Luzi	1507
JU	Bressaucourt	Eglise	1894
JU	Chevenez	Eglise paroissiale	1842
JU	Soubey	Eglise St. Valbert	1632
LU	Doppelschwand	St. Nikolaus	1864
LU	Eschenbach	Klosterkirche	1625
LU	Luzern	St. Paul	1912
LU	Neudorf	Kath. Kirche, St. Agatha	1678
NE	Neuchâtel	Collégiale	1276
OW	Engelberg	Klosterkirche	1737
OW	Melchtal	Kath. Kirche	1896
SG	Alt St. Johann	ref. Kirche	1861
SG	Au	Evangelisch-reformierte Kirche	1954
SG	Bad Ragaz	Kath. Kirche Maria Himmelfahrt	1704
SG	Ebnat	Ev. Kirche	1762
SG	Mols	Kath. Kirche	1600
SG	Montlingen	Kath. Kirche	1506
SG	Nesslau	Ev. Kirche	1811
SG	Neu St. Johann	Ehem. Klosterkirche Neu St. Johann	1680
SG	St. Gallen	Kath. Kirche St. Otmar	1908
SG	Waldkirch	Kath. Kirche St. Blasius	1487
SG	Wil	Kath. Kirche St. Peter	1460
SO	Balsthal	Pfarrkirche St. Marien	1914
SO	Biberist-Gerlafingen	Ref. Kirche, Thomaskirche	1910
SO	Oensingen	Reformierte Kirche, Pauluskirche	1937
SO	Olten	Kapuzinerkloster, Kirche	1648
SO	Olten	St. Martin	1910
SO	Olten	Stadtkirche	1813
SO	Schönenwerd	Schlösschen im Park der Villa Felsgarten	1865
SO	Solothurn	Kapelle Antoniushaus	1924
SO	Trimbach	Röm.-kath. Kirche St. Mauritius	1747
SZ	Arth	Kath. Kirche St. Georg und Zeno	1697
SZ	Gersau	Kath. Kirche St. Marzellus	1812
TG	Arbon	Kath. Kirche St. Martin	1490

Kanton	Ort	Objektname	Baujahr
TG	Bischofszell	Kath. Kirche St. Pelagius	1295
TG	Bischofszell	ref. Kirche	1969
TG	Erlen	St. Albankapelle	1764
TG	Fischingen	Klosterkirche Fischingen	1687
TG	Frauenfeld	Kath. Stadtkirche St. Nikolaus	1906
TG	Frauenfeld-Oberkirch	St. Laurentius	889
TG	Kesswil	Ev. Kirche	1629
TG	Sitterdorf	Kath. Kirche	1961
UR	Bristen	Kath. Kirche	1911
UR	Erstfeld	Kath. Kirche St. Ambros	1872
UR	Flüelen	Parrkirche Hez Jesu	1911
VD	Echallens	Eglise évangélique réformée	1865
VD	Grandson	Eglise St-Jean-Baptiste de Grandson	1150
VD	Lausanne	St. François	1270
VD	Saint-Loup	Chapelle de la Maison-mère des	1899
VS	Agettes	Eglise paroissiale des Agettes	1958
VS	Fiesch	Kath. Kirche	um 1500?
ZG	Baar	Kath. Kirche, St. Martin	1500
ZH	Albisrieden	Alte Ref. Kirche	1816
ZH	Altstetten	Ev.-ref. Kirche	1941
ZH	Benken	Ref. Kirche	1618
ZH	Bülach	Kath. Kirche	1902
ZH	Bülach	Ref. Kirche	1510
ZH	Dietlikon	Ref. Kirche	1698
ZH	Elgg	Ev. Kirche	1508
ZH	Kappel am Albis	Klosterkirche	1283
ZH	Langnau am Albis	Ref. Kirche	1711
ZH	Obfelden	Ref. Kirche	1848
ZH	Pfäffikon	Ref. Kirche	1488
ZH	Schlieren	Kath. Kirche St. Josef	1960
ZH	Stäfa	Kath. Kirche St. Verena	1948
ZH	Stäfa	Ref. Kirche	1688
ZH	Uster	Ref. Kirche	1828
ZH	Zürich	Fraumünster	874
ZH	Zürich	Friedenskirche	1900
ZH	Zürich	Haus Tödistrasse	1900
ZH	Zürich	Kapelle Klusplatz	um 1900?
ZH	Zürich	Kirche Bühl	1896
ZH	Zürich	Ref. Kirche St. Jakob	1901
ZH	Zürich	Ref. Kirche Unterstrass	1884
ZH	Zürich	Zwinglikirche	1923

Anhang 2

Bericht der Abteilung Bautechnologien der Empa Dübendorf

„Prüfbericht Nr. 5211-00258-100-01, Projekt Vitrocentre: Messungen und Berechnungen zum hygrothermischen Verhalten von Kunstverglasungen“

Vitrocentre Romont
Postfach 225
CH-1680 Romont**Prüfbericht Nr. 5211-00258-
100.01**

Prüfauftrag: **Projekt: Vitrocentre
Messungen und Berechnungen zum hyg-
rothermischen Verhalten von Kunstver-
glasungen**

Auftraggeber: Vitrocentre

Prüfobjekt: Kunstverglasung mit verschiedenen Schutz-
verglasungen

Kundenreferenz: Herr S. Trümpler / Frau S. Wolf

Ihr Auftrag vom: Mai 2012

Eingang des Prüfobjektes: November 2012

Ausführung der Prüfung: bis 19. September 2013

Anzahl Seiten: 26

Inhalt

- 1 Projektbescrieb
 - 2 Hot-Box Messungen
 - 3 U-Wert Berechnungen der Fenstersysteme
 - 4 U-Wert-Berechnung Fenstersystem mit Wandanteil
 - 5 Messungen in der Bewitterungskammer
 - 6 Messung der Spektrale Transmission und Reflexion
 - 7 Messung der Diffusionswiderstandszahl
- Anhang 1 : Beschreibung der Hot-Box (U-Wert Kammer)
- Anhang 2 : Kalibration des Prüfrahmens
- Anhang 3 : Bestimmen des Wasserdampf-Durchgangs

Dübendorf, 22.10.2013
Prüfleiter:

Abteilung Bautechnologien
Wärme- Feuchtelabor
Laborleiter :

B. Binder

Dr. K. Ghazi Wakili

1 Projektbeschreibung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes soll das hygrothermische Verhalten von Kunstgläser (aus Kirchen) alleine und in Kombination mit Schutzverglasungen und verschiedenen Zwischenräumen (dicht, belüftet, Grösse) untersucht werden. Dazu wurde ein Minimum an thermischen und hygrothermischen Messungen durchgeführt die als Referenz für darauffolgende Simulationen und Parameterstudien dienen. Das übergeordnete Ziel war die Quantifizierung der Energieeinsparung in Kirchen durch Anbringung von Schutzverglasungen. Allerdings sollte diese energietechnische Massnahme nicht zu Kondensationsschäden an den Kunstgläsern führen.

2 Hot-Box Messungen

Um den stationären Wärmedurchgang durch ein Baudetail pro Flächeneinheit und pro Grad Temperaturdifferenz bei definierten Wärmeübergangskoeffizienten zu bestimmen wird die sogenannte Hot-Box oder U-Wert Kammer eingesetzt. Die Spezifikationen der in diesem Projekt verwendeten Hot-Box sind im Anhang 1 zusammengefasst dargestellt.

2.1 Prüfkörper

Der U-Wert der folgenden Prüfkörper wurde gemessen:

- 2-IV Schutzverglasung
- Kunstglas mit 2-IV Schutzverglasung (Zwischenraum ZWR 39 mm, dicht) wobei dicht bedeutet dass die Aussenluft nicht in den Zwischenraum gelangen kann
- Kunstglas mit 2-IV Schutzverglasung (Zwischenraum 44 mm belüftet) wobei belüftet bedeutet, dass ein Luftwechsel zwischen Aussen und Zwischenraum über 2 Luftöffnungen unten und eine Luftöffnung oben(je 40 mm lang und 10 mm hoch) stattfinden kann

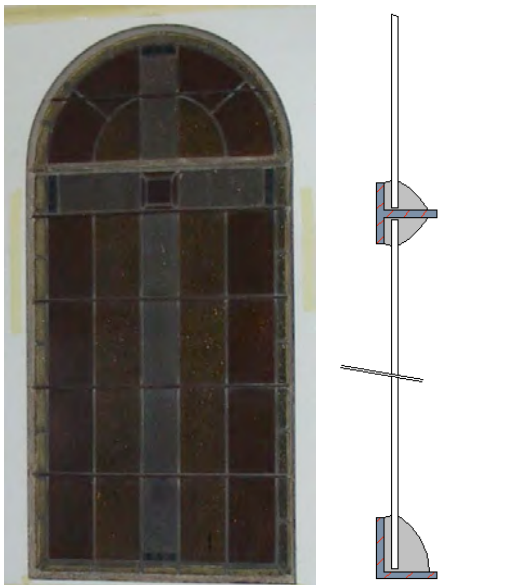
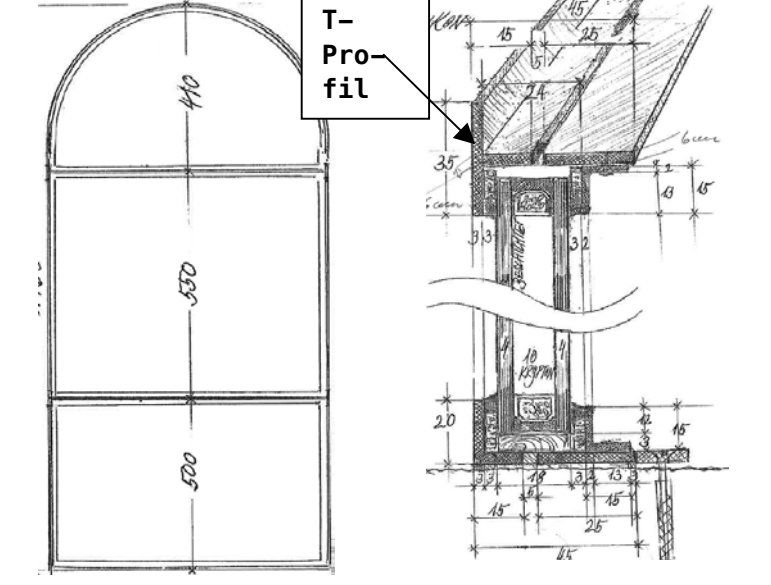
	
<p>Kunstglas h=1450 mm b= 716 mm Rahmen: L 25 x 25 x 3 Sprosse: T 25 x 25 x3</p>	<p>2-IV-Schutzverglasung Das T-Profil der Sprossen besteht aus zwei Winkel, der Steg ist effektiv 6 mm breit</p>

Abbildung 1: links ist das Kunstglas und rechts die 2-IV-Schutzverglasung

Abbildung 1 zeigt das Kunstglas (links) und die 2-IV Schutzverglasung (rechts) mit den entsprechenden Querschnitten. Ein Querschnitt des Fenstersystems Kunstglas mit 2-IV Schutzverglasung und Prüfraumen ist in der Abbildung 2 schematisch dargestellt.

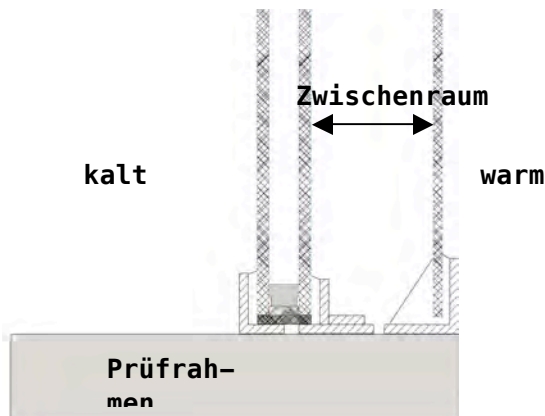


Abbildung 2: Kunstglas (rechts) mit 2-IV-Schutzverglasung.

2.2 Messeinrichtung, Prüfverfahren

2.2.1 Prüfraumen



Der Empa-Prüfraumen (Log-Nr. 1.1.21) mit einer Dicke von 150 mm und einer Prüföffnung von 1.23 m x 1.480 m (Breite x Höhe), wurde für die folgenden Messungen eingesetzt. Der Anteil des Wärmestromes das durch den Prüfraumen fliesst (Φ_{sur}) wurde mit Hilfe von Kalibriermessungen bestimmt (siehe Anhang 2). Um das Fenstersystem in den Rahmen stellen zu können wurde aus expandiertem Polystyrol (EPS) eine ergänzende Blende zusammengesetzt (Abbildung 3).

Abbildung 3: Ergänzung des Prüfraums mit ohne Prüfkörper

2.2.2 Formeln und Bezugsmasse für die U-Wert-Bestimmung

Der Wärmedurchgangskoeffizient U_F des Verglasungssystems wurde durch kalorimetrische Messung in der geschützten Prüfkammer (Hot-Box) der EMPA gemäss EN 12'412-2 bestimmt (Schnittzeichnung der Prüfeinrichtung siehe Anhang 1). Der lineare Randzuschlag für den Wärmestrom durch die Randzone zwischen Prüfraumen und Fensterrahmen wurde mit 2D-Rechnung numerisch bestimmt. Der Wärmedurchgangskoeffizient U_F der Rahmenprofile wurde nach folgenden Formeln berechnet:

$$U_F = \frac{(\Phi_{in} - \Phi_{sur} - \Phi_{edge} - \Phi_{fill})}{\Delta T_n \cdot A_F}; \quad \text{und} \quad \Phi_{Bl} = A_{Bl} \cdot \Lambda_{Bl} \cdot \Delta T_{s, Bl} \quad \text{und} \quad \Lambda_{Bl} = \lambda_{Bl} / d_{Bl}$$

wobei:

- U_F = Verglasung U-Wert [W/ m²K]
- Φ_{in} = zugeführte Heizleistung [W]
- Φ_{sur} = Wärmestrom durch den Prüfraumen [W]

Φ_{edge} = Wärmestrom durch die Randzone zw. Prüfraumen und Blende [W]

ΔT_n = Umgebungstemperaturdifferenz [K] = $\theta_{ni} - \theta_{ne}$

A_{tot} = totale Prüföffnungsfläche des Prüfraumens = 1.480 m x 1.230 m =
1.820 m²

A_F = totale Fläche der Verglasung = 0.983 m²

A_{Bl} = Fläche der Blende $A_{\text{Bl}} = A_{\text{tot}} - A_F = 1.820 - 0.983 = 1.147$ [m²]

Λ_{Bl} = Wärmedurchlasskoeffizient der Blende [W/ m²K]

D_{Bl} = Dicke der Füllelemente = 0.040 [m]

$\Delta T_{s,\text{Bl}}$ = Oberflächentemperaturdifferenz der Blende [K]

Die angewandte Messmethode wurde gemäss EN 12412-2 (Juli 2003) und gemäss der Empa SOP-Nr. 305.201 durchgeführt.

2.3 Messbedingungen

2.3.1 Einbau der Verglasung in die Prüfkammer

Die Verglasungssysteme wurden in den erwähnten Prüfraumen eingebaut. Der Prüfraum wurde wie oben erwähnt mit einer EPS-Blende ergänzt die eine Öffnung entsprechend dem Verglasungssystem aufweist. Die Berührstellen Prüfkörper/Blende und Blende/Prüfraum wurden mit Klebband luftdicht zugeklebt. Zur Ermittlung der Leibungstemperaturen wurden warm- und kaltseitig je 4 Messstellen in der Mitte der nach Prüfkörper einbau verbleibenden, begrenzenden Flächen angeordnet.

Die Temperatur-Messfühler auf den Leitblechen, im Prüfraum sowie die Lufttemperatur-Messstellen sind gemäss der Norm EN 12412-2: 2003 (D) angeordnet, wobei der Abstand zwischen Prüfraum und Leitblech warmseitig und kaltseitig beide exakt 150 mm beträgt.

2.3.2 Berücksichtigung des Randzonenwärmestromes Φ_{edge}

Der Wärmeverlust durch die Randzone zwischen Prüfraumergänzung und Fenstersystem (Prüfobjekt) wird auf die Umfangslänge der Prüfraumöffnung L_{edge} bezogen. Dieser lineare Randverlust Psi-Einbau wurde für jede einzelne Einbausituation anhand einer 2D-Rechnungen mit dem Programm BISCO numerisch bestimmt. Weil das Messprogramm der Messapparatur für rechteckige Prüfkörper ausgelegt ist wird bei flächentreuem Rechteck die Fensterrandlänge zu lang. Der Psi-Einbau muss um den Faktor der Längenverhältnisse korrigiert werden. Der Umfang des flächentreuen Rechteckes ist $L_r = 4.18$ m und der effektive Umfang ist $L_e = 4.02$ m, daraus ergibt sich ein Korrekturfaktor = 0.96.

Messung	2-IV-Verglasung	Kunstglas + 2-IV dicht	Kunstglas + 2-IV belüftet
Psi-Einbau	0.018 (W/m ² K)	0.018 (W/m ² K)	0.017 (W/m ² K)

Tabelle 1: Durch numerische Berechnung bestimmte und im Messprogramm eingesetzt Psi-Einbau-Werte

2.3.3 Luftgeschwindigkeit und Luftdruck

Der Wärmedurchgangskoeffizient U wurde beim vorhandenen Luftdruck und den in den Messwerten ausgewiesenen Luftgeschwindigkeitswerten für einen totalen Wärmeübergangswiderstand von circa $0.17 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ bestimmt. Die Werte der Kalibrierung sind im Anhang 2 oberstes Bild dargestellt.

$$R_{s,\text{total}} = R_{s,i} + R_{s,e}$$

2.4 Ergebnisse der Messungen

Die verwendeten Eingaben zur Bestimmung des U-Wertes sind in den Tabellen 2 (Prüfeinrichtung) und 3 (Rohdaten) zusammengefasst. Aus diesen wird der gemessene U-Wert bestimmt (Tabelle 4).

2.4.1 Prüfkammer- und Prüfkörpergrössen

Grösse	Einheit	2-IV	2-IV+KG dicht	2-IV+KG bel.
d kaltseitige Leibungstiefe	m	0.551	0.000	0.000
d _{sur} Dicke Prüfraumen	m	0.150	0.150	0.150
D _{pk} Dicke Prüfkörper	m	0.045	0.070	0.070
A _w Gesamtfläche Prüfkörper	m ²	1.373	1.373	1.373
A _{sur} Fläche Prüfraumen	m ²	3.195	3.195	3.195
L Randlänge der Prüfkörperöffnung	m	4.178	4.178	4.178

Tabelle 2: Die Dimensionen der Prüfeinrichtung für die Auswertung der U-Wert Prüfungen

2.4.2 Temperatur und Heizleistungsmesswerte

Messgrösse		Messwerte		
		2-IV	2-IV+KG dicht	2-IV+KG bel.
Lufttemperatur warmseitig θ_{ci}	°C	17.30	17.25	17.31
Oberflächentemperaturen warmseitig				
- Leitblech $\theta_{si, b}$	°C	16.77	16.78	16.81
- Leibung $\theta_{si, p}$	°C	16.23	16.19	16.09
- Prüfraumen $\theta_{si, sur}$	°C	16.35	16.34	16.39
- Blende $\theta_{si, fi}$	°C	16.70	16.60	16.70
Lufttemperatur kaltseitig θ_{ce}	°C	3.02	3.01	3.03
Oberflächentemperaturen kaltseitig				
- Leitblech $\theta_{se, b}$	°C	3.10	3.07	3.09
- Leibung $\theta_{se, p}$	°C	3.39	3.30	3.31
- Prüfraumen $\theta_{se, sur}$	°C	3.48	3.47	3.48
- Blende $\theta_{se, fi}$	°C	3.20	3.18	3.19
gemessene Heizleistung ϕ_{in}	W	44.35	34.38	35.71
Luftgeschwindigkeit warmseitig v_i	m/s	0.17	0.17	0.17
Luftgeschwindigkeit kaltseitig v_e	m/s	1.62	1.63	1.65

Tabelle 3: Die gemessenen Rohdaten der U-Wert Prüfung

2.5 Berechnungswerte zur Bestimmung des Prüfkörperwärmedurchgangskoeffizienten

Datenelement		2-IV	2-IV+KG dicht	2-IV+KG belk.
Mittlere Temperatur Prüfrahmen $\theta_{sur, me}$	°C	9.92	9.90	9.94
Temperaturdifferenz Prüfrahmen	K	12.86	12.87	12.92
Wärmedurchlasswiderstand Prüfrahmen R_{sur}	m ² K/W	3.876	3.876	3.876
Leitfähigkeit des Prüfrahmens λ_{sur}	W/mK	0.035	0.035	0.035
längenbezogener Wärmedurchgangskoeff. zwischen Prüfkörper und Prüfrahmen Ψ_{edge}	W/mK	0.0180	0.018	0.017
Umfangslänge L Prüfrahmen	m	4.178	4.178	4.178
Mittlere Temperatur der Blende	°C	9.947	9.898	9.938
Temperaturdifferenz des Blende	K	13.50	13.44	13.49
Lambda der Blende bei T _m °C	W/(mK)	0.033	0.033	0.033
Lufttemperaturdifferenz	K	14.28	14.24	14.28
gemessene Heizleistung Φ_{in}	W	44.35	34.38	35.71
Wärmestrom durch den Prüfrahmen Φ_{sur}	W	10.604	10.611	10.647
Wärmestrom durch die Randzone zwischen Prüfkörper und Prüfrahmen Φ_{edge}	W	1.07	1.07	1.01
Nettowärmestromdichte durch Blende + Prüfkörper q_t	W/ m ²	33.23	23.09	24.46
Konvektiver Anteil Warmseite F_{ci} (Anhang 2)	-	0.483	0.465	0.468
Konvektiver Anteil Kaltseite F_{ce} (Anhang 2)	-	0.798	0.800	0.800
Wärmedurchgangskoeffizient von Dämmstofffüllung und Rahmen $U_{m,t}$	W/(m ² K)	2.38	1.65	1.75
Nettowärmestrom durch die Blende Φ_{fill}	W	2.477	2.466	2.476
Nettowärmestrom durch Verglasung $\Phi_{Vergl.}$	W	30.19	20.23	21.57
Gesamtwärmeübergangswiderstand $R_{s, tot}$	m ² K/W	0.169	0.170	0.170
Strahlungstemperatur warmseitig θ_{ri}	°C	16.77	16.78	16.81
Strahlungstemperatur kaltseitig θ_{re}	°C	3.12	3.10	3.11
Umgebungstemperatur warmseitig θ_{ni}	°C	17.03	17.00	16.81
Umgebungstemperatur kaltseitig θ_{ne}	°C	30.4	3.03	3.04
Umgebungstemperaturdifferenz θ_{ni}	°C	13.98	13.97	17.05
Prüfkörperfläche innen	m ²	0.983	0.983	0.983
U-Wert $U_{Wand, m}$	W/(m²K)	2.20	1.47	1.57
Messunsicherheit $\Delta U_{Wand, m}$	W/(m²K)	0.11	0.07	0.08

Tabelle 4: Resultate der U-Wertbestimmung

3 U-Wert Berechnungen der Fenstersysteme

Die folgenden Berechnungen sind als Ergänzung und Weiterführung der vorangehenden Messresultate zu verstehen. Dabei werden die Messungen mit Hilfe von numerischen Methoden simuliert, die Resultate der beiden miteinander verglichen und falls notwendig angepasst um Parameterstudien dh. Interpolationen wie auch Extrapolationen zu ermöglichen. In anderen Worten Die Simulation wird mit Hilfe der Messung kalibriert und danach für beliebig veränderte Parameter wiederholt. Somit wird die Zahl der notwendigen Messungen für eine umfangreiche und plausible Aussage minimiert.

3.1 Berechnungsverfahren

Die numerischen Berechnungen wurden gemäss EMPA SOP 305.601 mit Hilfe des PC-Programms TRISCO Version 11.0w durchgeführt. TRISCO ist ein Programm zur Berechnung der dreidimensionalen stationären Wärmeströmung mittels einer Energiebilanzmethode.

Das iterative Rechenverfahren erfüllt die in EN ISO 10211-1 angegebenen allgemeinen Grundsätze und Anforderungen.

3.2 3D-Modellierung

Das Prüfobjekt ist ein Kirchenfenster mit rundem Oberteil. Um die Eingabeobjekte für das Berechnungsprogramm TRISCO modellieren zu können, wurden folgende Vereinfachungen gemacht:

Da das Eingaberaster rechtwinkelig ist, d.h. nur Geradenstücke zulässt, wurden alle Kreise durch ein Quadrat approximiert. Die Seitenlänge des Quadrats ist der Mittelwert der Seitenlänge eines dem Kreis flächengleichen, und der Seitenlänge eines, mit dem Kreis umfanggleichen, Quadrats.

Das oben bogenförmige Kirchenfenster wurde rechteckig modelliert. Die Höhe des modellierten Rechteckfensters wurde so bestimmt, dass der in der Berechnung verwendete Umfang des Glasrahmens dem effektiven Umfang entspricht. Weil der wesentliche Anteil des Wärmeflusses durch den Bereich Fensterrahmen/Glasrand fließt wurde für die Modellrechnung ein rechteckiges Fenster gewählt dessen Rahmenumfang gleich ist wie die des Kirchenfensters. Für den Vergleich des U-wertes von Messung und Modellrechnung muss der gerechnete U-Wert um den unterschiedlichen Glasanteil mit folgender Formel korrigiert werden:

$$U' = \frac{Q^{3D} + U_{GL} \cdot (A_{\text{effektiv}} - A_{\text{Modell}}) \cdot \Delta T}{A_{\text{effektiv}} \cdot \Delta T}$$

Q^{3D} : Wärmefluss (W)

A_{effektiv} : effektive Fenstersystemfläche (m²)

A_{Modell} : Fenstersystemfläche Trisco-Modell (m²)

U_{GL} : U-Wert Glasbereich (W/(m²·K))

ΔT : Temperaturdifferenz Lufttemperatur

Die Modellierung sowie die Unterteilung der Gitterpunkte entsprechen den Anforderungen der EN ISO 10211-1.

3.3 Modell

Aus Gründen der vertikalen Symmetrie und um unnötigen Rechenaufwand zu sparen wurde nur das halbe Fenster modelliert: Breite = 0.358 (Modell halbes Fenster) Höhe = 1.2963 m

Modelliert wurden die folgenden Situationen:

- Kunstverglasung allein
- Kunstverglasung mit EV-Schutzverglasung dicht und belüftet
- Kunstverglasung mit 2-IV-Schutzverglasung dicht und belüftet

Als EV-Schutzverglasung wurde ein 4 mm dickes Floatglas für die Berechnungen eingesetzt.

Als 2-IV-Verglasung wurde ein Doppelglas: 4/10/4 mm mit einem U-Wert von $U_{Gl}=1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem Abstandhalter ACS plus (Kunststoff) in der Rechnung berücksichtigt.

Der jeweilige Zwischenraum wurde mit 40, 100 und 120 mm und für den Vergleich mit den Messungen mit 39 und 44 mm in den entsprechenden Simulationen berücksichtigt.

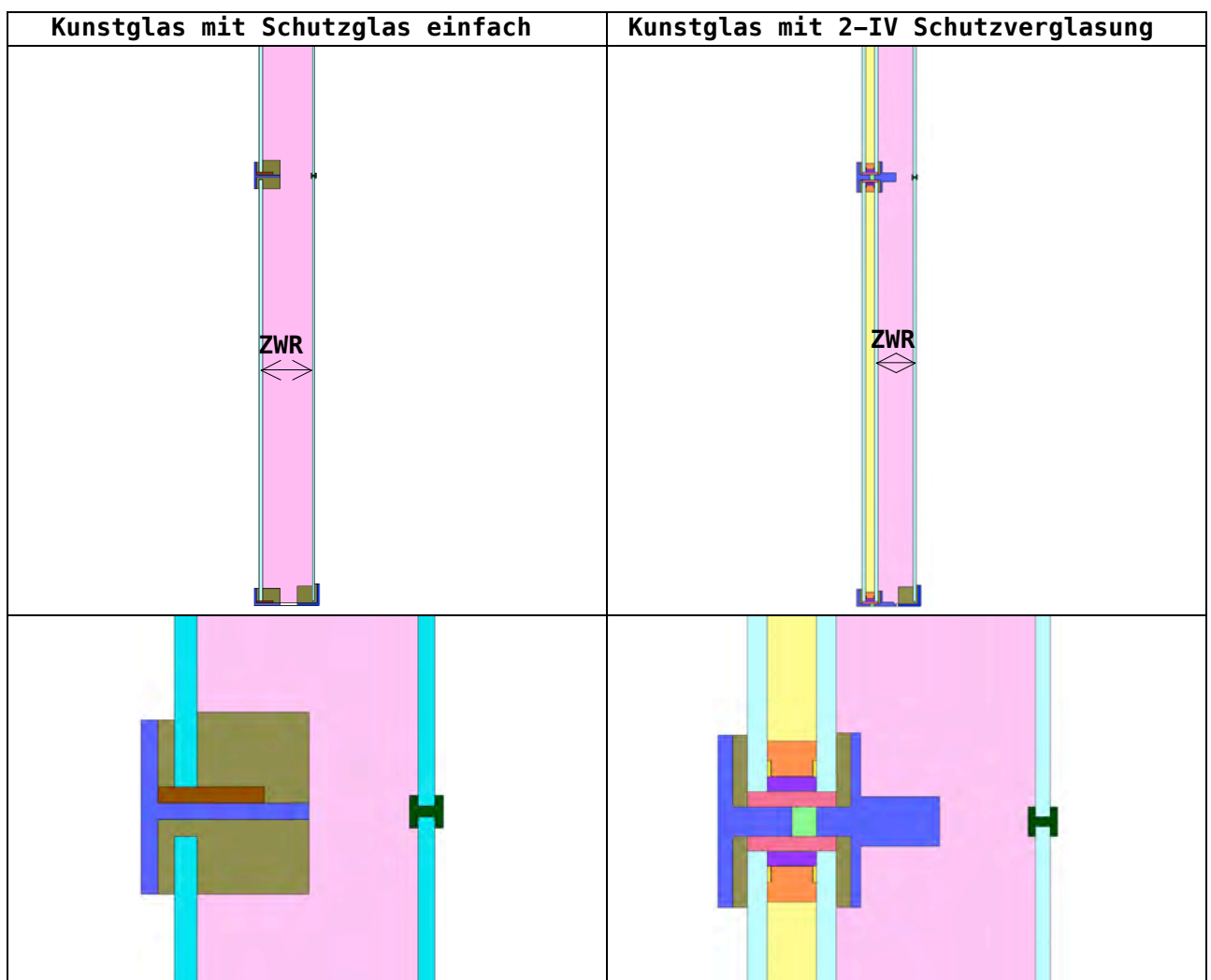


Abbildung 4: Vertikalschnitte durch die Verglasungssysteme, links Schutzverglasung einfach mit Kunstglas, rechts 2-IV Schutzverglasung mit Kunstverglasung. Der Zwischenraum ZWR wurde variiert (Dicht, belüftet, Breite)

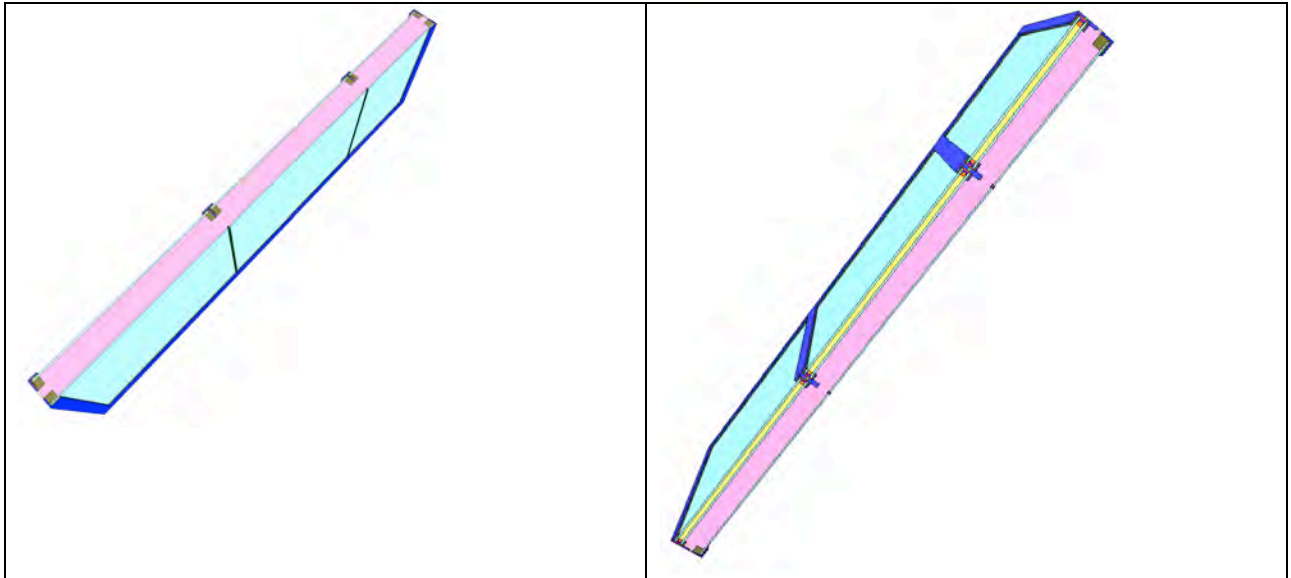


Abbildung 5: Isometrische Abbildung der beiden 3D-Modelle aus Abbildung 4.

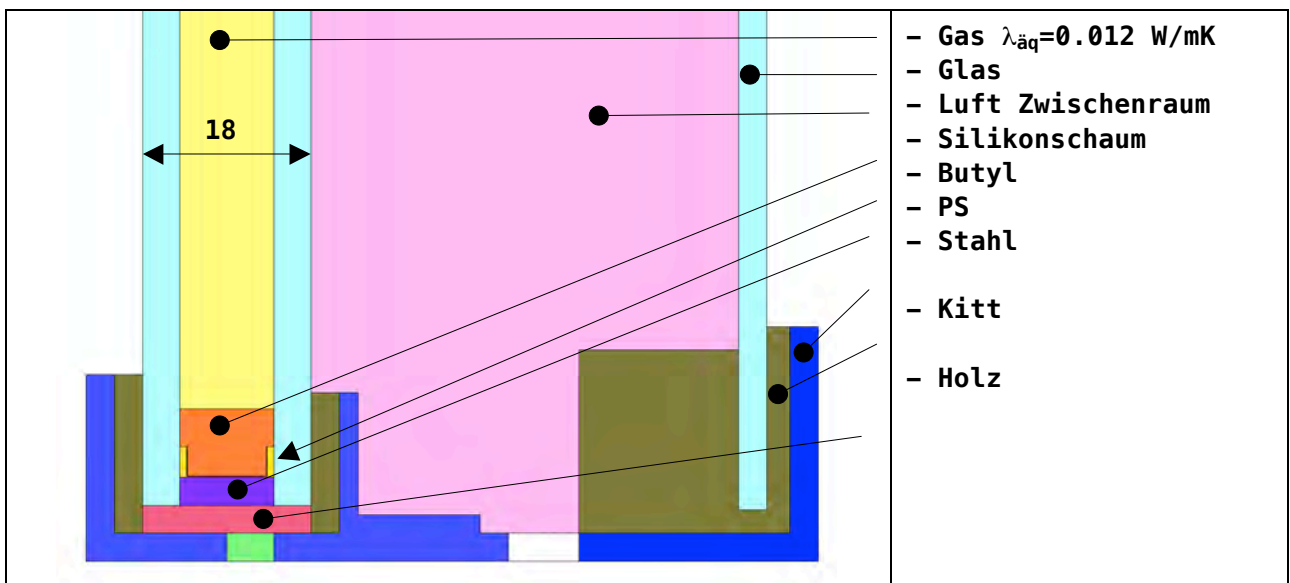


Abbildung 6: Modelliertes Verglasungssystem, links die 2-IV-Verglasung mit $U_{\text{Gl}} = 1.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ und Abstandhalter „ACS plus Spacer“, rechts die Kunstverglasung.

3.4 Materialkennwerte und Randbedingungen

Für die Berechnung des stationären Wärmedurchganges werden zusätzlich zum obigen geometrischen Modell die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialien sowie die klimatischen Randbedingungen auf der warmen und der kalten Seite benötigt. Diese wurden aus Normen und Literatur entnommen und sind in den Tabellen 5 und 6 zusammengefasst.

Material	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m ² K)]
Eisen / Stahl	7860	50
Blei	11000	35
Glas	1400	1
Kitt	-	0.3
Gasfüllung $\lambda_{\text{äq}}$	-	0.012
Silikonschaum	-	0.16
Milarfolie	-	1.1
PS	-	0.4
Butyp	-	0.2
Glasauflager Holz	-	0.14
Luft: - Hohlräume	Die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten der Luft-Hohlräume wurden anhand ihrer Geometrie mit Hilfe der Norm EN ISO 10077 Teil 2 berechnet.	

Tabelle 5: Materialkennwerte für die verwendeten Materialien

Randbedingung	Lufttemperatur [°C]	Wärmeübergangskoeff. [W/(m ² K)]
kaltseitig	0	25
warmseitig	20	7.7

Tabelle 6: Randbedingungen in der Modellrechnung: Lufttemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten kalt- und warmseitig.

3.5 U-Wert Vergleich Rechnung / Messung

Der Vergleich zwischen Rechnung und Messung (siehe Tabelle 7) weist auf eine genügende Übereinstimmung wenn man die Messunsicherheit von 5% und die nicht-idealen Kontakte zwischen den Materialien in der Realität und den idealen Verbindungen in den Berechnungen berücksichtigt. Vor allem der Luftaustausch für die belüfteten Zwischenräume. Da keine fluiddynamische Berechnungen sondern Approximationen basierend auf EN ISO 10077-2 in die Rechnung eingegangen sind, kann die Kalibration der Rechnung mit Hilfe der Messungen als erfolgreich bezeichnet werden.

Verglasungssystem	2-IV dicht (W/m ² K)	2-IV belüftet (W/m ² K)	IV (W/m ² K)
3D-Modellrechnung	1.63	1.89	2.16
3D-Modellrechnung mit Flächenkorrektur	1.58	1.73	2.10
Messung	1.47	1.57	2.20

2-IV dicht : Kunstglas mit 2-IV-Verglasung, Luftzwischenraum dicht ZWR = 39 mm

2-IV- belüftet : Kunstglas mit 2-IV-Verglasung, Luftzwischenraum belüftet ZWR = 44

2-IV : 2-IV-Verglasung für die Kontrolle Messung / Modellrechnung

Tabelle 7: Zusammenfassung der Vergleiche der Messung und Rechnung

3.6 U-Werte Modellrechnungen

Resultate der rechnerischen Parameterstudie wobei die beiden Schutzverglasungen EV und 2-IV mit verschiedenen ZWR Breiten und Belüftung verglichen werden, sind in der Tabelle 8 zusammengefasst.

Die berechneten U-Werte beziehen sich auf das berechnete rechteckige Fenster mit Umfang wie das gemessene Fenster.

Fall	System	ZWR [mm]	ZWR dicht	ZWR belüftet	U _w -Wert [W/m ² K]	U _w -Wert Mess. [W/m ² K]
TB1	Kunstverglasung				5.8	
TB2a	Kunstverglasung + EV	40	x		3.1	
TB2b	Kunstverglasung + EV	40		x	3.9	
TB4a	Kunstverglasung + 2-IV	40	x		1.6	
TB4b	Kunstverglasung + 2-IV	40		x	1.8	
TB5a	Kunstverglasung + EV	100	x		2.8	
TB5b	Kunstverglasung + EV	100		x	3.8	
TB5c	Kunstverglasung + 2-IV	100	x		1.5	
TB5d	Kunstverglasung + 2-IV	100		x	1.8	
TB3a	Kunstverglasung + EV	120	x		2.9	
TB3b	Kunstverglasung + EV	120		x	3.8	
TB4c	Kunstverglasung + 2-IV	120	x		1.5	
TB4d	Kunstverglasung + 2-IV	120		x	1.8	

Tabelle 8: Zusammenfassung der stationären thermischen Berechnungen und Messungen.

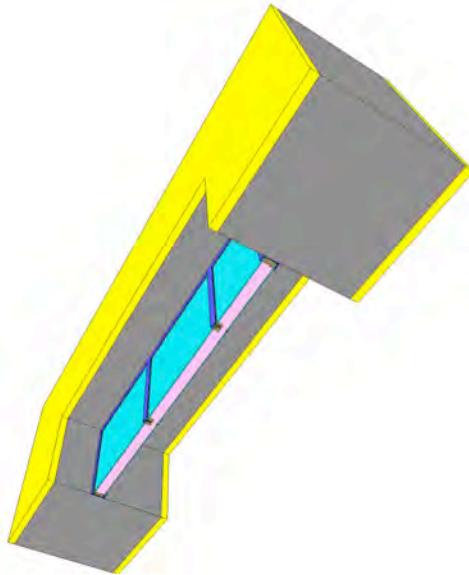
4 U-Wert-Berechnung Fenstersystem mit Wandanteil

Zur Abschätzung des energetischen Einflusses des Fenstersystems auf den Gesamt-U-Wert der Kirchenfassade wurden die verschiedenen Fenstersysteme mit zwei verschiedenen Flächenanteilen Glas zu Wand A_W/A_{Wand} von 15% und 25% nochmals dreidimensional berechnet. Für die Fassade wurden zwei Bruchsteinwände mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten verwendet um auch den Einfluss dieses Faktors zu quantifizieren.

4.1 Berechnungsverfahren

Die numerischen Berechnungen wurden wie in 3.1 beschrieben durchgeführt.

4.2 Angaben zu den Prüfobjekten



steinwand

Das Modell des Fenstersystems wurde in eine 60 cm dicke Wand platziert. Das Wandstück ist 50 cm Dicht und umgibt das Fenstersystem vollständig und gleichmässig von allen Seiten. Auch hier wurde die Spiegelsymmetrie zur Reduzierung des Rechenaufwandes ausgenutzt. Diese Wand besteht aus 54 cm Bruchsteinen, und 3 cm Kalksteinputz beidseitig. Das Fenstersystem ist von der Warmseite her 30 cm in die Leibung versetzt. Für die Wärmeleitfähigkeit der Bruchsteinwand wurden zwei Werte eingesetzt siehe Tabelle 9.

Abbildung 7: 3D-Modell des Fenstersystems mit 2-IV Schutzverglasung in der verputzten Bruch-

	Dicke mm	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
Wand	600	
Steinwand	540	1.5 / 2.1
Kalkmörtel	30	0.87

Tabelle 9: Abmessungen und Eigenschaften der Wandmaterialien

	Höhe (m)	Breite (m)	Fläche m ²
Wand mit Fenstersystem	2.2963	0.858	1.970
Fenstersystem	1.2963	0.358	0.464

Tabelle 10: Modellflächen

4.3 Berechnungen

$$U_{\text{Total}} = \frac{U_{\text{Wand}} \cdot A_{\text{Wand}} + U_{\text{w}} \cdot A_{\text{w}} + l \cdot \psi}{A_{\text{Total}}}$$

U_{Wand} : U-Wert Wand [W/(m²·K)]

U_{w} : U-Wert Fenster [W/(m²·K)]

ψ : lineare Wärmebrückenzuschlag Psi-Einbau [W/m·K]

l_{g} : Fensterrahmenumfang (Länge Psi-Einbau) [m]

Flächenverhältnisse Fenster/Wand:

$$\frac{A_{\text{w}}}{A_{\text{Wand}}} = f = 25\% \quad \text{bzw} \quad 15\%$$

Das Verhältnis vom Rahmenumfang zur Fensterfläche bleibt unverändert:

$$\frac{l_{\text{g}}}{A_{\text{w}}} = k = 0.6$$

U_{Total} gegeben durch das Flächenverhältnis Fensterflächen zu Wandflächen:

$$U_{\text{Total}} = \frac{U_{\text{Wand}} + U_{\text{w}} \cdot f + k \cdot \psi}{f + 1}$$

4.4 Resultate

Fensteranteil %			15	15	25	25
Wärmeleitfähigkeit Wand [W/mK]			1.5	2.1	1.5	2.1
Fenstersystem		ZWR [mm]	U Total [W/m ² K]			
EV	dicht	40	1.89	2.20	2.01	2.30
EV	belüftet	40	2.00	2.31	2.17	2.46
2-IV	dicht	40	1.70	2.01	1.71	2.00
2-IV	belüftet	40	1.76	2.03	1.81	2.04
EV	dicht	100	1.86	2.16	1.96	2.24
EV	belüftet	100	1.97	2.28	2.14	2.42
2-IV	dicht	100	1.69	2.00	1.70	1.99
2-IV	belüftet	100	1.73	2.04	1.76	2.05

Tabelle 11: Zusammenstellung der berechneten U-Werte aus Modellen mit verschiedene Fenstersystemen, Wänden und Fenster-Wand Anteilen.

5 Messungen in der Bewitterungskammer

Die vorangehenden Messungen in der Hot-Box sind rein thermische Untersuchungen und geben keine Auskunft über die Feuchteverteilung und den Einfluss der Randbedingungen darauf. Aus diesem Grund wurden ausführliche Messungen der verschiedenen Fenstersysteme in der Bewitterungskammer der Empa gemacht worden. Eine schematische Darstellung der Messsituation ist in der Abbildung 8 dargestellt. Die Aussenluft (Temperatur und Feuchte) wird in der Bewitterungskammer eingestellt. Da aber die Laborbedingungen in der Grossen Halle in der die Klimakammer steht auf $T = 20^{\circ}\text{C}$ und $rF = 50\%$ eingestellt ist, musste die Warmseite der Klimakammer hermetisch vom Laborklima getrennt werden um reale Temperatur- und Feuchtigkeitswerte des Kircheninnern zu simulieren.

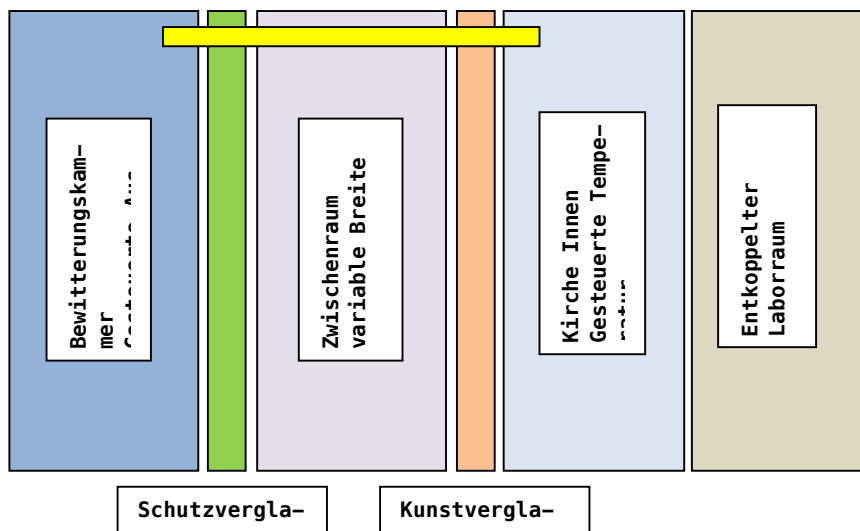


Abbildung 8: Schematische (nicht massstäbliche) Darstellung der Prüfung von Fenstersystemen in der Bewitterungskammer. Der Querbalken (gelb) bedeutet eine Verbindung zwischen Aussenluft und die Innenluft der Kirche (keine Verbindung zum Zwischenraum).

Der Querbalken in der Figur 8 (gelb) bedeutet eine Verbindung zur Aussenluft um die Innenluft der Kirche um 17 bis 18 °C d.h. unterhalb von der Labortemperatur (25°C) regulieren zu können. Dabei wurde ein Ventilator so geregelt dass die erwünschte Innenluft in der Kirche zu erhalten. Die Resultate der Messungen sind in den folgenden 4 Abbildungen zusammengefasst. Am Schluss sind die einzelnen Phasen und deren Parameter für alle drei untersuchten Konfigurationen zahlenmässig zusammengefasst.

Konfiguration 1: 2-IV Schutzverglasung + 3 cm Zwischenraum + Kunstverglasung

Konfiguration 2: EV Einzel-Schutzverglasung + 3 cm Zwischenraum + Kunstverglasung

Konfiguration 3: EV Einzel-Schutzverglasung + 10 cm Zwischenraum + Kunstverglasung

5.1 Kunstverglasung mit 2-IV und 3cm Zwischenraum

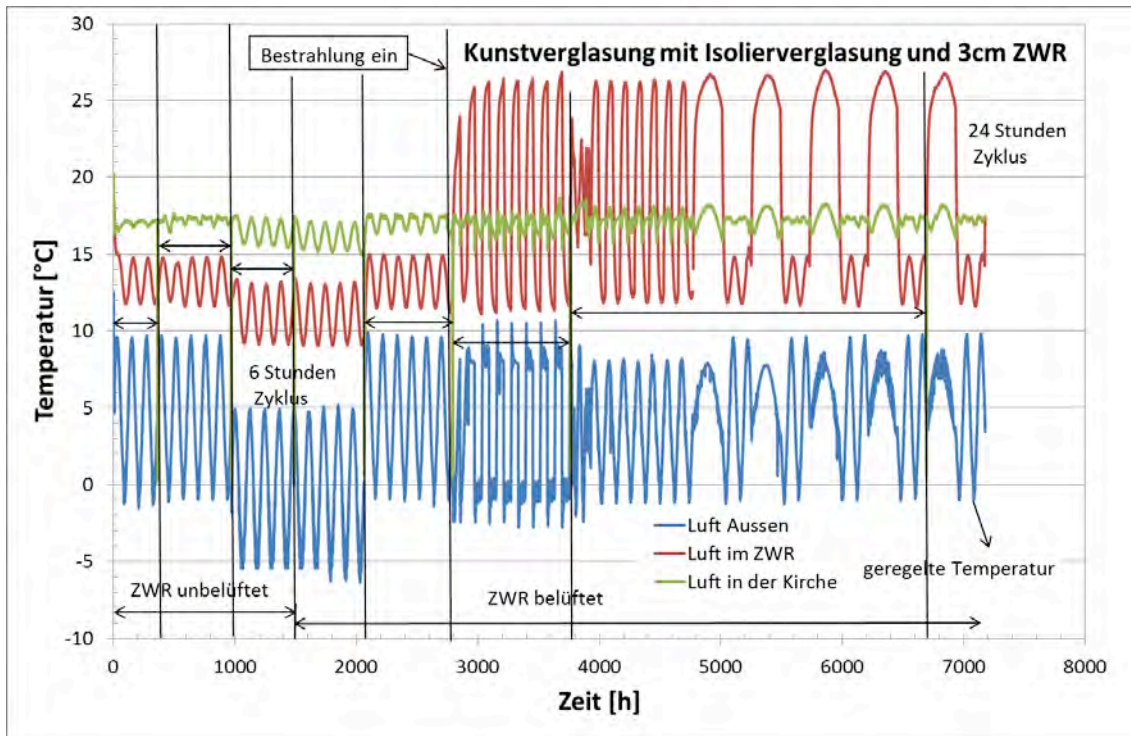


Abbildung 9: Gemessene Lufttemperatur in den drei Zonen: Aussen, Zwischenraum und Innen für das Fenstersystem 2-IV + 3 cm ZWR + Kunstverglasung.

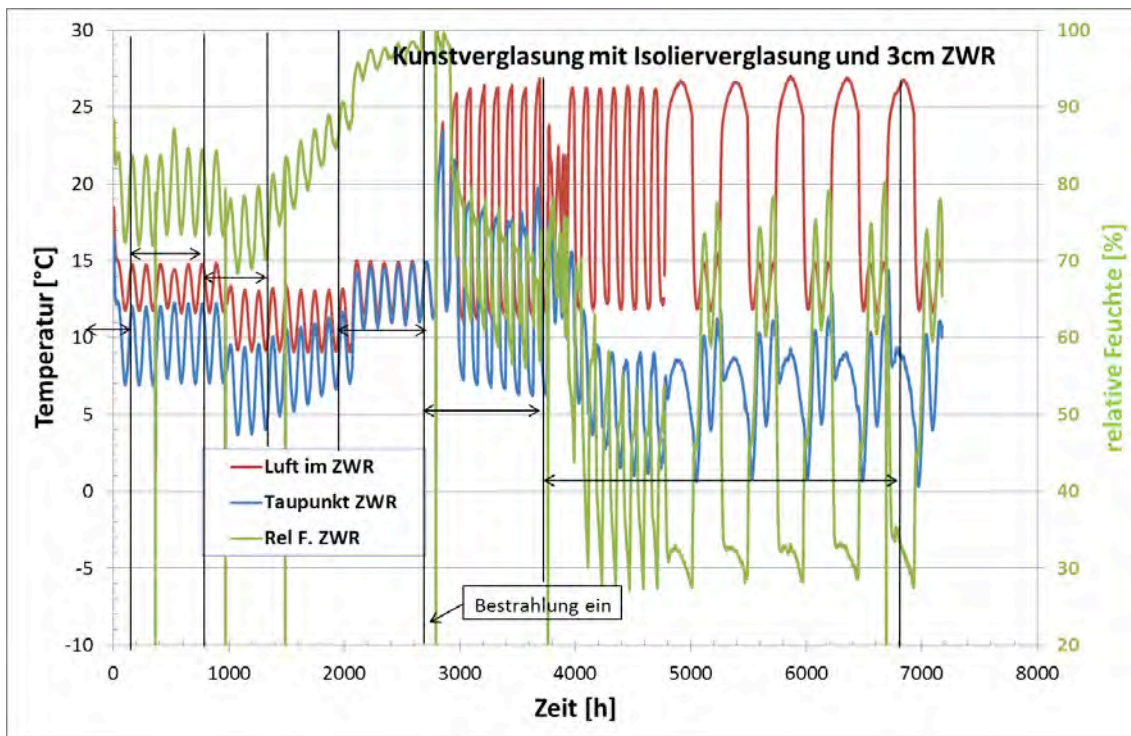


Abbildung 10: Gemessene Lufttemperatur, Luftfeuchte und sich ergebender Taupunkt im Zwischenraum für das Fenstersystem 2-IV + 3 cm ZWR + Kunstverglasung.

5.2 Kunstverglasung mit EV und 3cm Zwischenraum

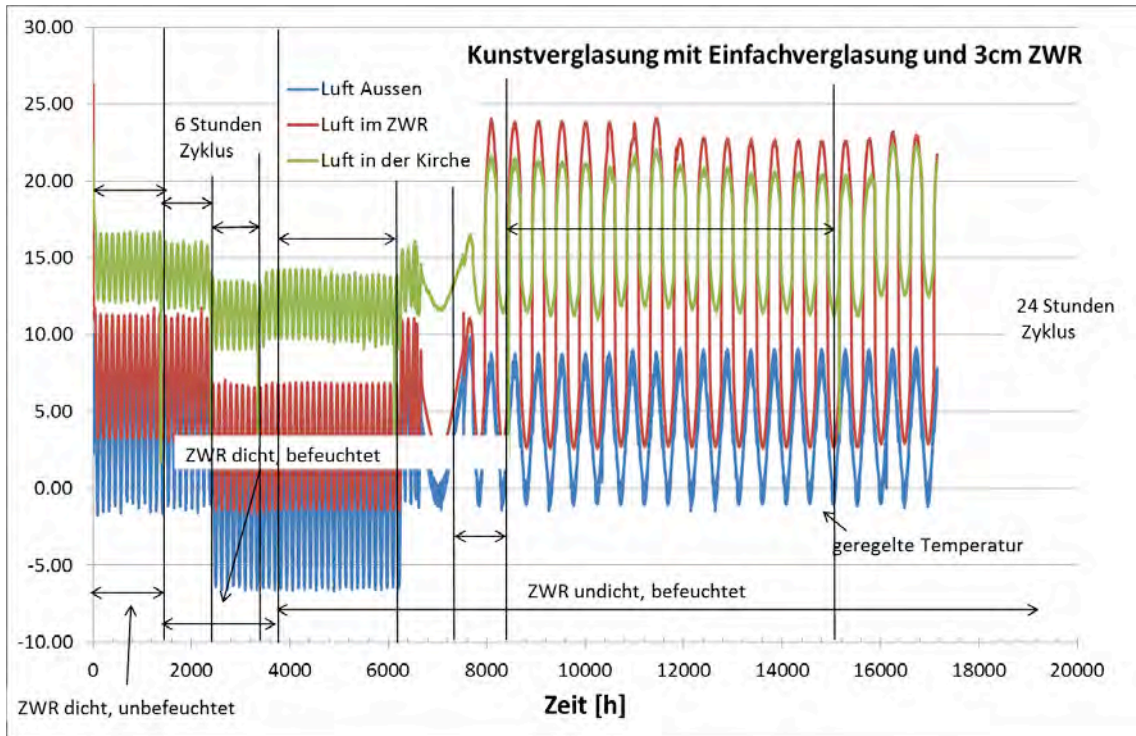


Abbildung 11: Gemessene Lufttemperatur in den drei Zonen: Aussen, Zwischenraum und Innen für das Fenstersystem EV + 3 cm ZWR + Kunstverglasung.

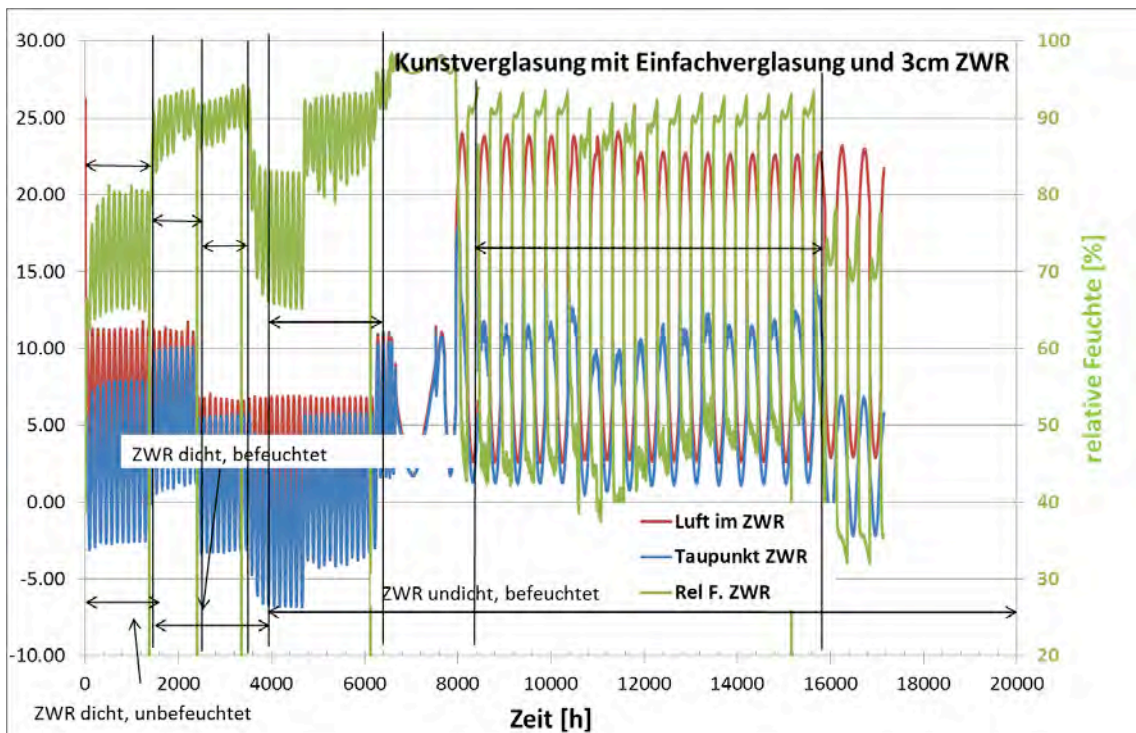


Abbildung 12: Gemessene Lufttemperatur, Luftfeuchte und sich ergebender Taupunkt im Zwischenraum für das Fenstersystem EV + 3 cm ZWR + Kunstverglasung.

5.3 Kunstverglasung mit EV und 10cm Zwischenraum

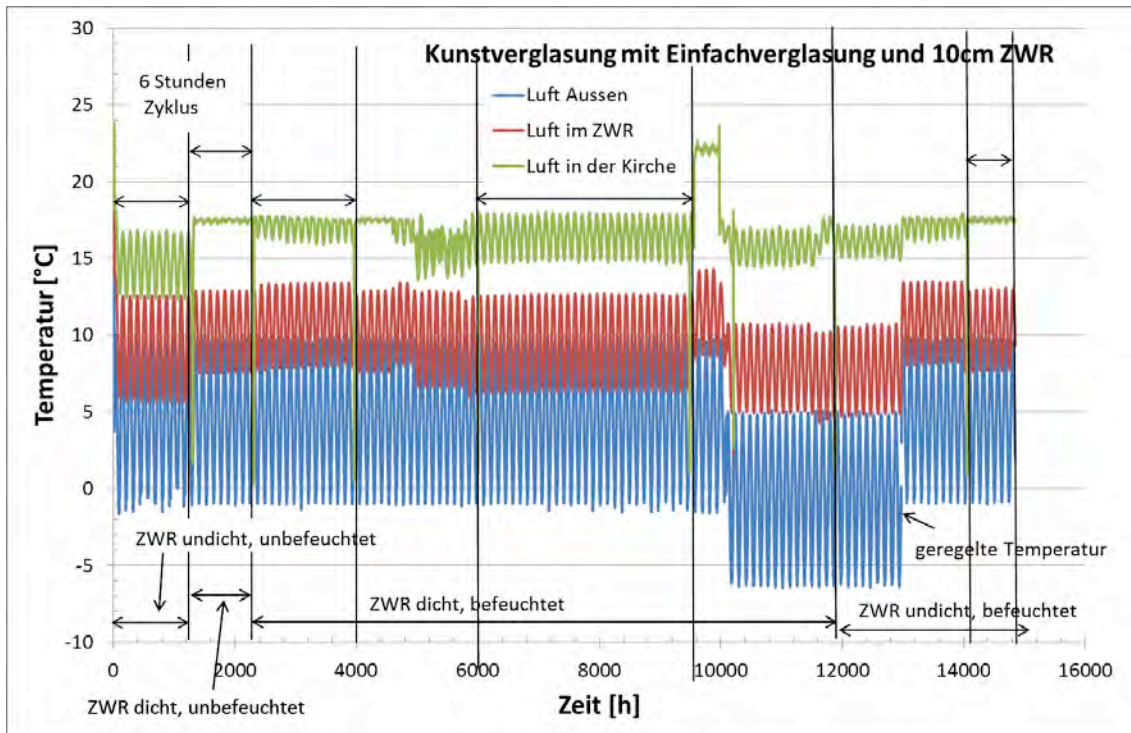


Abbildung 13: Gemessene Lufttemperatur in den drei Zonen: Aussen, Zwischenraum und Innen für das Fenstersystem EV + 10 cm ZWR + Kunstverglasung.

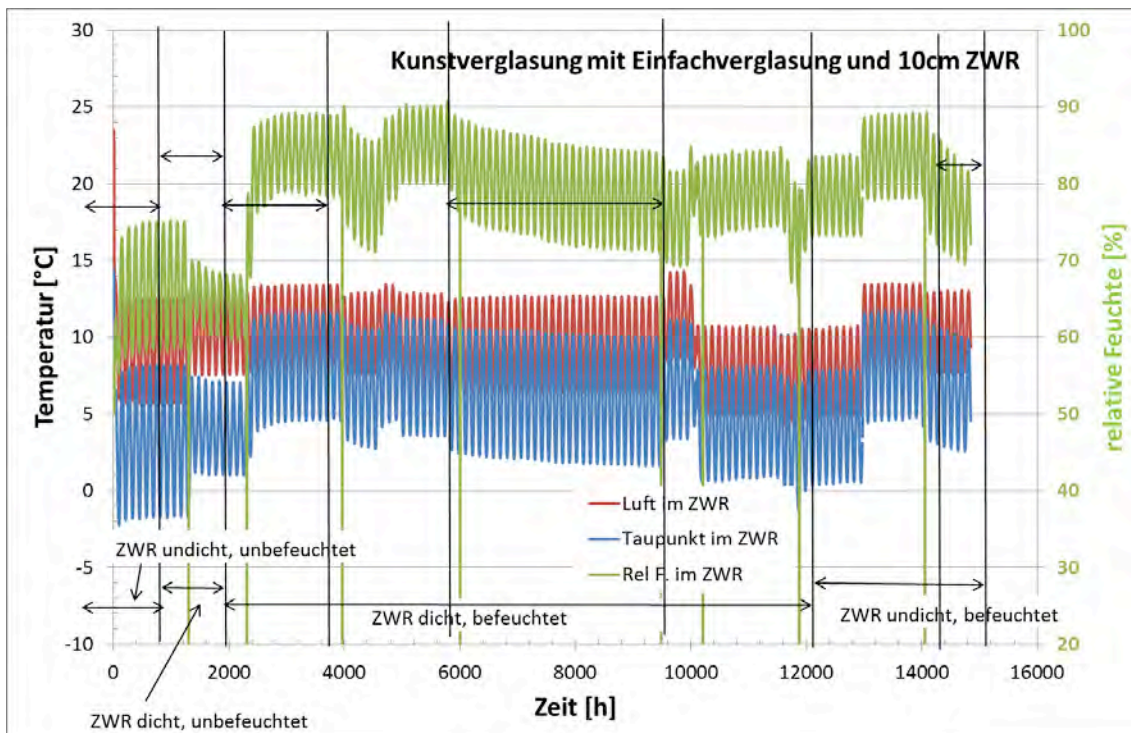


Abbildung 14: Gemessene Lufttemperatur, Luftfeuchte und sich ergebender Taupunkt im Zwischenraum für das Fenstersystem EV + 10 cm ZWR + Kunstverglasung.

EV 50 3 cm		Ta	rf a	Tau a	p sat	p	T1 Glas	T1 Rahmen	T2 Glas	T2 Rahmen	ZWR	rf ZWR	Tau ZWR	p sat	p	T3 Glas	T3 Rahmen	Ti	rf i	Tau i	p sat	p	
Phase 1	Abw.	4,6	75,4	6,4	848,9	640,1	6,4	6,2	7,0	7,3	7,5	71,8	2,7	1037,6	745,0	13,3	13,5	14,6	45,9	2,9	1662,4	763,0	niedrige Feuchte in der Kirche unbefeuert / unbestraht
		3,5	6,4	3,2			3,2	3,2	3,1	3,1	3,0	5,9	3,6			2,0	2,0	1,7	7,8	3,6			
Phase 2	Abw.	4,3	77,8	6,0	831,2	646,7	6,0	5,7	6,8	6,9	7,0	88,9	5,2	1002,7	891,4	12,8	12,9	13,8	59,2	5,9	1578,5	934,5	höhere Feuchte in der Kirche unbefeuert / unbestraht
		3,5	5,0	3,1			3,1	3,1	3,0	2,8	2,9	3,5	3,2			1,8	1,6	1,5	8,2	3,2			
Phase 3	Abw.	-0,4	76,5	1,6	593,2	453,8	1,6	1,3	2,7	2,8	2,7	90,0	1,2	742,2	688,0	10,0	10,0	11,3	54,1	2,3	1339,9	724,9	höhere Feuchte in der Kirche unbefeuert / unbestraht / Aussen kalt
		3,6	5,9	3,1			3,1	3,1	3,0	2,8	3,0	2,0	3,1			1,8	1,7	1,5	7,5	3,3			
Phase 4	Abw.	-0,4	76,5	1,8	593,2	453,8	1,8	1,4	2,8	2,8	2,7	82,8	0,0	742,2	614,5	10,4	10,5	11,8	45,7	0,3	1387,7	634,2	niedrige Feuchte in der Kirche befeuert / unbestraht / Aussen kalt
		3,6	6,0	3,0			3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	8,3	3,7			1,8	1,7	1,6	9,1	3,9			
Phase 5	Abw.	3,8	72,4	10,2	802,4	581,0	10,2	9,7	12,0	12,0	12,4	71,3	6,5	1440,7	1027,2	17,2	17,3	15,9	55,8	7,0	1805,9	1008,3	mittlere Feuchte in der Kirche befeuert / bestrahlt
		3,0	5,1	7,2			7,2	7,0	7,8	8,5	8,5	20,0	4,0			6,1	6,1	3,6	4,3	3,0			

EV 56 10 cm		Ta	rf a	Tau a	p sat	p	T1 Glas	T1 Rahmen	T2 Glas	T2 Rahmen	ZWR	rf ZWR	Tau ZWR	p sat	p	T3 Glas	T3 Rahmen	Ti	rf i	Tau i	p sat	p	
Phase 1	Abw.	4,6	77,2	6,3	848,9	655,3	6,3	6,0	7,3	7,3	9,4	65,7	3,2	1180,3	775,5	13,7	14,3	14,8	46,1	3,1	1683,9	776,3	ZWR undicht / unbestraht
		3,4	6,4	3,3			3,3	3,3	3,2	2,7	2,7	6,0	3,5			2,0	1,9	1,7	8,1	3,7			
Phase 2	Abw.	4,7	75,8	6,6	854,8	648,0	6,6	6,2	7,7	7,7	10,2	64,7	3,9	1245,4	805,8	14,3	16,6	17,5	39,2	3,0	1999,8	783,9	ZWR dicht / unbestraht
		3,4	5,5	2,9			2,9	2,9	2,5	1,9	1,9	2,9	2,5			0,8	0,5	0,3	9,0	3,3			
Phase 3	Abw.	4,6	74,9	6,8	848,9	655,8	6,8	6,4	8,0	8,0	10,7	82,9	7,9	1287,6	1067,4	15,9	16,9	17,0	98,6	16,8	1937,7	1910,6	ZWR dicht / hoch feucht
		3,4	5,3	2,9			2,9	3,0	2,6	1,9	1,9	4,4	2,5			1,0	0,6	0,5	3,9	0,9			
Phase 4	Abw.	4,7	74,0	6,4	854,8	632,6	6,4	6,0	7,3	7,3	9,6	79,2	6,1	1196,3	947,5	14,3	16,3	16,4	41,3	3,0	1865,4	770,4	ZWR dicht / niedrige Feuchte
		3,4	5,4	3,0			3,0	3,0	2,7	2,2	2,2	4,7	2,9			1,3	1,3	1,0	7,3	3,4			
Phase 5	Abw.	4,9	75,6	6,8	866,9	655,4	6,8	6,4	7,8	7,8	10,5	77,2	6,8	1270,6	980,9	15,5	16,6	17,5	49,6	6,8	1999,8	991,9	
		3,3	5,2	2,8			2,8	2,9	2,5	1,8	1,8	4,7	2,6			0,6	0,6	0,1	4,9	1,5			

IV 563 cm		Ta	rf a	Tau a	p sat	p	T1 Glas	T1 Rahmen	T2 Glas	T2 Rahmen	ZWR	rf ZWR	Tau ZWR	p sat	p	T3 Glas	T3 Rahmen	Ti	Ff i	Tau i	p sat	p			
Phase 1	Abw.	46	742		8485	6296	56	6.2	13.3	10.3	13.5	788	9.8	1548.1	12199	16.8	16.7	17.0	395	2.7	1997.7	765.4		niedrige Feuchte in der Kirche dicht / unbestrahlt	
		34	6.1				32	3.0	1.5	2.2	1.4	4.2	2.1			0.5	0.5	0.2	103	3.6					
Phase 2	Abw.	46	767		8489	6511	55	6.0	13.1	10.0	13.3	790	9.7	1528.0	1207.2	16.8	16.7	17.2	853	14.6	1982.3	1673.9		hohe Feuchte in der Kirche dicht / unbestrahlt	
		34	5.9				3.1	3.0	1.2	1.8	1.1	4.1	1.8			0.4	0.4	0.2	109	2.3					
Phase 3	Abw.	0.0	747		6108	4563	1.2	1.7	10.8	7.0	11.2	750	6.9	1331.1	998.3	15.7	15.6	16.5	898	14.8	1877.2	1685.8		hohe Feuchte in der Kirche dicht / unbestrahlt / aussen kälter	
		3.5	6.0				3.2	3.0	1.5	2.0	1.4	3.6	2.0			0.9	0.9	0.7	40	1.3					
Phase 4	Abw.	47	783		8548	6693	56	6.0	13.2	10.6	13.2	970	12.8	1518.1	1472.6	16.8	16.7	17.1	977	16.7	1950.0	1905.1		hohe Feuchte in der Kirche undicht / unbestrahlt	
		34	5.5				3.1	3.0	1.4	1.9	1.3	2.0	1.4			0.6	0.5	0.4	15	0.6					
Phase 5	Abw.	36	719		7912	5688	9.8	10.8	17.4	14.2	18.6	730	13.5	2142.7	1564.2	18.5	18.1	17.0	845	14.1	1997.7	1637.3		hohe Feuchte in der Kirche undicht / bestrahlt	
		4.3	6.9				8.0	7.9	5.1	5.5	5.8	12.0	5.1			2.0	1.7	0.5	16.1	3.1					
Phase 6	Abw.	53	729		8914	6499	11.5	12.0	18.3	15.6	19.6	480	7.1	2280.2	1094.5	19.0	18.7	17.3	648	10.2	1974.8	1279.6		mittlere Feuchte in der Kirche 24 Std Periode undicht / bestrahlt	
		28	6.9				6.4	6.5	5.2	5.4	6.0	17.5	2.6			2.2	1.9	0.5	16.2	3.4					

6 Messung der Spektrale Transmission und Reflexion

Die vorliegende Untersuchung soll die optische Transmission und Reflexion dieser Gläser untersuchen. Es wurde deshalb die spektrale Transmission und Reflexion der Proben jeweils einmal auf der beschrifteten und einmal auf der unbeschrifteten Seite gemessen. Die Transmission im Infrarotbereich ist für die thermische Untersuchung der Fenstersysteme relevant.

6.1 Prüfverfahren

Zur Ermittlung der optischen Transmission wurde in Abhängigkeit der Wellenlänge der prozentuale Anteil der durch die Probe transmittierten Strahlung (Transmission) gemessen. Zur Ermittlung der Reflexion wurde in Abhängigkeit der Wellenlänge der prozentuale Anteil der von der Probe reflektierte Anteil gemessen. Um auch die diffuse Anteile zu erfassen, wurde die Messung mit einer Ulbricht'schen Kugel durchgeführt.

Dabei wurde nach DIN 5036 Teil 1 Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik und EN 410 Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen, verfahren.

6.2 Prüfbedingungen

Messgerät	: Spektralphotometer Perkin Elmer Lambda 9 mit Steuer-PC	
Messbereiche	: Wellenlänge	: 250 – 2500 nm
	: Transmission	: 0 – 100 %
	: Reflexion	: 0 – 100 %
Bandbreite	: 1 nm	
Messgeschwindigkeit:	: 120 nm/min	
Messgeometrie	: 8°/diffus	
Probenbeleuchtung	: monochromatisch	
Blende/Messfläche	: quadratisch, 13 mm x 27 mm	
Kalibrierung	: Luft=100%	
Anzahl Muster	: 9	
Anzahl Messungen pro Muster:	2 Transmissionsmessungen 2 Reflexionmessungen(1x Vorderseite =Beschriftungsseite, 1x Rückseite)	
Prüfklima	: 20°C und 65 % r.F. ohne Klimatisierung der Proben	

6.3 Fensterglasproben

Folgende Fensterglasproben wurden untersucht:

Bezeichnung	Glasdicke
- 6-Eck	2.6mm
- ARTISTA	4.0mm
- GOETEGLAS	4.3mm
- FLOATGLAS	4.0mm
- ANTIKGLAS TRANSPARENT	2.9mm
- ANTIKGLAS BLAU	2.9mm
- ANTIKGLAS ORANGE	2.9mm
- ANTIKGLAS GRÜN	2.9mm
- ANTIKGLAS ROT	3.4mm

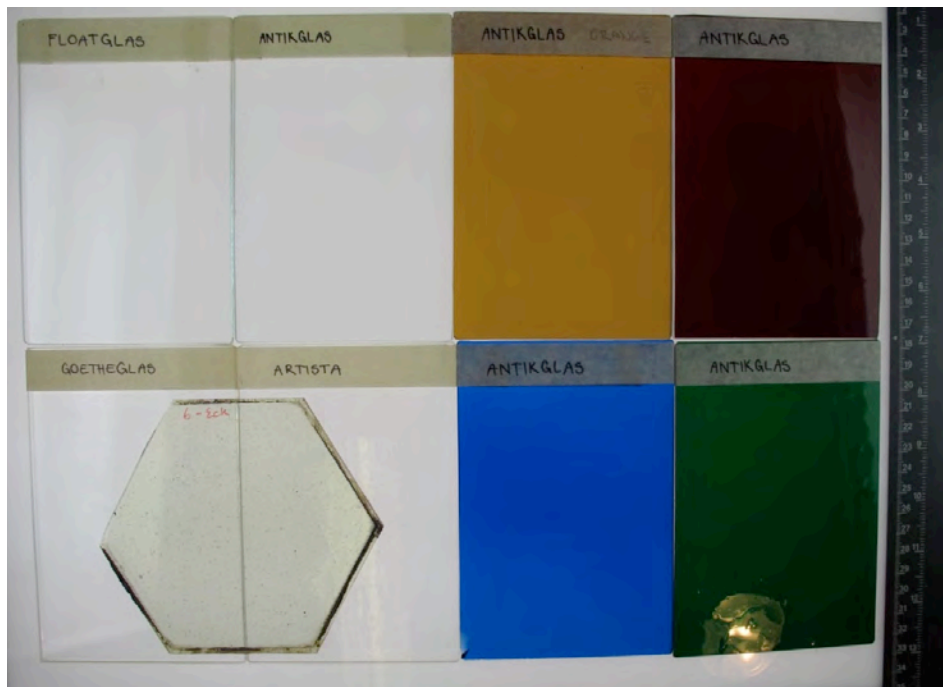


Abbildung 15: Vorderseite der untersuchten Fensterglasproben

6.4 Resultate

Die Transmission, Reflexion und Absorption der untersuchten Fensterglasproben sind in Abhängigkeit der Wellenlänge (Ultraviolett, sichtbar und nahes Infrarot) zwischen 250 nm und 2500 nm in den drei folgenden Abbildungen 16,17 und 18 dargestellt.

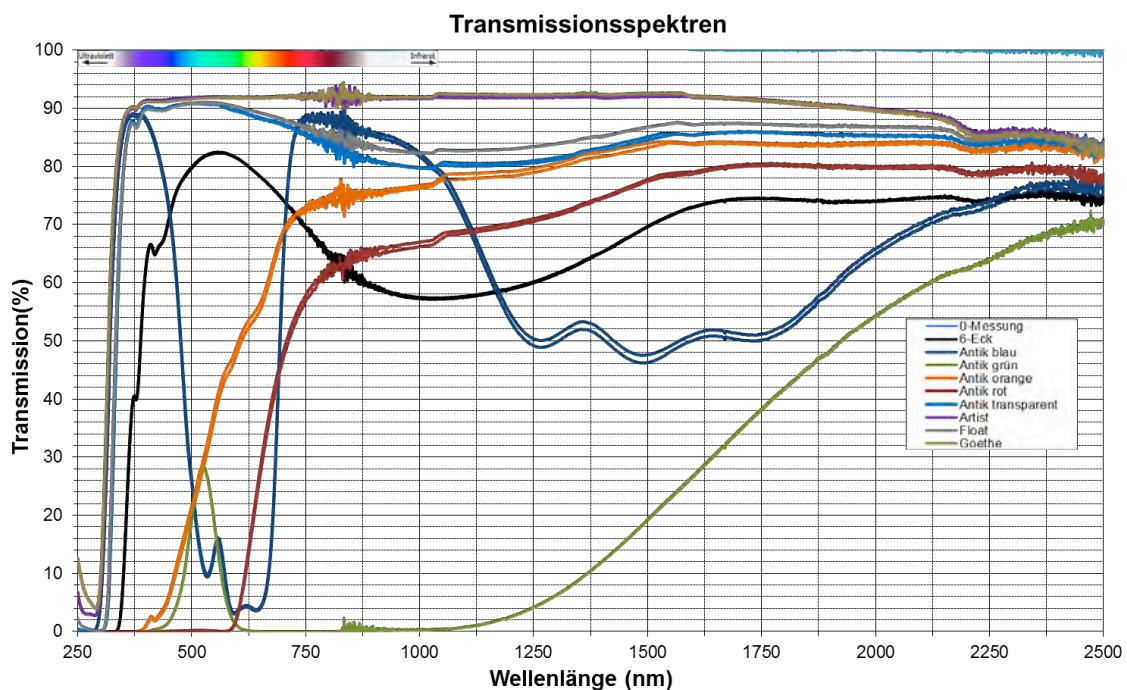


Abbildung 16: Spektrale Transmission der Fenstergläser im UV/VIS/NIR Bereich. Es sind keine Unterschiede in den Spektren der Vor- und Rückseite der Fenstergläser zu erkennen.

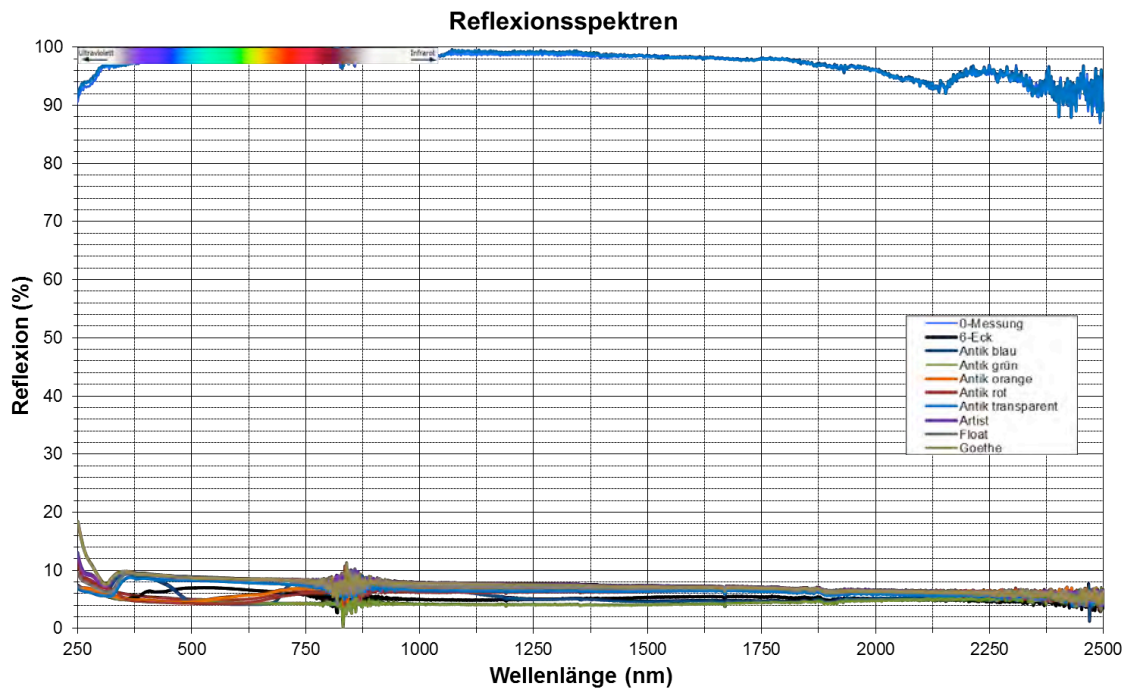


Abbildung 17: Spektrale Reflexion an den Kirchengläsern im UV/VIS/NIR-Bereich. Die Spektren der verschiedenen Gläser, weisen über den ganzen Wellenlängenbereich eine Reflexion von ca. 10% auf, liegen dementsprechend übereinander. Es sind keine Unterschiede in den Spektren der Vor- und Rückseite der Fenstergläser zu erkennen.

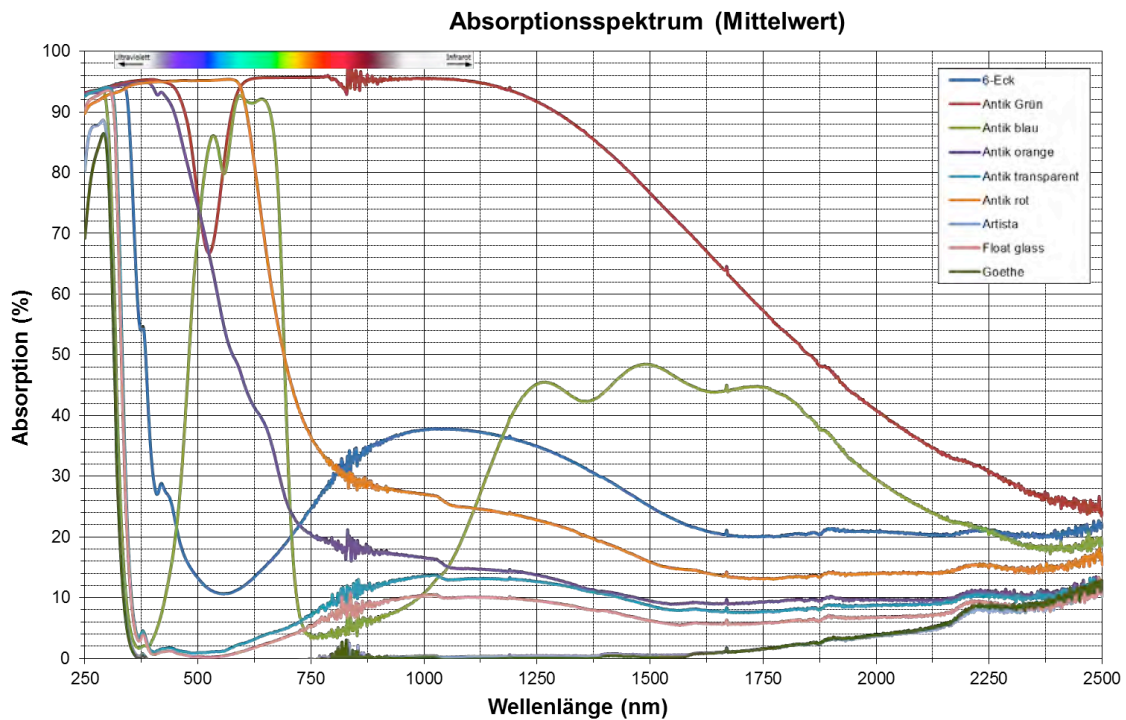


Abbildung 18: Die spektrale Absorption wurde mit der Formel $Absorption(\%) = 100\% - Transmission(\%) - Reflexion(\%)$ aus den jeweiligen Mittelwerten berechnet.

7 Messung der Diffusionswiderstandszahl

Ein wichtiger Faktor bei den hygrischen Betrachtungen ist die Menge des Wasserdampfes das durch die Kunstverglasung bei einem definierten Dampfdruckgradienten pro Zeiteinheit hindurchtreten kann. Dies wird für konventionelle Baustoffe durch den Diffusionswiderstand gekennzeichnet. Da aber die Kunstverglasung kein homogenes Material ist sondern aus Glas Metall und Kitt zusammengesetzt ist, wobei nur das letztere dampfdurchlässig ist, ist es angebracht den Diffusionswiderstand per Länge der Verkittungslinien um die farbigen Glasstücke anzugeben. Mit anderen Worten die Dampfdiffusion ist abhängig von der gesamten Randlänge der Verkittungen. Die Messmethode ist im Anhang 3 zusammengefasst.

7.1 Prüfkörper

Es wurden zwei kleine identische Kunstverglasungen als Prüfkörper ausgewählt (siehe Abbildung 19). Der Unterschied war lediglich die Verkittung Die Probe 1 hatte die Originalverkittung und Probe 2 wurde neu verkittet. Dies erlaubt einen Vergleich des Diffusionswiderstandes der beiden Kitte. Dies ist nur als ein Indiz zu verstehen. Um allgemeinere Aussagen über die Dampfdiffusion durch Kunstverglasungen mit verschiedenen Verkittungen (Zusammensetzung, Alter, etc.) machen zu können bedarf es einer grösseren und umfangreicheren Messkampagne.



Abbildung 19: Eine der beiden kleinen identischen Kunstverglasung und das Gefäss mit Trockenmittel.

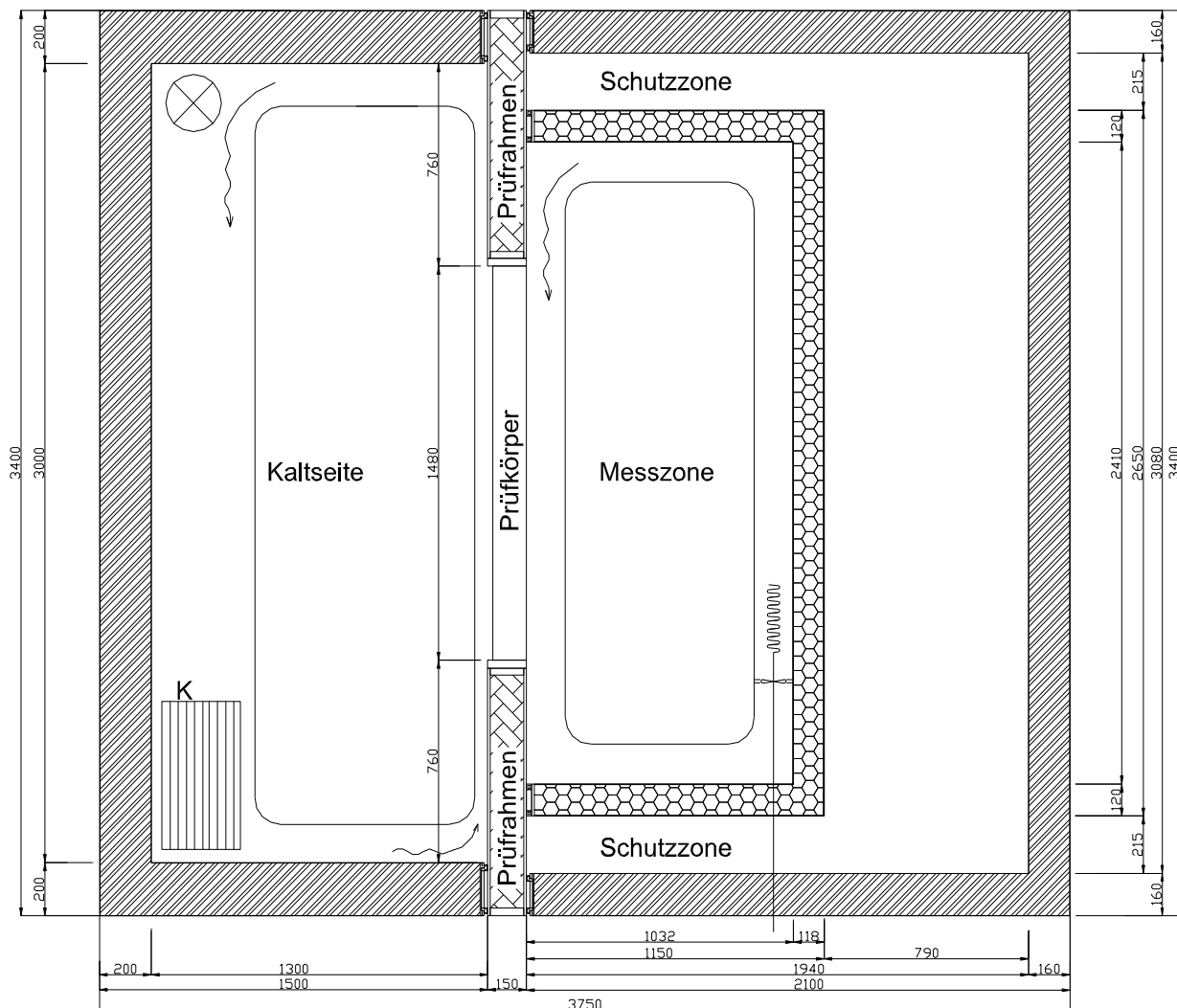
7.2 Resultate

	Probe 1 Alte Verkittung	Probe 2 Neue Verkittung
Glasdicke [mm]	3	3
Probenoberfläche [mm ²]	570 x 420	570 x 420
Dampfstrom [mg/h]	408	292
Diffusionswiderstand [m ² hPa/mg]	0.48	0.78
Diffusionswiderstandszahl [-]	109	178
Diffusionsäquiv. Luftschicht- dicke s [m]	0.33	0.53
Totale Verkittungslänge L [m]	14.3	14.3
Diffusionswiderst. per Länge μ_L [1/m]	0.023	0.037

Tabelle 12: Zusammenstellung der Resultate der Dampfdiffusionsmessungen.

Anhang 1 : Beschreibung der Hot-Box (U-Wert Kammer)

Schematischer Vertikalschnitt durch die U-Wert Kammer



Abmessungen der Heizkastenöffnung: $2.003 \text{ m (b)} \times 2.504 \text{ m (h)} = 5.016 \text{ m}^2$

Prüfföffnung (ohne EPS-Füllung): $1.230 \text{ m (b)} \times 1.480 \text{ m (h)} = 1.820 \text{ m}^2$

Die Messapparatur besteht aus einer warmen Kammer und einer kalten Kammer sowie aus einer Messkammer, die innerhalb der warmen Kammer auf Rollen verschiebbar aufgebaut ist (vgl. obige Skizze).

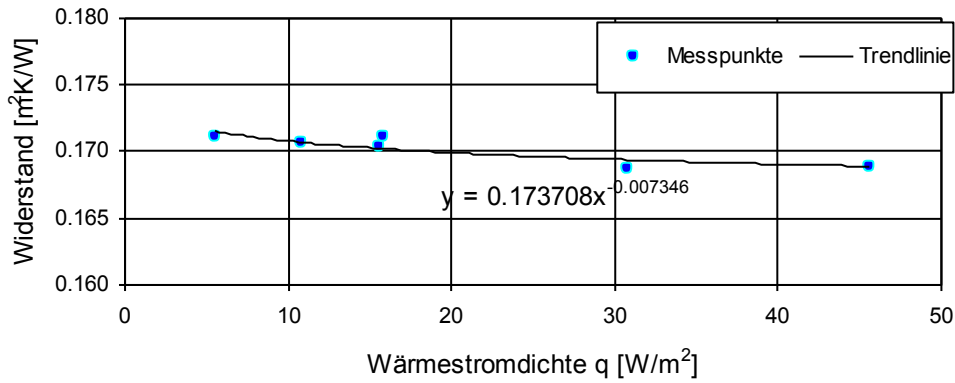
Alle Kammern bestehen im Kernmaterial aus Dämmstoff (PUR). Zwischen die beiden Kammern wird ein Prüffrahmen zur Aufnahme des Prüfkörpers gestellt. Es wird ein vorgegebenes Temperaturgefälle von ca. 20 K zwischen den beiden Kammern aufrechterhalten. Die Lufttemperatur wird in beiden Kammern mit je 9 Thermoelementen gemessen und mit einer Bandbreite kaltseitig von ca. 0.05 K, warmseitig von ca. 0.1 K geregelt. Die gesamte der warmseitigen Kammer zugeführte Energie wird mittels eines Infratek-kWh-Zählers gemessen.

Für die U-Wert-Berechnung wird von der gesamthaft zugeführten Leistung (Heizung und Ventilatorleistung) der Wärmestrom durch den Prüffrahmen (inkl. in der Kalibration ermittelte Randeffekte) abgezogen und als durch den Probekörper geflossene Leistung gewertet. Der Wärmestrom durch die Messzonenwände wird auf Null geregelt und kann, da die Wände sehr gut gedämmt sind, als vernachlässigbar angesehen werden.

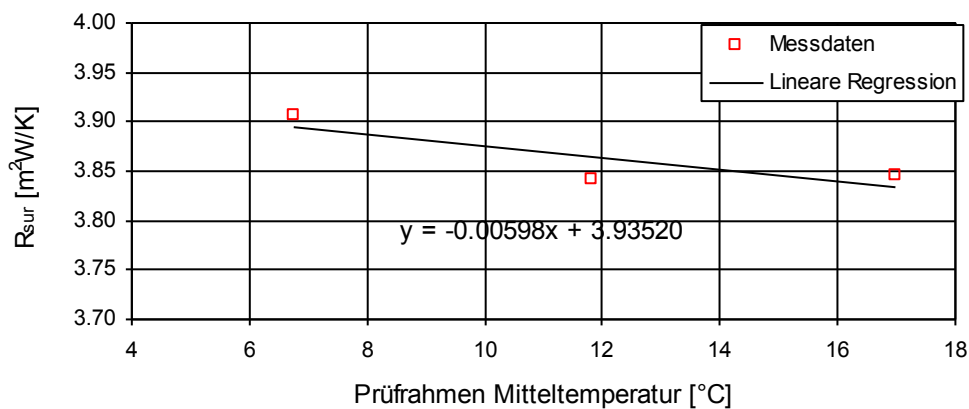
Die Wärmeübergangsbedingungen wurden mit Hilfe von Kalibriermessungen ermittelt
(vgl. Kalibrationsdaten im Anhang 2).

Anhang 2 : Kalibration des Prüfrahmens

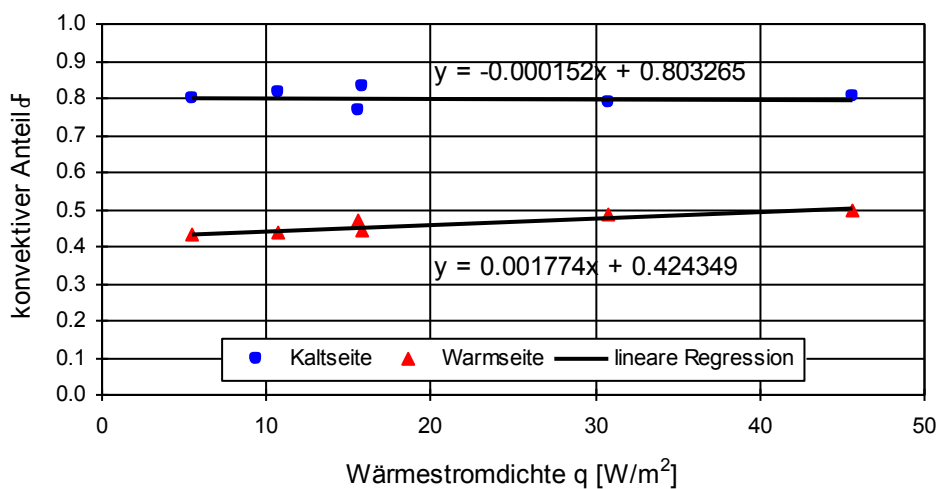
Gesamtwärmeübergangswiderstand ($R_{s, tot}$)



Wärmedurchlasswiderstand des Prüfrahmens R_{sur}



Anteil konvektiver Wärmeübergangskoeffizient F_c



Luftgeschwindigkeiten: warmseitig:
Potentiometer = 4.4V)

0.15m/s – 0.25m/s

(Einstellung

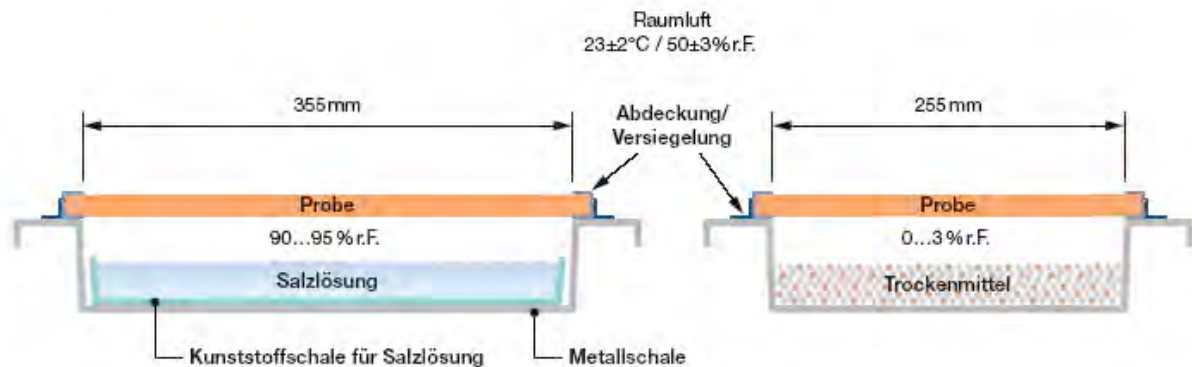
kaltseitig:

1.8m/s – 2.5m/s

(Einstellung

Potentiometer = 4.3V)

Anhang 3 : Bestimmen des Wasserdampf-Durchgangs



Die Proben werden auf die erforderlichen Masse von $0.375 \times 0.275 \text{ m}$ zugeschnitten und anschliessend während 28 Tagen oder bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte in einem Klima von $23^\circ\text{C}/50\% \text{ r.F.}$ gelagert. Vor der Messung werden die Ränder der Proben durch 10 mm tiefes Eintauchen in Paraffin oder durch Abkleben mit Aluminiumklebeband abgedichtet. Die diffusionsaktive Fläche verringert sich dadurch auf $0.355 \times 0.255 \text{ m}$. In spezielle Metallschalen wird Trockenmittel für Messungen im Trockenbereich oder eine Salzlösung für Messungen im Nassbereich gegeben. Für die Versuche an der EMPA wird Molekularsieb (ca. $0\% \text{ r.F.}$) als Trockenmittel und Ammoniumdihydrogenphosphat (ca. $93\% \text{ r.F.}$) als Salzlösung verwendet. Die Menge des Trockenmittels richtet sich nach dem zu erwartenden Dampfdurchgang und variiert zwischen 1 bis 3 kg. Anschliessend werden die Proben in die Schalen eingesetzt und mit einem plastischen Kitt oder durch Abkleben mit Aluminiumklebeband an den Rändern hermetisch abgedichtet. Durch periodisches Wägen wird die Gewichtszunahme bzw. -abnahme der gefüllten Schalen bestimmt. Bei Messungen im Trockenbereich werden die Messschalen nach jeder Wägung geschüttelt um die Aufnahmefähigkeit des Trockenmittels möglichst konstant zu halten. Die Wägungen werden so lange fortgesetzt, bis normalerweise fünf aufeinanderfolgende Messungen einen konstanten Dampfdurchgang ergeben. Der Dampfdurchgang wird als konstant beurteilt, wenn keiner der einzelnen Messwerte mehr als 5% vom Mittelwert abweicht. Das Messintervall hängt vom Wasserdampfdiffusionswiderstand der Proben ab und wird so gewählt, dass die Massenänderung zwischen den Wägungen 0.5 bis maximal 2 g beträgt. Das Messintervall kann daher zwischen einer Stunde und einem Monat variieren.

Wasserdampf-Diffusionskoeffizient			$W = mD / (A \cdot \Delta p)$	[mg/m ² .h.Pa]
Wasserdampf-Diffusionswiderstand			$Z = 1/W$	[m ² .h.Pa/mg]
Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient			$\delta = W \cdot d$	[mg/m.h.Pa]
Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl			$\mu = \delta_{Luft} / \delta$	[-]
Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke			$sD = \mu \cdot d$	[m]
Darin bedeutet:	mD	[mg/h]		Dampfdurchgang pro Stunde (Mittelwert aus min. drei Einzelmessungen oder als Mittelwert der Messperiode)
	A	[m ²]		Messfläche (Standard : 0.0905 m ²)
	Δp	[Pa]		Dampfdruckdifferenz
	d	[m]		Dicke der Probe
	δ_{Luf}	[mg/(m h Pa)]		Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient der umgebenden Luft. Für die EMPA Dübendorf kann der Wert 0.72 mg/m h Pa (23°C und 960 mbar) eingesetzt werden.

Anhang 3

Bericht der Baumann Akustik und Bauphysik AG, Dietfurt

„St. Laurentiuskapelle Oberkirch, Frauenfeld – Klimamessungen und Vorschläge für wärmetechnische Massnahmen“



Baumann Akustik und Bauphysik AG

Neudietfurt 10
Untere Schieb
9615 Dietfurt
Telefon 071 / 982 70 50
Telefax 071 / 982 70 59
eMail info@baumann-bauphysik.ch
www.baumann-bauphysik.ch

Vitrocentre Romont
Dr. Stefan Trümppler
Projekt Schutzverglasung

1680 Romont FR

Projekt Nr.: 11.065

Dietfurt, 25.10. 2013

St. Laurentiuskapelle Oberkirch, Frauenfeld

Klimamessungen und Vorschläge für wärmetechnische Massnahmen



Kapelle St. Laurentius Oberkirch links & St. Anna rechts

Inhalt:

1. Auftrag (Kontext und Fragen)	2
2. Ist-Zustand	2
3. Klimamessungen	5
4. Vorstellung und Diskussion der Messergebnisse	9
5. Heizenergiebedarf	14
6. Schlussfolgerungen	17
8. Anhang	21



1. Auftrag (Kontext und Fragen)

Die St. Laurentiuskapelle Oberkirch, Frauenfeld ist im Besitze der evangelischen Kirchgemeinde Frauenfeld und wird von der katholischen Kirchgemeinde Frauenfeld verwaltet. Die Kapelle weist sehr bedeutungsvolle Glasmalereien aus dem 14. Jahrhundert im Chorfenster der Kirche auf. An der Aussenseite dieses Fensters wurde vor einigen Jahrzehnten eine Schutzverglasung in einem Holzrahmen angebracht. Die übrigen Fenster der Kirche sind einfach verglast (Bleiverglasungen aus dem 19. Jh.) und haben keine Schutzverglasung.

Aus Gründen der rationellen Energieverwendung möchte die Kirchgemeinde die Fenster mit einer Isolierverglasung versehen. Die Fragen, die es in dieser Untersuchung zu beantworten galt, betreffen u.a. die Heizenergieverluste über die Fenster: Würde eine zusätzliche Isolierverglasung an den einfachverglasten Fenstern im Schiff und am Chorfenster zu wesentlichen Energieeinsparungen führen? Wie hoch wären diese Einsparungen – auch im Vergleich zu anderen möglichen Massnahmen? Weiteres Ziel der Untersuchung war es, das Klima am Chorfenster und damit die Wirksamkeit der bestehenden Schutzverglasung zu prüfen und herauszufinden, unter welchen klimatischen Bedingungen es zu Kondensat an der Kunstverglasung und der Schutzverglasung kommt.

Da die Beantwortung der Fragen eines allfälligen Kondensataufkommens am Chorfenster und der Einsparung an Heizenergie durch den Einbau von Isolierverglasungen nicht losgelöst vom herrschenden Innenklima in der Kapelle erfolgen kann, war es nötig Klimamessungen im Kircheninnern durchzuführen. Um die Wirksamkeit der bestehenden Schutzverglasung am Chorfenster genau überprüfen zu können, wurde auch das dortige Mikroklima, insbesondere der Verlauf der Luftfeuchtigkeit und Temperatur im Zwischenraum und allfälliges Kondensationsaufkommen auf der Aussenseite der Glasmalerei und der Innenseite der Schutzverglasung untersucht.

2. Ist-Zustand

2.1 Die Kirche

Für den Bau der Kirche ergibt sich eine Zeitspanne zwischen dem 4. Jh. bis zur ersten urkundlichen Erwähnung im 9. Jh¹. Baulich besteht eine Dreigliederung ohne proportionale Gebundenheit; eine einheitliche Mittelachse ist nicht zu erkennen. Es wird angenommen, dass der Bau in drei Bauperioden von Westen nach Osten erfolgte.

In der folgenden Zusammenstellung sind die wichtigsten bau- und energierelevanten Ereignisse aufgeführt.

Bau / Renovationen	4. Jh.-9.Jh./1680/1931/1984
Sitzplätze: Schiff / Chor / Empore / Total	160/18/ 30/ 208
Orgel Kuhn AG Männedorf mit 32 Registern; mechanische Traktur	
Energiebezugsfläche/ Beheizte Nettofläche / Volumen Kirchenraum	312m ² * / 214m ² / 1530m ³
*ohne Sakristei dafür Aufgang Empore und Raum Elektroverteilung	

¹ Die St. Laurentiuskirche zu Oberkirch- Frauenfeld von Hans Metzler / Alfred Vögei. Sonderdruck aus dem Anzeiger für schweizerische Altertumskunde 1934 / Heft 3



2.2 Das Chorfenster

Das Chorfenster entstand wohl um 1330–40 im künstlerischen Umfeld von Konstanz. Es gehört mit den Glasfenstern von Königsfelden, Kappel am Albis, Hauterive, Köniz und Blumenstein zu den bedeutendsten Zeugnissen der hochgotischen Glasmalereien in der Schweiz. Von den genannten Werken hebt sich das Kreuzigungsfenster von Oberkirch jedoch durch seinen ausserordentlichen Erhaltungszustand ab. Der Grund dafür liegt wohl vor allem darin, dass das Glasgemälde über Jahrhunderte eingemauert war, im Zusammenhang mit der Errichtung eines barocken Hochaltars. Auch scheint es schon früh – seit etwa 1900 oder sogar im 19. Jahrhundert – durch ein aussen vorgesetztes Fenster geschützt worden zu sein. Diese einfache Aussenverglasung entspricht nicht den belüfteten Schutzverglasungssystemen, die in den letzten Jahrzehnten speziell als Erhaltungsmassnahme für mittelalterliche Glasmalereien entwickelt wurden. Das "Vorfenster" könnte aber angesichts des Zustands des Glasgemäldes eine ausreichende konservatorische Wirkung erzeugt haben. Die klimatischen Bedingungen wurden nie erhoben.

2.3 Nutzung

Die ehemalige Pfarrkirche dient heute als Begräbniskirche, für Gottesdienste und gelegentlich weiteren Veranstaltungen wie Konzerten usw. Die Kirche ist ganzjährig tagsüber offen. Während der Heizperiode 2012/13 fanden etwa 50 Abdankungen mit je 10 bis 200 Personen und 9 Gottesdienste mit je etwa 50 Personen statt.

2.4 Bauliches

Im Folgenden sind die wichtigsten Bauteile aufgeführt.

Aussenwände U-Wert variabel

Bruchsteinmauerwerk	60 -125 cm
---------------------	------------

Holz Kassettendecke U-Wert 0.34 W/m²k

Riemenboden im Estrich mit Dämmung im Luftzwischenraum Holz Kassettendecke	30 cm
--	-------

Boden

Sandstein /Klinkerboden Bankfeld Holzboden	Annahme 6 cm Dämmung
---	-------------------------

Fenster

Beschrieb Glasfläche (..)	U-Wert [W/m ² K]
Chor Glasmalereifenster mit Schutzverglasung 5.6 (3.5) m ²	2.5
übrige Fenster in Bleiverglasung (EV) ohne Schutzverglasung 25.2 (18.2)m ²	5.8



Innen gegen Empore



Innen gegen Chor mit mittelalterlichem Chorfenster



Baumann Akustik und Bauphysik AG

2.4 Elektroheizung

Heizgruppen

Die Kirche wird elektrisch beheizt.

Installierte Heizleistung: 37 kW; Anteil Fussbodenheizung in Gehbereichen 20 kW.

Heizbetrieb

Die Heizung wird nach Gutdünken zu Beginn des Herbstes ein- und darauffolgenden Frühling wieder ausgeschaltet. Bei Aussentemperaturen um den Gefrierpunkt werden vor einem Anlass zusätzlich zu der stets eingeschalteten Fussbodenheizung die Fenster- und Bankheizungen eingeschaltet.

Energieverbrauch

Verbrauchsangaben nach Angaben Werkbetriebe Frauenfeld Mittel 2009–2011:

Total: 57'039kWh (Hochtarif: 14'745 kWh; Niedertarif:42'294 kWh)

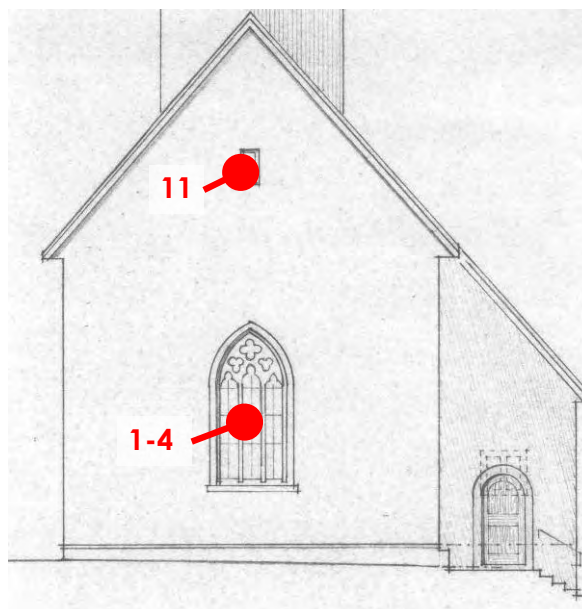


3. Klimamessungen

3.1 Verzeichnis der Messstellen

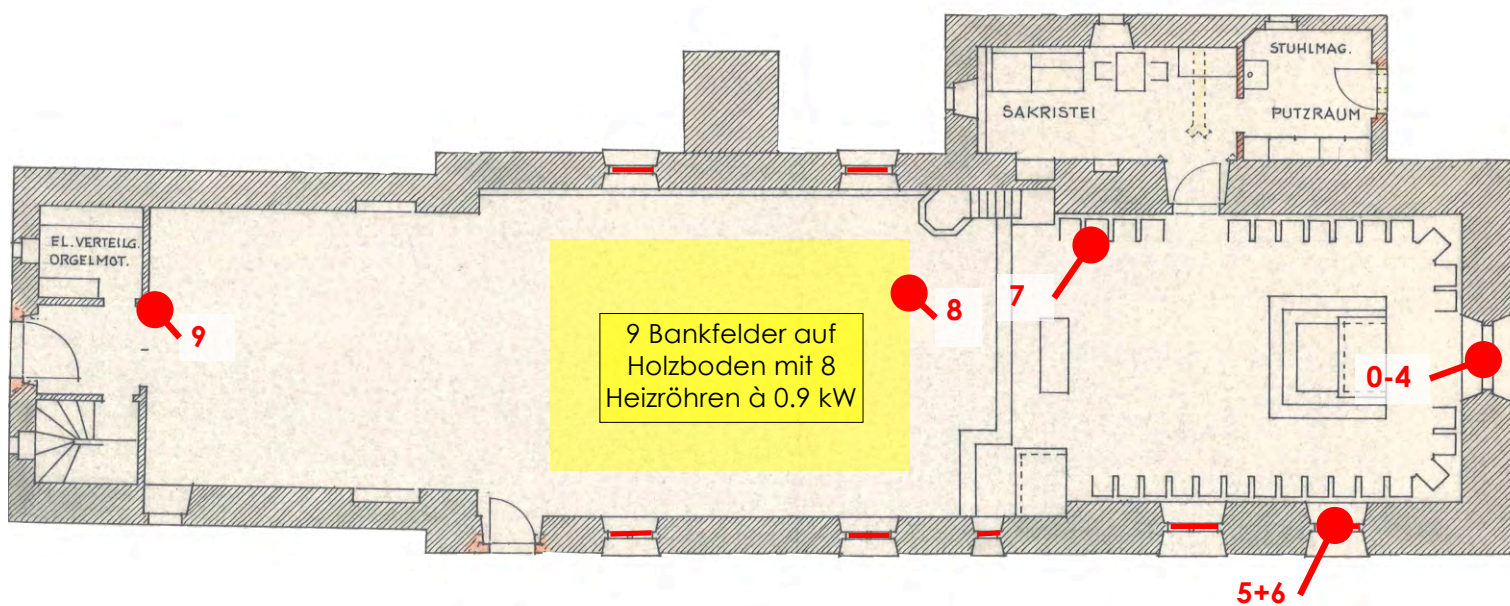
Messtandorte für Klimamessungen

	Messstellen	Temperatur	Rel. Feuchte
0	Chor vor Chorfenster	x	x
1	Chorfenster Glas	x	
2	Chorfenster Rahmen	x	
3	Schutzglas innen	x	
4	Chorfenster Zwischenraum	x	x
5	Südfenster Glas	x	
6	Südfenster Heizung	x	
7	Chor Fussboden	x	
8	Sitzbankheizung	x	
9	unter Empore	x	
10	Orgel	x	x
11	Aussen	x	x



Ostfassade mit Messstellen

Grundriss mit Messstellen, Bankfeld mit Heizröhren und Heizkörper an den Fenstern (zusätzlich auf Empore Westfenster)

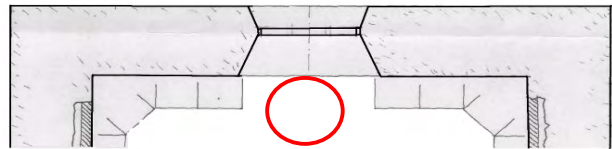




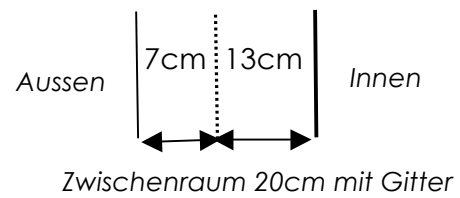
3.2 Messstellen am Chorfenster



Kunstglas 1; Rahmen 2; Schutzglas 3; Zwischenraum 4



Grundriss mit Messstelle (0) vor Chorfenster +4m





3.3 Mittelwerte an den Messstellen

Die Messungen wurden am 1.10.2012 begonnen und am 30.09.2013 beendet. In der folgenden Tabelle sind die Messresultate für die Winter- und Sommerperiode dargestellt.

Messstellen mit Mittelwert, Standardabweichung \pm , Minimum – Maximum

Nummer	Messstellen (Grundriss) *Detailmessungen am Ostfenster ab 11.10.12	Winter vom 1.10.12 bis 31.03.13			Sommer vom 1.04.13 bis 30.09.13		
		Temperatur T(°C)	Rel. Luft- feuchte (%)	Taupunkt TP [°C] /abs. Feuchte aF [g/m ³]	Temperatur T(°C)	Rel. Luft- feuchte (%)	Taupunkt TP [°C] /abs. Feuchte aF [g/m ³]
0*	Chor vor Ostfenster	15.7 \pm 1.5 7.9-20.5	47 \pm 8 25-68	4.4 / 6.5	19.2 \pm 2.2 13.3-28.3	61 \pm 9 35-85	11.5/ 10.3
1*	Ostfenster Kunstverglasung (4)	13.0 \pm 1.9 6.4-21.3					
2*	Ostfenster Kunstglas-Rahmen (4)	11.9 \pm 2.0 5.5-22.8					
3*	Ostfenster Schutzglas (2)	6.9 \pm 3.6 -2.8-21.1					
4*	Ostfenster Klima im Zwischenraum	9.8 \pm 3.0 2.3-24.4	58 \pm 10 17-81	1.9		-	
5*	Südfenster Glas	10.5 \pm 4.0 3.4-39.4	-			-	
6	Südfenster Heizung	13.2 \pm 3.2 6.2-50.2-	-			-	
7	Chor Fussboden	24.3 \pm 5.8 10.3-35.8					
8	Sitzbankheizung vorn	16.9 \pm 3.4 8.2-48.6					
9	Schiff unter Empore	18.2 \pm 1.6 8.8-22.2					
10	Orgel auf Empore	15.7 \pm 1.5 7.8-22.1	52 \pm 8 33-71	5.9/7.1	19.1 \pm 2.6 13.8-25.5	62 \pm 7 43-85	11.6/10.4
11	Aussen	3.7 \pm 4.9 -8.5-21.3	86 \pm 10 37-100	1.6/5.6	16.8 \pm 6.2 -0.6-41.8	69 \pm 10 49-99	11.1/9.9
*Ostfenstersystem: Schutzglas gegen Zwischenraum (2); Kunstverglasung gegen Innenraum Kapelle (4)							

3.4 Aufnahmen von Wärmebildern

Am 11.12.2012 bei einer Aussentemperaturen um 0°C und Innentemperatur um 16.5°C wurden IR-Aufnahmen durchgeführt (siehe Anhang).

Die Oberflächentemperaturen der Aussenwände lagen dabei um knapp 14°C, die Deckenmitte um 17.7°C und die Glastemperatur am Chorfenster bei 12.9°C (Ablesung Datenlogger)



Baumann Akustik und Bauphysik AG



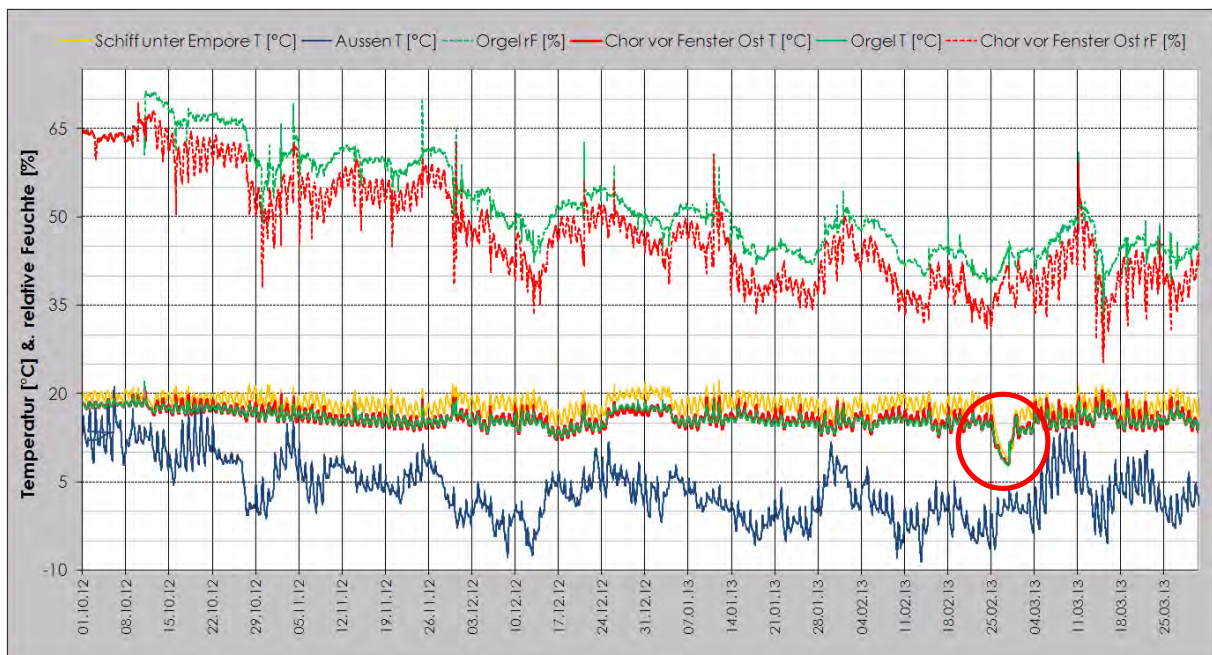
4. Vorstellung und Diskussion der Messergebnisse

4.1 Klimamessungen während der Heizperiode 2012-2013

Im folgenden Diagramm ist der Klimaverlauf von Oktober 2012 bis Ende März 2013 an ausgewählten Messstellen dargestellt. In diesem Zeitraum nehmen Aussentemperatur und relative Luftfeuchte in der Kapelle deutlich ab. Die relative mittlere Luftfeuchte ist im Chor um 5% tiefer als auf der Empore. Die Temperaturmittel Chor und Orgel sind mit 15.7°C zufällig gleich, weisen aber unterschiedliche Streuungen und Minima-Maxima-Werte auf. Die vertikalen Ausschläge der Verläufe entsprechen den täglichen Schwankungen und Beeinflussung durch Sonneneinwirkung und / oder Belegung mit kurzzeitiger Temperatur- bzw. relative Luftfeuchteänderung.

Die Fussbodenheizung war in diesem Zeitraum bis auf eine Ausnahme ständig in Betrieb: Vom 25.02.13 bis 28.03.13 wurde die Heizung zu Versuchszwecken abgeschaltet (roter Kreis). Während dieser Zeit war die mittlere Aussentemperatur -1°C.

Innenklima- & Aussentemperaturverlauf vom 1.10.12 bis 31.03.13



Messstellen:

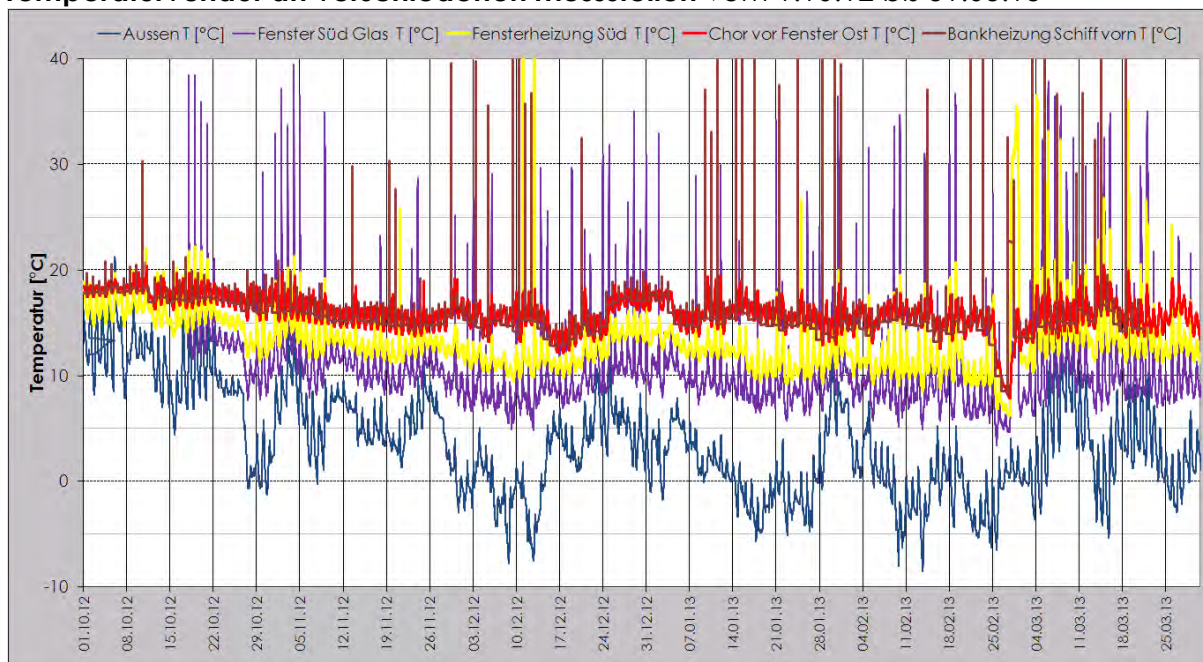
Chor (15.7°C/47%), Schiff unter Empore (18.2°C), Orgel (15.7°C/52%) und Aussen (3.7°C).



Baumann Akustik und Bauphysik AG

Der Temperaturverlauf an den verschiedenen Messstellen (Diagramm unten) gibt Aufschluss über die Auswirkung von Sonneneinstrahlung und die Inbetriebnahme der Bankheizung. Letztere ist an der deutlichen Erhöhung der Temperaturen über 20°C anhand von vertikalen Ausschlägen nach oben erkennbar.

Temperaturverlauf an verschiedenen Messstellen vom 1.10.12 bis 31.03.13



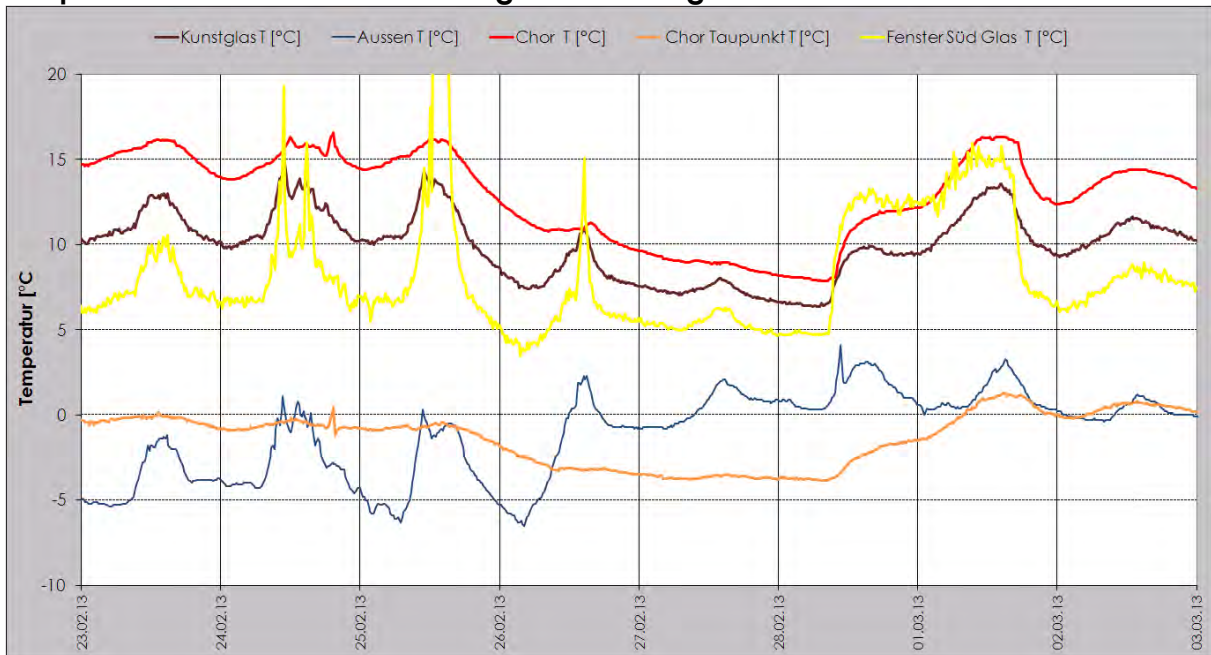
Messstellen:

Aussen (3.7°C), Fenster Süd, Fensterbankheizung Süd, Bankheizung (30 Einschaltungen) und im Chor (15.7°C/47%)

Die Auswirkung der Heizungsabschaltung vom 25.02.13 bis 28.02.13 bei tiefen Aussentemperaturen wird im folgenden Diagramm erkenntlich. Nach dem Ausschalten der Heizung fiel die Innentemperatur im Chor innert 24h von 16°C auf 11°C und sank bis zum Wiedereinschalten der Bank-, Fenster- und Fussbodenheizung am 28.02.13 um 09.00 Uhr auf rund 8°C. Der Temperaturverlauf am Fenster Süd zeigt der Einfluss der Sonneneinstrahlung und nachts die Absenkung bis auf ein Minimum von 3.8°C. Der Vergleich mit der Kunstverglasung am Ostfenster zeigt den Einfluss der Schutzverglasung durch den nachts stets höheren Temperaturverlauf. Weiter ist zu beachten, dass die Taupunkttemperatur im Chor stets weit unter der Temperatur des Fensters Süd (ohne Schutzverglasung) verlief.

Nach dem Wiedereinschalten der Heizung erhöhte sich die Temperatur im Chor innert 12h auf 12°C und nach 24h auf 15.5°C. Während der Zeit ohne Heizung machte das Aussentemperaturmittel -1.0°C aus.

Es ist also möglich, die Heizung selbst mit der trägen Wärmeabgabe über den Fussboden mit zwischen den Nutzungen liegenden Abschaltungen zu betreiben, da innert einem Tag auch bei Aussentemperaturen um den Gefrierpunkt die Ausgangstemperatur wie vor der Abschaltung wieder erreicht werden kann.

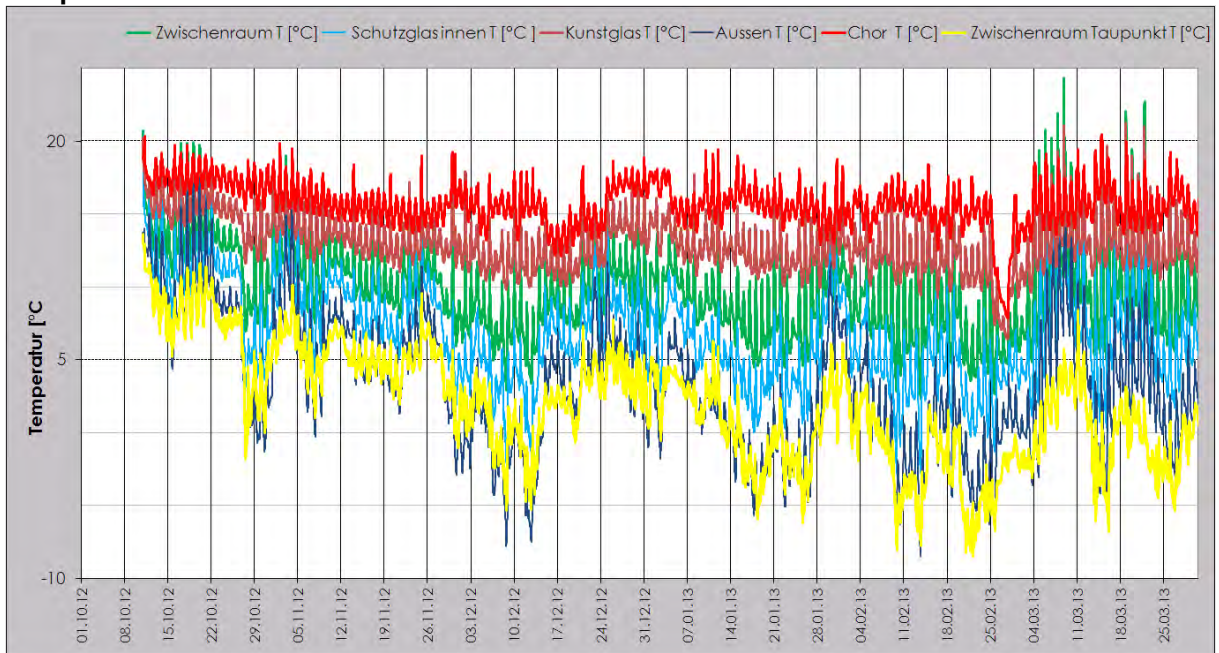
**Baumann Akustik und Bauphysik AG****Temperaturverlauf während Heizungsabschaltung vom 23.02.13 bis 03.03.13**

Messstellen:

KunstglasT(4); Aussen T; Chor T&TP; Fensterglas Süd T

4.2 Klimamessungen am Chorfenster während der Heizperiode 2012-2013

(Siehe auch IR- Aufnahmen im Anhang)

Temperaturverlauf am Chorfenster vom 11.10.13 bis 03.03.13Messstellen: Aussen (3.1°C), Chor (15.7°C/47%), Zwischenraum (9.8°C/58%), Kunstglas (13.0°C)
Schutzglas innen (6.9°C), Zwischenraum Taupunkt (1.8°C), Rahmen Kunstverglasung innen (11.9°C).



Die mittlere Oberflächentemperatur der Kunstverglasung (4) mit 13.0°C ist um 2.7°C tiefer als die Lufttemperatur im Chor mit 15.7°C und weist praktisch den gleichen Unterschied von 2.9°C zwischen der Lufttemperatur im Zwischenraum von 9.8°C und der Schutzverglasung (2) von 6.9°C auf.

Der Mittelwert der Taupunkttemperatur im Zwischenraum von 1.9°C ist um 7.9°C tiefer als die Lufttemperatur im Zwischenraum mit 9.8°C .

Im Vergleich zur mittleren Luftfeuchte im Zwischenraum von 58% würde erst mit einer Erhöhung auf 85% Oberflächenkondensat an der Schutzverglasung (2) auftreten.

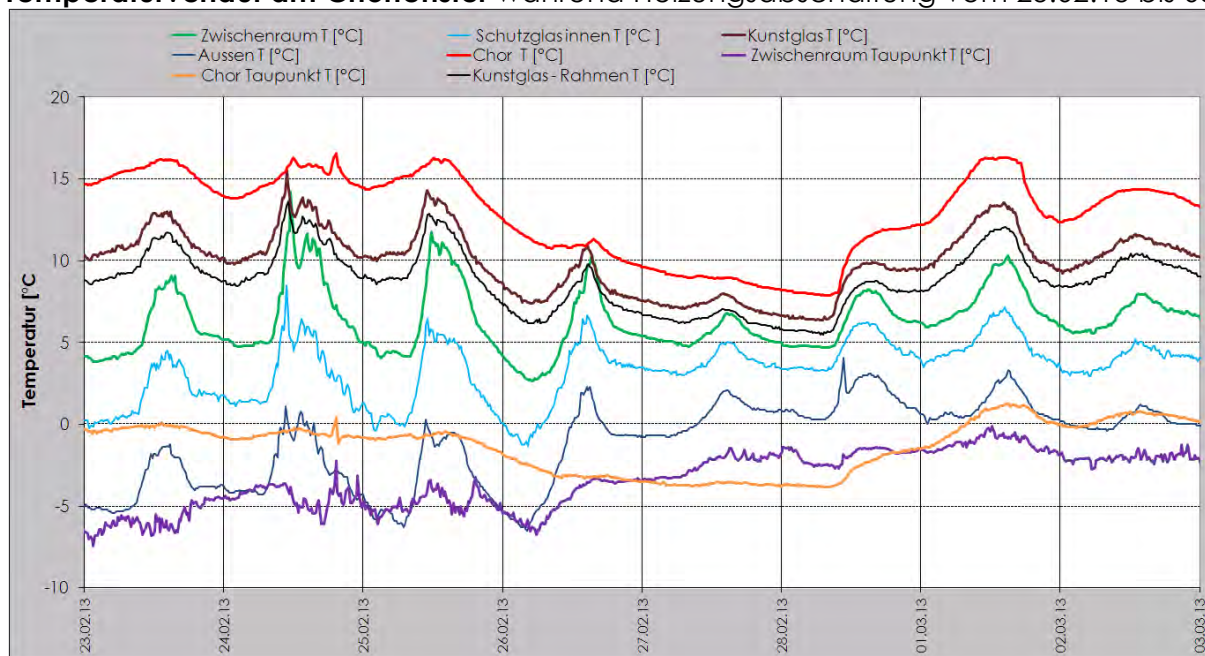
Damit an der Kunstverglasung (4) Oberflächenkondensat auftreten könnte, müsste die relative Luftfeuchte im Chor bei gleicher Lufttemperatur von 15.7°C statt 47% sich auf 85% erhöhen.

Das heisst, dass über die ganze Heizperiode betrachtet, am Ostfenster an der Kunstverglasung, am dazugehörigen Stahlrahmen und an der Schutzverglasung kein Oberflächenkondensat auftrat, weil die Taupunkttemperatur in der Kapelle mit 4.4°C einen grossen Abstand zu den entsprechenden Oberflächentemperaturen aufweist.

Die mittlere Oberflächentemperatur der Kunstverglasung am Südfenster ist unter Sonneneinwirkung mit 10.5°C um 2.5°C tiefer als diejenige am Ostfenster.

Es gilt nun zu untersuchen, ob bei gewissen Klimasituationen Oberflächenkondensat sowohl an der Kunstverglasung als auch am Schutzglas auftrat.

Temperaturverlauf am Chorfenster während Heizungsabschaltung vom 23.02.13 bis 03.03.13



Messstellen:

Aussen T, Chor T & TP, Zwischenraum T & TP, KunstglasT(4), SchutzglasT(2), Kunstglas-Rahment(4).

Die tiefsten Temperaturen während der Heizperiode wurden an den Fenstern nach der Heizungsabschaltung am 26.02.2013 um 04:30h an der Kunstverglasung Süd ohne Schutzverglasung mit 3.4°C und an der Kunstverglasung Ost mit Schutzverglasung mit 7.4°C gemes-



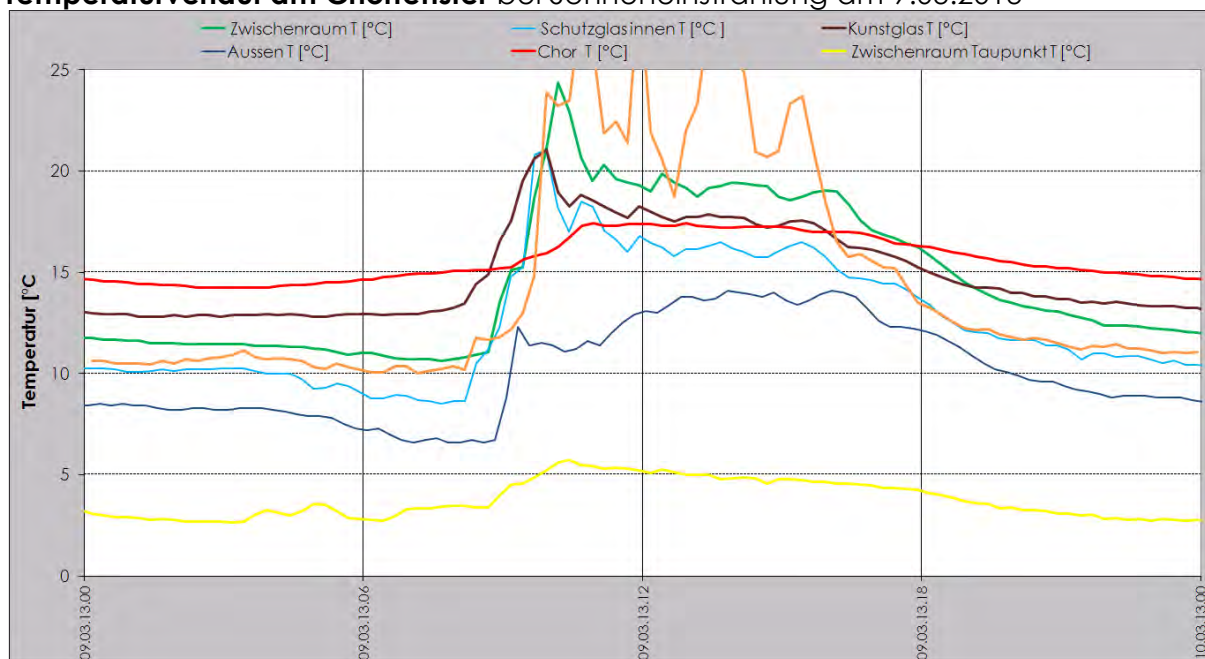
Baumann Akustik und Bauphysik AG

sen. Dabei betrug die Lufttemperatur im Chor noch 11.4°C , allerdings mit tiefer relativer Luftfeuchte von 37%.

Vor dem Wiedereinschalten der Heizung sank die Lufttemperatur im Chor auf 7.9°C .

Die Taupunkttemperatur wurde sowohl an der Kunstverglasung Ost mit dem Schutzglas als auch an der Kunstverglasung Süd ohne Schutzglas nie erreicht.

Temperaturverlauf am Chorfenster bei Sonneneinstrahlung am 9.03.2013



Messstellen:

AussenT, ChorT, Zwischenraum T&TP, KunstglasT(4), SchutzglasT(2), Kunstglas-RahmenT(4)

Eine weitere extreme Klimasituation zur momentanen Bildung von Oberflächenkondensat an den Gläsern könnte bei Sonneneinstrahlung auftreten. Das obige Diagramm zeigt die Temperaturverläufe an einem typischen Frühlingstag bei Aussentemperaturen zwischen 5 bis 15°C . Die schnellen Temperaturanstiege an der Schutzverglasung und zum Vergleich auch am Südfenster sind Hinweise auf die an diesem Tag erfolgte Sonneneinstrahlung.

Die Innentemperatur erreicht um 10 Uhr im Zwischenraum des Chorfensters ein Maximum von knapp 25°C , dabei fällt die relative Luftfeuchte auf 30%. Die Taupunkttemperatur wurde innenseitig nie erreicht und weist einen noch grösseren Abstand zur Temperatur am Schutzglas auf als während der Heizperiode.



5. Heizenergiebedarf

5.1 Allgemein

In den vielen zumeist über hundertjährigen Landeskirchen der Schweiz war es erst ab dem 19. Jh. möglich zu heizen (z.T. mit kohlebefeuelten Warmluftheizungen oder mit Einzelöfen). Ab etwa 1930 wurden die Kirchen mit der blossen Drehung eines Schalters mühelos elektrisch beheizbar. Eine durchschnittliche Landeskirche weist Aussenwände in Bruchsteinmauerwerk von mehr als 0.5m Stärke auf und steht oft an gut besonntem Standort mit der Hauptausrichtung von Westen nach Osten.

Eine statische Betrachtungsweise ohne Berücksichtigung der solaren Wärmegewinne wie z.B. die Annahme eines U-Wertes aufgrund der Materialeigenschaften einer Aussenwand (Bruchstein, Kalkmörtel) führt deshalb zu einem unrealistischen überdimensionierten Wärmeleistungsbedarf. Hinzu kommt, dass bei temporärer Nutzung nach dem Einschalten der Heizung sich zuerst die Innenluft erwärmt und erst nach grösser werdendem Temperaturunterschied zwischen Raumluf- und Wandoberflächentemperatur die zugeführte Heizenergie für die „Ladung“ der massiven Bauteile zur Verfügung steht. Wenn also nur kurzzeitig beheizt wird, kann Heizenergie gespart werden.

5.2 Ermittlung Heizenergiebedarf mit HELIOS- Simulation (EMPA)²

Gilt es den Heizenergieverbrauch von Kirchen theoretisch zu ermitteln, kann dies nur mit einem dynamischen Rechenmodell erfolgen. Damit ist man in der Lage, verschiedene Sparmöglichkeiten für Heizenergie zuverlässig zu berechnen. Das „HELIOS“-Rechenverfahren ist ein dynamisches Ein-Zonen-Simulationsmodell zur Erfassung des thermischen Verhaltens von Gebäuden unter Berücksichtigung der kurz- und langwelligen Strahlungsvorgänge. Das Rechenmodell verwendet die Energiebilanzmethode. Damit werden dynamische Speichervorgänge berücksichtigt. Auch weitere Einflüsse wie z.B. Aussenklima, Benutzer, natürlicher Luftaustausch und die Art der Heizungsregelung können im Rechenmodell berücksichtigt werden.

Bei der St. Laurentiuskapelle Oberkirch sind einige günstige Voraussetzungen vorhanden, die einer theoretischen Berechnung des Heizenergieverbrauches entgegenkommen:

1. Ständiges Beheizen während der Winterperiode
2. Einfache Geometrie der Kirche
3. Klima- und Heizenergiemessungen ab 1.10.2012 bis 31.03.2013
4. Wärmeflussmessungen an den Aussenwänden (pendent).

Hinweise zur Berechnung

1. Es wurden die gemessenen Aussentemperaturen für die Berechnung verwendet
2. Der Wärmefluss der Fussbodenheizung in das Erdreich wurde berücksichtigt, indem mit der Veränderung der Erdreichtemperatur eine grosse Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den resultierenden Oberflächentemperaturen angestrebt wurde.
3. Letztlich wurde überprüft, ob die resultierende theoretische Innentemperatur mit den gemessenen übereinstimmt.

² EMPA Dübendorf Stefan Carl



Ergebnisse

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Ergebnisse der HELIOS-Simulation für vier Varianten dargestellt.

Massnahmen Varianten	Ist- Zustand	1	2	3	4
Innentemperatur	Ø16°C	Ø 14°C konst.	Ø16°C	Ø16°C	min. 10-18°C
Fenster	Ist-Zustand	Ist-Zustand	Kunstfenster + 2 IV	Ist-Zustand	Ist-Zustand
Dämmputz	-	-	-	Dämmputz 5cm	-
Ein-Absenkbetrieb Aufheizen während 12h (min. 10°C)					Zwei Anlässe pro Woche 16-18°C
Heizenergiebedarf	53'750 kWh	43'440 kWh	49'400kWh	28'790 kWh	32'700 kWh
Heizenergiebedarf	100%	81%	92%	54%	61%

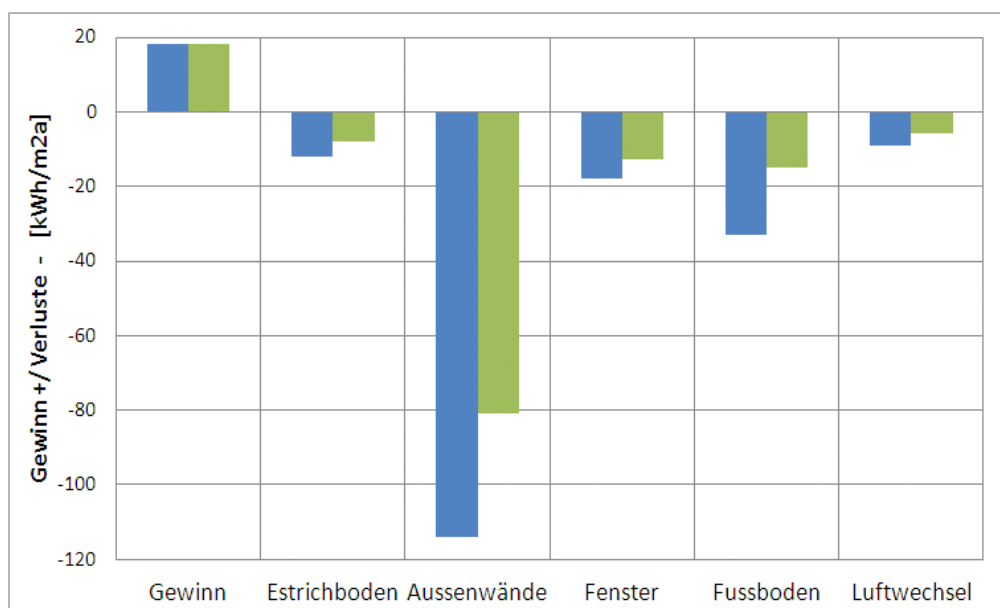
Die grösste Einsparung an Heizenergie mit 46% würde das Aufbringen eines Dämmputzes auf die Aussenwände bringen (Variante 3). Die geringste Einsparung mit 8% ergäbe sich, wenn alle Fenster mit einer IV-Schutzverglasung (U-Wert:<1.0) versehen würden (Variante 2). Die effizienteste Massnahme ist allerdings die Umstellung des praktizierten Heizbetriebes auf einen Ein- und Abschaltbetrieb mit einer Einsparung von 39% (Variante 4).

In allen diesen Fällen wurde nicht berücksichtigt, dass die zusätzliche Dämmung des Estrichbodens durch das Verfüllen des Hohlraumes mit Zellulose und damit einhergehender Reduktion des natürlichen Luftwechsels über die Decke in den Estrich, eine zusätzliche Einsparung von ca. 4% bewirken würde.

Im folgenden Diagramm sind Wärmegewinne (Sonne, Personen, Licht) und -verluste über Bauteile und natürlichen Luftwechsel für den Ist-Zustand (Heizperiode) als auch im neuen Heizbetrieb dargestellt. Dem für beide Zustände unveränderten Gewinn von 18 kWh/m² stehen die Summe der unterschiedlichen Verluste von 186 kWh/m² im Ist- Zustand bzw. 123 kWh/m² im Ein-Ausschaltbetrieb gegenüber.

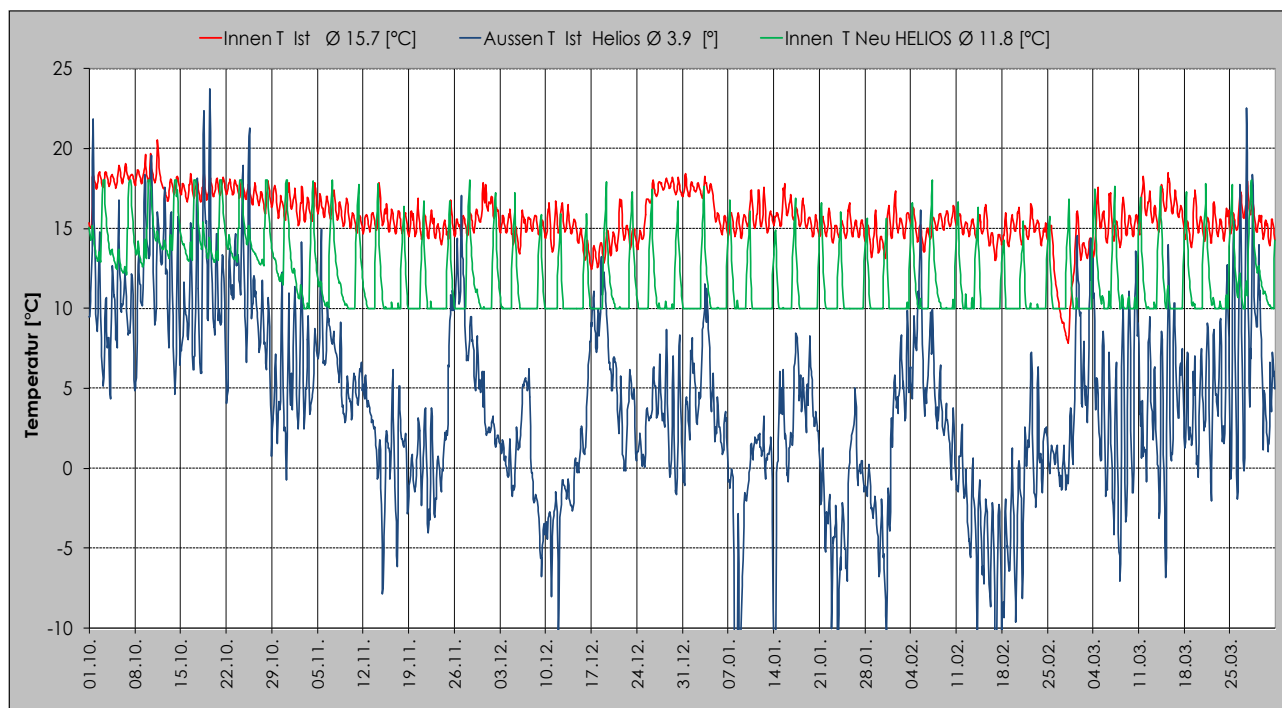
Wärmegewinne und -verluste im Ist-Zustand (blau) und neuem Ein-Absenkbetrieb (grün) [kWh/m²]

Transmissionsverluste Total: Ist-Zustand 186 kWh/m²; Neu-Zustand:123 kWh/m²





Temperaturverlauf im Ist- Zustand und neuem Ein- Absenkbetrieb



Im obigem Diagramm ist die gemessene Aussen- und Innentemperatur (rot) und der berechnete Verlauf der Innentemperatur im neuen Ein- Absenkbetrieb (grün) als 2-Stunden-Wert dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass im neuen Heizbetrieb eine Innentemperatur von 10°C nie unterschritten wird. Weiter stellen die grünen „Spitzen“ die Innentemperatur bei wöchentlich zweimaliger Belegung dar und zeigen, dass diese sich in ähnlichem Bereich wie beim heute praktizierten Durchheizbetrieb, also zwischen 16-18°C, einstellen würden. Die mittlere Innentemperatur wird damit von rund 16°C auf rund 12°C fallen, was eine erhebliche Einsparung von Heizenergie von rund 40% zur Folge hat.



6. Schlussfolgerungen

6.1 Ziele

Den durchgeführten Untersuchungen standen zwei Hauptziele zu Grunde:

1. Aufzeigen von Massnahmen zur Einsparung an Heizenergie
2. Detailuntersuchungen am Chorfenster zur Abklärung von Kondensataufkommen und allfällige Massnahmen

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse erläutert.

6.2 Einsparung an Heizenergie

Neue Heizungsregelung

Bei gleichen Komfortbedingungen für die Belegung wie bisher empfiehlt sich die Umstellung des praktizierten Heizbetriebes auf einen Ein- und Absenkbetrieb mit der Installation einer speicher-programmierten Steuerung. Der Versuch der Heizungsabschaltung und das Wiederaufheizen haben gezeigt, dass die installierte Heizleistung ausreicht, um bei Aussentemperaturen unter 0°C von 8°C auf rund 16°C innerhalb 24h aufzuheizen. Es ist also möglich, die Heizung selbst mit der trägen Wärmeabgabe über den Fussboden mit zwischen den Nutzungen liegenden zeitweiligen Abschaltungen, zu betreiben.

Wenn nach einer Belegung nicht am folgenden Tage eine Nutzung erfolgt, macht es Sinn die Heizung abzuschalten. In der Heizwärmebedarfsberechnung mit dem Simulationsprogramm HELIOS wurde ab einer Ausgangstemperatur von 10°C und einer maximalen Aufheizzeit von 12h gerechnet.

Zusammen mit der zusätzlichen Dämmung des Estrichbodens wird eine sehr effiziente Energieeinsparung erreicht. Seitens des Betriebspersonals erfordert dies nur noch das Eingeben der bevorstehenden Anlässe auf dem Bildschirm des Heizungsreglers.

Richtpreis neue Heizungsregelung: Fr. 30'000.-³

Wärmedämmung der Decke

Mit dem zusätzlichen Ausblasen des Hohlraumes des Estrichbodens mit Zelluloseflocken und damit der Verringerung des Luftaustausches gegen den Estrich, wird zusätzlich 4% Heizenergie gespart. Im Zusammenhang mit dieser Massnahme müssen auch die Undichtigkeiten der Dacheindeckung an verschiedenen Stellen behoben werden.

Richtpreis Dämmung: Fr. 5'000.-⁴

IV-Verglasung der Fenster

Eine umfassende IV-Verglasung (U-Wert <1.0) aller einfachverglasten Kunstverglasungen und des Ostfensters im Chor würde nur 9% Heizenergie einsparen. Unter Berücksichtigung des neuen Heizbetriebes würde somit die IV-Verglasung um 5% zusätzlich einsparen. Wird bei tiefen Aussentemperaturen während eines Anlasses die Fensterheizung eingeschaltet, können die Kaltluftbeeinträchtigungen von den Fenstern abgemindert werden.

Kostenschätzung neue IV-Verglasung: Fr.110'000.-⁵

³ AVM Solutions AG 9606 Bütschwil Grob- Kostenvoranschlag Klimaregelung 27.08.2013. www.syneos.ch

⁴ Isofloc AG Bütschwil, W. Senn Fr.160.- je m3 fertig eingeblasen

⁵ Kostenschätzung vom 26.08.13: Neue IV- Verglasung und Bleiverglasung sanieren, Mathies AG, SG



Wärmedämmputz

Die wirksamste Massnahme wäre das Aufbringen eines Wärmedämmputzes ($\lambda < 0.028$ W/mK) auf allen Aussenwänden. Aus denkmalpflegerischen Gründen und wegen des neuen Heizbetriebes, welche die Einsparung im Vergleich zu heute ebenfalls halbiert, kann diese Möglichkeit nicht empfohlen werden.

Richtpreis Wärmedämmputz: Fr.180'000.-⁶

6.3 Detailuntersuchungen am Chorfenster

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl während der Heizperiode als auch an einem Frühlingstag weder am Schutzglas noch auf den Glasmalereien Oberflächenkondensat auftrat. Im 20 cm breiten Zwischenraum zwischen Kunst- und Schutzverglasung war die Taupunkttemperatur stets tiefer als die Oberflächentemperatur an der kältesten Stelle der Schutzverglasung. In gleicher Weise trat am Glasmalereifenster nie Oberflächenkondensat auf. Das Innenklima der Kapelle müsste bei gleicher Innentemperatur statt im Mittel 47% sich auf 85% erhöhen damit Oberflächenkondensat auftreten würde.

Auch beim Versuch mit der Heizungsabschaltung, wo die Innentemperatur auf rund 8°C fiel, trat trotz Abkühlung am Kunstglas auf 6.5°C und am Schutzglas auf 0°C kein Oberflächenkondensat auf. An einem Frühlingstag zeigte sich, dass trotz plötzlicher Erwärmung durch die Sonneneinstrahlung auf das Fenster und damit dem Ansteigen der Lufttemperatur im Zwischenraum auf 25°C, kein Oberflächenkondensat auftrat.

Zusammenfassend zeigte sich, dass die Taupunkttemperatur stets einen grossen Abstand zur Temperatur am Schutzglas aufwies. Jede weitere Oberfläche, die räumlich näher zur beheizten Kapelle liegt, ist demzufolge noch unkritischer zum Risiko, dass Oberflächenkondensat auftreten könnte.

Der Grund, dass das Klima im Zwischenraum im Mittel mit 58% relativ trocken ist weist darauf hin, dass keine erwärmte und damit feuchtere Innenluft der Kapelle durch Undichtigkeiten der Kunstverglasung in den Zwischenraum strömte. Weiter ist daraus zu folgern, dass die Luftdichtigkeit der Kunstverglasung zur Kapelle grösser ist als diejenige der Schutzverglasung zum Aussenklima. Der breite Zwischenraum von 20 cm trägt durch das grössere eingeschlossene Luftvolumen und die Abminderung des Randeinflusses zum guten Schutz des Kunstfensters bei. Aus bauphysikalischen Gründen muss deshalb am vorhandenen Fenstersystem nichts verändert werden.

⁶ Richtwert für 4cm Wärmedämmputz Fr.300.-/m² vom 22.08.13 Thomas Stahl EMPA. www.fixit.ch



6.4 Abschliessende Bemerkungen

Energiebedarf und neuen Heizbetrieb

Als wichtigste Bestätigung gilt die präzise Voraussage der grossen Einsparung an Heizenergie durch einen neuen Heizbetrieb und die daraus resultierende Absenkung der mittleren Innentemperatur auf rund 12°C.

Im Vergleich zu übrigen elektrisch beheizten Kirchen der Schweiz liegt der Verbrauch der Friedhofkapelle Oberkirch für die Heizperiode 2012/13 um 57 % über dem Durchschnitt (Vorjahre 183 kWh/m²a).

Die vorgeschlagene speicherprogrammierte Heizungsregulierung ist in der Lage zu günstigen Zeiten über die neuen (motorisch betriebenen) Fensterflügel das Innenklima je nach Aussenklimabedingungen ganzjährig zu beeinflussen.

Die ergänzende Dämmung des Hohlraumes zwischen vorhandenen Wärmedämmung und dem Estrichboden mit Zelluloseflocken ist empfehlenswert.

Der Heizenergiebedarf gegenüber heute wird mit den vorgeschlagenen Massnahmen um mehr als die Hälfte verringert.

Fenster

Eher ungewöhnlich wurde selbst bei extremen Aussenklimabedingungen kein Oberflächenkondensat an den Kunstverglasungen ohne Schutzverglasung festgestellt.

Diese Beobachtung muss im Zusammenhang mit dem durchgehenden Heizbetrieb stehen, da die Oberflächentemperaturen an den Kunstverglasungen stets höher waren als diese sich rechnerisch ergäben. Warum dies so ist, hat auch mit der internen Luftumwälzung zu tun, die wegen des ununterbrochenen Heizbetriebes die Temperaturen der Glasoberflächen durch den steten oberflächennahen Luftstrom erwärmte (auch nachts).

Weiter beeinflusst die tiefe relative Luftfeuchte in der Kapelle die Taupunkttemperatur was wiederum im Zusammenhang mit dem steten Heizen zu sehen ist. Während der Heizperiode ist eine andauernde Austrocknung durch den Austausch der trockeneren Aussenluft mit der feuchteren Innenluft im Gange, welche im Herbst mit dem Heizen beginnt und im Sommer nach dem Abschalten aufhört.

So lässt sich auch begründen wieso nach einer Abschaltung der Heizung während vier Tagen keine Taupunktunterschreitung an den Kunstverglasungen auftrat, da zu diesem Zeitpunkt die raumumschliessenden Materialien (Innenputz, Holzdecke und Innenausstattung) eine der relativen Luftfeuchte entsprechende tiefe Materialfeuchte aufwiesen und damit keine Feuchte aus diesen Materialien der Innenluft zuströmte.

Die relativ hohen Glasoberflächentemperaturen und die tiefen Taupunkttemperaturen sind der Grund, dass nie Oberflächenkondensat auftrat.

Neu Schutzverglasung für die Kunstverglasungen

Mit dem vorgeschlagenen neuen Heizbetrieb und damit der Absenkung der mittleren Innentemperatur auf 12°C, ist eine mittlere Luftfeuchte von 60% zu erwarten.

Dies hat zur Folge, dass bereits bei einer Aussentemperatur um 0°C Oberflächenkondensat an den Kunstverglasungen ohne Schutzverglasung auftreten würde.



Baumann Akustik und Bauphysik AG

Weil inskünftig die Zeiten ohne Heizen von längerer Dauer sein werden als die Zeiten mit Heizen werden infolge einer geringeren Konvektion, tiefere Oberflächentemperaturen an der Kunstverglasung und höhere relative Luftfeuchten zu erwarten sein.

Aus diesem Grunde kann die bestehende Kunstverglasung nicht ohne Schutzverglasung belassen werden. Es ist also nicht primär aus Gründen Heizenergie zu sparen eine Schutzverglasung nötig, sondern wegen der Vermeidung von Oberflächenkondensat.

Eine der Kunstverglasung vorgesetzte Schutzverglasung mit Einfachglas würde auch bei einer Luftfeuchte von mehr als 70% nie zu einer Kondensatbildung am Kunstglas führen.

Eine Schutzverglasung in grösserem Abstand zur Kunstverglasung weist viele Vorteile auf und ist mit einer 2 IV Verglasung in kleinem Abstand zur Kunstverglasung und der Berücksichtigung der geringeren Randeinflüsse bezüglich Wärmeverluste des ganzen Fenstersystems annähernd gleichwertig.

Mit dem neuen Heizbetrieb dürfte der Anteil der Transmissionsverluste der Fenster mit einer Schutzverglasung aus Einfachglas noch etwa 2-3% ausmachen.

Die bestehende Schutzverglasung am Ostfenster kann dabei belassen werden.

Unterhaltsarbeiten:

- Sanierung Dacheindeckung
- Kontrolle Fussbodenheizung Schiff Mittelgang gegen Süden (vergl. S. 28).

Bazenheid, 25.10.2013

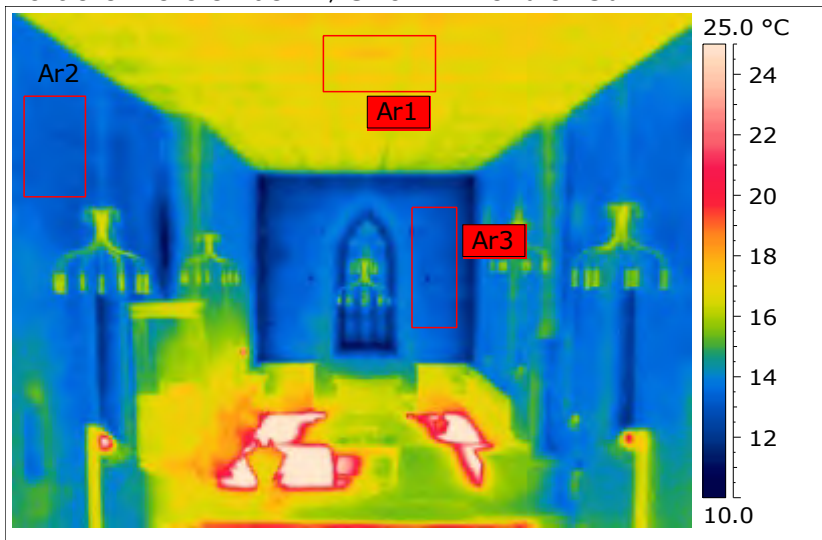
Ernst Baumann



8. Anhang

IR- Aufnahmen 11.12.2012 von 11h – 12h

Vorderer Bereich Schiff, Chor mit Fenster Ost



Messungen:

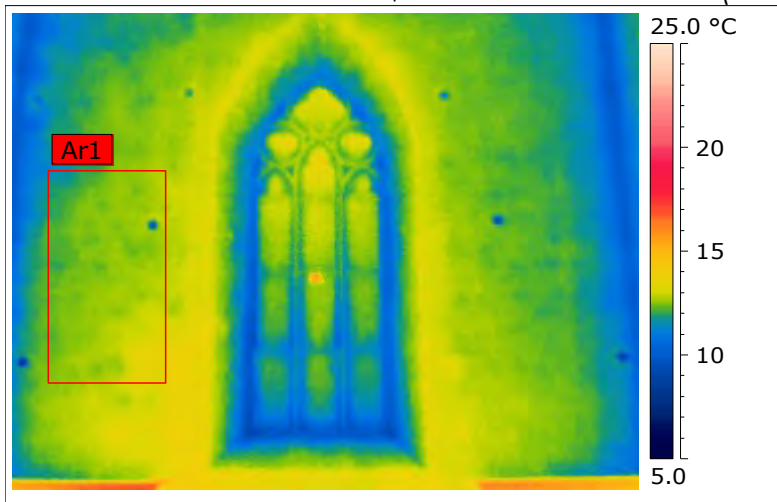
Luft: Aussen 0°C; Chor 16.5°C; Empore Orgel 16°C/ Unter Empore:19°C

Oberflächen: Decke (Ar1) 17.7°C; Chorwand (Ar3) 13.6°C; Aussenwand Nord (Ar2)13.9°C;

Fussbodenheizung Chor in Betrieb

Chorfenster

Übersicht Aufnahme links IR; rechts mit Messstellen (roter Kreis) links unten 1-3; Mitte 4



	Messungen am: 11.12.12 11h	Temp. [°C]	r.F. [%]	Taupunkt
1	Chorfenster Glas	12.9		
2	Chorfenster Rahmen	11.6		
3	Schutzglas innen	4.5		
4	Zwischenraum Glas	8.4	54	-0.3
	Chor vor Fenster	16.5	41	3.2
	Aussen	-0.2	93	

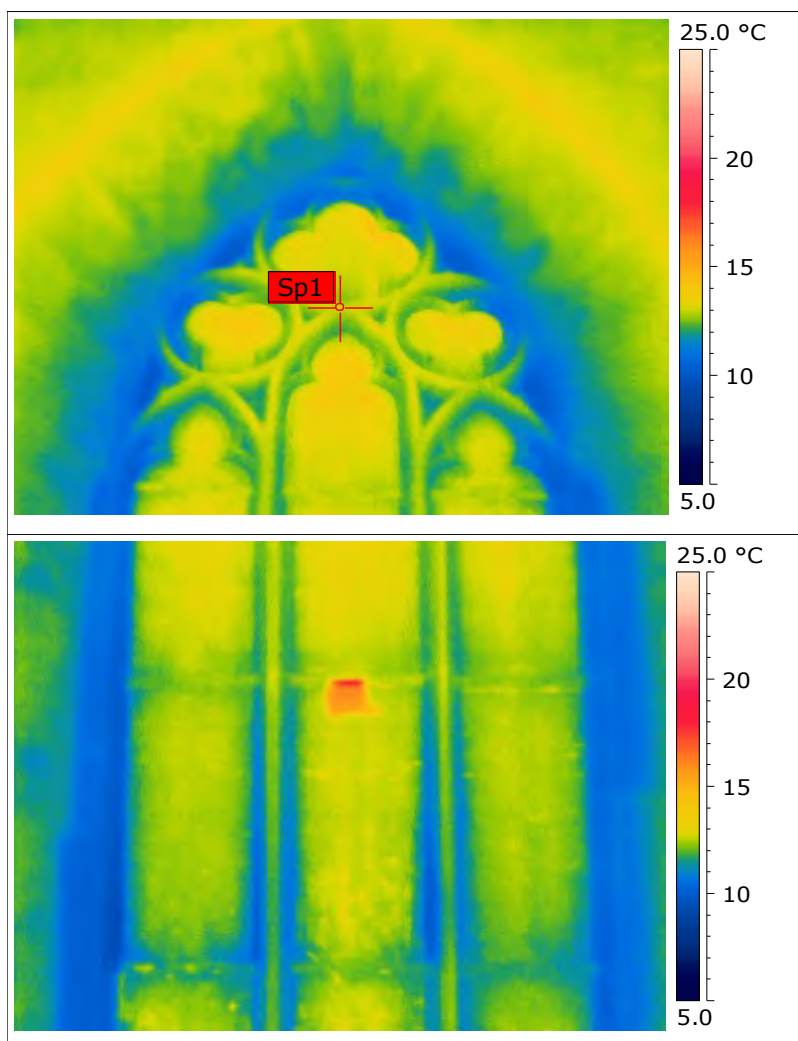
**Baumann Akustik und Bauphysik AG**

Chorfenster: IR – Detailaufnahmen vom 11. 12. 2012 11h

Anmerkung: Messgerät vor Chorfenster 16.5°C (Rotes Rechteck)

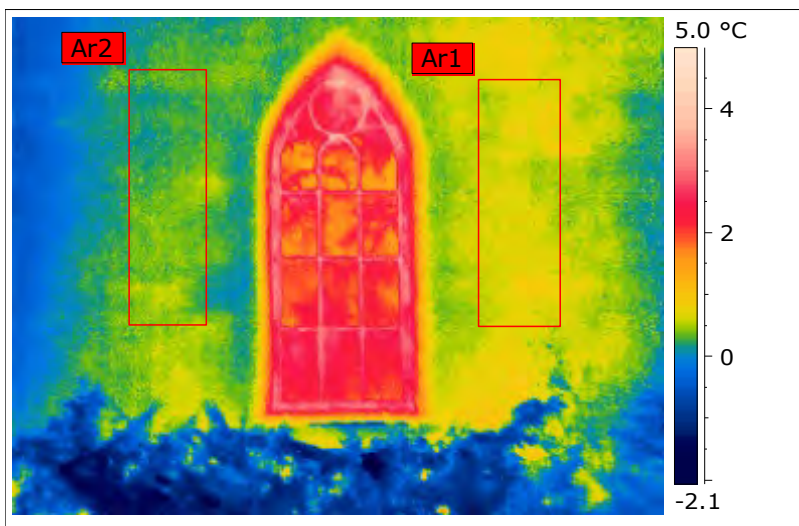
Temperaturunterschied SP1 unten 10.4°C; oben SP1 13.0°C:

Messtelle Sp2 auf Stahlrahmen: 11.8°C; mit Oberflächenfühler:11.6°C





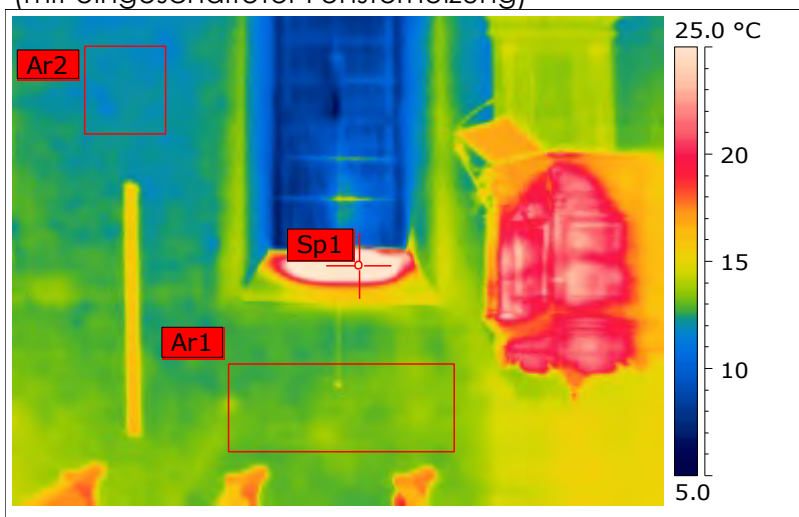
Chorfenster von Aussen



Messungen:

Luft: Aussen 0°C; Chor innen 16.5°C;

Oberflächen: Aussenwand rechts vom Fenster (Ar1) 1.2°C; Aussenwand links vom Fenster (Ar2) 0.8°C

Kunstfenster Nordseite von Innen
(mit eingeschalteter Fensterheizung)

Messungen:

Luft: Aussen 0°C; Chor 16.5°C;

Oberflächen: Aussenwand unter Fenster (Ar1) 15.1°C; Aussenwand links vom Fenster (Ar2) 12.5°C. Sandsteinabdeckung über Heizelementen (SP1) 42°C unterer Bereich wärmer als oberer Bereich 15.2-10.8°C

Anhang 4

**Beitrag im Tagungsband „Recent Advances in Glass, Stained-Glass and Ceramics
Conservation“**

**„Protective Glazing: The Conflict Between Energy-saving and Conservation
Requirements“**

Protective Glazing: The Conflict Between Energy-Saving and Conservation Requirements

Sophie Wolf*, Stefan Trümpler, Karim Ghazi Wakili, Bruno Binder, Ernst Baumann

* Corresponding author

Keywords

stained glass; conservation; protective glazing; energy efficiency; heat loss

Abstract

Heating a historic church is expensive. To improve the energy efficiency of such churches, their windows are increasingly fitted with protective glazing using a double-glazed unit. This applies particularly to the great number of parish churches in Switzerland with post-mediaeval stained-glass windows. The added glazing is intended to protect the stained glass from weathering and to provide thermal insulation. In a collaborative research project, we are exploring whether, or to what extent, protective-glazing systems that are primarily fitted for insulation purposes fulfil energy-saving and conservation requirements. Among other issues, we are investigating the thermal efficiency and condensation behaviour of various protective-glazing systems. The aim of this study is to assist church authorities, architects, and monument conservators to evaluate energy-saving options.

Context and Aims of the Project

Switzerland has approximately 5,000 parish churches. About 80% of these churches were built before 1850 and have historic stained-glass windows that, with the exception of a comparatively small number of mediaeval windows, date mostly from the nineteenth and twentieth century. However, these churches also feature some restored Renaissance and Baroque glazing. Although originally constructed without heating systems, today the great majority of these buildings are heated (Giezendanner 2009, p. 24). Heating such large and mostly non-insulated buildings is usually very costly. The annual heating costs for a parish church in Switzerland lie between 5,000 and 40,000 CHF, depending on the heating system and the energy source used (Bickel and others 2009, p. 9). The average cost is 9,600 CHF (€ 8,000) per year. Two-thirds of the churches are heated electrically, with average annual heating costs of 7,200 CHF (€ 6,000) (Aufderreggen 2012). Because of rising energy costs, and encouraged by the current energy debate, church authorities are trying to lower the energy consumption of their buildings.

Numerous guidelines have been published that provide advice on how to improve the energy efficiency of churches (for example Dahm 2010). Measures to improve the windows are usually outlined among options to reduce heat loss in buildings and lower heating costs (Bickel and others 2009, p. 19). When considering energy-saving options, there is a tendency to assume that windows represent a determining factor in reducing energy consumption. This has already led church authorities to install protective glazing on a large scale. In the canton of Zurich alone, an estimated 50% of its nearly 300 churches have been fitted with protective glazing in the past 30 years, and the trend to install protective glazing for 'energy-saving' reasons continues. However, protective-glazing systems not only are intended to improve the thermal properties of churches, but also have to fulfil a number of other requirements: to protect the stained glass from environmental impact and vandalism, to reduce condensation on the historic windows and surrounding structures, to be aesthetically in keeping with the rest of the building, and to reduce the number of interventions (restoration, conservation, maintenance) on the stained glass.

The question as to whether thermally efficient protective glazing (e.g. protective-glazing systems glazed with a double-glazed unit) also represent an effective solution in terms of conservation has become fundamental to the preservation of the large body of post-mediaeval stained glass in Switzerland. The question becomes even more critical in the long-term if one considers the high cost of fitting protective glazing, the low durability of polymer materials often used in such glazing (e.g. silicone sealants), and the risk of subsequent damage to the stained glass and building structures adjacent to the windows (see, for example, Baumann, Zehnder, and Rüegg 1998).

In the process of planning for the renovation and thermal retrofitting of churches, architects and building owners in Switzerland are advised to follow the guidelines of the Swiss Federal Office of Energy and the Federal Commission of Monument Preservation, according to which the effects of measures to improve the thermal properties of a historic building have to be quantified (Furrer and others 2009). However, appropriate methods and techniques to quantify measures and evaluate requirements (conservation, aesthetic considerations, energy saving, comfort, etc.) have yet to be defined. There is a general lack of experience when it comes to understanding the effects of certain types of protective glazing on stained-glass windows; further, there is an inadequate understanding of the thermal losses and climatic impacts (condensation on the stained glass in particular). In order to close this gap, the Vitrocentre Romont initiated an interdisciplinary research project in 2012. The aims of the project are twofold:

1. To determine the overall heat transfer coefficient of historic windows fitted with protective glazing based on calculations and measurements in a climate chamber, the so-called 'hot box'.
2. To investigate the climatic effects of protective glazing, particularly condensation, on stained-glass windows, by initiating a survey in situ of post-mediaeval stained-glass windows with protective glazing, and by recording measurements in a weathering chamber.

The project has focused on two particular protective-glazing systems: (1) protective glazing fitted in a metal frame and glazed with a single glass sheet, and (2) protective glazing fitted in a metal frame and glazed with a double-glazed unit. Both systems have been evaluated with and without external ventilation. Despite being widespread in Swiss parish churches with stained glass from the nineteenth and twentieth century, these protective-glazing systems have

hitherto received insufficient attention. Isothermal glazing, a system more commonly used in the preservation of mediaeval stained glass, has been excluded from this study.

The results of this investigation should enable the following questions to be answered. To what extent do the above-mentioned glazing systems improve the thermal efficiency of historic windows? Do they meet preservation requirements (by, for example, preventing condensation on the stained glass)? It is also hoped, that this study goes some way towards identifying appropriate solutions for the comprehensive, long-term preservation of post-mediaeval stained-glass windows in Switzerland.

Efficiency of Protective Glazing: Current State of Research

Condensation problems related to protective glazing have been reported from various places all over Europe (see, for example, Bacher 1988; Trümpler 1988; Berkenkopf 2005). The observations prompted research on the effectiveness of protective-glazing systems (see the overview in Oidtmann, Leissner, and Römich 2000; Römich 2004; Hör and Seele 2005). Among the first researchers to study systematically the effects of internally and externally ventilated as well as unventilated protective-glazing systems under variable climatic conditions was Stefan Oidtmann, who carried out simulations in a hot box and compared them to in situ measurements (Oidtmann 1994). Many studies have followed since, including the European research project VIDRIO, which aimed to monitor the climatic conditions of stained-glass windows with internally ventilated protective-glazing systems, and to develop methods to detect condensation in the interspace between the historic window and the protective glazing (Bernardi and others 2012). Researchers from the Federal Institute for Materials Research and Testing in Berlin have looked at, among other things, the problem of dust deposition in the interspace in isothermal glazing (Torge and Müller 2011; Torge, Bückner, and Feldmann, 2013). To date, however, research has concentrated mostly on the conservation aspects of protective-glazing systems in general, and isothermal glazing in particular. To our knowledge, the only investigation focussing on the thermal effectiveness of protective glazing was published by researchers from Eindhoven Technical University (Neilen, Schellen, and van Aarle 2003).



Fig. 1. Unventilated protective glazing fitted in a metal or wood frame: 'Église des Capucins' in Romont, installed around 1950 (left); Parish church of Frauenfeld-Oberkirch, installed probably before or around 1900 (right). Photos: authors.

Those authors provide interesting insights into the energy efficiency of various insulation measures (including double glazing) in churches. They also point out that, among the various options to improve energy efficiency, the thermal insulation of a church's roof and floors, as well as the replacement of old heating systems, usually provides much more potential for energy saving than the installation of protective glazing. Their conclusions draw on the evaluation (from a conservation as well as an energy perspective) of heating systems in churches (see, for example, Schellen 2004; Limpens-Neilen 2006). They also draw on the development of sustainable heating concepts such as 'friendly heating' (Camuffo and others 2010), which have found their way into various guidelines, textbooks, and standards on how to heat historic buildings appropriately (for example DIN EN 15757). Yet, despite these findings, church owners in Switzerland are reluctant to review the options to reduce heating costs (for example, by reducing temperature set

points for heating). The fact that the Vitrocentre Romont continues to be consulted on the choice of thermally effective protective-glazing systems seems to justify further investigations into the efficiency of such systems, both in terms of energy and conservation.

Results

Efficiency of Protective Glazing in Swiss Parish Churches

One type of protective glazing with which the Vitrocentre Romont has been confronted in recent years (in connection with restoration and monitoring projects) is a system that was prevalent in the 1950s or even earlier. This type of protective glazing is fitted in a metal or wood frame to the window's reveal (i.e. the masonry adjoining the window) and is not connected structurally to the historic window (figure 1).



Fig. 2. 'Bonded' protective-glazing system: stained glass fitted in a metal frame together with the protective glazing, installed around 1970. Photo: authors.

It is usually unventilated, although such protective glazing is rarely perfectly airtight. The interspace between the stained-glass window and the protective glazing normally ranges between 10 and 30 cm, depending on the width of the window reveal. The framing is usually delicate. Occasionally, the drawn glass has been preserved, and the stained glass has remained untouched in its original place. Our observations show that this type of protective glazing is still effective in protecting the stained glass. Because of the limited extent of external ventilation, these systems have created very good climatic and conservation conditions for (at least certain types of) stained glass.

Another type of protective glazing became common in the second half of the twentieth century. Here, the stained glass is fitted in a metal frame together with the protective glazing to form a new type of 'bonded' glazing; the interspace between the stained glass and the protective glazing glazed with a single glass sheet is usually less than 4 cm and normally unventilated. This leads to condensation on cold surfaces in the interspace: in winter on the inner side of the protective glazing, and in summer on the outside of the stained glass and the lead cames (figure 2). Another problem associated with these 'bonded' systems is that structural changes have to be made to the historic windows. For example, the stained glass has to be trimmed to fit the new frame, and historic armouring usually has to be removed. Finally, a type of protective glazing that has found increasing use since the 1980s consists of unventilated systems that combine the stained glass with double-glazed units (figure 3). Practical experience shows that the fitting of such sys-

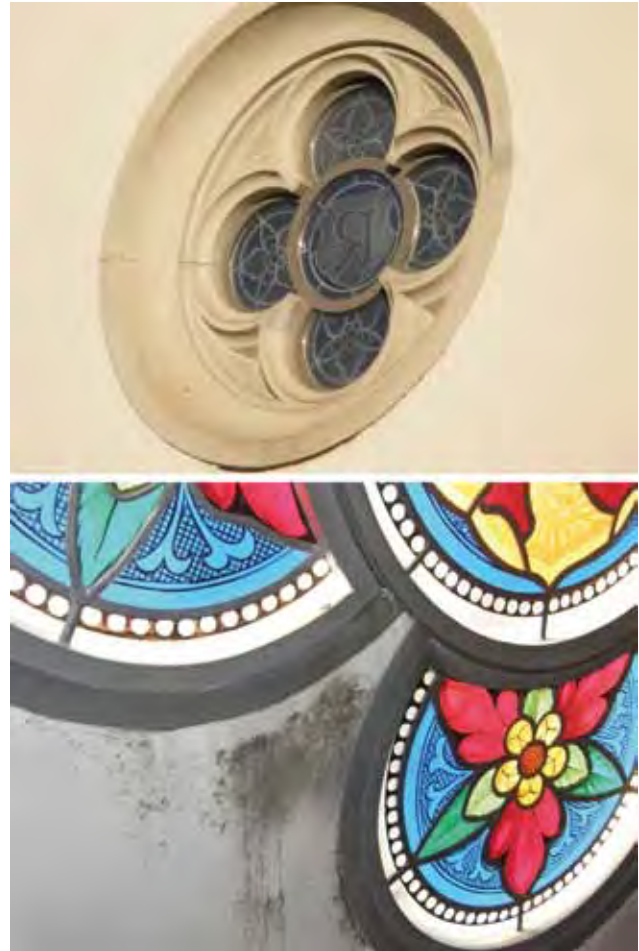


Fig. 3. Protective glazing fitted with a double glazing unit: outside view (above) and inside view showing fungal growth on the walls surrounding the stained-glass window (below). Photos: authors.

tems does not solve but only shifts the problem of condensation. Under certain climatic conditions, water condenses not on the glass surfaces but on the frames and cold wall surfaces adjacent to the windows. If the water is not properly drained, it can lead to damage and fungal growth (figure 3, bottom picture). In some cases, the double glazing creates quasi 'hermetic' conditions, which, in contrast to the originally permeable stained-glass windows (which often included little vent windows), can lead to climatic conditions that are detrimental to the interior of the church (affecting woodwork, wall paintings, organ, etc.). One variant of such a double-glazed protective glazing is the so-called 'sandwich glazing', which involves the stained glass being fitted between the two panes of a double-glazed unit (figure 4). The main problem with this system is the limited durability of the materials used in the double glazing.



Fig. 4. Type of double-glazed protective glazing known as 'sandwich glazing', installed around 1990. Photo: authors.

Over the years, the silicone sealing begins to leak, leading to condensation on the stained glass.

The durability of double-glazing systems has been shown to be relatively short compared with the lifetime of historic stained-glass windows with 'low-tech' protective glazing, which – if properly maintained – can span a century. The short lifespan of double glazing (with replacement likely to be necessary every 20 to 30 years) presents additional risks for the historic windows as well as additional costs, which are usually not included in the original cost calculations for improving the thermal efficiency of the church. Considering the risks and the costs of repair or replacement, double-glazing systems seem to be less sustainable than, for example, the 'simpler' protective-glazing systems that use a single glass sheet. One might also add that the possibilities of an aesthetic integration of a protective glazing using double-glazed units into church façades are limited in comparison with (to give an example) a frameless protective-glazing system or single-pane protective glazing framed in thin wooden or metallic frames.

Preliminary Experiments and Calculations

Preliminary measurements in a hot box, as well as thermal calculations, have been carried out in order to determine the overall heat transfer through various glazing systems in steady-state conditions (i.e. at constant internal and external air temperatures). The measurements provide the thermal transmission coefficients, called U -factor, for the tested glazing systems and allow verification of the thermal calcula-

tions. The U -factor is expressed in $W/m^2 K$ and represents the amount of heat transfer per square metre and per degree of temperature difference between the warm side and the cold side of the tested element. The rule is that the higher the U -factor, the higher the heat loss of the tested element. Three hot-box experiments have been carried out so far. In the first one, a stained-glass window (146 x 71.5 x 2.5 cm) fitted with a double-glazed protective glazing was tested. The stained glass was taken from Vitromusée Romont's depository and dates from around 1910. The dimensions of the unventilated interspace between the stained glass and the protective glazing were as follows: height 146 cm, length 71 cm, and width 0.39 cm. In the second experiment, the same assembly was used but was ventilated to the exterior and the interspace was slightly enlarged (gap width 0.44 cm) to allow for natural convection by four openings in the protective-element. A third experiment was conducted with the double glazing alone to get the precise U -factor of the unit. This last test also represents the reference measurement when comparing calculations to measurements. Figure 5 shows the stained-glass window and the double-glazed unit as well as a model cross-section of the tested glazing systems. In all three cases, the assembly was surrounded by insulating material with a known thermal conductivity in order to evaluate the thermal performance of the window only. The temperatures chosen in the measurements were 17°C for the room side and 2°C as the outdoor temperature. For the ventilated assembly, thermal conductivities of the air cavities were chosen according to the European standard EN ISO 10077-2. The U -factor of the stained-glass window alone and the sandstone wall were determined by calculation only, because they represent very simple cases and need not to be confirmed by hot-box measurements: for the existing stained-glass window, a U -factor of $U_{\text{stained glass}} = 5.78 W/m^2 K$ was calculated; the U -factor of the sandstone wall with a thickness of 0.5 m was $U_{\text{wall}} = 2.38 W/m^2 K$. The calculated and measured U -factors for the three different glazing systems range between 1.56 $W/m^2 K$ for the stained glass with unventilated double-glazed protective glazing and 2.1 $W/m^2 K$ for the double glazing alone. That the double-glazed unit is composed of three fields fitted in a metal frame explains its relatively high U -factor (which is usually found to be less than 1 $W/m^2 K$ for modern double glazing). The ventilation seems to have a negligible effect on the thermal conductivity of the window element: the U -factor for the unventilated system is 1.56 $W/m^2 K$, while that of the ventilated system is 1.68 $W/m^2 K$.

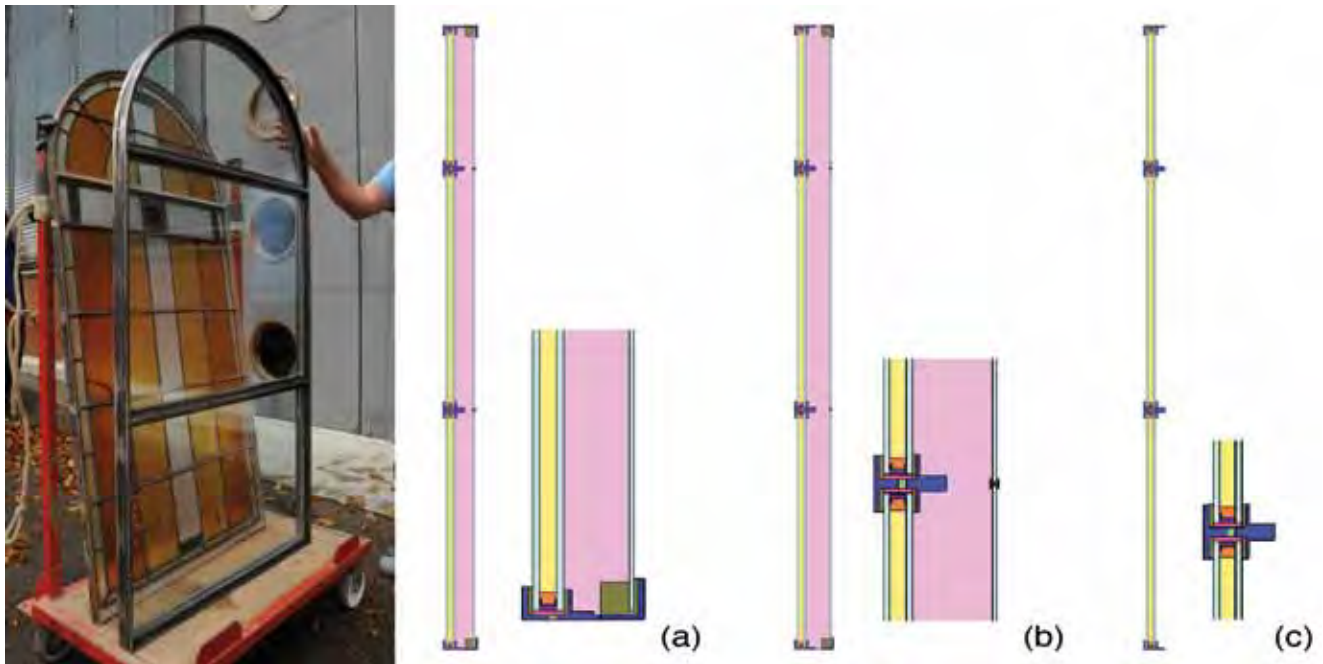


Fig. 5. Stained-glass window and double glazing used in the hot-box measurements (left) and model cross-section of the three window assemblies tested in the hot box (right): (a) unventilated assembly, (b) ventilated assembly, (c) double-glazed unit alone. Photo: authors.

In order to get an impression of the thermal efficiency of a stained-glass window protected with double glazing in an 'average' parish church, the following simple calculation was done using the calculated U -factors for the ventilated and the unventilated glazing systems as well as for the stained-glass window alone: $U_{\text{total}} = U_{\text{window}} \times A_{\text{window}}/A_{\text{total}} + U_{\text{wall}} \times A_{\text{wall}}/A_{\text{total}} + \text{PSI} \times P_{\text{wall}}$, where U is the thermal transmittance of the window or wall, respectively, A is their area, and P_{wall} is the circumference (perimeter) of the window. The total U -factor ranges between $2.6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (stained-glass window without protective glazing) and $2.4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (with double glazing). The results illustrate that, regardless of the type of glazing system present, the thermal loss through the windows, which in our example make up 5% of the total wall area, is very small compared with the loss through the walls. Figure 6 shows the calculated temperature distribution through a cross-section of each of the tested assemblies. The temperatures in the interspace are to be regarded as average temperatures, because the model does not include computational fluid dynamics to model real air flow. The calculated temperatures on the surfaces of the stained-glass window and the protective glazing will be relevant in our further investigations regarding condensation in the interspace between stained glass and protective glazing. In a further step to investigate condensation, water vapour transmission through

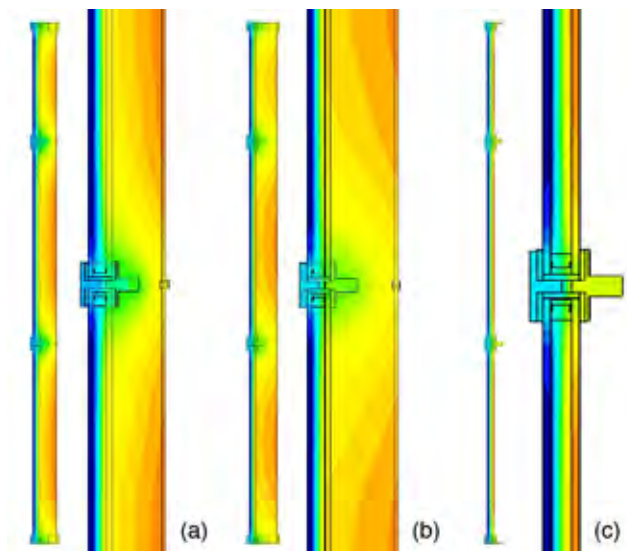


Fig. 6. Calculated temperature distribution in the three investigated assemblies for indoor temperature and external temperature of 17°C and 2°C , respectively. False colour images: the temperatures range between 0°C (dark blue) and 18°C (dark orange). Images: authors.

stained glass was measured. Two identical panes of stained glass measuring approximately 30 x 40 cm and dating from the mid-twentieth century were used in these tests: one test panel had naturally aged putty, while the other had freshly applied putty. The measurements were carried out according to the European Standard EN 12086. The test results show a clear reduction of water vapour transmission by a factor of approximately 1.6 for the stained glass with freshly applied putty. Additional measurements on older stained glass (nineteenth and early twentieth century) with naturally aged putty are planned. These supplementary measurements should provide an indication of the range of water vapour transmission values for stained glass in various states of preservation.

Summary and Conclusions

The calculations and measurements in this study represent preliminary results on the thermal efficiency of stained-glass windows protected by double-glazed units. The results have shown that the addition of protective glazing with a double-glazed unit improves the thermal conductivity of a stained-glass window by a factor of approximately 3 as compared to the stained-glass window alone. The experiments have also demonstrated that the *U*-factor for a double-glazed unit that is designed to protect stained glass and to fulfil aesthetic requirements does not achieve the thermal efficiency values of modern double glazing. Additional experiments on protective-glazing systems glazed with a single glass sheet will follow. They will include the thermal simulation of ventilated and unventilated systems with interspace widths varying between 3 and 12 cm. In a further step, the efficiency of the glazing systems investigated will also be compared under transient (i.e. varying) temperature conditions. These calculations will be verified by measurements in a weathering test chamber. The aim of the research is to compare the thermal performance of single-pane and double-glazed protective-glazing systems, while taking into consideration the specific characteristics of the different systems, for example the large insulating interspace of early protective-glazing systems and the divided metal frames in double-glazed protective glazing. The results of these experiments should enable us to discuss the pros and cons of the glazing systems studied, regarding both thermal loss and (more importantly in conservation terms) the frequency of condensation on the stained glass and in the interspace. They should also allow us to identify the systems that are most appropriate in terms of energy saving, stained-glass preserva-

tion, and aesthetic result. At this point in the study, the results already corroborate the hypothesis that, regardless of the glazing system chosen, the amount of heat loss through church windows is minimal compared to the loss through the walls. The effects of double-glazed units are negligible when considering that, in historic churches, the thermal loss through stained-glass windows without protective glazing is estimated to be less than 10% (Neilen, Schellen, and van Aarle 2003) and that the heat loss normally accounts for only between 10% and 20% of the total energy consumption (Baumann 2004).

With regard to appropriate solutions for the comprehensive and long-term protection of post-mediaeval stained-glass windows, our empirical survey has provided valuable information on the environmental impact (the risk of condensation on the stained glass in particular) of certain types of protective glazing. One major outcome of the study is the observation that the early protective-glazing systems dating from the first half of the twentieth century have created surprisingly good conditions for the conservation of at least some of the post-mediaeval stained glass in Switzerland. However, so far we only have a limited understanding of the efficiency of these systems, which is why they remain one of the focal points of the project. The aim of further research will be not only to establish whether there are additional arguments to preserve these early protective-glazing systems, but also to understand how these systems function and to apply the principles in the design of new protective-glazing systems. Notwithstanding the advantages of the systems outlined here (or any other protective-glazing system), alternative approaches to the conservation of stained glass should always be considered. Even from an energy-saving point of view, the conservation of stained glass without protective glazing must remain an option, at least for windows dating from the nineteenth and twentieth century.

Acknowledgements

The authors would like to thank the *Stiftung zur Förderung der Denkmalpflege* Zürich for supporting the project. The authors are also very grateful to Urs Rickenbach of *Mäder Glas*, Zurich, and the *Association professionnelle suisse du vitrail* for supplying materials and for sharing their expertise on various glazing systems. Hannelore Römich, Sebastian Strobl, and an anonymous reviewer are thanked for their helpful comments and advice on correct terminology. A special thank you also to Bill Gilonis for proofreading the text.

References

Aufderegg 2012

Kurt Aufderegg, oeku Kirche und Umwelt, Schwarztorstrasse 18, Postfach 7449, CH-3001 Bern, Switzerland, personal communication, 12 September 2012.

Bacher 1988

Ernst Bacher, "Einführung zum Thema: Aussenschutzverglasung – Erfahrungen und Probleme," *Newsletter du Comité Technique International du Corpus Vitrearum*, v. 41–42, 1988, pp. 2–3.

Baumann, Zehnder, and Rüegg 1998

Ernst Baumann, Konrad Zehnder, and Thomas Rüegg, "Beheizen von Kirchen. Kathedrale Chur – Komfortanspruch und Schäden," *Schweizer Ingenieur und Architekt*, v. 116, no. 18, April 1998, pp. 307–312.

Baumann 2004

Ernst Baumann, "Historische Fenster und Energiesparen," *NIKE Bulletin*, no. 5, 2004, pp. 15–19.

Berkenkopf 2005

Peter Berkenkopf, "Die Auswirkung von Schutzverglasungen auf Konservierungskonzepte für historische Glasmalereien. Fallbeispiele aus Köln, Trier, Esslingen und Ulm," in *Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes*, ed. Matthias Exner and Dörthe Jakobs, Munich/Berlin: ICOMOS Deutschland und Kunstverlag, 2005, pp. 191–198.

Bernardi and others 2012

Adriana Bernardi and others, "Conservation of Stained Glass Windows With Protective Glazing: Main Results From the European VIDRIO Research Programme," *Journal of Cultural Heritage*, in press, available online: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207412001896>.

Bickel and others 2009

Anne Bickel and others, *Energie sparen und Klima schützen. Ein Leitfaden für Kirchgemeinden und Pfarreien*, ed. Kurt Aufderegg, Bern: oeku Kirche und Umwelt, 2009.

Camuffo and others 2010

Dario Camuffo and others, "An Advanced Church Heating System Favourable to Artworks: A Contribution to European Standardisation," *Journal of Cultural Heritage*, v. 11, no. 2, 2010, pp. 205–219.

Dahm 2010

Christian Dahm, *Energiesparen in Kirchgemeinden. Ein praktischer Leitfaden*, Munich: Oekom Verlag, 2010.

Furrer and others 2009

Bernhard Furrer and others, *Energie und Baudenkmal. Empfehlungen für die energetische Verbesserung von Baudenkmalern*, Bern: Bundesamt für Energie BFE und Eidgenössische Kommission für Denkmalpflege, 2009, pp. 1–5.

Giezendanner 2009

Emil Giezendanner, "Heizschäden in Kirchen," *TEC21*, v. 135, nos. 51–52, December 2009, pp. 24–27.

Hör and Seele 2005

Martha Hör and Jörg Seele, "Bauphysikalische Untersuchungen zur Gefährdung des Glasmalereibestandes in der Nürnberger Sebalduskirche. Möglichkeiten und Grenzen der Wirksamkeit von Aussenschutzverglasungen," in *Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes*, ed. Matthias Exner and Dörthe Jakobs, Munich/Berlin: ICOMOS Deutschland und Kunstverlag, 2005, pp. 199–213.

Limpens-Neilen 2006

Dionne Limpens-Neilen, *Bech Heating in Monumental Churches*, Eindhoven: Technical University, 2006.

Neilen, Schellen, and van Aarle 2003

Dionne Neilen, Henk L. Schellen, and M. A. P. van Aarle, "Characterizing and Comparing Monumental Churches and Their Heating Performance," in *Research in Building Physics*, ed. Jan Carmeliet, Hugo Hens, and Gerrit Vermeir, Lisse: Swets & Zeitlinger, 2003, pp. 793–802.

Oidtmann 1994

Stefan Oidtmann, *Die Schutzverglasung. Eine wirksame Schutzmassnahme gegen die Korrosion an wertvollen Glasmalereien*. Dissertation, Eindhoven: Technical University, 1994.

Oidtmann, Leissner, and Römich 2000

Stefan Oidtmann, Johanna Leissner, and Hannelore Römich, "Schutzverglasungen," in *Restaurierung und Konservierung historischer Glasmalereien*, ed. Arnold Wolff, Mainz: Philipp von Zabern, 2000, pp. 167–209.

Römich 2004

Hannelore Römich, "Evaluation of Protective-Glazing Systems," in *e-Preservation Science*, v. 1, 2004, pp. 1–8.

Schellen 2004

Henk L. Schellen, "Tools to Evaluate and/or Design Heating Systems for (Monumental) Churches," in *Built Environments and Environmental Buildings: 21st PLEA International Conference on Passive and Low-energy Architecture*, ed. M. H. De Wit, Eindhoven: Technical University, 2004, pp. 789–794.

Torge und Müller 2011

Manfred Torge and Wolfgang Müller, *Staubmessungen im Spalt zwischen Original und Schutzverglasung*, Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 2011.

Torge, Bückler, and Feldmann 2013

Manfred Torge, Michael Bückler, Ines Feldmann, "The Effect of Climate and Particle Deposition on the Preservation of Historic Stained-glass Windows – In Situ Measurements and Laboratory Experiments," this volume.

Trümpler 1988

Stefan Trümpler, "Experience With Protective Glazing in Switzerland," *Newsletter du Comité Technique International du Corpus Vitrearum*, v. 41–42, 1988, pp. 19–22.

Authors:

Sophie Wolf

Vitrocentre Romont, Au Château, CH-1680 Romont,
Switzerland,
sophie.wolf@vitrocentre.ch

Stefan Trümpler,

Vitrocentre Romont, Au Château, CH-1680 Romont,
Switzerland,

Karim Ghazi Wakili and Bruno Binder

Empa Dübendorf, Laboratory for Building Science and
Technology, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf,
Switzerland

Ernst Baumann

Baumann Akustik und Bauphysik AG, Neudietfurt 10,
Untere Schieb, CH-9615 Dietfurt, Switzerland

**RECENT ADVANCES IN GLASS,
STAINED-GLASS, AND
CERAMICS CONSERVATION 2013**

**ICOM-CC Glass and Ceramics
Working Group Interim Meeting**

and

**Forum of the International Scientific Committee
for the Conservation of Stained Glass
(Corpus Vitrearum-ICOMOS)**

**EDITED BY
HANNELORE ROEMICH AND
KATE VAN LOOKEREN CAMPAGNE**

© ICOM COMMITTEE FOR CONSERVATION

ISBN number: 978-90-8932-113-8

Publisher: SPA Uitgevers
Assendorperstraat 174-4
8012 CE Zwolle, the Netherlands
www. spa-uitgevers.nl

Layout: Hidde Heikamp, SPA publishers
Graphic design: Erica Dooijes-Hoogwijk
Proofreading: Gary Anderton (Anderton Editing),
Hoorn, the Netherlands

Editors: Hannelore Roemich and
Kate van Lookeren Campagne

Scientific Committee: Joost Caen, Antwerp, Belgium
Renske Dooijes, Leiden, the Netherlands
Gerhard Eggert, Stuttgart, Germany
N. Astrid van Giffen, Corning, NY, USA
Ineke Joosten, Amsterdam, the Netherlands
Kate van Lookeren Campagne, Amsterdam, the Netherlands
Luc Megens, Amsterdam, the Netherlands
Isabelle Pallot-Frossard, Champs-sur-Marne, France
Lisa Pilosi, New York, NY, USA
Hannelore Roemich, New York, NY, USA
Sebastian Strobl, Erfurt, Germany
Norman H. Tennent, Amsterdam, the Netherlands

Conference sponsors: Rijksmuseum, Amsterdam (RMA)
University of Amsterdam (UvA)
Cultural Heritage Agency of the Netherlands, Amsterdam (RCE)
National Museum of Antiquities, Leiden (RMO)

Cover photographs: Stained-glass panel: 'The Miracle of Amsterdam' (L. van den Essen, 1934),
Sint Franciscus Church, Bolsward, the Netherlands (Photo © Taco Hermans)
Tulip vase: Anon. 1690–1720 (in the process of conservation),
Rijksmuseum, Amsterdam, the Netherlands (Photo © Rijksmuseum)

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, whether electronic or mechanical, including photocopying, recording, or otherwise, without the prior permission in writing of the publisher.

Anhang 5

Übersicht über Mittelverwendung im Projekt

„Schutzverglasungen historischer Glasmalereien und Kunstverglasungen im Spannungsfeld von Denkmalpflege und energetischer Verbesserung von Baudenkmalern“

Projektbeitrag Stiftung zur Förderung der Denkmalpflege **CHF 185'000.00**

Mittelverwendung

Personal wissenschaftliche Mitarbeiter gemäss Projektbudget	130'000.00
Aufwand Projektpartner EMPA, pauschal	27'000.00
Aufwand Projektpartner Ernst Baumann, pauschal	21'600.00
Materialkosten für Laborversuche, Glas Mäder Zürich	<u>8440.20</u>
Total	CHF 187'040.20

Gemäss der Budgetierung im Projektantrag gehen Kosten für Overhead, Projektleitung, Koordination und Infrastruktur zulasten des Vitrocentre. Darüber hinaus übernimmt dieses die Mehrkosten von CHF 2'040.20 sowie die Spesen.

Anhang 6

Projektresümee für die Webseite der Stiftung zur Förderung der Denkmalpflege

„Schutzverglasungen historischer Glasmalereien und Kunstverglasungen im Spannungsfeld von Denkmalpflege und energetischer Verbesserung von Baudenkmalern“

Vitrocentre Romont

in Zusammenarbeit mit der Abteilung Bautechnologien der Empa Dübendorf und Baumann Akustik und Bauphysik AG, Dietfurt

Hauptanliegen des von der Stiftung zur Förderung der Denkmalpflege unterstützen Projekts war es, einerseits die weit verbreitete Annahme in Frage zu stellen, dass der Einbau von Schutzverglasungen mit Isolierverglasung eine effiziente Energiesparmassnahme darstellt und andererseits, deren “automatischen” Einbau auch aus konservatorisch-denkmalpflegerischer Sicht zu hinterfragen. Ein weiteres Ziel war es, die Wirksamkeit einfacher Aussenschutzverglasungen zu untersuchen und deren Bedeutung bei der präventiven Konservierung vor allem nachmittelalterlicher Glasmalerei herauszustellen.

Die Untersuchungen führten zu wichtigen neuen Erkenntnissen hinsichtlich Energiemanagement in Kirchen und Transmissionsverlusten über historische Fenster mit Aussenschutzverglasung: Die Messungen im Labor und am Objekt haben gezeigt, dass der Wärmeverlustanteil über die Fenster bei rationellem Heizbetrieb kaum ins Gewicht fällt und der Einbau einer Isolier-Schutzverglasung erstens gegenüber einer einfachen Schutzverglasung nicht wesentliche wärmetechnische Verbesserungen erbringt und zweitens energetisch weit weniger effizient als andere Energiesparmassnahmen ist. Weiter bestätigen die Projektergebnisse unsere bisherige Hypothese, dass die frühen einfachen Aussenschutzverglasungen sowohl aus denkmalpflegerischer als auch wirtschaftlicher Sicht Vorteile gegenüber den moderneren Systemen besitzen und nachhaltiger sind was Materialien und Lebensdauer angeht. Die Messungen im Labor und am Objekt beweisen zudem, dass die einfachen Aussenschutzverglasungen günstige klimatische Bedingungen für Kunstverglasungen schaffen und insbesondere das Kondensationsrisiko auf der Innenseite der Glasmalereien deutlich vermindern. Sie untermauern somit unsere Beobachtung, dass diese frühen Systeme als präventive konservatorische Massnahme für nachmittelalterliche Glasmalereien, bei denen die Hauptgefährdung oft in fragilen Bemalungsschichten auf der Innenseite besteht, grundsätzlich geeignet sind.

Auf Grundlage bisheriger Projektergebnisse wird derzeit eine Informationsbroschüre erarbeitet, die Kirchengemeinden, Architekten und Denkmalpfleger bei der ganzheitlichen Beurteilung verschiedener Energiesparoptionen unterstützen und ihnen helfen soll, angemessene und nachhaltige Lösungen zum Schutz der historischen Fenster und Glasmalereien zu finden. Im Sinne einer Empfehlung für die Praxis sollen darin Potentiale wie auch Risiken einer energetischen Verbesserung von Kirchenfenstern aufgezeigt und diese anderen Optionen der energetischen Verbesserung am Gebäude gegenübergestellt werden.